

T-401

0555

PES

DIVISION DE ESTUDIOS SUPERIORES

01149

FACULTAD DE INGENIERIA

111

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

608

**ANALISIS SISMICO DE TERRAPLENES CONSIDERANDO
COMPORTAMIENTO ELASTOPLASTICO DEL MATERIAL**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERIA

PRESENTA

VICTOR PORRAS SILVA

294522

MEXICO, D. F. MARZO 1974

**TESIS CON
FALLA 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.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

RECONOCIMIENTO

La dirección del presente trabajo estuvo a cargo del Dr. Luis Esteva Maraboto.

Se agradece el estímulo brindado por el Dr. Javier Salazar Resines y la participación del M. en I. Ramón Cervantes Beltrán, así como las sugerencias del Dr. Gustavo Ayala M.

RESUMEN

Se presenta un procedimiento para el análisis sísmico de terraplenes considerando comportamiento elastoplástico del material, así como no linealidades en las relaciones cinemáticas. Se hace una formulación incremental de las ecuaciones de equilibrio a través del principio del trabajo virtual y se emplea el método del elemento finito para transformar la forma integral de las ecuaciones en un sistema diferencial de segundo orden. El método de integración utilizado es el θ de Wilson. El procedimiento se aplica a una presa de tierra y enrocamiento y la respuesta se compara con la obtenida con un análisis lineal, haciendo notar las diferencias entre los dos tipos de soluciones. Se incluye el listado del programa de computadora en lenguaje FORTRAN, que se desarrolla para dicho procedimiento.

ABSTRACT

A procedure for the seismic analysis of slopes considering geometric nonlinearities and elastoplastic behaviour of the material is reported. The differential equations of motion are formulated in incremental form using the Principle of Virtual Work. The Finite Element Method is used to transform the equations from the integral form into a second order differential system. The procedure is applied to the analysis of an earth dam subjected to earthquake-like excitation. Numerical results are compared with those of a linear analysis. A Fortran listing of the computer program is included.

I N D I C E

| | Página |
|---|--------|
| 1. INTRODUCCION | 1 |
| 2. CONCEPTOS BASICOS DE LA MECANICA DEL MEDIO CONTINUO | 4 |
| 3. METODO DEL ELEMENTO FINITO | 12 |
| 3.1 <u>Formulación del modelo de desplazamientos para el procedimiento incremental no lineal.</u> | 12 |
| 3.2 <u>Elemento finito para el estado plano de deformación</u> | 17 |
| 3.2.1 Función de desplazamientos | 18 |
| 3.2.2 Matriz de rigidez lineal | 20 |
| 3.2.3 Matriz de rigidez geométrica | 23 |
| 3.2.4 Fuerzas internas | 25 |
| 3.2.5 Vector de fuerzas externas equivalentes | 25 |
| 3.2.6 Vector de fuerzas de cuerpo | 25 |
| 3.2.7 Matriz de masas del elemento triangular | 26 |
| 3.2.7.1 Matriz de masas concentradas | 28 |
| 3.2.8 Matriz de amortiguamientos | 29 |
| 4. RESPUESTA SISMICA DE TERRAPLENES AL CONSIDERAR COMPOR- TAMIENTO ELASTOPLASTICO DEL MATERIAL | 30 |
| 4.1 <u>Método de análisis</u> | 30 |
| 4.2 <u>Aplicación del método a la cortina de una presa</u> | 33 |
| 4.2.1 Geometría, materiales y sollicitaciones | 33 |
| 4.3 <u>Resultados obtenidos</u> | 33 |

| | Página |
|---|--------|
| 4.4 <u>Conclusiones y recomendaciones</u> | |
| 5. REFERENCIAS | 38 |
| 6. RECONOCIMIENTO | |
| TABLAS | 41 |
| FIGURAS | 46 |
| APENDICES | |
| A OBTENCION DE LA MATRIZ DE ESFUERZO-DEFORMACION PARA UN MATERIAL ELASTOPLASTICO EN EL QUE ES VALIDO EL CRITERIO DE VON-MISES SIN ENDURECI- MIENTO | 83 |
| B METODO θ DE WILSON PARA INTEGRAR LAS ECUACIO- NES DE EQUILIBRIO DINAMICO DE SISTEMAS DISCRE- TOS | 88 |
| C PROGRAMAS DE COMPUTADORA PARA EL ANALISIS SIS- MICO DE TERRAPLENES | 97 |
| C.1 <u>Organización de programas.</u> | 97 |
| C.2 <u>Programa para calcular las frecuencias pe- riodos y configuraciones naturales de vibra- ción.</u> | 98 |
| C.3 <u>Programa para el análisis incremental está- tico, simulando el proceso de construcción.</u> | 101 |
| C.4 <u>Programa de computadora para organización de datos.</u> | 105 |
| C.5 <u>Programa para procesar los datos de los ace- lerogramas.</u> | 109 |

| | Página |
|---|--------|
| C.6 <u>Programas para el cálculo de fuerzas hidro-</u> <u>dinámicas.</u> | 110 |
| C.7 <u>Programa para el cálculo de la respuesta sís-</u> <u>mica.</u> | 112 |
| C.8 <u>Listado de los programas de computadora.</u> | 114 |

1. INTRODUCCION.

El planteamiento usual del análisis sísmico de terraplenes que se ha realizado en diversos países, se basa en modelos simplificados donde únicamente se consideran desplazamientos pequeños, deformaciones infinitesimales y comportamiento lineal del material (refs 9 y 11).

A fin de reducir las simplificaciones anteriores es necesario incorporar en el análisis algunos efectos de no linealidad en el material, así como las formulaciones necesarias para considerar tanto la influencia de los desplazamientos grandes en las propiedades dinámicas de la estructura, como los términos no lineales del tensor de deformaciones.

Es propósito de este trabajo desarrollar los procedimientos que permitan cuantificar la respuesta sísmica de terraplenes en los que se incluyan las no linealidades mencionadas.

Con objeto de ubicar el problema que aquí se resuelve y de criticar las hipótesis que se introducen, se ha organizado este trabajo como se describe a continuación.

En el Cap 2 se hace un planteamiento general del problema a partir de las leyes básicas del movimiento de medios continuos y de una teoría constitutiva. Se describen modelos matemáticos para sólidos elásticos lineales y elastoplásticos, así como la formulación incremental de medios continuos considerando las no linealidades.

El Cap 4 contiene el método de análisis para terraplenes considerando desplazamientos grandes, deformaciones finitas y comportamiento inelástico del material.

Se utiliza el método del elemento finito descrito en el Cap 3, y las ecuaciones de equilibrio, obtenidas de la formulación incremental mediante el principio del trabajo virtual, se resuelven utilizando el método θ de Wilson descrito en el Apéndice B.

Se establecen las siguientes hipótesis en cuanto a geometría y materiales del terraplén y de las sollicitaciones que lo afectan:

a) Geometría

Se consideran válidas las hipótesis de estado plano de deformaciones.

b) Material

El comportamiento del material es elastoplástico y se considera válido el criterio de Von-Mises, sin endurecimiento con una ley de flujo de Coulomb (Apéndice A).

c) Sollicitaciones

Debido a que la respuesta depende de la historia de cargas, se toma en cuenta el procedimiento de construcción descrito en la ref (10), y para el caso de una presa se considera el efecto de llenado del embalse, cambiando las propiedades del enrocamiento que dependen de la presión confinante y como consecuencia del nivel del agua. Respecto a la excitación sísmica, se utilizan acelerogramas simulados (ref 14) y las presiones hidrodinámicas, cuando se requieren, se calculan empleando los estudios realizados por A. Flores V. (ref 15) como se describe en la ref (11).

El método se aplica a una presa de tierra y enrocamiento

según se describe en el Cap. 5. Se consideró la sección transversal de la cortina constituida por un sistema de elementos finitos triangulares y se obtuvo la respuesta haciendo notar la influencia de distintos parámetros como son no linealidad geométrica, no linealidad del material, efecto del componente vertical del temblor, etc.

El programa de computadora se describe en el Apéndice C y se adjunta un listado en lenguaje Fortran.

En estudios futuros se pueden incorporar al procedimiento de análisis descrito otros tipos de comportamiento del material, efectos de interacción suelo - estructura, flujo de agua, efecto de consolidación en las arcillas, problema tridimensional, etc.

Algunos de estos temas se encuentran actualmente en estudio en la División de Estudios Superiores y en el Instituto de Ingeniería.

2. CONCEPTOS BASICOS DE LA MECANICA DEL MEDIO CONTINUO

En el comportamiento de un terraplén intervienen las características geométricas, distribución y tipos de materiales que lo constituyen, así como las particularidades de las sollicitaciones y los métodos de solución asociados a los modelos resultantes.

Uno de los modelos más aceptados es el que considera a la estructura como un medio continuo, en el que es válido el axioma de continuidad. La teoría de la mecánica del medio continuo la forman las leyes básicas del movimiento y una teoría constitutiva.

Para la formulación matemática se utilizará los sistemas de referencia Lagrangiano y Euleriano y se hará uso de la notación tensorial índice.

Las ecuaciones de las leyes básicas del movimiento de un medio continuo referidas a un sistema euleriano cartesiano (fig 2.1) son:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\rho v_k)_{,k} = 0 \quad (2.1)$$

$$t_{1k,1} + \rho(f_k - \dot{v}_k) = 0 \quad (2.2)$$

$$t_{k1} = t_{1k} \quad (2.3)$$

$$\dot{\rho \epsilon} = t_{k1} v_{1,k} + q_{k,k} + \rho h \quad (2.4)$$

$$\rho \dot{\gamma} \equiv \rho \left(\dot{\eta} - \frac{\dot{\epsilon}}{\theta} \right) + \frac{1}{\theta} t_{k1} v_{1,k} + \frac{1}{\theta^2} q_k \theta_{,k} \geq 0 \quad (2.5)$$

donde

ρ densidad de masa

v_k componentes de la velocidad

t_{1k} tensor de esfuerzos de Cauchy

f_k componentes de las fuerzas de cuerpo por unidad de masa

q_k componentes del vector de calor por unidad de área

ϵ densidad de energía interna

h calor por unidad de volumen

η densidad de entropía

θ temperatura

$$v_{1,k} = \frac{\partial v_1}{\partial x_k}$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \epsilon}{\partial x_1} v_1$$

Las ecs 2.1 a 2.4 representan la conservación de la masa, balance de la cantidad de movimiento y del momento de la cantidad de movimiento, conservación de energía y principio de entropía. A las ecs 2.2 y 2.3 también se les conoce como primera y segunda ley de Cauchy, y a la ec 2.5 como desigualdad de Clausius-Duhem.

Como la ec 2.2 está en términos de variables medidas en la configuración deformada del medio continuo, resulta que la superficie frontera no se conoce, mientras que en la configuración no deformada está prescrita, por lo que conviene formular las ecuaciones anteriores en términos de coordenadas materiales, quedando las ecs 2.1 a 2.3 expresadas respectivamente por

$$\rho_0 = \rho j \quad (2.6)$$

$$(T_{KL} x_{k,L})_{,K} + \rho_0 (f_k - \dot{v}_k) = 0 \quad (2.7)$$

$$T_{KL} = T_{LK} \quad (2.8)$$

siendo ρ_0 la densidad de masa en el sistema material, j el jacobiano de la transformación y T_{KL} es el tensor de esfuerzos de Piola, relacionado con el tensor de esfuerzos de Cauchy mediante

$$T_{KL} = j x_{K,k} x_{L,l} t_{kl} \quad (2.9)$$

Las ecuaciones básicas 2.1 a 2.5 o 2.6 a 2.8 son válidas para cualquier medio continuo sin importar la constitución interna y forman un sistema de ocho ecuaciones independientes con diecinueve incógnitas, por lo que el sistema es indeterminado. Para

poder explicar el movimiento de un medio continuo en particular, se necesitan once ecuaciones adicionales que se obtienen al considerar el tipo de material. Experimentalmente, se observa que dos medios continuos con la misma geometría y carga pero material distinto, responden en forma diferente, lo cual se debe fundamentalmente a la constitución interna del material. El análisis de las observaciones anteriores conduce a una teoría constitutiva, y para un material termomecánico las variables constitutivas dependientes se pueden representar en la siguiente forma

$$\begin{aligned} \underline{t}(\underline{X}, t) &= \mathcal{F}[\underline{x}, \theta, \underline{X}, t] \\ \underline{q}(\underline{X}, t) &= \mathcal{G}[\underline{x}, \theta, \underline{X}, t] \\ \varepsilon(\underline{X}, t) &= \mathcal{E}[\underline{x}, \theta, \underline{X}, t] \\ \eta(\underline{X}, t) &= \mathcal{N}[\underline{x}, \theta, \underline{X}, t] \end{aligned} \tag{2.10}$$

El estudio de \mathcal{F} , \mathcal{G} , \mathcal{E} y \mathcal{N} forma la teoría constitutiva de los medios continuos, donde se especifica que la complejidad de estas funcionales dependerá del número de fenómenos físicos que se deseen incluir en un material dado.

Para el caso particular de un medio continuo elástico lineal con deformaciones infinitesimales y libre de esfuerzos iniciales, las ecuaciones constitutivas están dadas por el tensor de esfuerzos expresado como

$$t_{kl} = \sigma_{klmn} \tilde{e}_{mn} \tag{2.11}$$

$$\tilde{e}_{mn} = \frac{1}{2}(u_{m,n} + u_{n,m}) \quad (2.12)$$

Siendo \tilde{e}_{mn} el tensor de deformaciones infinitesimales en el sistema euleriano, \underline{u} , el vector de desplazamientos (fig 2.2) y σ_{klmn} un tensor de cuarto orden definido con 81 coeficientes, de los cuales 21 son independientes debido a la propiedad de simetría del tensor de deformaciones. El número de estos coeficientes se puede reducir si se imponen restricciones de simetría al material. Así, para el caso de isotropía las constantes se reducen a dos y la ec 2.11 toma la forma (ref 3)

$$t_{kl} = \lambda_e \tilde{e}_{mn} \delta_{kl} + 2\mu_e \tilde{e}_{kl} \quad (2.13)$$

las constantes λ_e y μ_e se conocen con el nombre de constantes de Lamé.

Utilizando la ecuación constitutiva 2.13 en la ecuación de movimiento 2.2 y a su vez empleando la ec 2.12, se tiene el modelo matemático de un sólido elástico lineal e isótropo expresado por

$$(\lambda_e + \mu_e) u_{l,1k} + \mu_e u_{k,1l} + \rho (f_k - \ddot{u}_k) = 0 \quad (2.14)$$

bajo condiciones de frontera e iniciales.

Las condiciones de frontera se expresan como

$$\begin{aligned} t_{kl} n_l &= \bar{t}_k && \text{en } \mathcal{J}_t \\ u_k &= \bar{u}_k && \text{en } \mathcal{J}_u \end{aligned} \quad (2.15)$$

n_1 vector unitario normal a la superficie donde actúa \bar{t}_k que son las fuerzas de superficie prescritas en la parte \mathcal{J}_t de la frontera del cuerpo. \bar{u}_k es el campo de desplazamientos prescrito en la parte \mathcal{J}_u de la frontera. Las fronteras \mathcal{J}_u y \mathcal{J}_t deben ser tales que $\mathcal{J} = \mathcal{J}_u + \mathcal{J}_t$.

Las condiciones iniciales se expresan como

$$u_k(\underline{x}, 0) = u_k^0(\underline{x}) \quad \text{en } \mathcal{V}$$

$$\dot{u}_k(\underline{x}, 0) = v_k^0(\underline{x}) \quad \text{en } \mathcal{V} \quad (2.16)$$

La ec 2.14 se conoce como la ecuación de Navier y su solución, sujeta a las condiciones de frontera e iniciales del tipo 2.15 y 2.16, representa la base de la teoría infinitesimal de los sólidos elásticos lineales homogéneos e isótropos.

Para un material elastoplástico las ecuaciones constitutivas se postulan mediante una función de fluencia, una ley de flujo y otra de endurecimiento y un criterio de carga y descarga dentro de la teoría constitutiva. Así, en el caso de un sólido de comportamiento elastoplástico y para el que es válido el criterio de Von-Mises sin endurecimiento, se tiene (ref 10).

Función de fluencia

$$f(T_{KL}) = 0 \quad (2.17)$$

Ley de flujo

$$\delta E_{KL}^P = \Lambda \frac{\partial f}{\partial T_{KL}} \quad (2.18)$$

Λ es un escalar no negativo y E_{KL}^P es el tensor de deformaciones plásticas en el sistema material.

Criterio de carga y descarga

$$\frac{\partial f}{\partial T_{KL}} \delta T_{KL} \begin{matrix} < \\ = \\ > \end{matrix} 0 \Rightarrow \begin{matrix} \text{descarga} \\ \text{carga nula} \\ \text{carga} \end{matrix} \quad (2.19)$$

En este caso el modelo matemático no resulta sencillo, y a medida que se vayan reduciendo las restricciones impuestas a los modelos es de esperarse que la representación matemática resulte más compleja dificultando su representación explícita. Si además de la no linealidad del material se incluyen en el modelo matemático efectos de desplazamientos grandes y deformaciones grandes, se hace necesaria una formulación apropiada de las ecuaciones de movimiento.

La formulación incremental de las ecuaciones de equilibrio de los medios continuos es una de las formas empleadas en la teoría no lineal de los mismos y utiliza el principio del trabajo virtual, cuya expresión en forma incremental referida a un sistema Lagrangiano resulta ser

$$\int_{\mathcal{V}} T_K \delta \underline{U} dA + \int_{\mathcal{V}} \rho F_K \delta \underline{U} dV - \int_{\mathcal{V}} t_{kl} \delta \tilde{e}_{kl} dV = \int_{\mathcal{V}} (t_{kl} \delta \eta_{KL} + S_{KL} \delta E_{KL}) dV + \int_{\mathcal{V}} \rho \ddot{\underline{U}} \delta \underline{U} dV \quad (2.20)$$

La ecuación anterior cumple con el equilibrio en cada incremento y está dada en términos de las variables de la configuración no deformada. El primer miembro de la ec 2.20 representa el trabajo virtual desarrollado por las fuerzas en equilibrio, a través de un desplazamiento virtual, en la configuración deformada. La primera integral del segundo miembro de

la ec 2.20 es la energía de deformación incremental virtual, mientras la segunda integral corresponde a la energía cinética virtual del medio continuo. Esta ecuación es válida para cualquier medio continuo, ya que no está restringida a una ley constitutiva.

Debido a la complejidad del modelo presentado, el método de solución asociado será del tipo numérico. Uno de los que más se emplean actualmente es el método del elemento finito que se describe a continuación.

3. METODO DEL ELEMENTO FINITO

En el capítulo anterior se planteó, mediante una formulación incremental el modelo matemático de un medio continuo con desplazamientos grandes, deformaciones finitas y comportamiento no lineal del material. Las ecuaciones de equilibrio que resultan se resolverán utilizando el método del elemento finito.

3.1 Formulación del método del elemento finito en términos de los desplazamientos para el caso de un medio continuo de comportamiento no lineal.

Consiste en subdividir el medio continuo en un número finito de subdominios disjuntos denominados elementos finitos (fig 3.1).

En cada elemento finito se selecciona un conjunto de puntos llamados nudos. Se propone una función de desplazamientos que representa la solución del problema y se expresa en términos de los valores que adquiere en los puntos nodales mediante funciones de interpolación. La solución propuesta deberá satisfacer las condiciones de continuidad en las fronteras del elemento. Se establece el equilibrio de cada elemento mediante el principio del trabajo virtual dado por la ec 2.20 y las fronteras corresponderán a las de cada elemento respectivamente. El equilibrio de la estructura completa se garantiza al establecer el equilibrio de cada elemento.

Si los desplazamientos nodales se representan por el vector $R_L(X_M, t)$ y las funciones de interpolación por $N_{KL}(X_M)$, el vector de desplazamientos supuesto $U_K(X_M, t)$ será de la forma

$$U_K(X_M, t) = N_{KL}(X_M, t) R_L(X_M, t) \quad (3.1)$$

De manera similar se expresan las fuerzas de cuerpo y su superficie mediante vectores valuados en los nudos con sus correspondientes funciones de interpolación.

$$T_{(N)K}(X_M, t) = t_{N_{KL}}(X_M, t) T_L(X_M, t) \quad (3.2)$$

$$F_K(X_M, t) = f_{N_{KL}}(X_M, t) V_L(X_M, t) \quad (3.3)$$

Tomando en cuenta el tensor de deformaciones finitas de Lagrange dado por

$$E_{KL} = \frac{1}{2}(U_{K,L} + U_{L,K} + M^N U_{M,K} U_{N,L}) \quad (3.4)$$

y expresando la relación entre el tensor de esfuerzos de Piola T_{KL} y el tensor de deformaciones E_{KL} como

$$T_{KL} = D_{KLMN} E_{MN} \quad (3.5)$$

la expresión del trabajo virtual 2.20 usando las relaciones 3.1 a 3.5 queda

$$M_{IQ} \ddot{\Delta R}_Q + (K_{IQ}^{(0)} + K_{IQ}^{(1)}) \Delta R_N + K_{IQS}^{(2)} \Delta R_Q \Delta R_S + K_{IQSU}^{(3)} \Delta R_Q \Delta R_S \Delta R_U = P_I \quad (3.6)$$

donde

$$P_I = \int_{\mathcal{V}} t_{NIM} N_{IQ} T_K dA + \int_{\mathcal{V}} \rho^f N_{IM} N_{IQ} V_K dV - \int_{\mathcal{V}} \frac{1}{2} t_{kl} (N_{KI,L} + N_{LI,K}) dV \quad (3.7)$$

$$K_{IQ}^{(0)} = \frac{1}{4} \int_{\mathcal{V}} D_{KLRT} (N_{KI,L} + N_{LI,K}) (N_{RQ,T} + N_{TQ,R}) dV \quad (3.8)$$

$$K_{IQ}^{(1)} = \frac{1}{4} \int_{\mathcal{V}} t_{kl} (N_{MI,K} + N_{MQ,L} + N_{MQ,K} + N_{MI,L}) dV \quad (3.9)$$

$$K_{IQS}^{(2)} = \frac{1}{4} \int_{\mathcal{V}} D_{KLRT} \left[(N_{KI,L} + N_{LI,K}) N_{MS,R} N_{MQ,T} + (N_{MI,K} + N_{MQ,L} + N_{MI,L} + N_{MQ,K}) \right] \quad (3.10)$$

$$K_{IQSU}^{(3)} = \frac{1}{4} \int_{\mathcal{V}} D_{KLRT} N_{MS,R} N_{MU,T} (N_{MI,K} + N_{MQ,J} + N_{MK,J} + N_{MQ,I}) dV \quad (3.11)$$

$$M_{IQ} = \int_{\mathcal{V}} \rho N_{KM} N_{KI} dV \quad (3.12)$$

Obsérvese que la ecuación de equilibrio resultante 3.6 es una ecuación diferencial ordinaria no lineal.

La forma más común de representar las ecs 2.20 y 3.1 a 3.12 es en notación matricial de la siguiente manera:

$$\int_{\mathcal{V}} \delta U^T T dA + \int_{\mathcal{V}} \delta U^T \rho_0 F dV - \int_{\mathcal{V}} \delta \underline{e}^T \sigma dV = \int_{\mathcal{V}} (\sigma^T \delta \underline{\eta} + \underline{\tau}^T \delta \underline{E}) dV + \int_{\mathcal{V}} \delta U^T \rho \ddot{U} dV \quad (3.13)$$

La forma lineal de 3.13

$$\int_{\mathcal{V}} \delta U^T T dA + \int_{\mathcal{V}} \delta U^T F dV - \int_{\mathcal{V}} \delta \underline{e}^T \sigma dV = \int_{\mathcal{V}} (\sigma^T \delta \underline{\eta} + \underline{\tau}^T \delta \underline{e}) dV + \int_{\mathcal{V}} \delta U^T \rho \ddot{U} dV \quad (3.14)$$

donde

$$T = \underline{t}_N \underline{T}$$

$$\sigma = \underline{\sigma}_N \underline{\sigma}$$

(3.15)

$$\rho_0 F = \rho_0^f \underline{N} \underline{V}$$

$$U = \underline{N} \underline{R}$$

La relación entre $\underline{\tau}$ y \underline{e}

$$\underline{\tau} = \underline{C} \underline{e} \quad (3.16)$$

y la parte lineal de 3.4

$$\underline{e} = \underline{B} \underline{R} \quad (3.17)$$

siendo \underline{e} el vector de componentes de deformación en términos de desplazamientos nodales obtenido por diferenciación de 3.15.

De manera similar a 3.16 se puede representar la parte no lineal del tensor de deformación \underline{E} (ref 5)

$$\underline{\eta} = \underline{R}^T \underline{G} \underline{G}^T \underline{R} \quad (3.18)$$

donde \underline{G} se define en el inciso 3.3.

Finalmente, la forma lineal 3.6 se transforma en forma matricial a

$$\underline{M}^{(e)} \underline{R} + \underline{K}^{(e)} \Delta \underline{R} = \underline{P}^{(e)} \quad (3.19)$$

donde

$$\underline{M}^{(e)} = \int_{V_e} \rho \underline{N}^T \underline{N} \, dV \quad (3.20)$$

$$\underline{K}_t^{(e)} = \underline{K}_1^{(e)} + \underline{K}_G^{(e)} \quad (3.21)$$

$$\underline{K}_1^{(e)} = \int_{V_e} \underline{B}^T \underline{D} \underline{B} \, dV \quad (3.22)$$

$$\underline{K}_G^{(e)} = \int_{V_e} \underline{G} \underline{E} \underline{G}^T \, dV \quad (3.23)$$

$$\underline{P}^{(e)} = \underline{P}_S^{(e)} + \underline{P}_C^{(e)} - \underline{P}_I^{(e)} \quad (3.24)$$

$$\underline{P}_S^{(e)} = \int_{S_e} \underline{N}^T \underline{T}_N \underline{T} \, dA \quad (3.25)$$

$$\underline{P}_C^{(e)} = \int_{V_e} \rho_0 \underline{N}^T \underline{F}_N \underline{V} \, dV \quad (3.26)$$

$$\underline{P}_I^{(e)} = \int_{V_e} \underline{B}^T \underline{\sigma} \, dV \quad (3.27)$$

Para un sistema conservativo, la forma más usual de cuantificar la energía disipativa es considerando el amortiguamiento del tipo viscoso dependiente de la velocidad. Del equilibrio, la ecuación de movimiento resulta ser

$$\underline{M}^{(e)} \ddot{\underline{R}} + \underline{C}^{(e)} \dot{\underline{R}} + \underline{K}_t^{(e)} \Delta \underline{R} = \underline{P}^{(e)}$$

donde

$\underline{C}^{(e)}$ es la matriz de amortiguamientos y se define en el inciso 3.2.8.

Del equilibrio de cada elemento se obtiene el equilibrio del sistema estructural completo expresándose mediante

$$\underline{M} \ddot{\underline{U}} + \underline{C} \dot{\underline{U}} + \underline{K}_t \Delta \underline{U} = \underline{P} \quad (3.31)$$

donde

\underline{M} , \underline{C} , \underline{K}_t , corresponden respectivamente a matrices de masas, amortiguamientos y rigideces.

\underline{P} vector de cargas en la superficie más fuerzas de cuerpo y más fuerzas internas.

\underline{U} vector de desplazamientos nodales.

3.2 Elemento finito para el estado plano de deformación.

El elemento finito triangular es el que se describe y se utiliza para problemas de terraplenes en donde se acepten las hipótesis de estado plano de deformaciones.

3.2.1 Función de desplazamientos. En la figura 3.2 se muestra un elemento triangular con nudos i, j, k numerados en sentido contrario a las manecillas de un reloj.

Los desplazamientos nodales R se expresan en sus dos componentes rectangulares como

$$(\underline{R}) = \begin{bmatrix} \underline{R_i} \\ \underline{R_j} \\ \underline{R_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{ix} \\ R_{iy} \\ R_{jx} \\ R_{jy} \\ R_{kx} \\ R_{ky} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Los desplazamientos del elemento tienen que ser definidos únicamente por los seis valores.

La representación más sencilla está dada mediante dos polinomios lineales de la forma

$$U_x = \alpha_1 + \alpha_2 X + \alpha_3 Y \quad (3.33)$$

$$U_y = \alpha_4 + \alpha_5 X + \alpha_6 Y \quad (3.34)$$

Las seis constantes se valúan por solución de los dos conjuntos de tres ecuaciones simultáneas y el resultado es el siguiente

$$U_x = \frac{1}{2A_{ijk}} \left\{ \left[y_{ik}(x-x_k) - x_{jk}(y-y_k) \right] R_{ix} + \left[y_{ki}(x-x_i) - x_{ki}(y-y_i) \right] R_{jx} + \left[-y_{ji}(x-x_j) + x_{ji}(y-y_i) \right] R_{kx} \right\} \quad (3.35)$$

$$U_y = \frac{1}{2A_{ijk}} \left\{ [y_{jk}(x-x_k) - x_{jk}(y-y_k)] R_{ij} + [y_{ki}(x-x_i) - x_{ki}(y-y_i)] R_{jy} + [-y_{ji}(x-x_j) + x_{ji}(y-y_i)] R_{ky} \right\} \quad (3.36)$$

donde

A_{ijk} = área del triángulo de vértices i, j, k

$$x_{ij} = x_i - x_j \quad (3.37)$$

$$y_{ij} = y_i - y_j \quad (3.38)$$

De 3.35 y 3.36 se tiene

$$U = \begin{bmatrix} U_X \\ U_X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_X^T \\ N_Y^T \end{bmatrix} \underline{R} \quad (3.39)$$

donde

$$\underline{N_X} = \begin{bmatrix} y_{ik}(x-x_k) - y_{jk}(y-y_k) \\ 0 \\ -y_{ij}(x-x_i) + x_{ik}(y-y_i) \\ 0 \\ y_{ij}(x-x_j) - x_{ij}(y-y_i) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

$$\underline{N_Y} = \begin{bmatrix} 0 \\ y_{jk}(x-x_k) - x_{jk}(y-y_k) \\ 0 \\ -y_{ik}(x-x_i) + x_{ik}(y-y_i) \\ 0 \\ y_{ij}(x-x_j) - x_{ij}(y-y_j) \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

De 3.15 y 3.39

$$\underline{N} = \begin{bmatrix} N_x & N_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{ik}(x-x_k) - y_{jk}(y-y_k) & 0 \\ 0 & y_{ik}(x-x_k) - x_{jk}(y-y_k) \\ -y_{ik}(x-x_i) + x_{ik}(y-y_i) & 0 \\ 0 & -y_{ik}(x-x_i) + x_{ik}(y-y_i) \\ y_{ij}(x-x_j) - x_{ij}(y-y_i) & 0 \\ 0 & y_{ij}(x-x_j) - x_{ij}(y-y_j) \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

3.2.2 Matriz de rigidez lineal $K_l^{(e)}$

Se obtiene a partir de la discretización del siguiente término de la ec 3.14

$$\int_{V_e} \delta \underline{\epsilon}^T \underline{\tau} \, dV \quad (3.43)$$

donde

$$\underline{\epsilon}^T = \left\{ \frac{\partial U_x}{\partial x} \frac{\partial U_y}{\partial y} \quad \frac{\partial U_x}{\partial y} + \frac{\partial U_y}{\partial x} \right\} \quad (3.44)$$

De 3.16

$$\underline{\tau} = \underline{D} \underline{\epsilon} \quad (3.45)$$

donde

$$\underline{D} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \nu/(1-\nu) & 0 \\ \frac{\nu}{(1-\nu)} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-2\nu)/2(1-\nu) \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

para material elástico lineal e isótropo. En caso que el material sea de comportamiento elastoplástico, las relaciones esfuerzo-deformación se describen en (Yagmahi, 1969) y en el apéndice A se obtienen en forma matricial las relaciones esfuerzo-deformación para un material elastoplástico en que es válido el criterio de Von-Mises sin endurecimiento.

$$\underline{B} = \frac{1}{2A_{ijk}} \begin{bmatrix} y_{ik} & 0 & -y_{ik} & 0 & y_{ij} & 0 \\ 0 & -x_{jk} & 0 & x_{ik} & 0 & -x_{ij} \\ -x_{jk}y_{jk} & x_{ik} & & -y_{ik} & -x_{ij} & y_{ij} \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

Luego 3.41 se transforma en

donde

$$\underline{K}_l^{(e)} = \int_{V_e} \underline{B}^T \underline{D} \underline{B} \, dV \quad (3.48)$$

Entonces

$$\frac{K}{L} = \frac{E}{4A_p(1-\nu)l(2-\nu)}$$

| | | | | | |
|---|---|---|---|--|--|
| $(1-\nu)y_p^2 + \frac{1}{2}(1-2\nu)x_p^2$ | $-\nu x_p y_p - \frac{1}{2}(1-2\nu)x_p y_p$ | $(1-\nu)y_p y_p - \frac{1}{2}(1-2\nu)x_p y_p$ | $\nu x_p y_p + \frac{1}{2}(1-2\nu)x_p y_p$ | $(1-\nu)y_{ij} y_{jk} + \frac{1}{2}(1-2\nu)x_{ij} y_{jk}$ | $-\nu x_{ij} y_{jk} - \frac{1}{2}(1-2\nu)x_{ij} y_{jk}$ |
| | $(1-\nu)x_p^2 + \frac{1}{2}(1-2\nu)y_p^2$ | $\nu x_p y_p + \frac{1}{2}(1-2\nu)x_p y_p$ | $-(1-\nu)x_p y_p - \frac{1}{2}(1-2\nu)y_p y_p$ | $-\nu x_{ij} y_{ij} - \frac{1}{2}(1-2\nu)x_{ij} y_{ij}$ | $(1-\nu)x_{ij} y_{jk} + \frac{1}{2}(1-2\nu)x_{ij} y_{jk}$ |
| | | $(1-\nu)y_{ik}^2 + \frac{1}{2}(1-2\nu)x_{ik}^2$ | $-\nu x_{ik} y_{ik} - \frac{1}{2}(1-2\nu)x_{ik} y_{ik}$ | $-(1-\nu)y_{ij} y_{ik} - \frac{1}{2}(1-2\nu)x_{ij} x_{ik}$ | $\nu x_{ij} y_{jk} + \frac{1}{2}(1-2\nu)x_{ij} y_{jk}$ |
| | | | $(1-\nu)x_{ik}^2 + \frac{1}{2}(1-2\nu)y_{ik}^2$ | $\nu x_{ij} y_{ij} + \frac{1}{2}(1-2\nu)x_{ij} y_{ij}$ | $-(1-\nu)x_{ij} x_{ik} - \frac{1}{2}(1-2\nu)x_{ij} y_{ik}$ |
| | Simétrica | | | $(1-\nu)y_{ij}^2 + \frac{1}{2}(1-2\nu)x_{ij}^2$ | $-\nu x_{ij} y_{ij} - \frac{1}{2}(1-2\nu)x_{ij} y_{ij}$ |
| | | | | | $(1-\nu)x_{ij}^2 + \frac{1}{2}(1-2\nu)y_{ij}^2$ |

(3.49)

3.2.3 Matriz de rigidez geométrica $K_G^{(e)}$

La matriz de rigidez geométrica se obtiene de la discretización de

$$\int_{V_e} \underline{\sigma} \underline{\eta}^T dV \quad (3.50)$$

donde $\underline{\sigma}$ son los esfuerzos iniciales de Cauchy o esfuerzos en la geometría deformada, $\underline{\eta}$ es la parte cuadrática del tensor de deformación.

Para el caso de estado plano

$$\underline{\eta}^T = \begin{bmatrix} \eta_{xx} & \eta_{yy} & \eta_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

donde

$$\eta_{xx} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial U_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial U_y}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (3.52)$$

$$\eta_{yy} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial U_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial U_y}{\partial y} \right)^2 \right]$$

$$\eta_{yx} = \left[\frac{\partial U_x}{\partial x} \frac{\partial U_x}{\partial y} + \frac{\partial U_y}{\partial x} \frac{\partial U_y}{\partial y} \right]$$

y

$$\underline{\eta}^T = \begin{bmatrix} \eta_{xx} & \eta_{yy} & \eta_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

Luego 3.50 se transforma en

$$\int_{V_e} \delta \begin{bmatrix} \eta_{xx} & \eta_{yy} & \eta_{xy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} dV = \int_{V_e} \frac{1}{2} \delta \begin{bmatrix} \frac{\partial U_x}{\partial x} & \frac{\partial U_x}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial U_x}{\partial x} \\ \frac{\partial U_x}{\partial y} \end{bmatrix} dV +$$

$$+ \int_V \frac{1}{2} \delta \left[\frac{\partial U_y}{\partial x} \quad \frac{\partial U_y}{\partial y} \right] \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial U_y}{\partial x} \\ \frac{\partial U_y}{\partial y} \end{bmatrix} dV \quad (3.54)$$

Utilizando 3.39 y 3.40 y 3.41 en 3.54
3.50 se transforma en

$$\int_{V_e} \underline{\sigma} \delta \underline{\eta}^T dV = \delta \underline{R}^T K_g^{(e)} \underline{\Delta} \underline{R} \quad (3.55)$$

donde

$$K_g^{(e)} = \int_{V_e} \underline{G} \underline{S} \underline{G}^T dV \quad (3.56)$$

siendo

$$\underline{G} = \begin{bmatrix} \underline{N}_{x,x} & \underline{N}_{x,y} & \underline{N}_{y,x} & \underline{N}_{y,y} \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

$$\underline{S} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & 0 & 0 \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ 0 & 0 & \sigma_{xy} & \sigma_{yy} \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

Utilizando 3.40 y 3.41 y efectuando operaciones en 3.57 se
tiene

$$\underline{G} = \begin{bmatrix} -y_{jk} & -x_{jk} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & y_{jk} & -y_{jk} \\ -y_{ik} & y_{ik} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -y_{ik} & x_{ik} \\ y_{ij} & -x_{ij} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & y_{ij} & -y_{ij} \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

3.2.4 Fuerzas internas $\underline{p}_I^{(e)}$

De la ec 3.2

$$\underline{p}_I^{(e)} = \int_{V_e} \underline{B}^T \underline{\sigma} dV \quad (3.60)$$

donde

$\underline{\sigma}$ es el vector de esfuerzos en el elemento en la configuración deformada (fuerza por unidad de área deformada).

\underline{B} está definida por 3.47

3.2.5 Vector de fuerzas externas equivalentes $\underline{p}_S^{(e)}$

El vector de fuerzas externas se obtiene de la discretización de la primera integral de 3.14.

Suponiendo la función de interpolación para T y F igual que para los desplazamientos U , se tiene

$$\int_V \delta U^T T dA = \delta \underline{U}^T \underline{Q} \quad (3.61)$$

donde

$$\underline{Q} = \int_V \underline{N} \underline{N}^T dA \underline{T} \quad (3.62)$$

y

$$\underline{T} = \begin{bmatrix} T_i & T_j & T_k \end{bmatrix}^T \quad (3.63)$$

donde T_i , T_j , T_k son las fuerzas aplicadas en los nudos, i , j , y k , respectivamente.

3.2.6 Vector de fuerzas de cuerpo $\underline{p}_C^{(e)}$

Está definida por la ec 3.26 como

$$\underline{p}_c^{(e)} = \int_{\underline{V}} \rho \underline{N}^T \underline{N} \underline{V} dV$$

donde \underline{V} son las fuerzas de cuerpo por unidad de masa.

3.2.7 Matriz de masas del elemento triangular

La matriz de masas está dada por 3.20

$$\underline{M} = \int_{\underline{V}} \rho \underline{N}^T \underline{N} dV \quad (3.64)$$

Debido a que $N = N(X, Y)$, el efectuar la integración indicada en 3.64 en un dominio triangular resulta laborioso, se opta por un cambio de sistema de coordenadas (ref 9). En el caso del triángulo se utilizarán coordenadas triangulares ζ y η según se muestra en la fig 3.2.

Las coordenadas triangulares (no ortogonales), (ζ, η) se relacionan a las rectangulares (X, y) mediante las transformaciones

$$X = x_i + \zeta(X_{ji} - \eta X_{jk}) \quad (3.65)$$

$$y = Y_i + \zeta(y_{ji} - \eta y_{jk}) \quad (3.66)$$

Debido a la forma de la matriz \underline{N} , donde el primer renglon está asociado a las componentes horizontales de los desplazamientos y el segundo renglon a los verticales, entonces basta trabajar únicamente con los desplazamientos horizontales U_x . Transformando los elementos no nulos de \underline{N}_x de la ec 3.40 al sistema triangular y denominándola \underline{N}_{xx} se tiene

$$\underline{N_{xx}} = \left[(1-\zeta), \zeta\eta, \zeta(1-\eta) \right] \quad (3.67)$$

entonces, para desplazamientos horizontales y referidos a coordenadas triangulares se tendrá que la ec 3.60 se transforma en

$$\underline{M_x^{(e)}} = \int_V \rho \underline{N_{xx}}^T \underline{N_{xx}} dV = \int_0^1 \int_0^1 \rho \underline{N_{xx}}^T \underline{N_{xx}} |J(x,y)| d\zeta d\eta \quad (3.68)$$

$$J(x,y) = \frac{\partial x}{\partial \zeta} \frac{\partial y}{\partial \eta} - \frac{\partial x}{\partial \eta} \frac{\partial y}{\partial \zeta} \quad (3.69)$$

sustituyendo en (3.69) e integrando se tiene

$$\underline{M_x^{(e)}} = \frac{\rho A_{ijk}}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (3.70)$$

La matriz de masas para los 6 grados de libertad de elemento triangular en el orden de 3.34 será:

$$\underline{M}^{(e)} = \frac{\rho A_{ijk}}{12} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (3.71)$$

La matriz 3.71 provoca acoplamiento inercial, lo cual complica los cálculos numéricos. Además, el uso de dicha matriz en forma conjunta con la formulación de energía de deformación del sistema en términos de los desplazamientos, asegura que todas las frecuencias del sistema descrito constituyen acotamientos superiores de las frecuencias exactas.

3.2.7.1 Matriz de masas concentradas

Una idealización física de las masas del sistema sugiere la idea de la matriz de masas concentradas, donde la masa total del elemento se concentra en los nudos de tal modo que no exista el acoplamiento inercial; es decir, se calcularán suponiendo que para una aceleración especificada en un punto nodal, el material asociado al nudo se comporte como un cuerpo rígido mientras el resto del sistema no participa en el movimiento. Entonces la matriz de masas resulta diagonal.

En la matriz de masas acopladas, los términos de la diagonal principal son menores que en el caso de masas concentradas. Lo anterior significa físicamente que bajo una aceleración la contribución de cada nudo a las fuerzas de inercia es más pronunciada en el caso de la matriz con masas concentradas que la acoplada, lo que significa que la representación de las masas del sistema en términos de la matriz de masas concentradas es menos precisa que la que provoca acoplamiento inercial. Puesto que la formulación de la energía de deformación del sistema en términos de los desplazamientos conduce a un límite superior de la respuesta, se tendrá que la representación de masas concentradas da mejores resultados en la mayoría de los casos.

Es práctica común concentrar la masa de cada elemento por partes iguales en cada nudo; entonces se tendrá que la matriz de masas concentradas del elemento triangular quedará de la siguiente manera:

$$\underline{M}^{(e)} = \frac{\rho A_{ijk}}{12} \begin{bmatrix} 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 \end{bmatrix} \quad (3.72)$$

3.2.8 Matriz de amortiguamientos

En este trabajo se construye la matriz de amortiguamientos de acuerdo con el criterio utilizado por Ghosh y Wilson (ref 6), donde se forma como una combinación lineal de \underline{M} y \underline{K} en la forma

$$\underline{C} = \alpha \underline{M} + \beta \underline{K}$$

donde

$$\alpha = \zeta, p,$$

$$\beta = \zeta/p,$$

siendo p el valor de la frecuencia natural de vibración asociada al primer modo, y ζ el valor de amortiguamiento respecto al crítico, asociado al primer modo de la estructura.

4. RESPUESTA SISMICA DE TERRAPLENES AL CONSIDERAR COMPORTAMIENTO ELASTOPLASTICO DEL MATERIAL

Con base en los desarrollos presentados en los capítulos anteriores, se desarrolla un método para analizar la respuesta sísmica de terraplenes considerando un comportamiento elastoplástico del material.

4.1 Método de análisis

Con base en el cap 2 se puede formular el problema considerando el terraplén como un medio continuo. Las ecuaciones de equilibrio dinámico que resultan son de la forma 2.2 más las condiciones de frontera así como las condiciones iniciales. Conside-

rando que en un proceso de deformación las fronteras del medio varían y dependen de los desplazamientos incógnitas, se plantean las ecuaciones de equilibrio dinámico en coordenadas materiales 2.6, para considerar el efecto de desplazamientos finitos. Para que el sistema de ecuaciones, que gobiernan el comportamiento del problema, no resulte indeterminado, se hace necesario el uso de una ecuación constitutiva que incluya el tipo de material que se considere.

Si el medio continuo que constituye al terraplén se hubiese idealizado como un material elástico e isótropo y sin considerar no linealidades geométricas, el modelo matemático que gobierna el problema serían las ecs de Navier, que es un sistema de ecuaciones en derivadas parciales con una representación explícita, pero como el material se va a modelar con un comportamiento elastoplástico considerándose desplazamientos finitos y deformaciones grandes, no se tiene una forma explícita de las ecuaciones de movimiento, que se formularon a través del principio del trabajo virtual, surgiendo la necesidad de formular el problema no lineal mediante un procedimiento incremental. Además, empleando el método del elemento finito se obtiene una solución numérica del problema donde se incluyen características geométricas, distribución y comportamiento de los materiales.

Con base en la formulación incremental, teniendo en cuenta el modelo de desplazamientos del método del elemento finito, resulta que la ecuación de equilibrio incremental para un terraplén de la forma 3.31 es

$$\underline{M} \underline{U} + \underline{c} \dot{\underline{U}} + \underline{K}_t \Delta \underline{U} = \underline{P} \quad (4.1)$$

Si en el terraplén por analizar se aceptan las hipótesis de estado plano de deformaciones, la expresión que relaciona es fuerzos con deformaciones en el intervalo lineal es de la forma 3.35 y en caso que el comportamiento sea elastoplástico, siguien do la teoría descrita por Green y Naghdi (ref 7) se obtienen en el apéndice A las relaciones esfuerzo-deformación en forma ma tricial para un material elastoplástico, en que es válido el cri terio de Von-Mises sin endurecimiento.

Las matrices M, C, K_t y los vectores P, se forman mediante la unión de las cantidades respectivas para cada elemento.

Para resolver el conjunto de ecuaciones diferenciales aco plado 4.1, que gobierna el comportamiento del terraplén, se uti liza el método θ de Wilson, que es un método paso a paso (apén dice B). En la solución para cada paso de carga se obtiene un incremento de desplazamiento y consecuentemente un incremento de esfuerzos, los cuales se acumulan para obtener el estado to tal de desplazamientos y esfuerzos, al final de la historia de carga, por repetición del proceso en cada incremento.

Debido a que la respuesta depende de la historia de carga y del estado de esfuerzos, se consideró el procedimiento de cons- trucción siguiendo el criterio descrito por Porras y Cervantes (ref 10) para obtener el estado de esfuerzos inicial. En el a péndice E se incluye instructivo y listado del programa de com putadora en lenguaje Fortran.

Finalmente en el apéndice E se describe el diagrama de bloques, organización y manejo del programa de computadora para el análisis sísmico de terraplén.

4.2 Aplicación del método a la cortina de una presa

El procedimiento descrito es aplicable a una presa de tierra y enrocamiento (figs 4.1 y 4.2); para ilustrar el método se escogió una sección de las siguientes características:

4.2.1 Geometría, materiales y solicitaciones

La sección transversal de la presa se muestra en la fig 4.3 con una altura de 90 m.

La presa se idealizó como un estado plano de deformaciones y para la discretización de la sección se utilizaron elementos finitos triangulares (figs 4.4 y 4.5). Las propiedades de los materiales utilizados se muestran en la tabla 4.1. El valor del amortiguamiento crítico fue de 5 por ciento.

Para determinar la matriz de amortiguamientos, se calcularon la frecuencia y periodo del primer modo de vibración de acuerdo con un artículo de Porras y Cervantes (ref 10). En el apéndice E se describe el programa para calcular frecuencias, periodos y configuraciones naturales de vibración.

El temblor utilizado fue simulado por el procedimiento de Rascón y Cornell (1968); en la fig 4.6 se muestran los componentes de aceleración horizontal y vertical.

Las presiones hidrodinámicas en cada paso se valuaron de acuerdo con lo descrito en el trabajo de Cervantes, y otros (ref 10) y en el apéndice E se describe el programa de computadora.

4.3 Resultados obtenidos

Se calculó la respuesta debida a peso propio siguiendo el proceso de construcción, por lo que en la fig 4.7 se muestra la distribución de desplazamientos al finalizar la construcción,

en la fig. 4.8 se tiene la distribución de esfuerzos σ_x , σ_y , τ_{xy} , en la fig 4.9 se presentan los esfuerzos y direcciones principales, y en la fig 4.10 se observan las zonas plastificadas que se presentan durante cada etapa de construcción.

La respuesta sísmica de la cortina se obtuvo para dos temblores cuyos acelerogramas se muestran en la fig 4.6. Las aceleraciones máximas del temblor 1 son 0.05 g el componente horizontal y 0.035 g el vertical. Para el temblor 2 las correspondientes aceleraciones máximas son 0.5 g y 0.35 g. Ambos temblores poseen el mismo contenido de frecuencias. Se utilizaron los dos temblores anteriores debido a que con tales excitaciones se podrá hacer una serie de comparaciones de los resultados que son de esperarse en la respuesta de la estructura.

Para cada punto de la cortina se calcularon las historias de los desplazamientos, las velocidades y las aceleraciones, así como las historias de los esfuerzos, las deformaciones, los esfuerzos principales y su orientación respecto al sistema de referencia inicial de cada uno de los elementos finitos en que se idealizó la cortina.

En la fig 4.11 se pueden observar los acelerogramas calculados en dos puntos de la cortina, y en las figs 4.12 a 4.14 se presenta en gráficas la distribución de los esfuerzos en la sección de la presa para diversos instantes del temblor 2. La fig 4.15 muestra las zonas plastificadas de la cortina en algunos instantes en que estaba actuando el temblor 2.

Con objeto de comparar los resultados del análisis de la presa aquí desarrollado con un análisis elástico lineal, se resuelve la misma estructura con el procedimiento descrito en el

trabajo de Cervantes y otros (ref 11).

Como las aceleraciones del temblor 1 son sumamente pequeñas, también lo serán las fuerzas generadas por este y es de esperarse que la respuesta de la cortina ante dicho temblor sea muy parecida, calculada tanto por el procedimiento aquí desarrollado como con un elástico lineal. Esta aseveración se confirma en los acelerogramas calculados (figs 4.11a - 4.11d) y también en las historias de los desplazamientos relativos calculados (figs 4.11i - 4.11l).

Las aceleraciones del temblor 2 corresponden a temblores que pueden ocasionar problemas a las estructuras y es de esperarse diferencias en las respuestas calculadas con comportamientos lineales y no lineales. Así, las diferencias esperadas tanto en amplitud como en fase se pueden observar en las figs 4.11e-4.11h para los acelerogramas calculados, mientras que para los desplazamientos relativos calculados dichas diferencias pueden verse en las figs 4.11m - 4.11o.

Los resultados anteriores corresponden a dos puntos de la cortina; uno está muy cerca de la base, mientras el otro se encuentra sobre la cresta. Puede observarse el efecto de amplificación de la respuesta y para el caso de los acelerogramas, en las figuras correspondientes también se incluye el acelerograma en la base de la cortina.

4.4 Conclusiones y recomendaciones

El método que se presenta permite analizar terraplenes sometidos a la acción de temblores, donde el terraplén se modela como un estado plano de deformaciones y las ecuaciones de movi -

miento se plantean considerando las no linealidades geométricas y del material y dichas ecuaciones se resuelven paso a paso.

Por lo que respecta al método desarrollado puede observarse lo siguiente:

1. La formulación incremental de las ecuaciones de equilibrio es general para cualquier medio con desplazamientos grandes y deformaciones finitas. Las ecuaciones que resultan para un material dado son no lineales y su linealización obliga a incrementos de carga pequeños. Para lograr mayor aproximación en la curva de respuesta se deben introducir las fuerzas internas existentes, de manera que se satisfaga el equilibrio al inicio de cada incremento.
2. El comportamiento inelástico del material se puede considerar utilizando alguno de los criterios de la teoría de la plasticidad. Por simplicidad se utilizó el modelo de Von Mises sin endurecimiento. Es recomendable proseguir los estudios incluyendo otros tipos de comportamiento no lineal del material, acordes con las leyes constitutivas que se obtengan en laboratorio.
3. El método de solución más utilizado en la actualidad para resolver ecuaciones en derivadas parciales es el del elemento finito, y su utilización ha permitido grandes progresos en el análisis no lineal de las estructuras. Aquí se utilizó el elemento finito triangular por ser el más simple; sin embargo, se puede utilizar un elemento mejor para representar los esfuerzos y los desplazamientos, como el cuadrilátero ge

neral.

4. Las propiedades no lineales de los materiales afectan en forma notable la respuesta, y el problema sobre la representación del comportamiento de los materiales se agudiza en este tipo de estructuras.

Del estudio de los resultados obtenidos en los casos analizados se concluye lo siguiente:

1. La influencia de la no linealidad conduce a reducción de las aceleraciones máximas en la corona, pero para los casos analizados tal reducción es menos marcada de lo que podría esperarse teniendo en cuenta la experiencia sobre respuesta sísmica de estructuras que pudieran idealizarse como vigas de cortante.
2. Puesto que, a diferencia de las estructuras de cortante parte de las deformaciones son irreversibles, es decir, corresponden a desplazamientos elastoplásticos que tienen una componente vertical hacia abajo, en la estructura elastoplástica los desplazamientos se van acumulando en una dirección, creciendo sistemáticamente, mientras que en la lineal tal acumulación no ocurre.
3. A pesar de lo anterior, y a pesar de la elevada intensidad de algunos de los acelerogramas empleados, que dieron lugar a incursiones en el rango inelástico en una amplia zona de la estructura analizada, los asentamientos residuales de la corona resultaron sumamente pequeños.

4. Los resultados de algunas pruebas llevadas a cabo en el Instituto de Ingeniería en modelos de terraplenes homogéneos sometidos a movimiento armónico de su base o a aceleración lateral constante (inclinación de su base) muestran que la falla de deslizamiento se produce mediante un mecanismo de deslizamiento de granos, incluyendo desplazamiento importante de masas, que no está previsto en el modelo analítico supuesto. Por ello es que las conclusiones de estudios de respuestas dinámicas basadas en modelos como los descritos en este trabajo pueden pecar de inseguros. El comentario se aplica también a los resultados de estudios similares en otros países. Es recomendable profundizar en este problema.

Para continuar la investigación en este campo se sugiere lo siguiente:

1. El estudio de las ecuaciones constitutivas requiere mayor investigación para lograr criterios que permitan formular modelos que representen los fenómenos más importantes que influyen en el comportamiento de los materiales. En este tema es de vital importancia la relación teórico-experimental y, en especial la determinación en laboratorio de las leyes constitutivas de los materiales.
2. Se requiere instrumentación de prototipos y pruebas de modelos a escala para calibrar las respuestas medidas con las calculadas mediante las teorías desarrolladas, y para incluir aspectos hasta ahora no cubiertos los modelos analíticos, y

que podrían ser muy significativos como el deslizamiento de granos y el flujo de masas.

3. Los estudios teóricos deben continuarse a fin de considerar efectos como interacción entre cortina y líquido al macenado, amortiguamiento por radiación, forma arbitraria del vaso, diversos comportamientos del material que constituye al terraplén, arribo no simultáneo de la perturbación a toda la extensión de las interfases y, finalmente, extensión del problema a tres dimensiones.

5. R E F E R E N C I A S .

1. R. Cervantes B., G. Alduncin G., "Métodos numéricos para calcular paso a paso la respuesta dinámica de estructuras" III Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Acapulco, México (1971)
2. D. C. Drucker, y W. Prager, "Soil Mechanics an Plastic Analysis on Limit Design", Quar. of Appl. Math., Vol. 10, N° 2, 1952, pp. 157 - 165
3. A. Eringen, CEMAL, "Mechanics of Continua", John Wiley and Sons (1967)
4. I. Farhomand, "Nonlinear Dynamic Strees Analysis of Two-dimensional Solids", Ph. D. Dissertation, University of California, Berkeley (1970)
5. K. T. Kavanagh, "Orthogonal Modes for the Solution to Static Nonlinear Problems", Finite Element Method in Civil Engineering Editores Mc Cutcheon, Mirza y Mufti. Montreal 1972
6. S. Ghosh y E. L. Wilson, "Dynamic Strees Analysis of Axisymmetric Structures Under Arbitrary Loadings", Report N° EERC 69-10, College of Engineering, University of California, Berkeley EUA (1969)

7. A. E. Green y P. M. Naghdi, "A General Theory of an Elastic Plastic Continuum", Arch. Rat. Mech. Anal. 18,4 (1965) pp. 250-281
8. J. T. Oden, "Finite Elements of nonlinear continua", Mc Graw Hill Book Co. Inc. (1972)
9. V. Porrás S., "Análisis dinámico de presas de tierra y enrocamiento", Tesis profesional, Facultad de Ingeniería UNAM (1972)
10. V. Porrás S. y R. Cervantes B., "Análisis de esfuerzos en terraplenes durante el proceso de construcción", División de Estudios Superiores, Facultad de Ingeniería, UNAM, Publicación DESFI-2 México, D. F. (1974)
11. R. Cervantes B., L. Esteva M., V. Porrás S., G. Alduncin G. y J. L. Trigos S., "Riesgo sísmico de la presa Las Piedras", Informe a la Secretaría de Recursos Hidráulicos, México, D. F. (1972)
12. Secretaría de Recursos Hidráulicos, "Estudio preliminar de los materiales para la construcción de la cortina de la presa "Las Piedras", Jal. - "Dirección de Proyectos", México, D. F. (1971)
13. E. Silva y A. Fuentes, "Pruebas de compresión triaxial y unidimensional, enrocamiento de la presa La Angostura, Chis.",

Informe para la Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Ingeniería, UNAM, México, D. F. (1971)

14. O. Rascón y C. A. Cornell, "Strong motion earthquake Simulation", Massachusetts Institute of Technology, Civil Engineering Report R 68-15, Cambridge, Mass, EUA (1968)
15. A. Flores, "Presión hidrodinámica en presas sujetas a sismos", Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, D. F. (1966).
16. S. Yagmai, "Incremental Analysis of Large Deformations in Mechanics of Solids with Applications to Axisymmetric Shells of Revolution, doctoral dissertation, University of California, Berkeley. (1968).

TABLA 4.1. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

| Material | PV, en ton/m ³ | E, en ton/m ² | ν | C, en ton/m ² | tan ϕ |
|----------|------------------------------|-----------------------------|-------|-----------------------------|------------|
| 1 | 1.2 | * | 0.25 | 0.0 | 0.45 |
| 2 | 2.0 | 1600 | 0.40 | 5.0 | 0.00 |
| 3 | 2.2 | * | 0.25 | 0.0 | 0.84 |
| 4 | 2.2 | * | 0.25 | 0.0 | 0.49 |

PV peso volumétrico

E módulo de elasticidad

ν coeficiente de Poisson

C cohesión

ϕ fricción

* Depende de la presión confinante

TABLA B.1 ALGORITMO PASO A PASO PARA LA SOLUCION DE LA ECUACION DE MOVIMIENTO DE SISTEMAS ESTRUCTURALES LINEALES

Cálculos iniciales

1. Se forma la matriz de rigideces \underline{K} , la matriz de masas \underline{M} y la matriz \underline{C} como $\underline{C} = \alpha \underline{M} + \beta \underline{K}$.
2. Calcular las siguientes constantes

$$\tau = \theta \Delta t, \theta > 1.37$$

$$b_6 = 2 + \frac{\tau}{2} b_3$$

$$b_0 = (1 + \frac{3}{\tau} \beta)$$

$$b_7 = \frac{6}{\theta \tau^2 b_0}$$

$$b_1 = (\frac{6}{\tau^2} + \frac{3}{\tau} \alpha)$$

$$b_8 = \frac{3}{\tau} \beta b_7 - \frac{6}{\theta \tau^2}$$

$$b_2 = \frac{b_1}{b_0}$$

$$b_9 = 2 \beta b_7 - \frac{6}{\theta \tau}$$

$$b_3 = \alpha - \beta b_2$$

$$b_{10} = 1 - \frac{3}{\theta} + \frac{\tau}{2} \beta b_7$$

$$b_4 = \frac{6}{\tau^2} + \frac{3}{\tau} b_3$$

$$b_{11} = \frac{\Delta t}{2}$$

$$b_5 = \frac{6}{\tau} + 2b_3,$$

$$b_{12} = \frac{\Delta t^2}{6}$$

3. Formar la matriz \underline{K}^* como

$$\underline{K}^* = \underline{K} + b_2 \underline{M}$$

Para cada incremento de tiempo

1. Formar el vector de cargas \underline{R}^*

$$\underline{R}_t^* = \underline{R}_t + \theta (\underline{R}_{t+\Delta t} - \underline{R}_t) + M \left[b_4 \underline{x}_t + b_5 \underline{x}_t + b_6 \underline{x}_t \right]$$

2. Resolver el sistema

$$K^* \underline{x}_t^* = \underline{R}_t^*$$

3. Calcular los vectores de aceleración, velocidad y desplazamiento para $t + \Delta t$

$$\underline{x}_{t+\Delta t} = b_7 \underline{x}_t^* + b_8 \underline{x}_t + b_9 \underline{x}_t + b_{10} \underline{x}_t$$

$$\underline{x}_{t+\Delta t} = \underline{x}_t + b_{11} (\underline{x}_{t+\Delta t} + \underline{x}_t)$$

$$\underline{x}_{t+\Delta t} = \underline{x}_t + \Delta t \underline{x}_t + b_{12} (\underline{x}_{t+\Delta t} + 2\underline{x}_t)$$

4. Calcular los esfuerzos en cada elemento si se requiere.

5. Repetir los pasos anteriores para el siguiente incremento de tiempo.

TABLA B. 2 ALGORITMO PASO A PASO PARA LA SOLUCION DE LA ECUACION DE MOVIMIENTO DE SISTEMAS ESTRUCTURALES NO LINEALES

Cálculos iniciales

1. Formar la matriz de rigideces \underline{K} y la matriz de masas \underline{M} .
2. Obtener desplazamientos, deformaciones, esfuerzos y fuerzas internas debidas a cargas estáticas.
3. Calcular las siguientes constantes:

$$\begin{aligned}\tau &= \theta \Delta t, & \theta &< 1.37 \\ a_0 &= 6/\tau^2 & a_4 &= a_0/\theta & a_7 &= \Delta t/2 \\ a_1 &= 3/\tau & a_5 &= -a_2/\theta & a_8 &= \Delta t^2/6 \\ a_2 &= 2 & a_6 &= 1-3/\theta \\ a_3 &= \tau/2\end{aligned}$$

Para cada incremento de tiempo

1. Calcular la matriz de rigidez tangente \underline{K}_t .
2. Formar la matriz $\underline{K}_t^* = \underline{K}_t + a_0 \underline{M} + a_1 \underline{C}$
3. Triangularizar \underline{K}_t^*
4. Formar el vector de cargas \underline{R}_t^*

$$\underline{R}_t^* = \underline{R}_t + \theta (\underline{R}_{t+\Delta t} - \underline{R}_t) - \underline{F}_t + \underline{M} (a_2 \underline{x}_t + 2\underline{x}_t) + \underline{C} (2\underline{x}_t + a_3 \underline{x}_t)$$

5. Resolver el sistema

$$\underline{K}_t^* \Delta \underline{x}_t = \underline{R}_t^*$$

6. Calcular los vectores de desplazamiento, velocidad y aceleración para $t + \Delta t$

$$\underline{x}_{t+\Delta t} = a_4 \Delta \underline{x}_t + a_5 \underline{x}_t + a_6 \underline{x}_t$$

$$\underline{x}_{t+\Delta t} = \underline{x}_t + a_7 (\underline{x}_{t+\Delta t} + \underline{x}_t)$$

$$\underline{x}_{t+\Delta t} = \underline{x}_t + \Delta t \underline{x}_t + a_8 (\underline{x}_{t+\Delta t} + 2\underline{x}_t)$$

7. Calcular deformaciones, esfuerzos y fuerzas internas.
8. Cambiar las coordenadas a la configuración deformada.
9. Continuar con los pasos anteriores para el siguiente incremento.

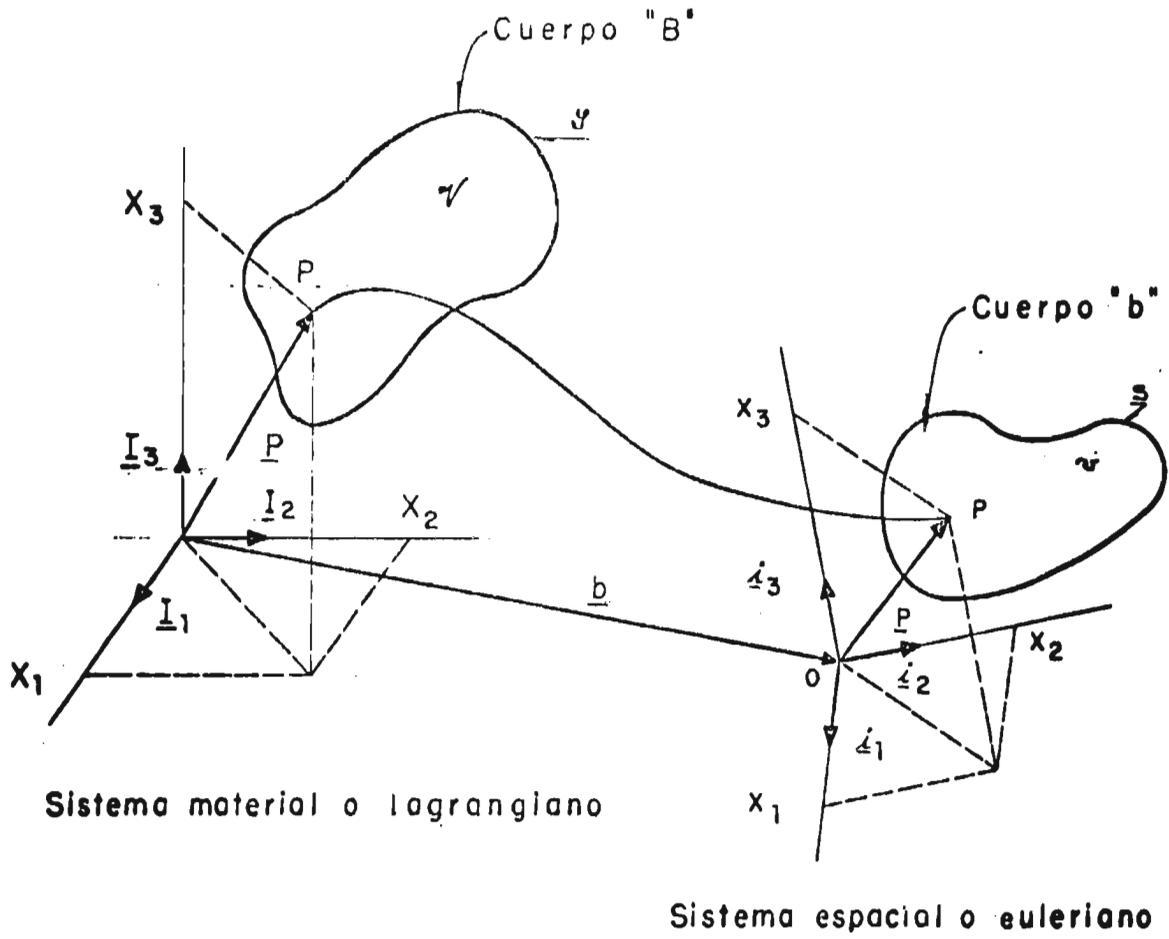


Fig 2.1 Sistemas Coordenadas

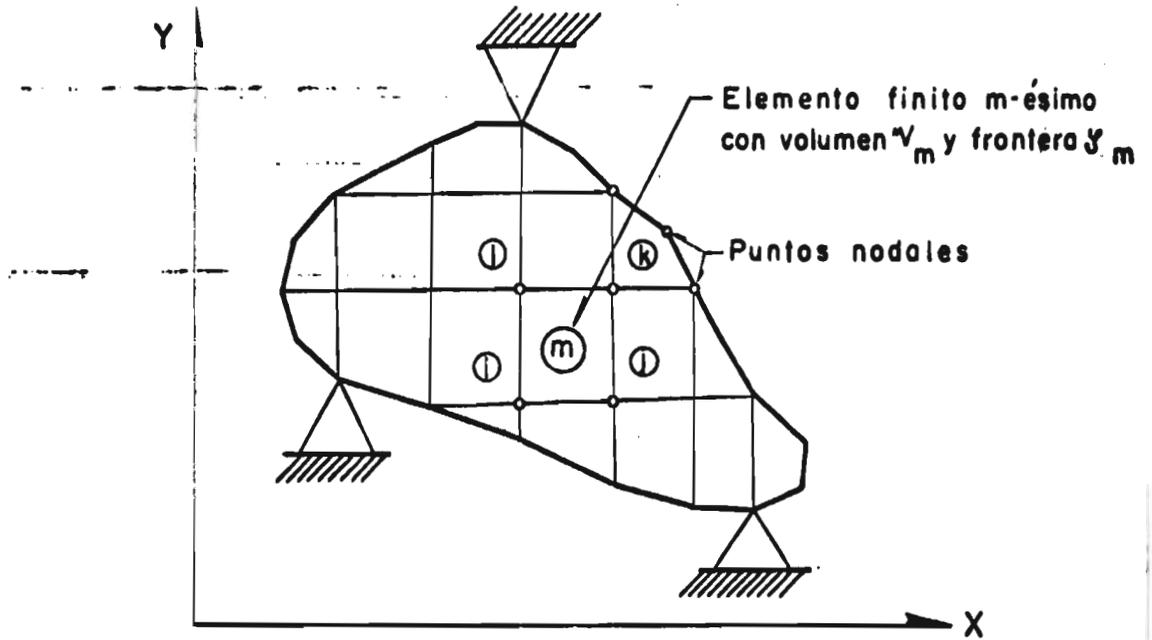


Fig 3.1 REPRESENTACION ESQUEMATICA DE UN MEDIO CONTINUO DISCRETIZADO EN ELEMENTOS FINITOS

BIBLIOTECA DE LAS DIVISIONES DE INVESTIGACION Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE LA FACULTAD DE INGENIERIA.

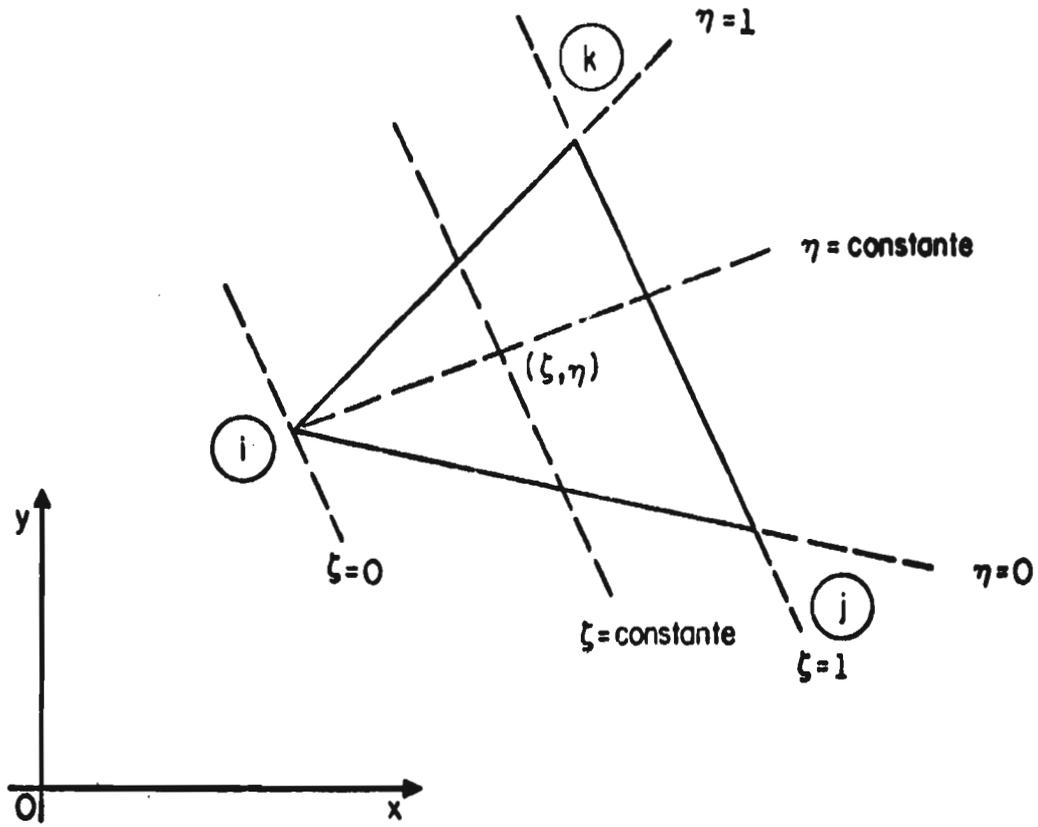
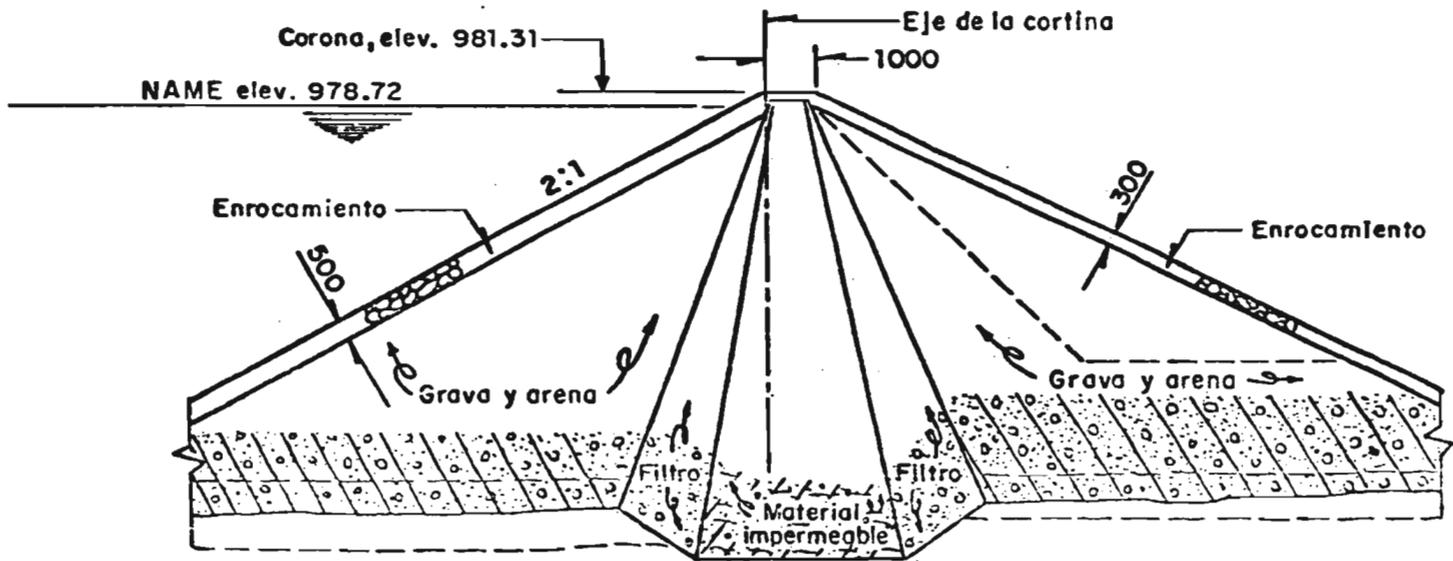
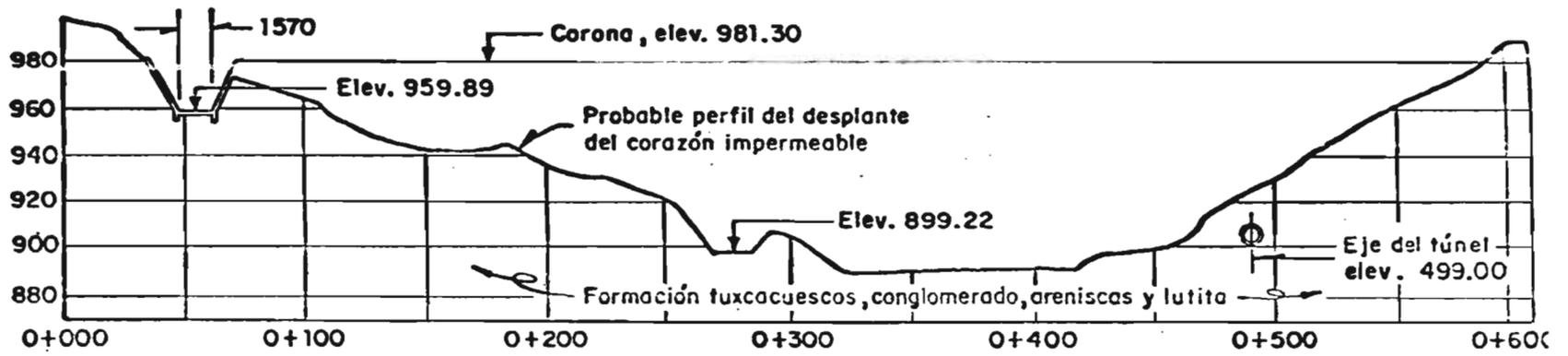
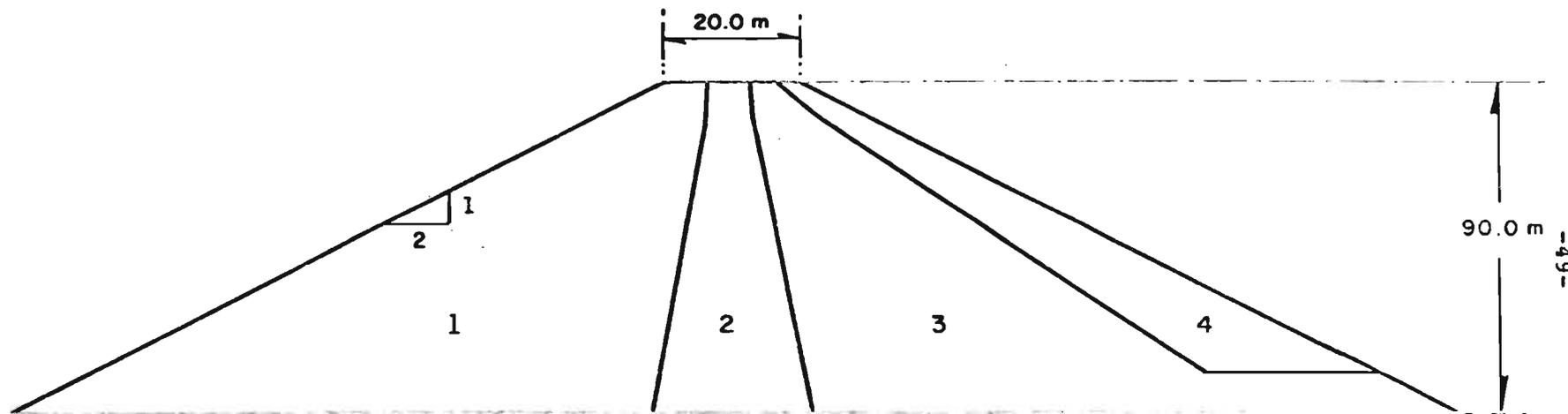


Fig 3.2 Elemento finito triangular





1, Arena y grava saturada ; 2 ,arcilla ; 3 ,arena y grava ; 4 ,tuxcocuesco

Fig 4.3 Geometría y materiales de la cortina

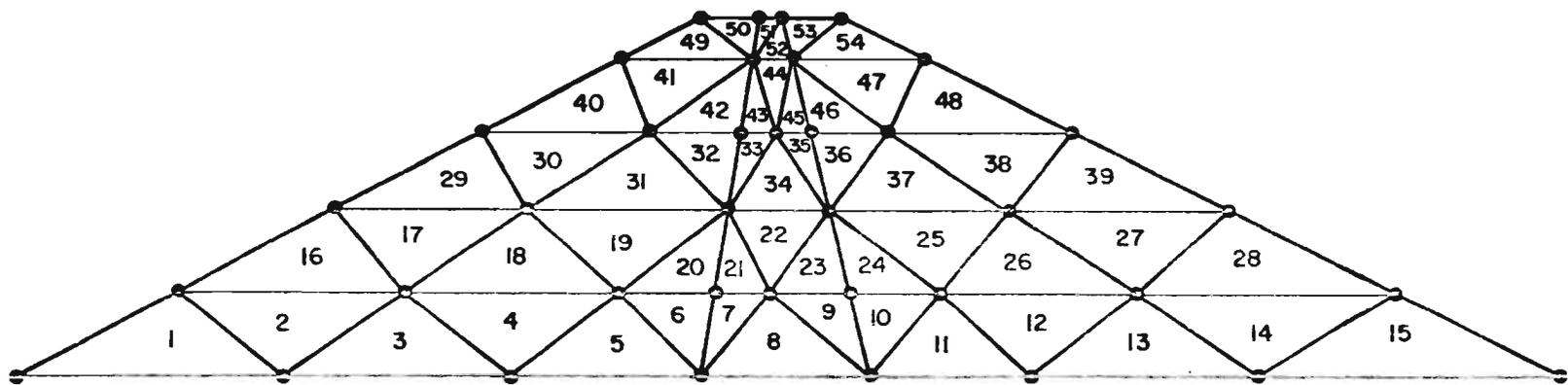


Fig 4.4 Idealización de la sección transversal de la cortina mediante elementos finitos triangulares y numeración de los mismos .

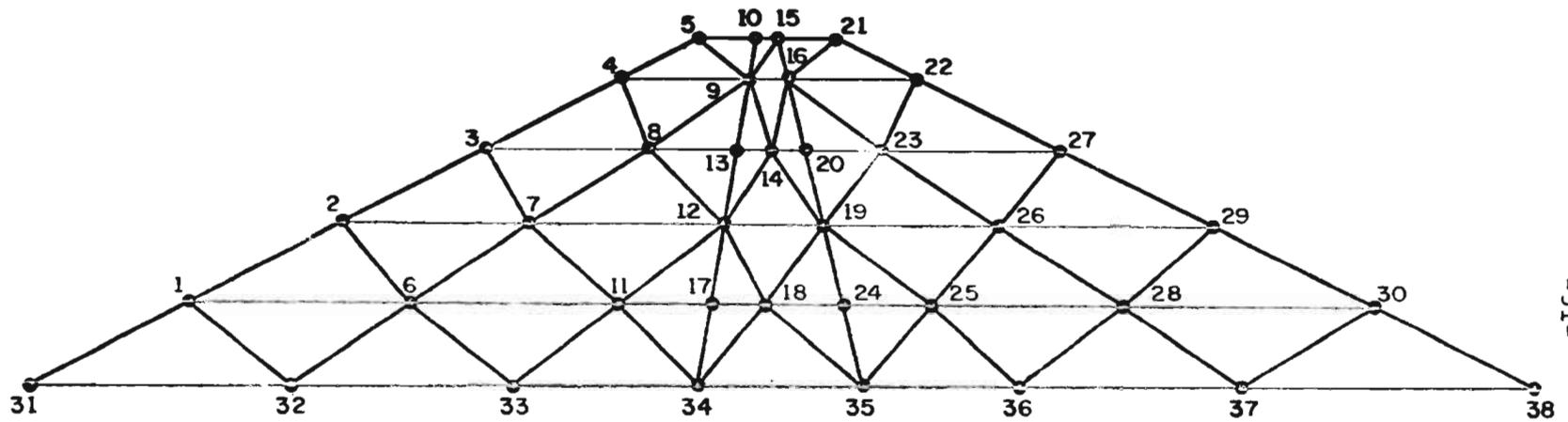
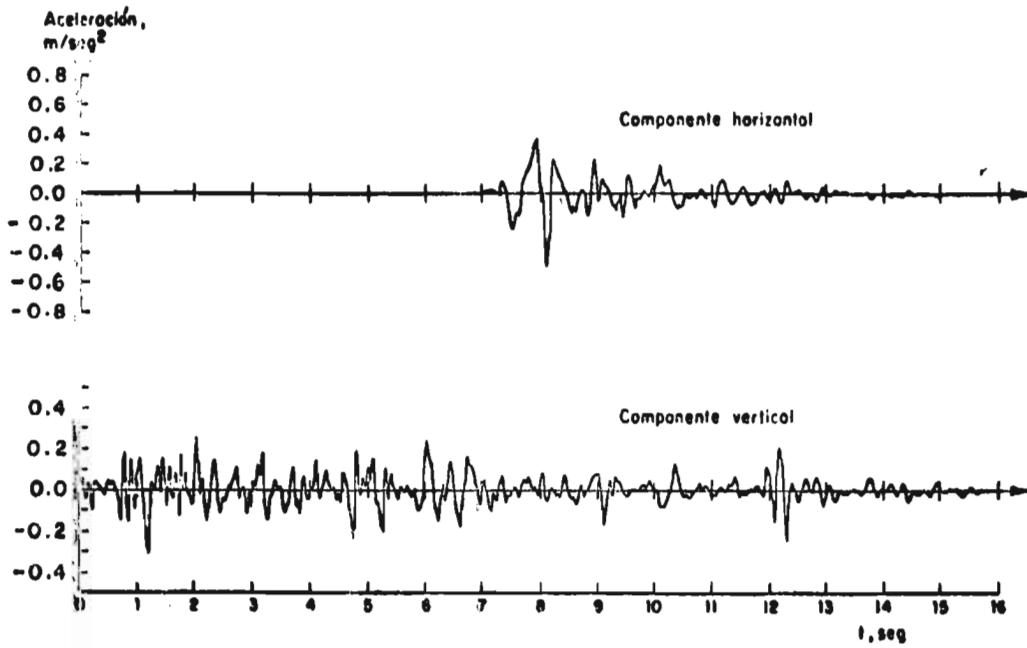
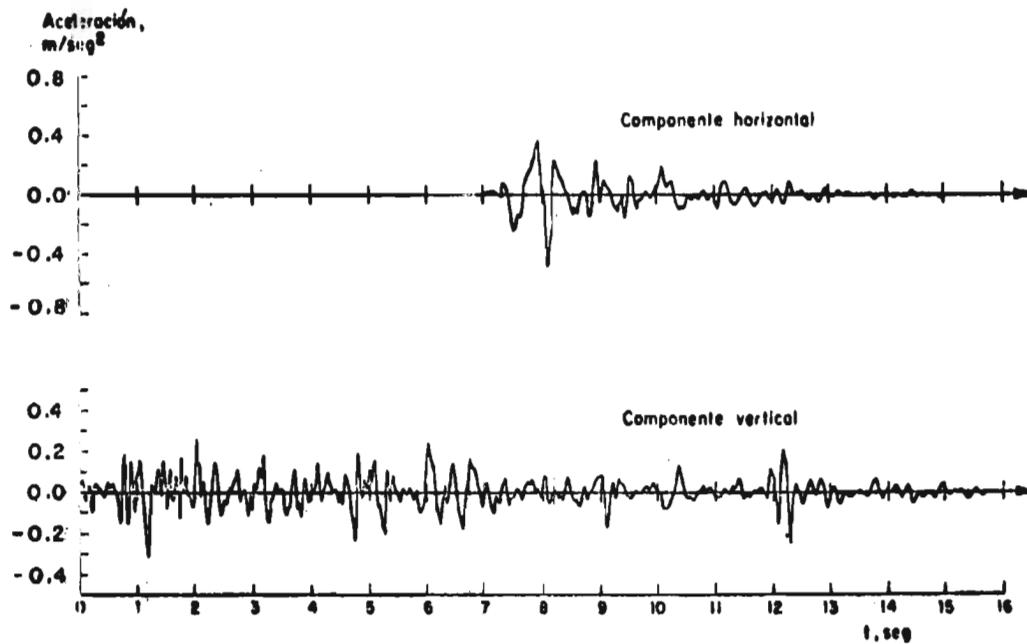


Fig 4.5 Numeración de los puntos nodales en la sección idealizada por elementos finitos



a) Temblor 1



b) Temblor 2

Fig 4.6 Acelerogramas de los temblores actuantes en la presa

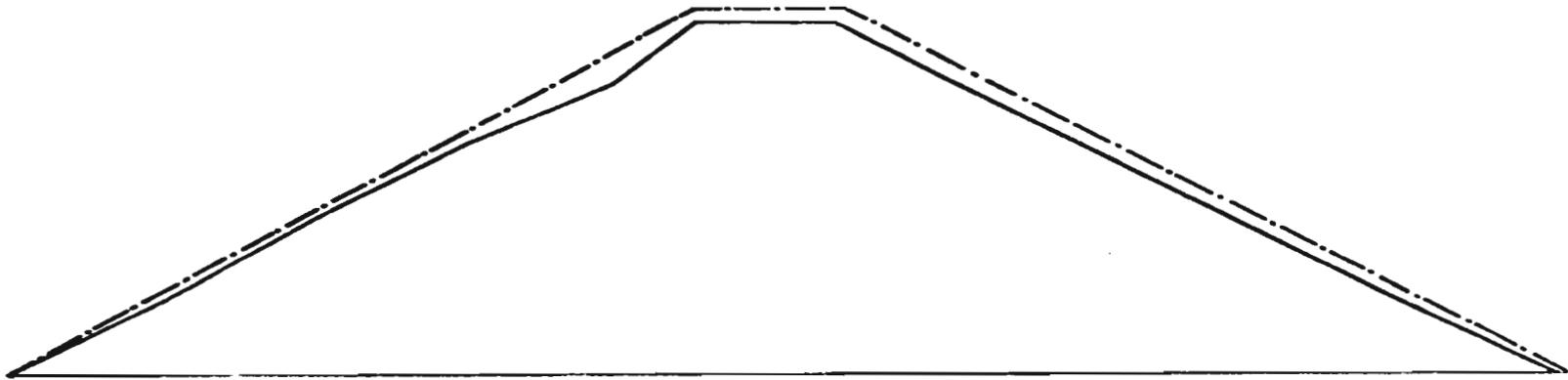
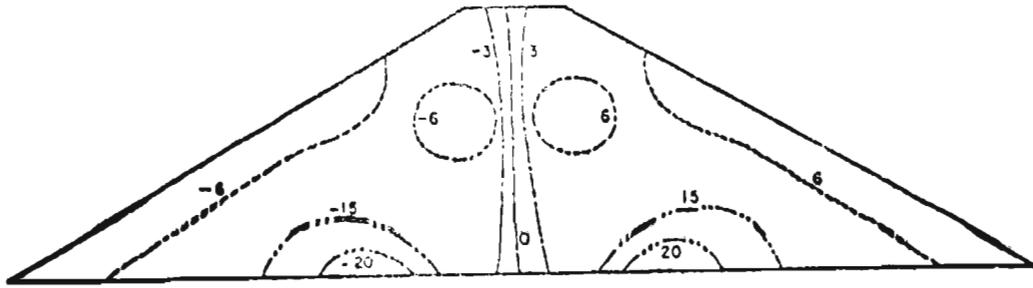
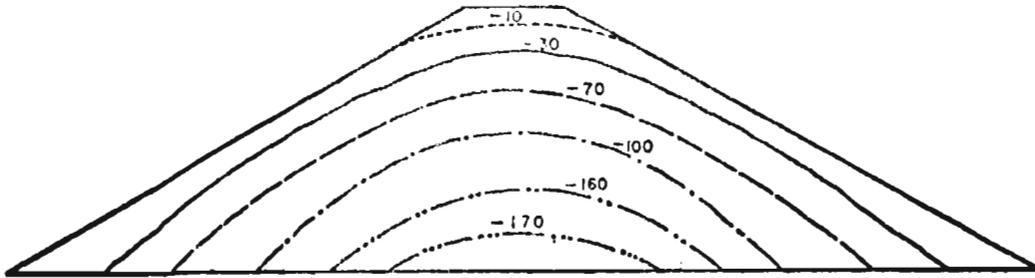


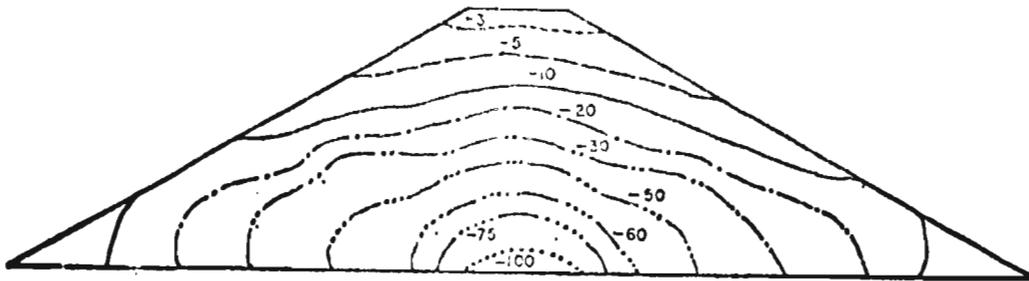
Fig 4.7 Distribución de desplazamientos iniciales



a) Distribución de esfuerzos cortantes, τ_{xy} , en ton/m^2

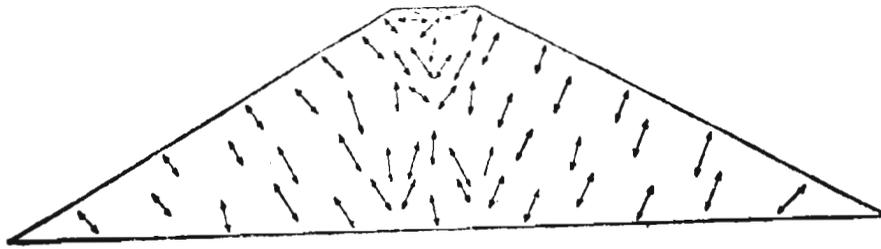


b) Distribución de esfuerzos normales, σ_y , en ton/m^2

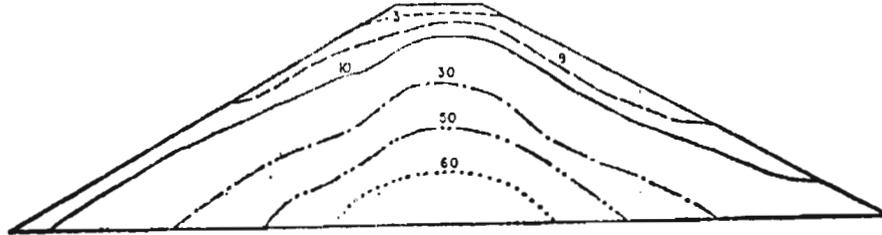


c) Distribución de esfuerzos normales, σ_x , en ton/m^2

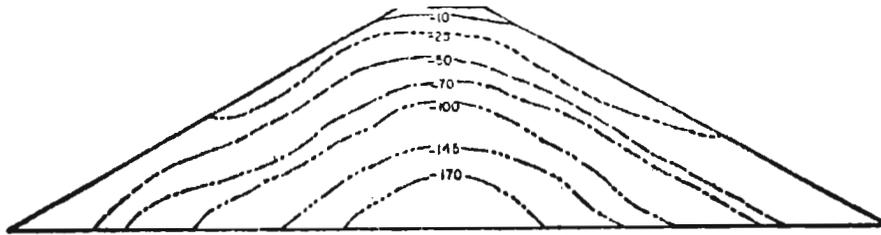
Fig 4.8 Distribución de esfuerzos iniciales



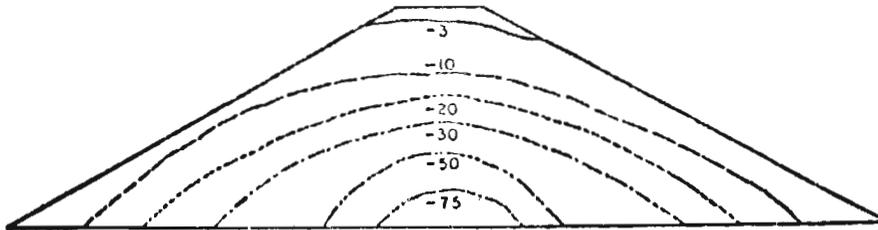
a) Direcciones principales



b) Distribución de esfuerzos cortantes máximos, $\tau_{\text{máx}}$, en ton/m^2



c) Distribución de esfuerzos principales mínimos, $\sigma_{\text{mín}}$, en ton/m^2



d) Distribución de esfuerzos principales máximos, $\sigma_{\text{máx}}$, en ton/m^2

Fig 4.9 Esfuerzos y direcciones principales

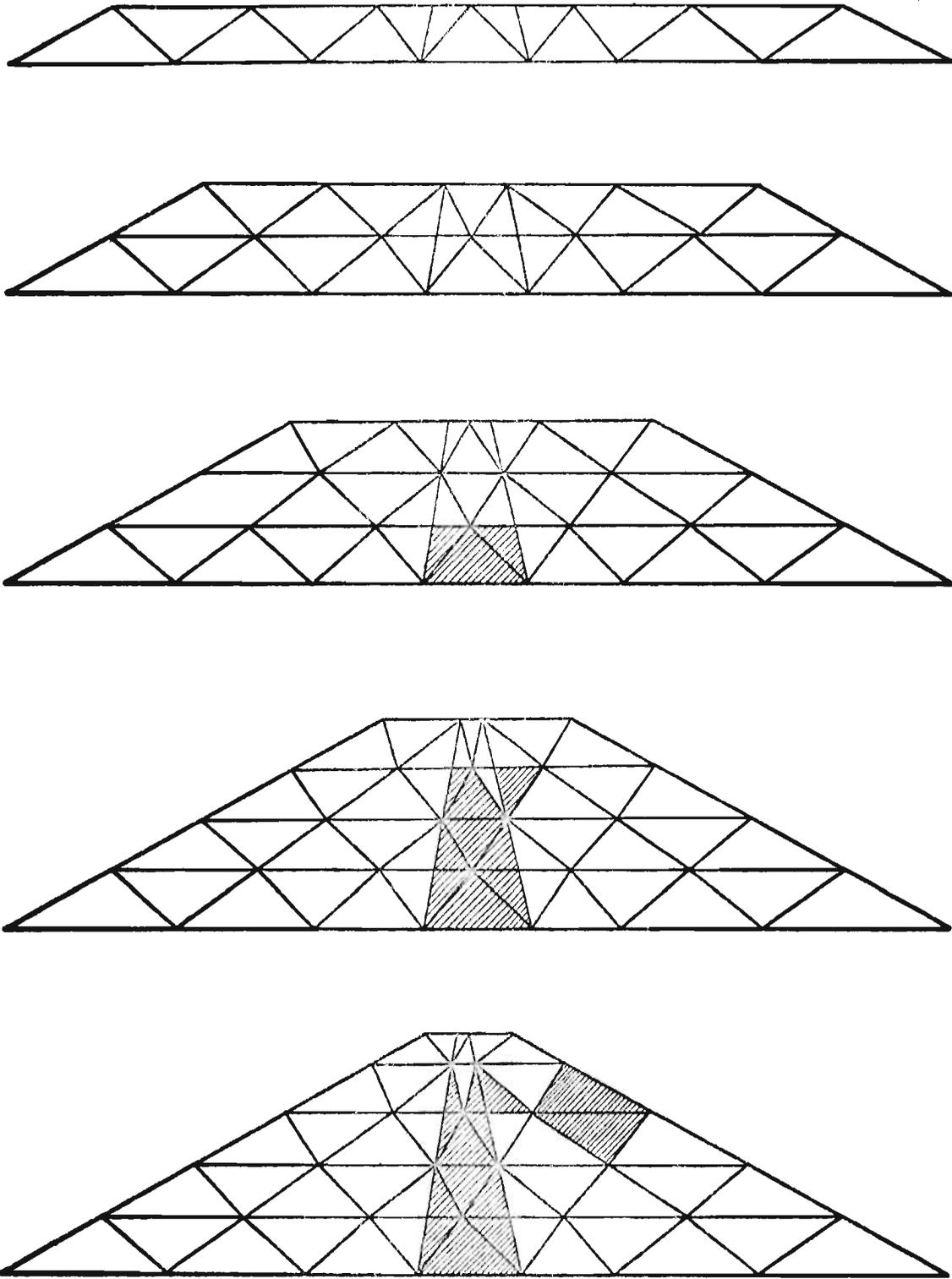
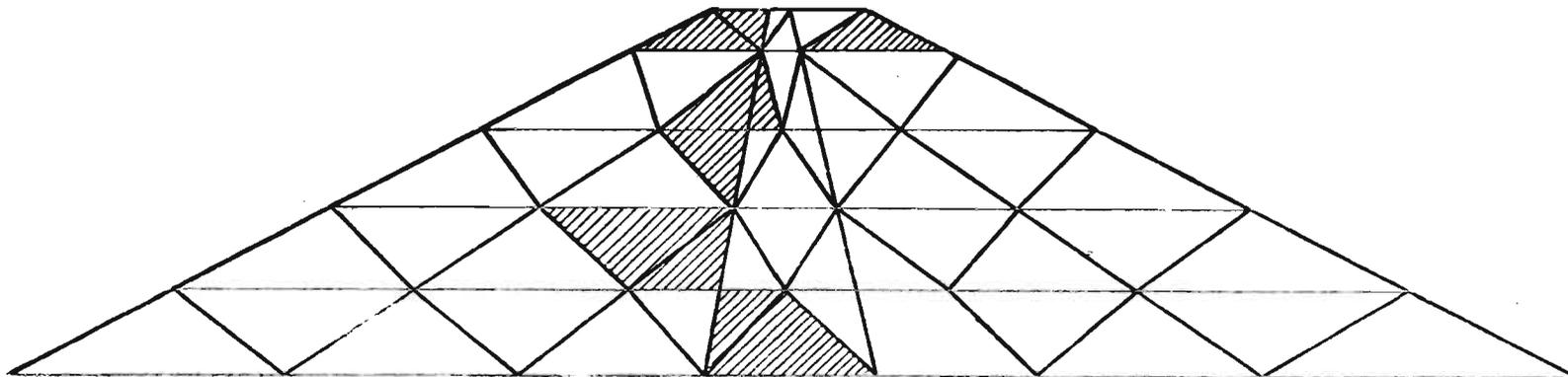
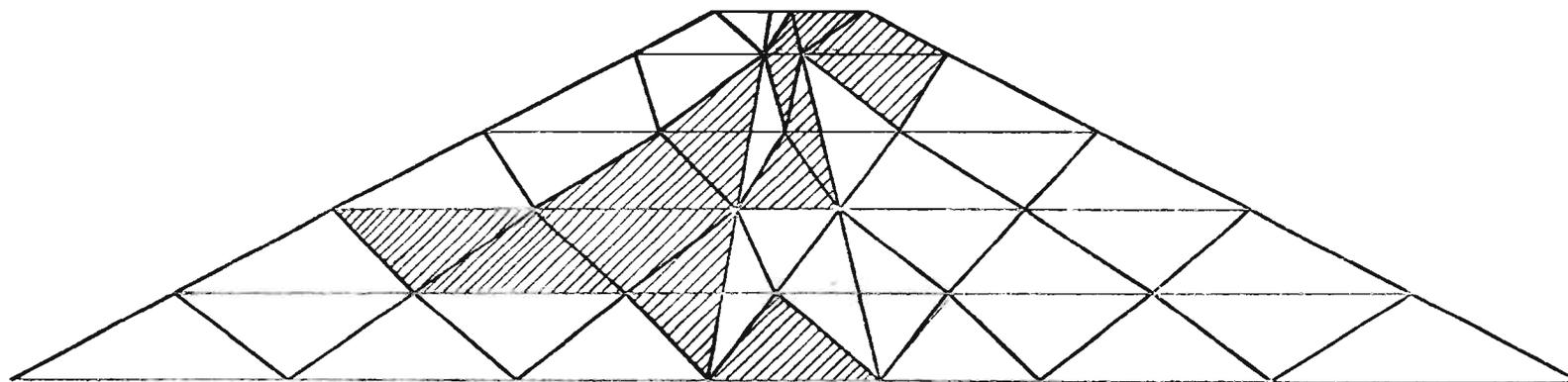


Fig 4.10 Zonas plastificadas de la cortina durante el proceso de construcción



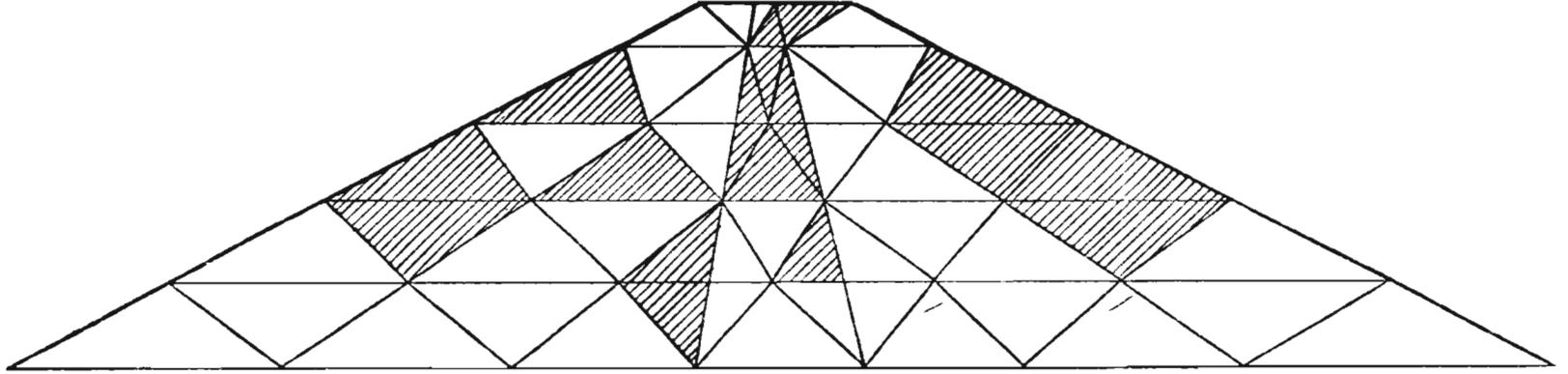
$t = 0$ Seg



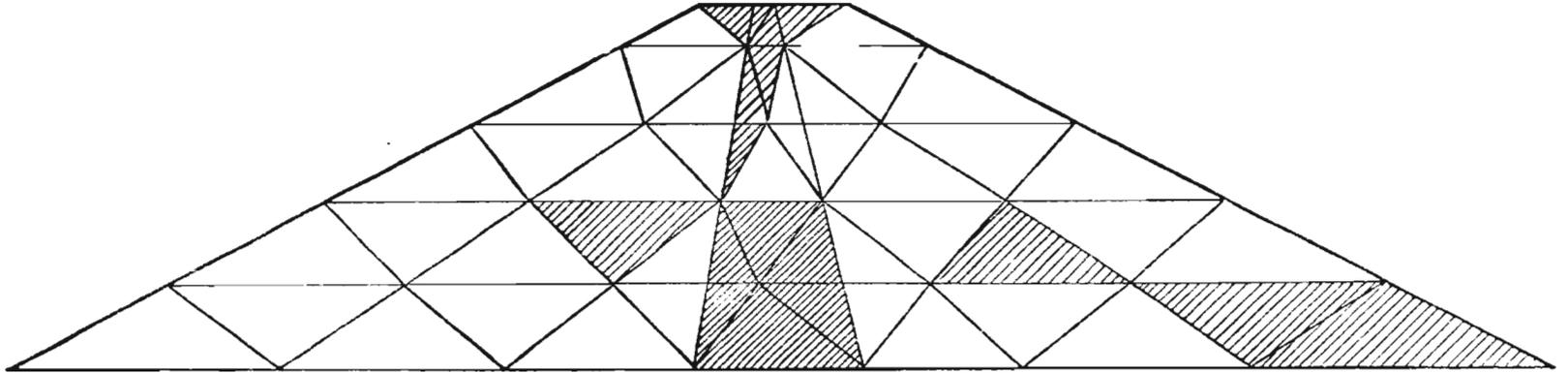
$t = 1$ Seg

Fig 4.15. Zonas plastificadas para distintos tiempos

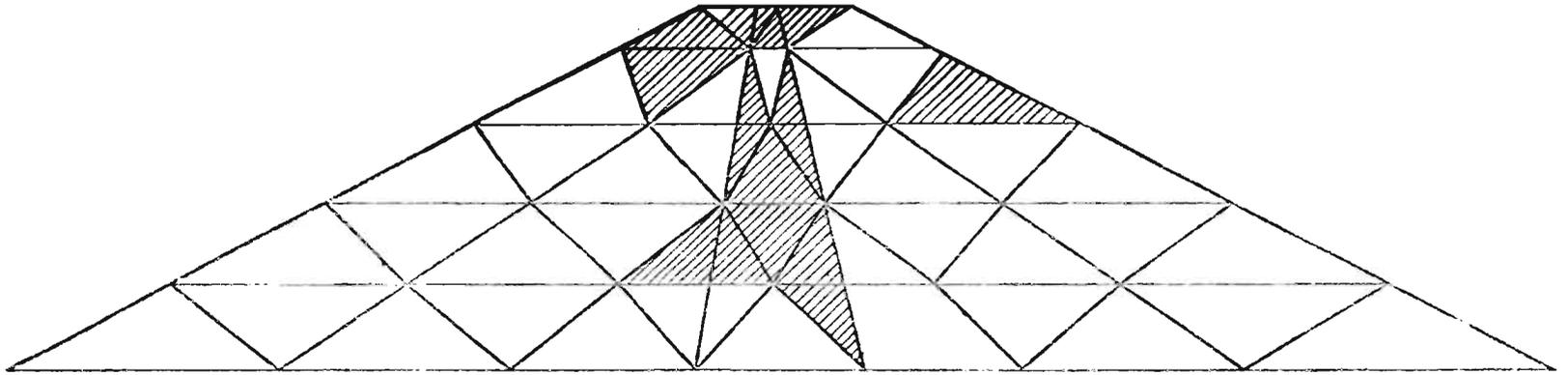
A la hoja siguiente



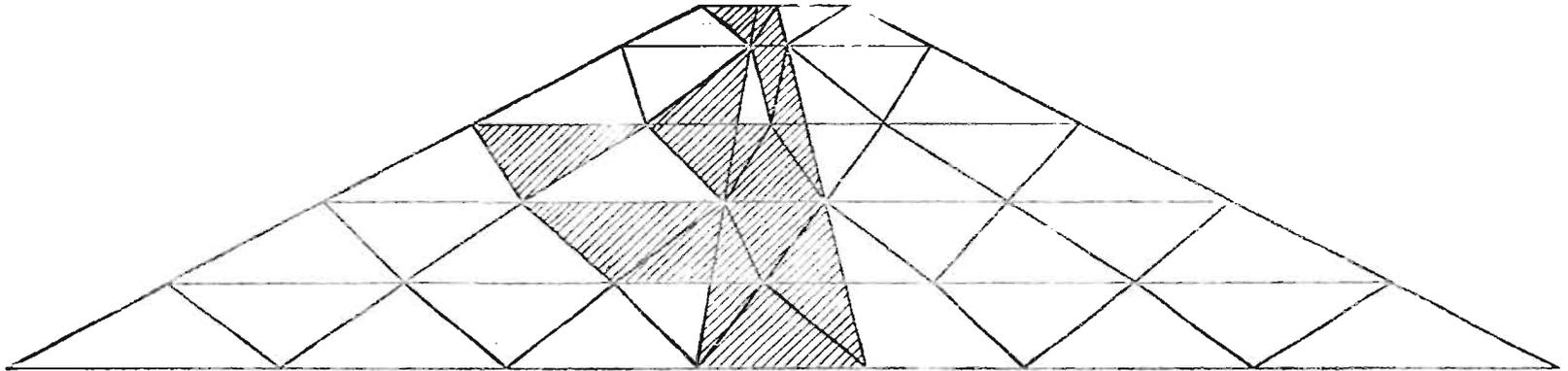
f = 2 Seg.



f = 3 Seg.

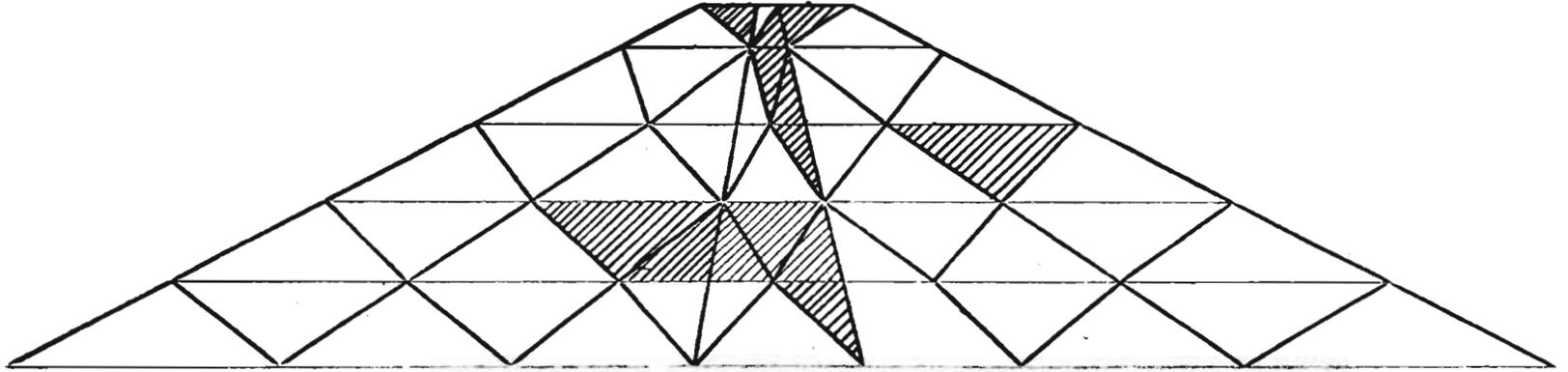


$t = 4$ Seg

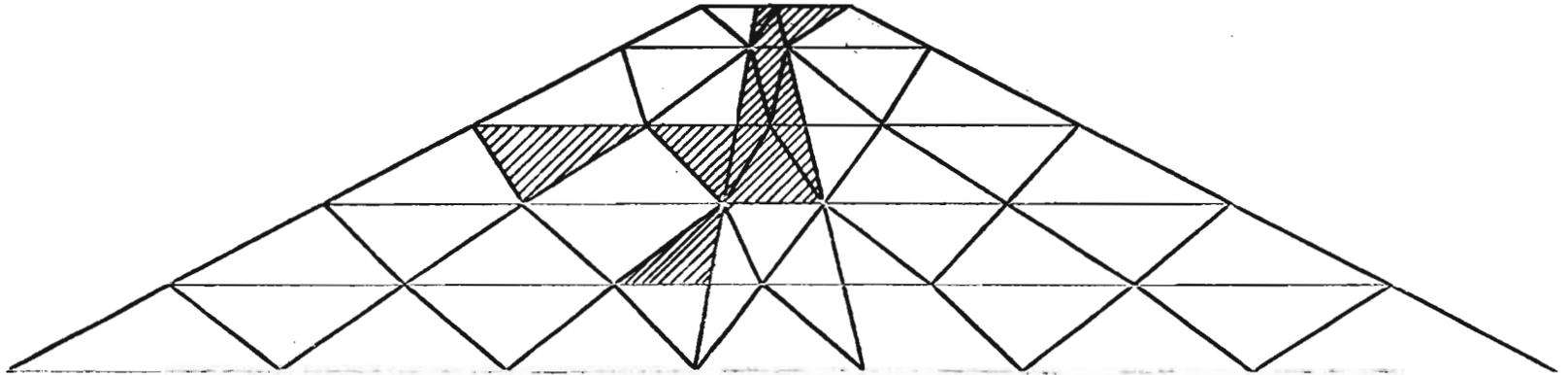


$t = 5$ Seg

Continua

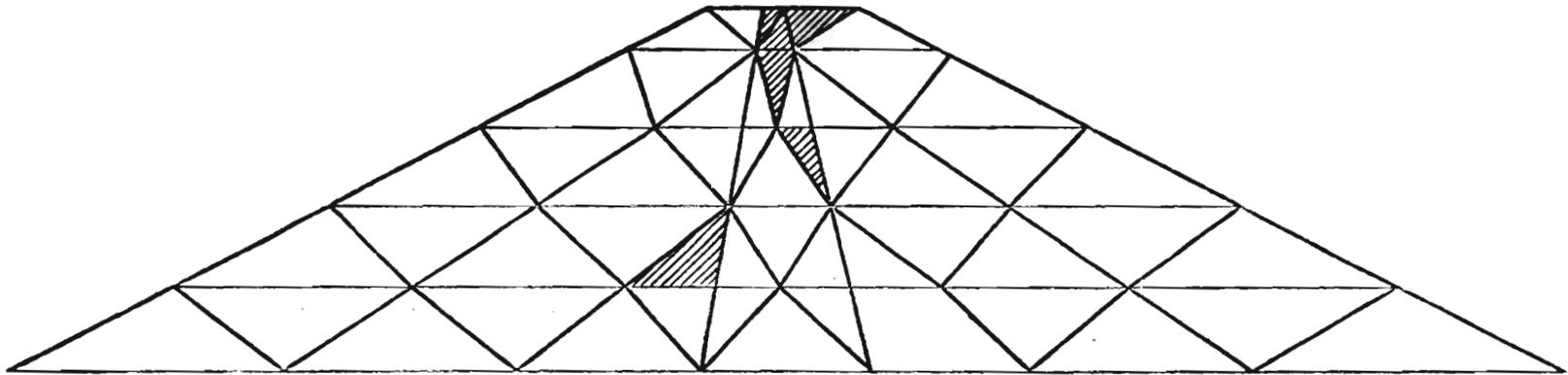


$t = 6 \text{ Seg}$

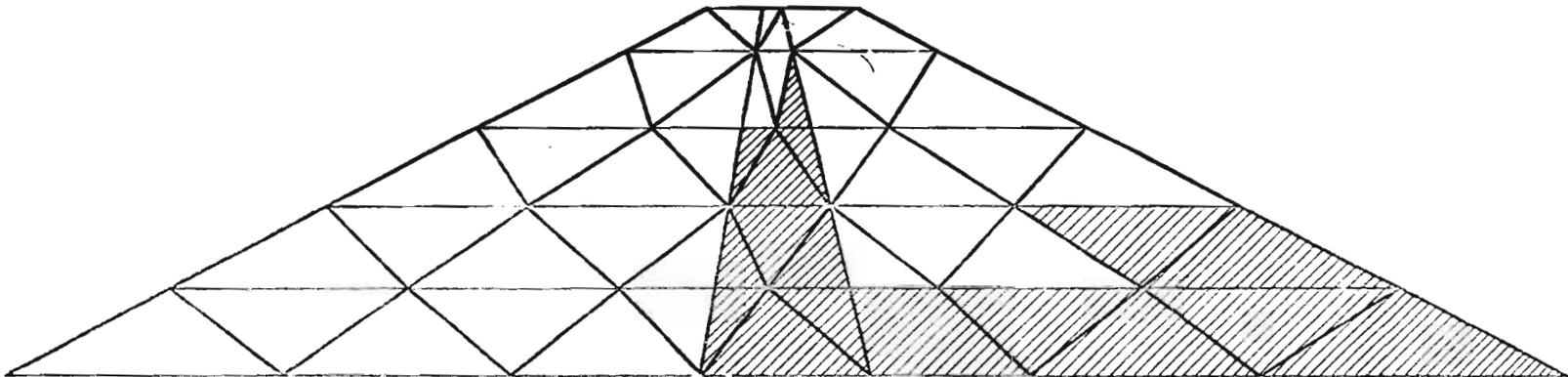


$t = 7 \text{ Seg}$

Continua ...

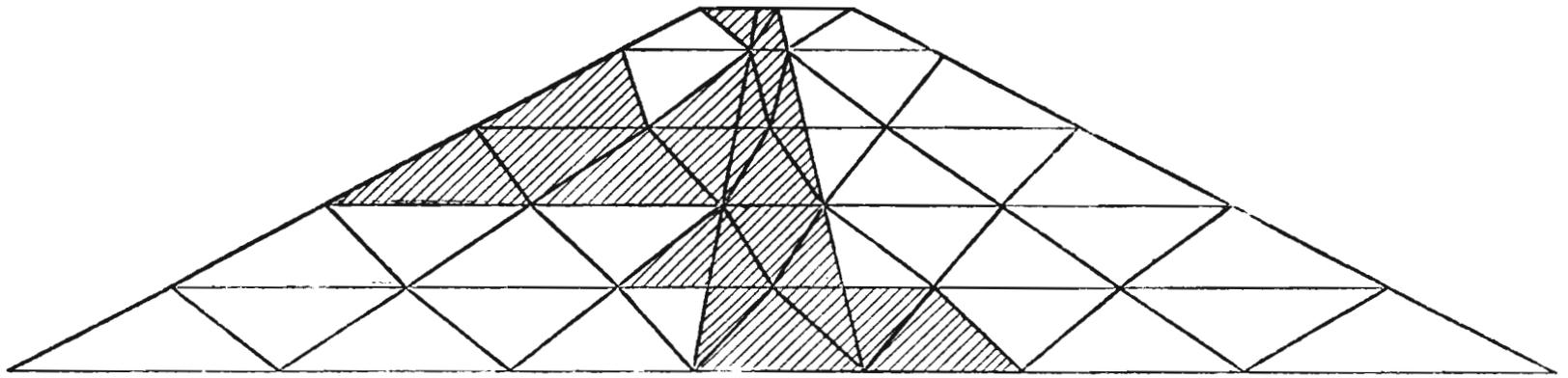


f = 8 Seg



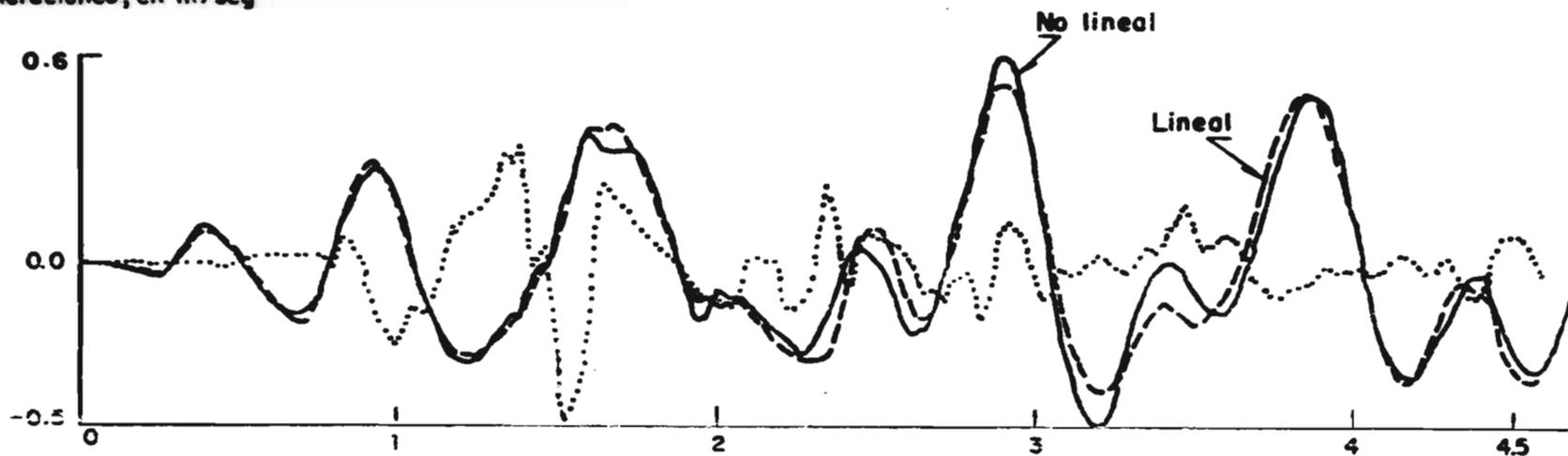
f = 9 Seg

Continua



t = 10 Seg

Aceleraciones, en m/sec^2



-63-

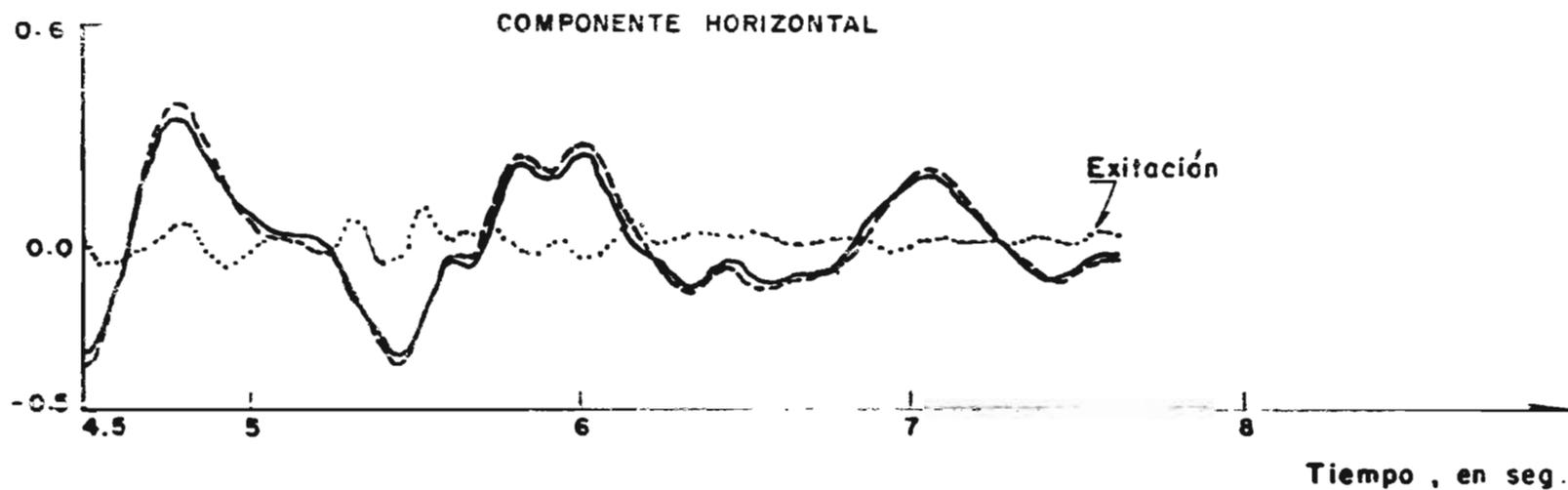


Fig 4.11 a Variación de aceleraciones absolutas durante el temblor 1, en el punto nodal 10 de la presa

Aceleraciones en m/seg^2

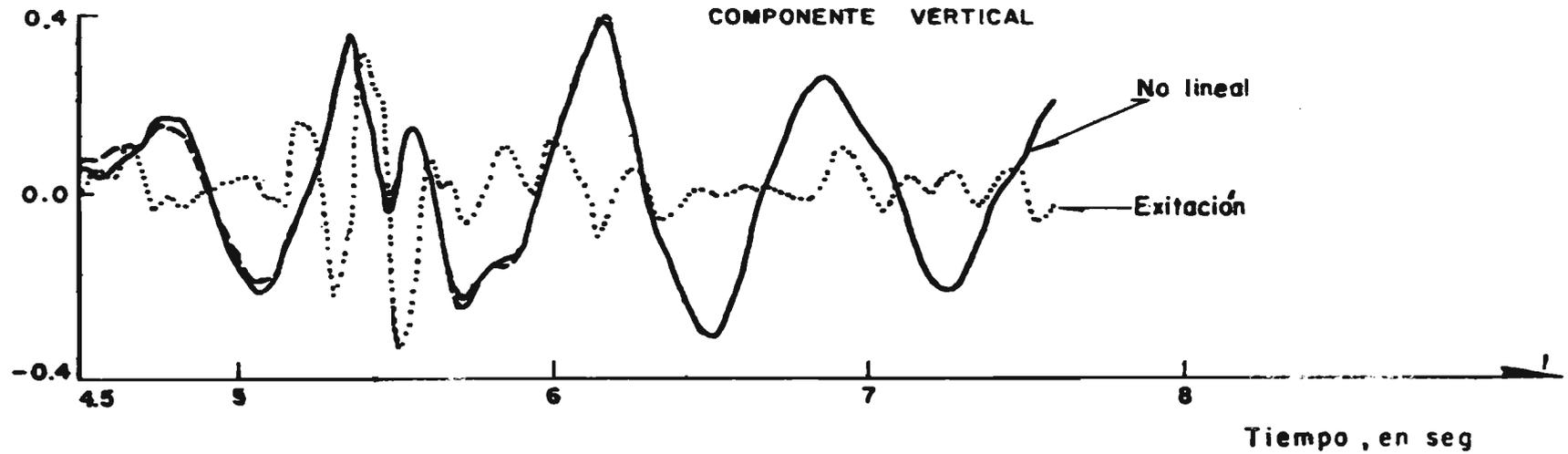
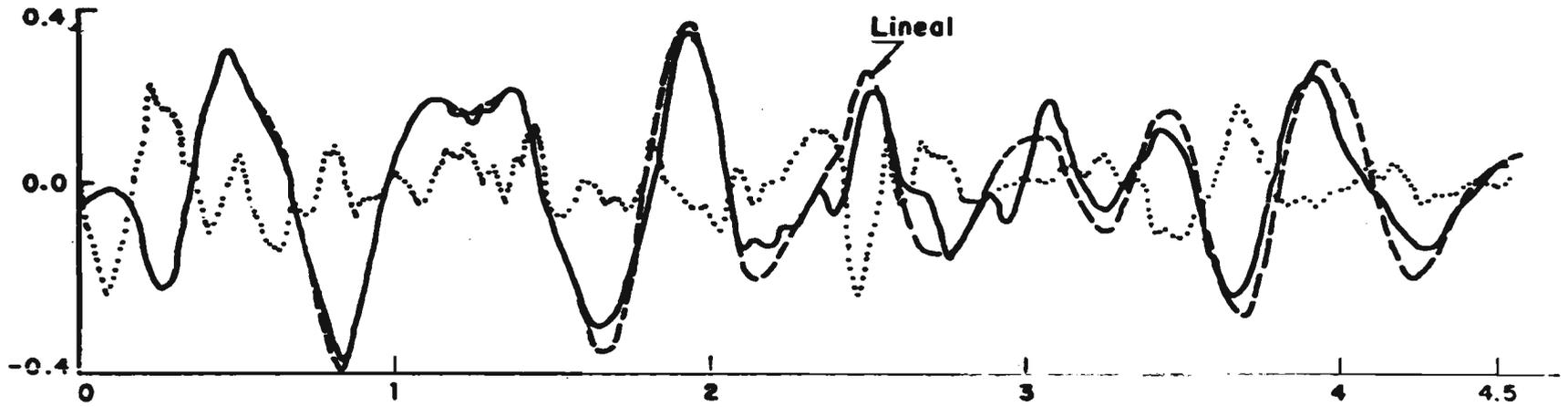


Fig 4.ii b Variación de aceleraciones absolutas durante el temblor 1 en el punto nodal 10 de la presa

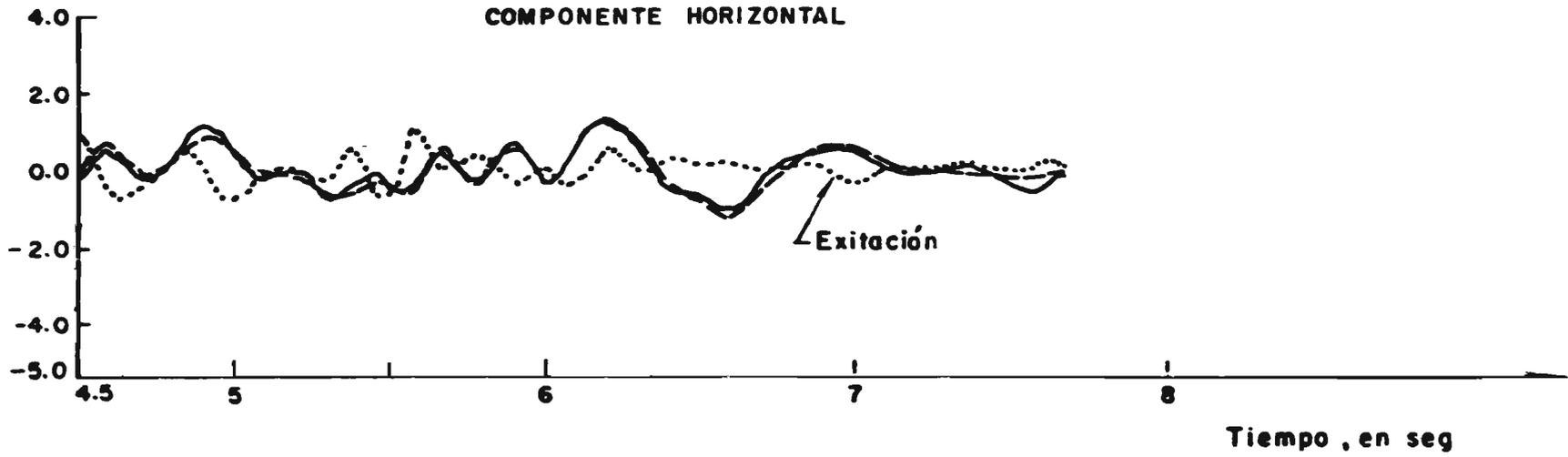
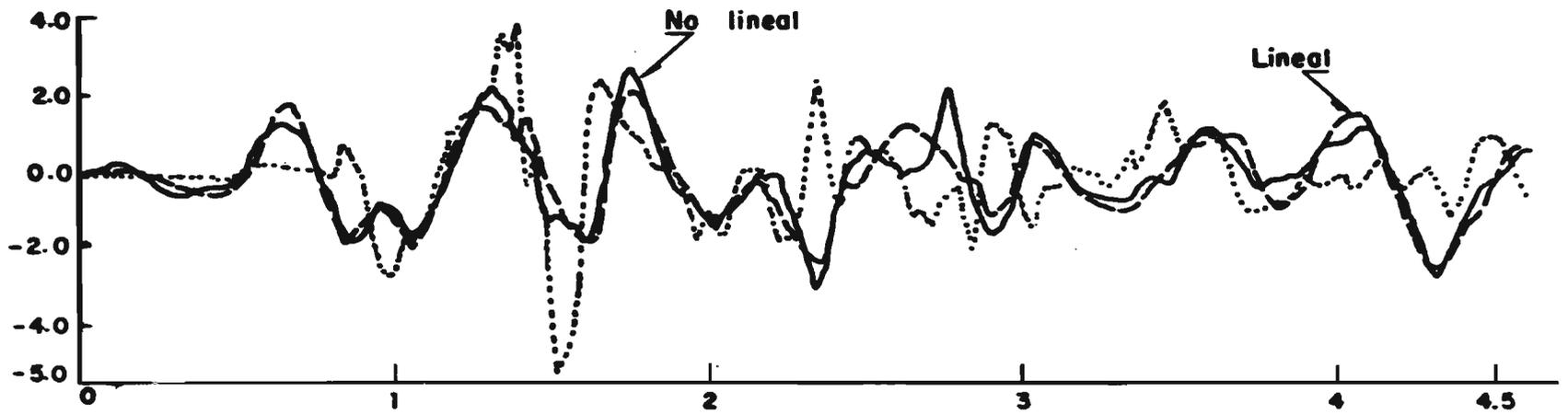
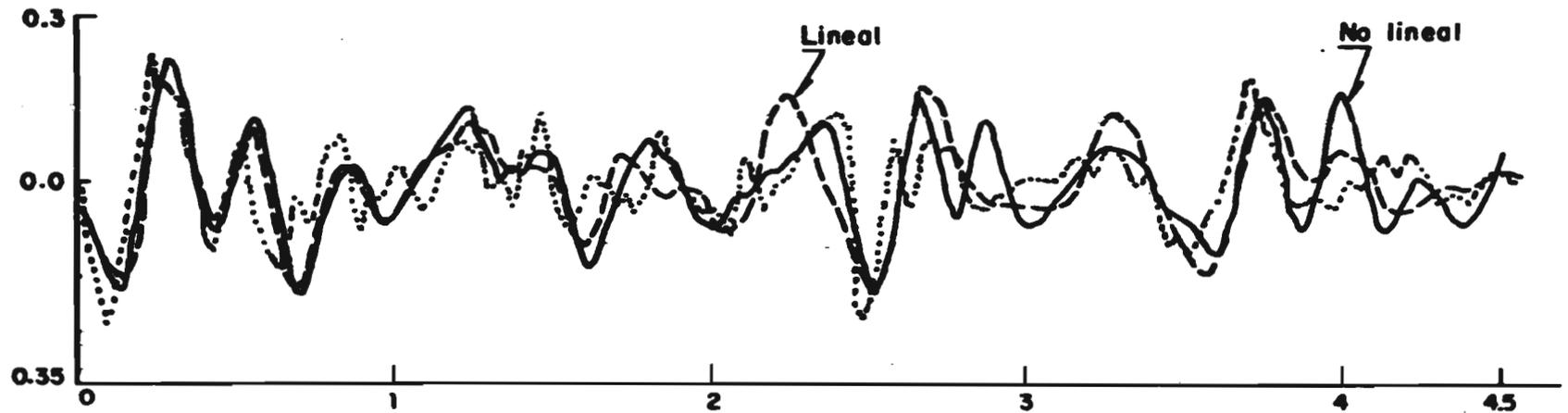


Fig 4.11 c Variación de aceleraciones absolutas durante el temblor 1 en el punto nodal 18 de la presa

ACELERACIONES, en m/s²



COMPONENTE VERTICAL

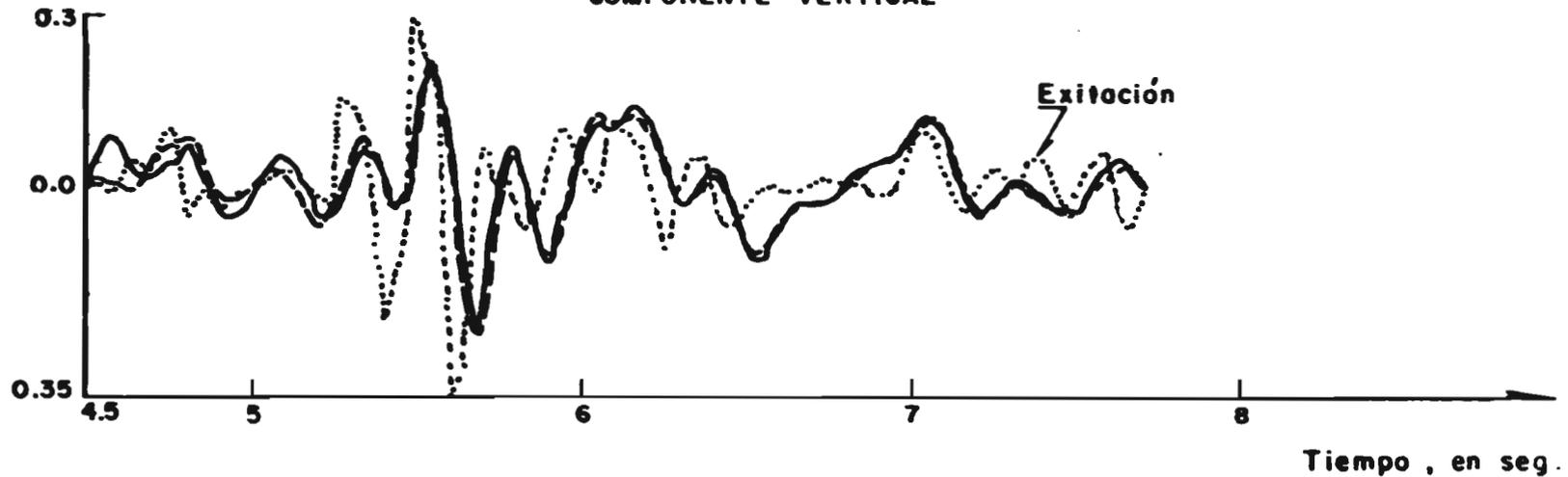
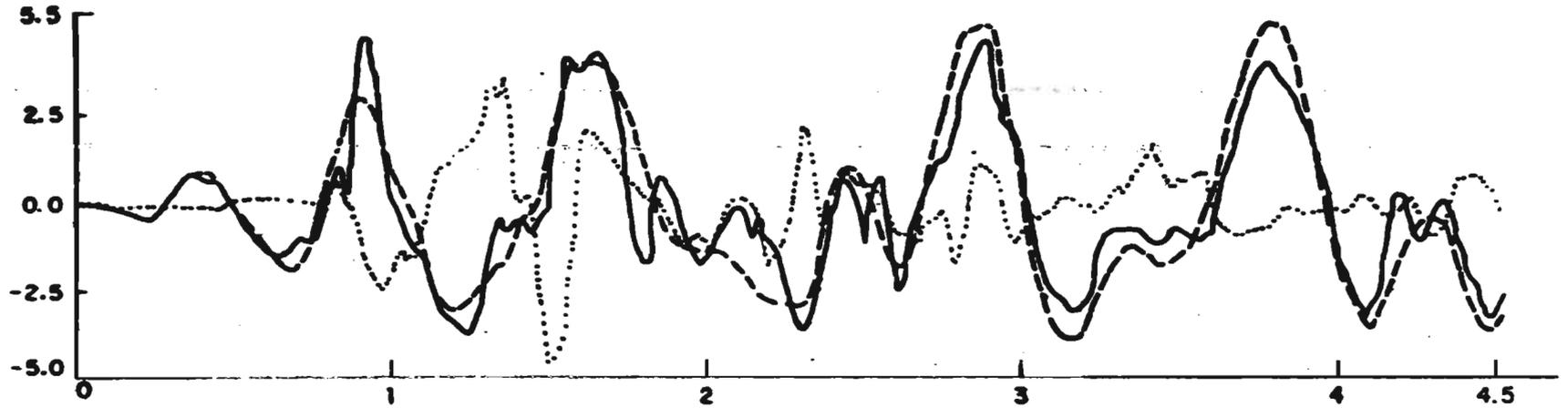


Fig 4.11 d Variación de aceleraciones absolutas durante el temblor 1, en el punto nodal 18 de la presa

Aceleraciones, en m/seg^2



COMPONENTE HORIZONTAL

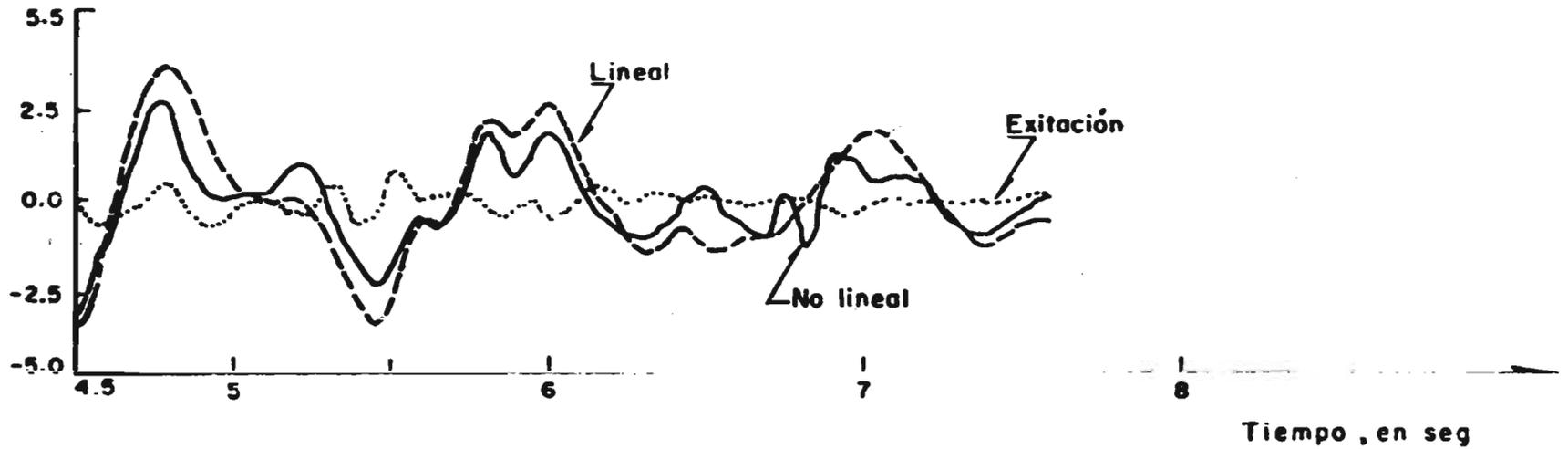
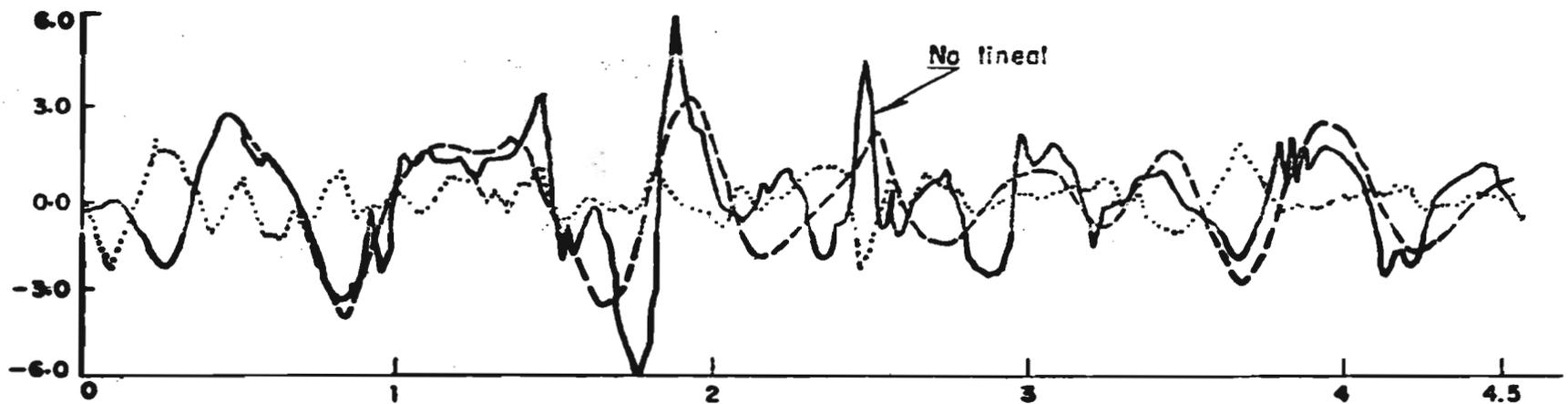
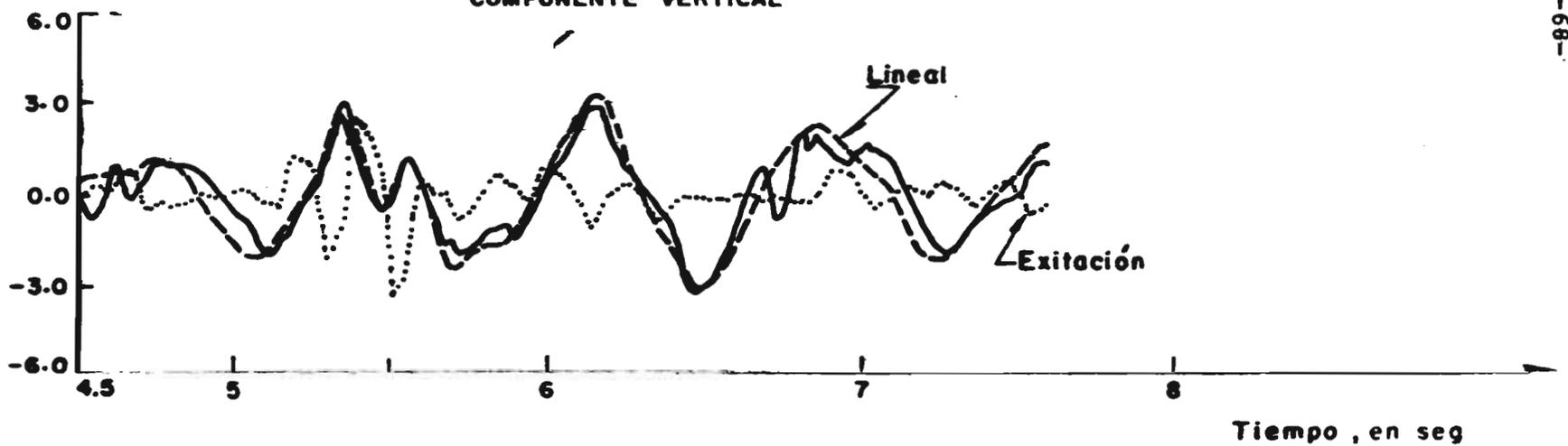


Fig 4.11 e Variación de aceleraciones absolutas durante el temblor 2 en el punto nodal 10 de la presa

Aceleraciones, en m/seg^2



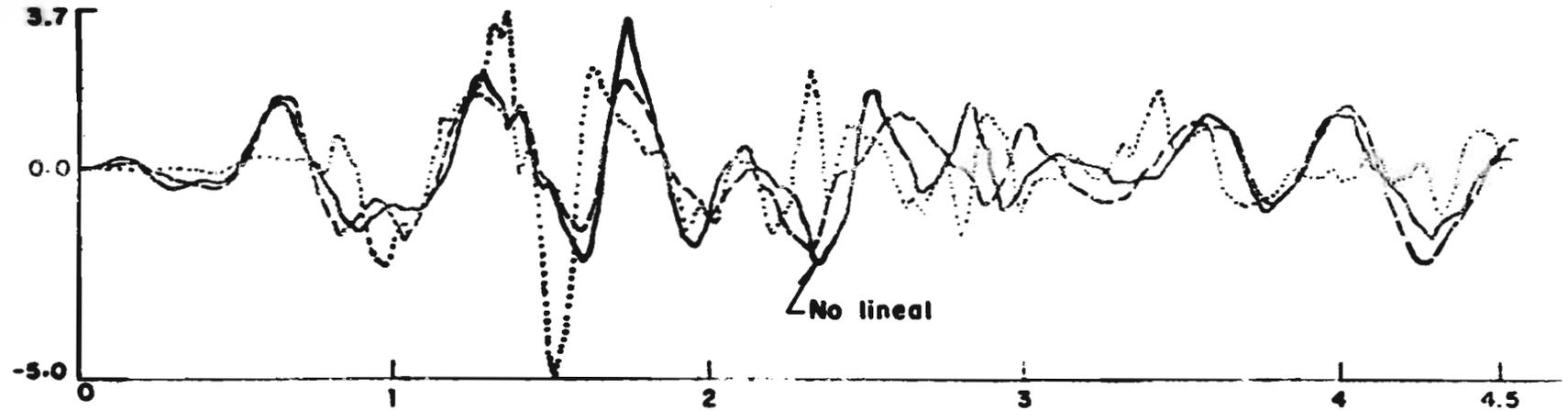
COMPONENTE VERTICAL



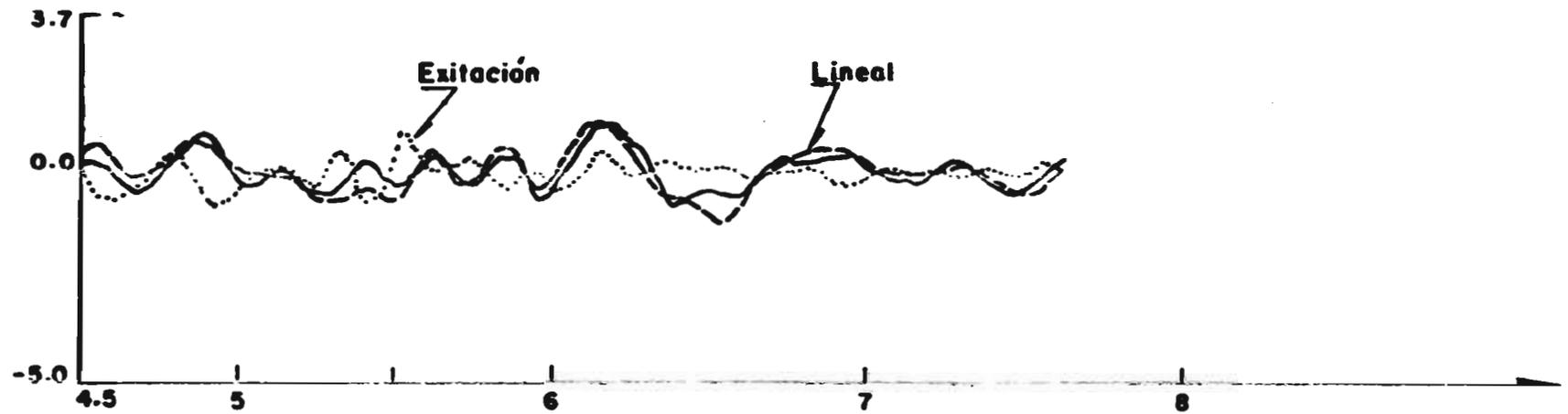
-69-

Fig 4.11 f Variación de aceleraciones absolutas durante el temblor 2 en el punto nodal 10 de la presa

Aceleraciones, en m/seg^2



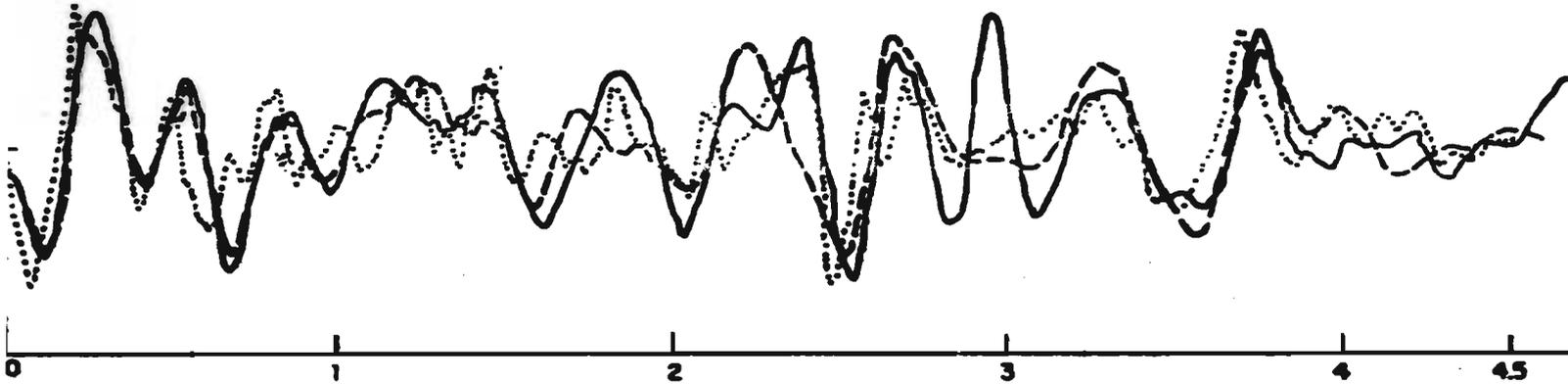
COMPONENTE HORIZONTAL



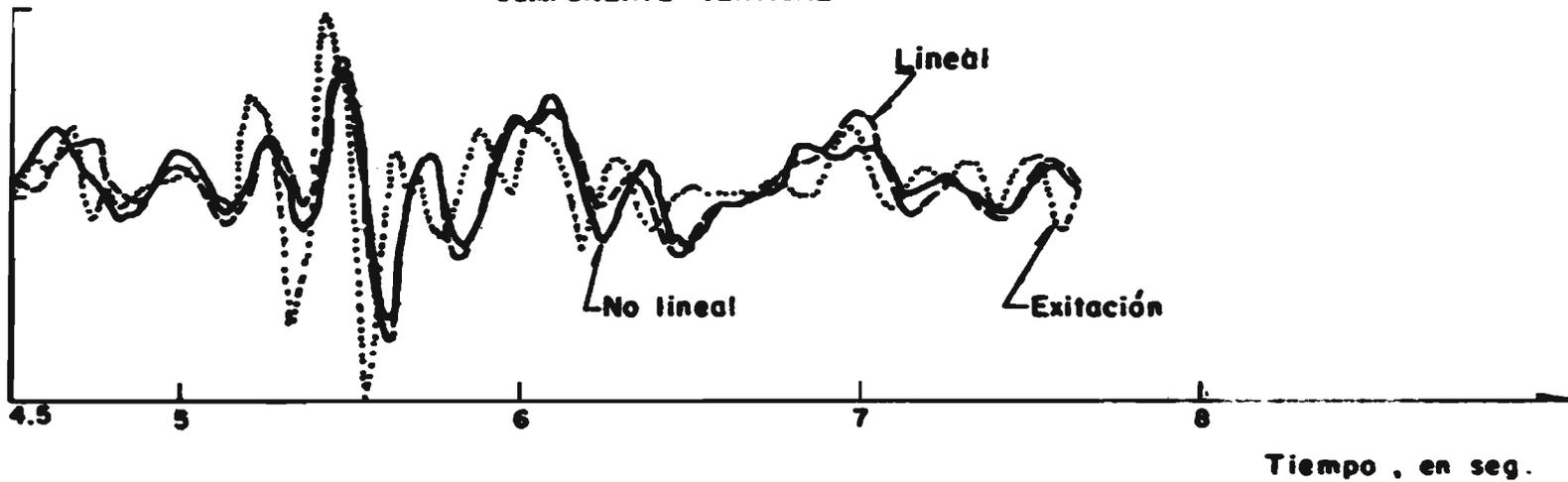
Tiempo, en seg

Fig 4.11 g Variación de aceleraciones absolutas durante el temblor 2 en el punto nodal 18 de la presa

es, en m/seg^2



COMPONENTE VERTICAL



-70-

Fig 4.11 h Variación de aceleraciones absolutas durante el temblor 2, en el punto nodal 18 de la presa

Desplazamientos, en m

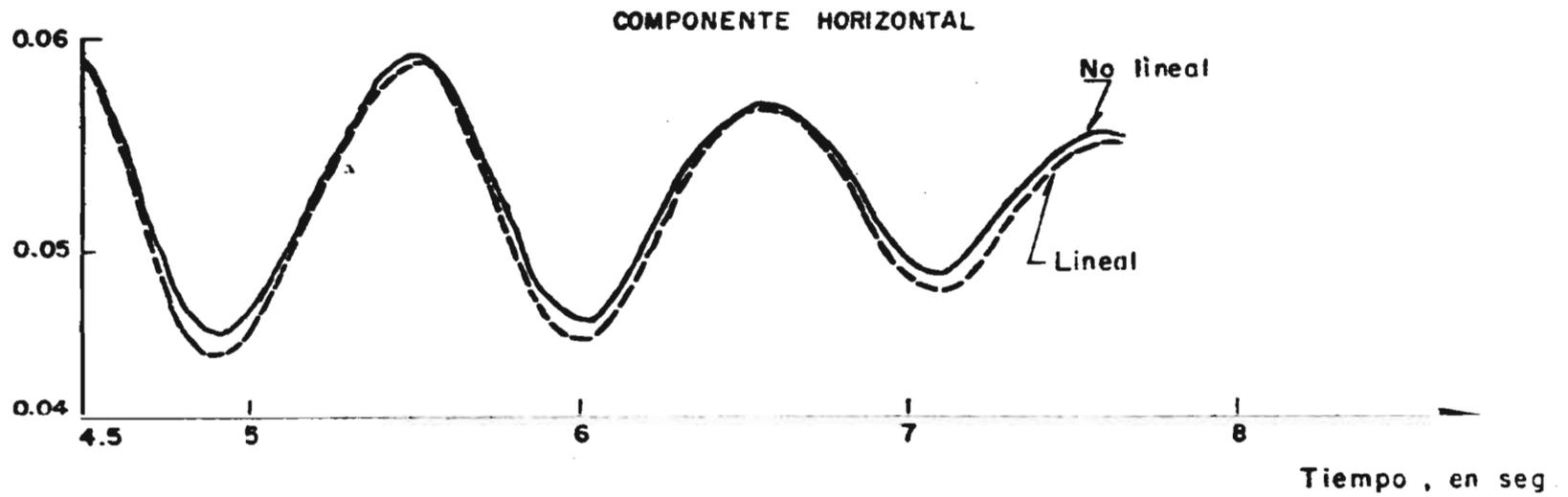
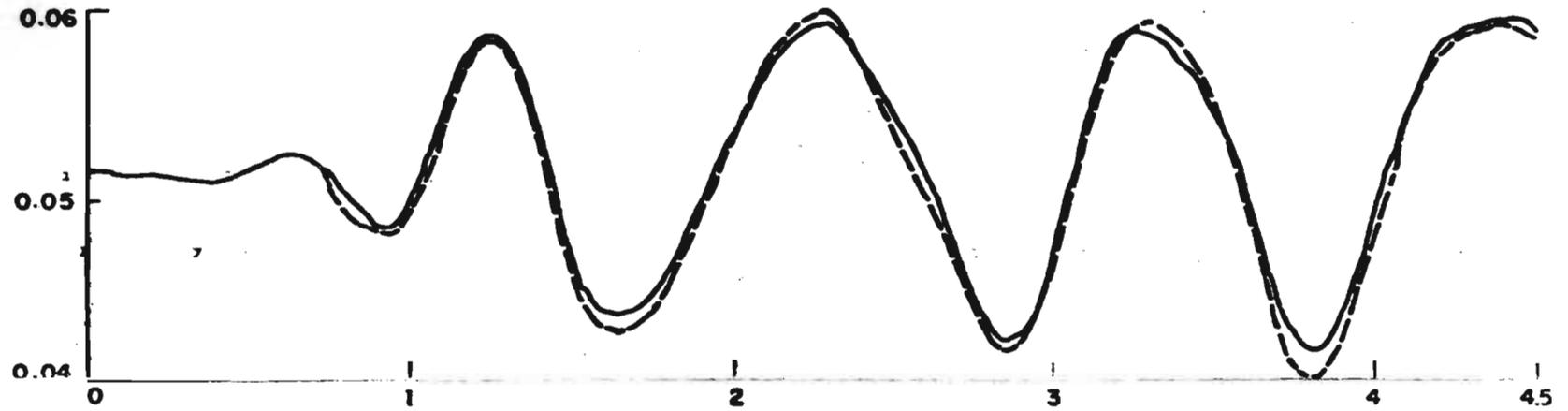


Fig 4.11 λ Variación de desplazamientos relativos durante el temblor 1, en el punto nodal 10 de la presa

Desplazamientos , en m

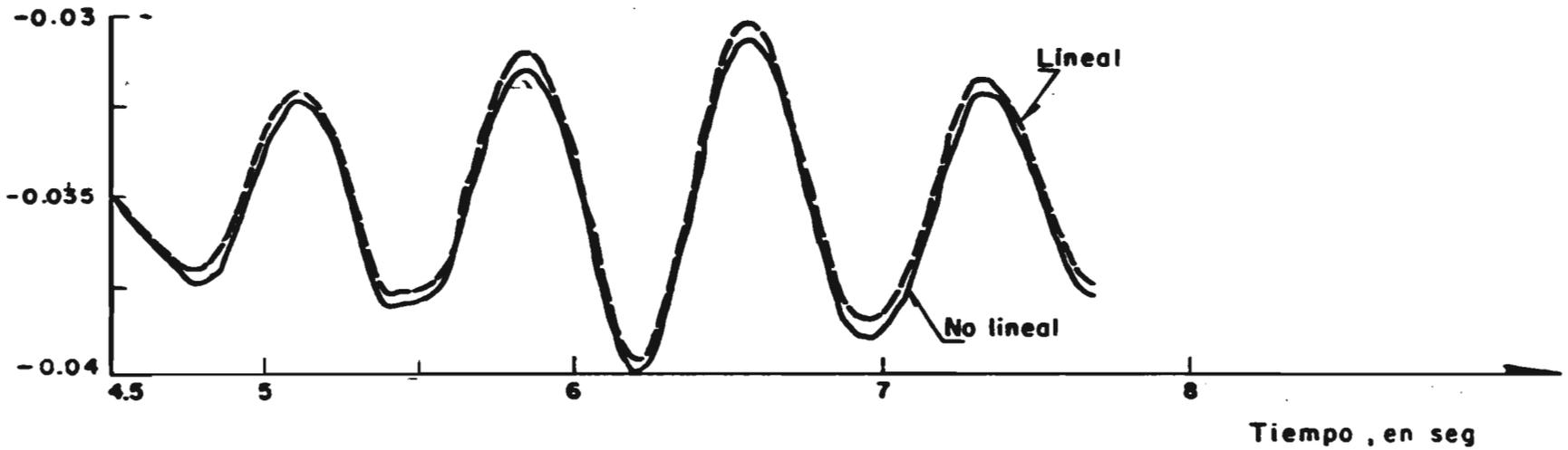
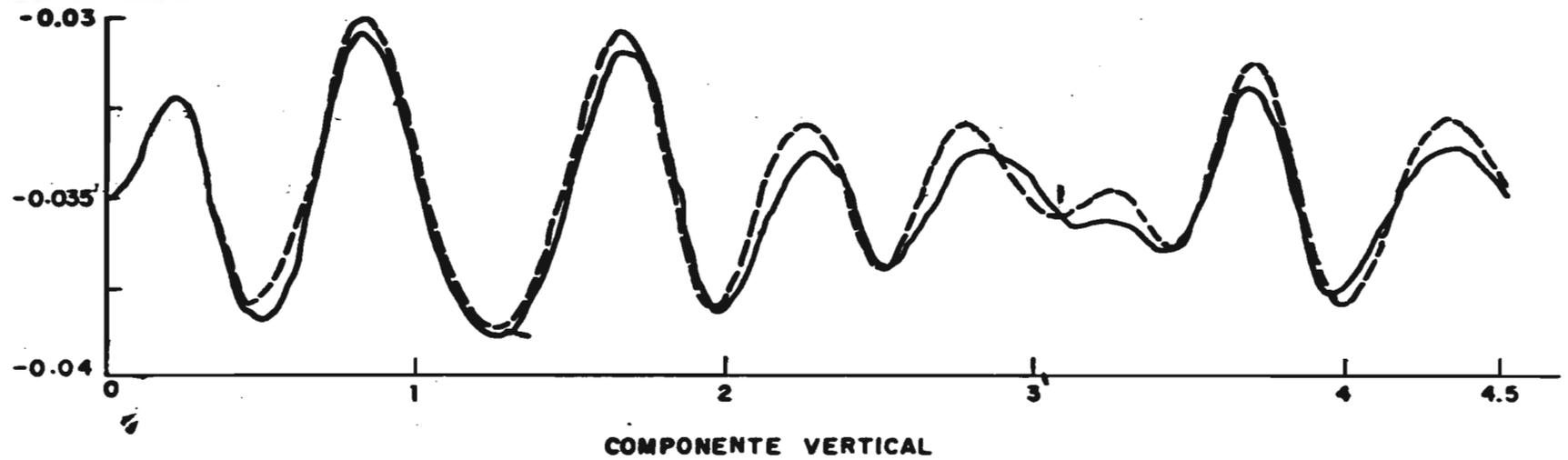
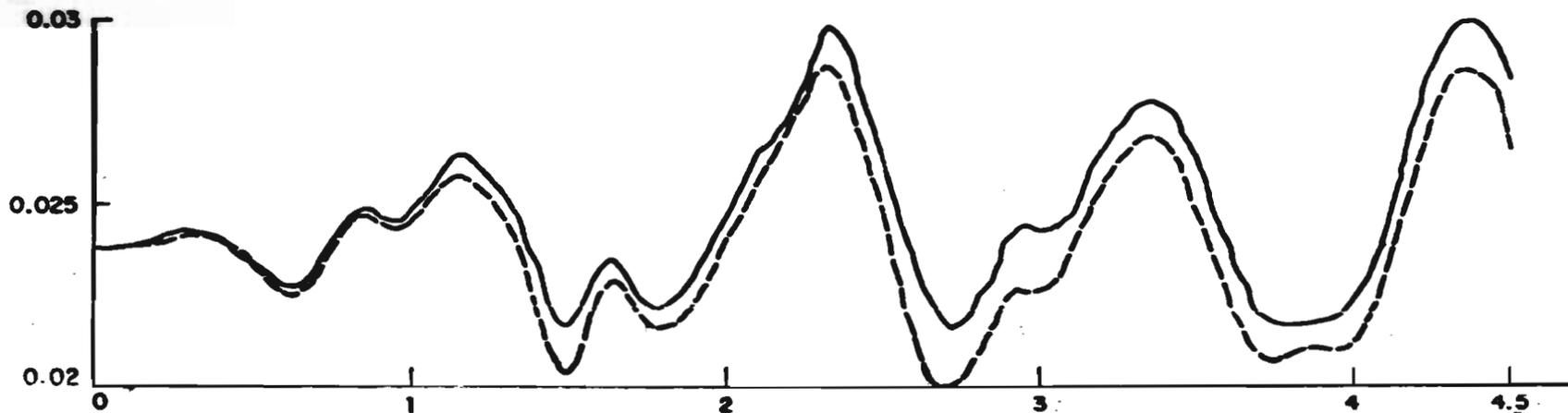


Fig 4.11 j Variación de desplazamientos relativos durante el temblor 1 en el punto nodal 10 de la presa

Desplazamientos, en m



-73-

Desplazamientos, en m

COMPONENTE HORIZONTAL

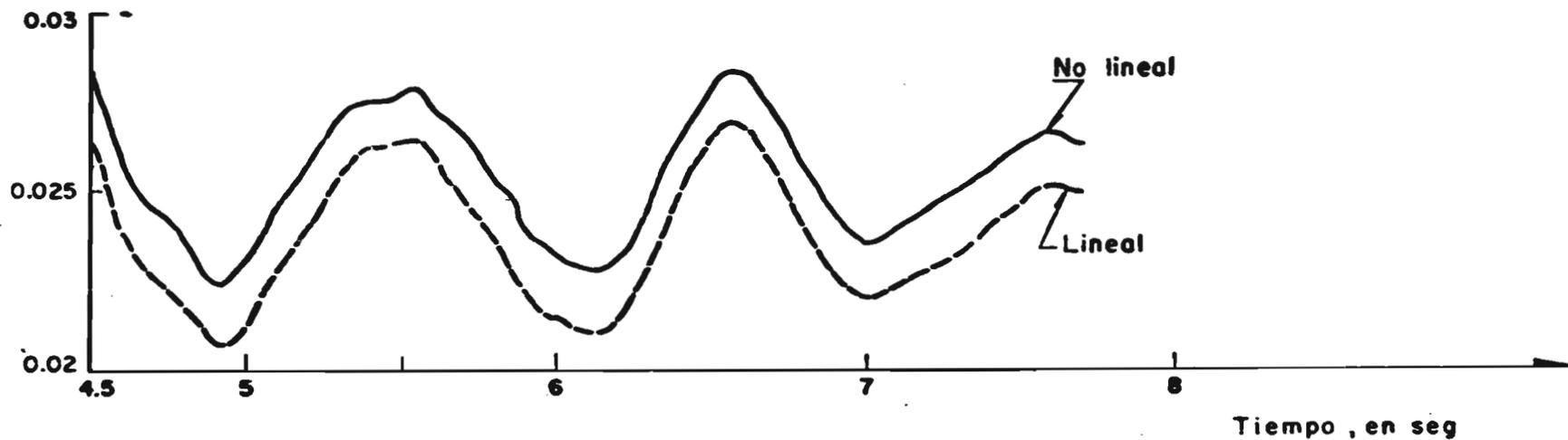
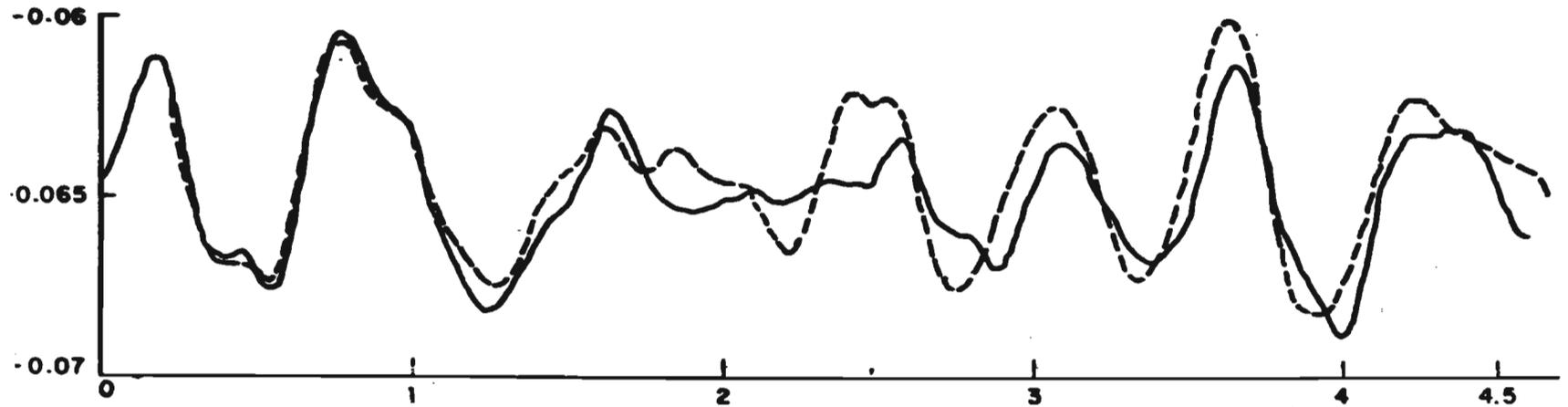


Fig 4.11 k Variación de desplazamientos relativos durante el temblor 1 en el punto nodal 18 de la presa

Desplazamientos, en m



COMPONENTE VERTICAL

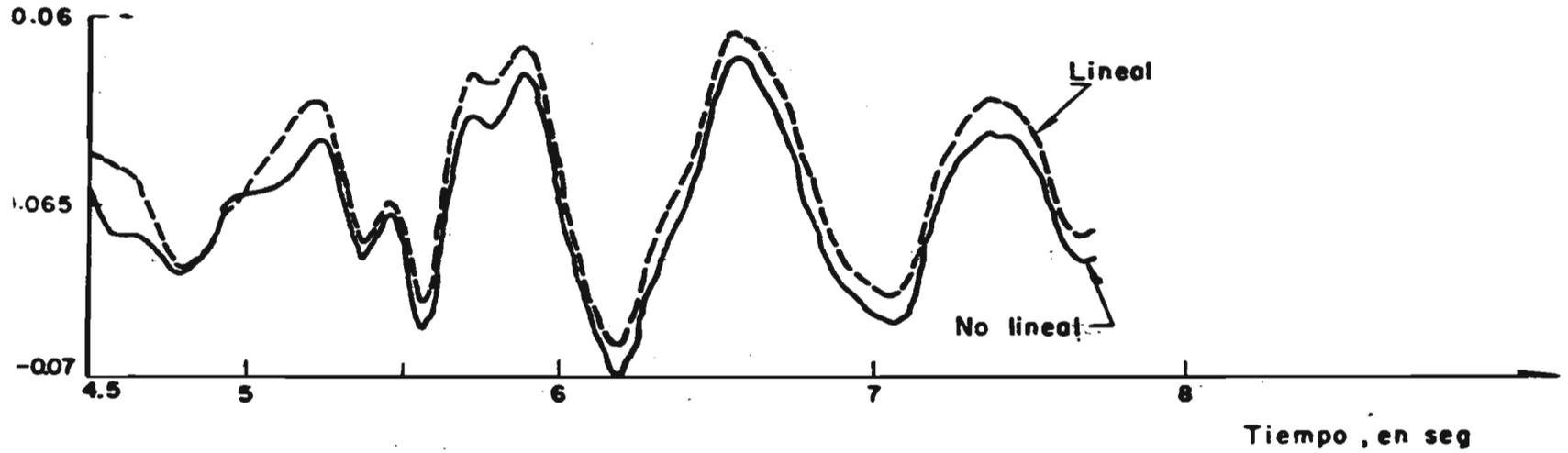


Fig 4.11 Variación de desplazamientos relativos durante el temblor I en el punto nodal 18 de la presa

Desplazamientos en m

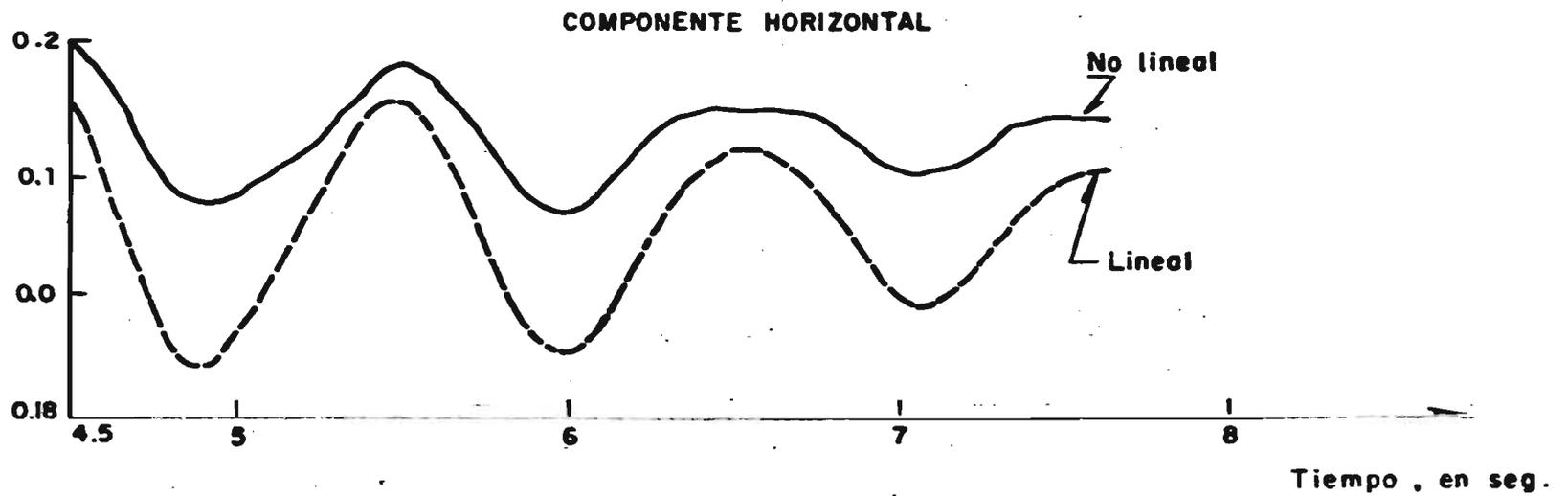
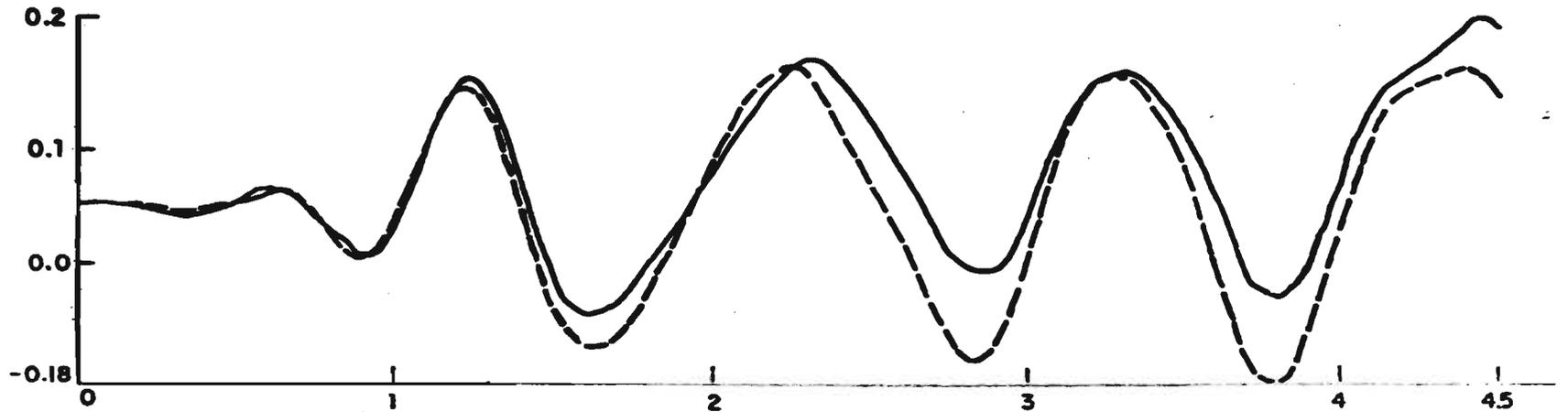
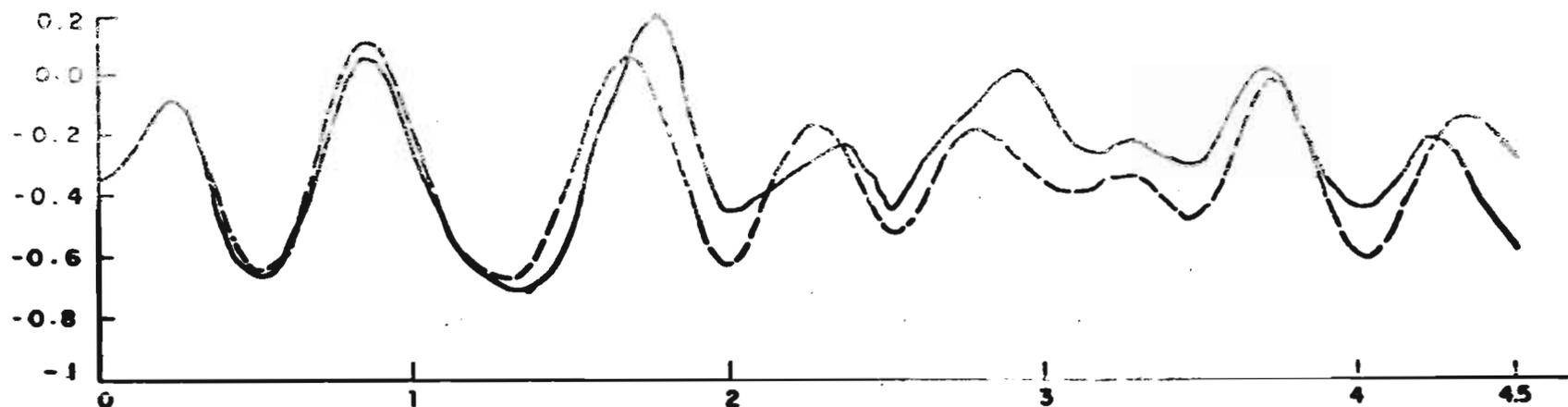


Fig 4.11m Variación de desplazamientos relativos durante el temblor 2 , en el punto nodal 10 de la presa

Desplazamientos, en m



COMPONENTE VERTICAL

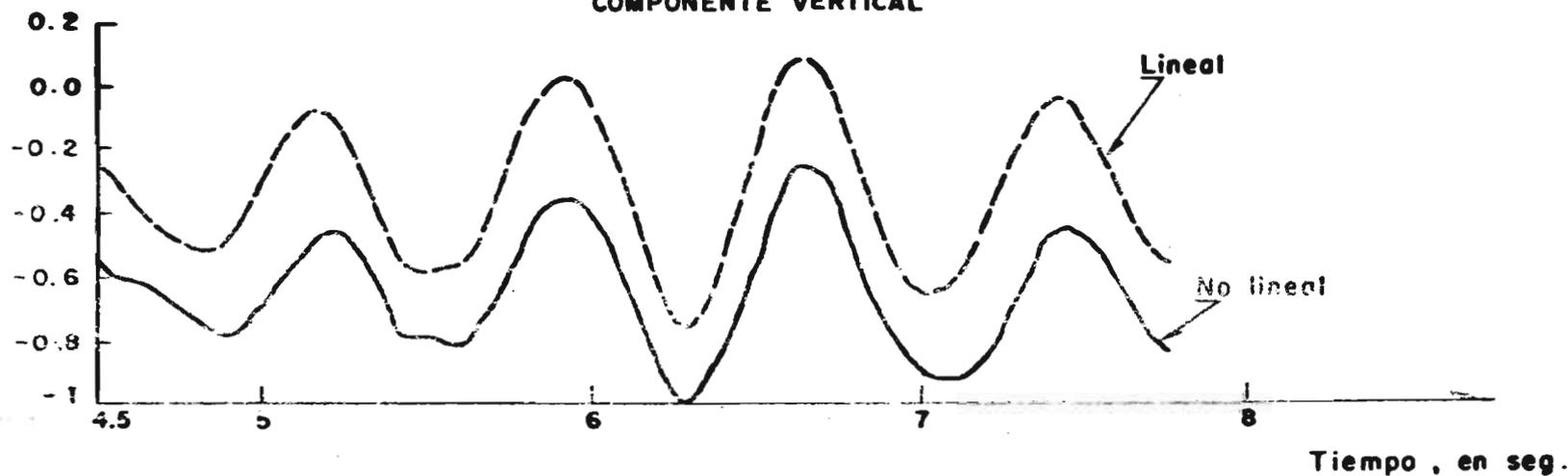
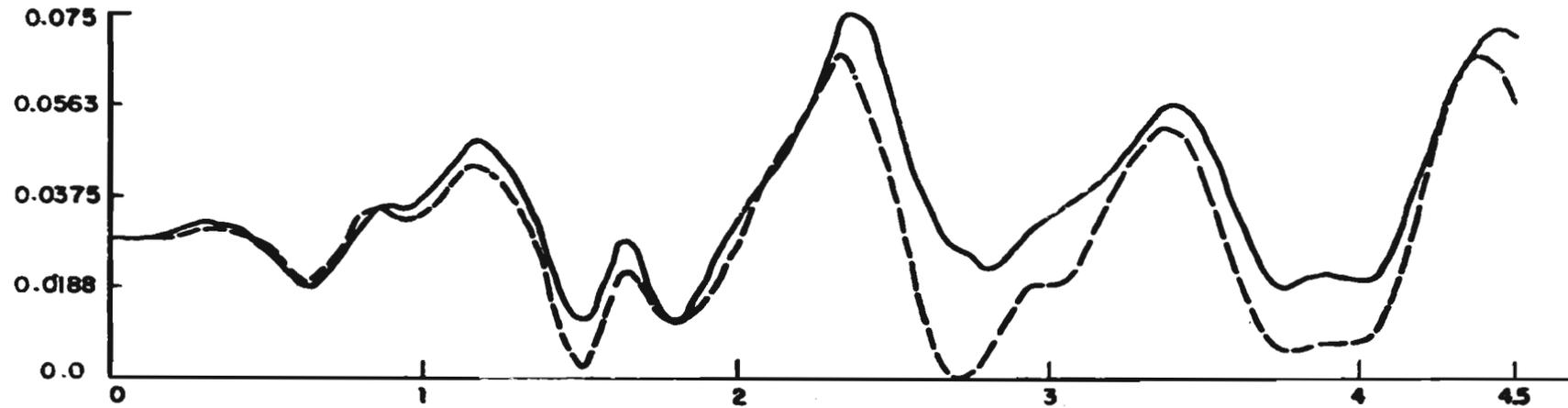
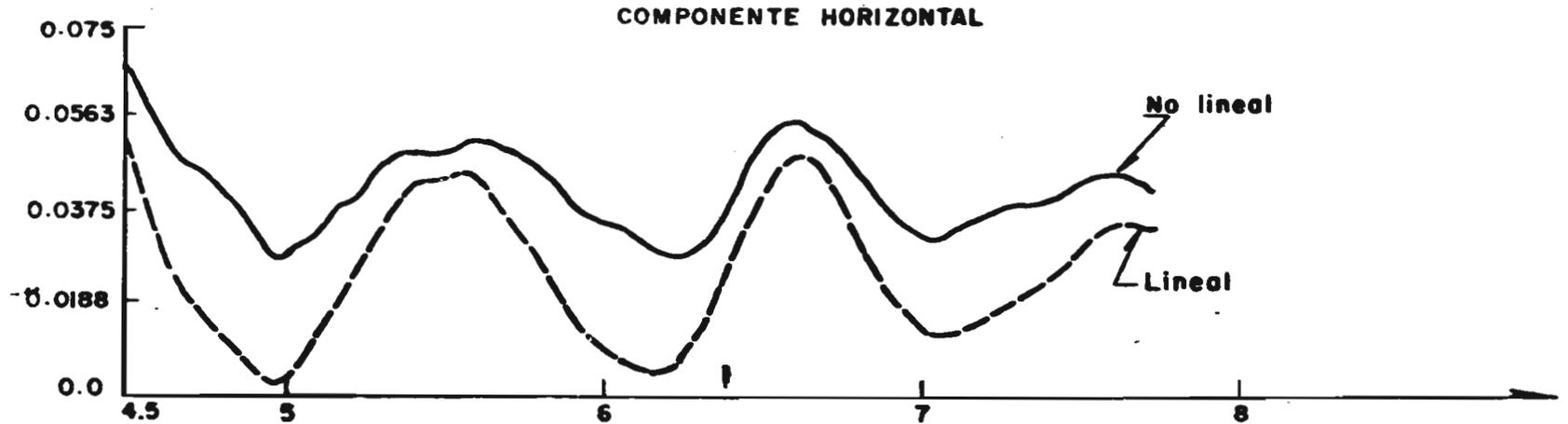


Fig 4 II n Variación de desplazamientos relativos durante el temblor 2, en el punto nodal 10 de la presa.

Desplazamientos, en m



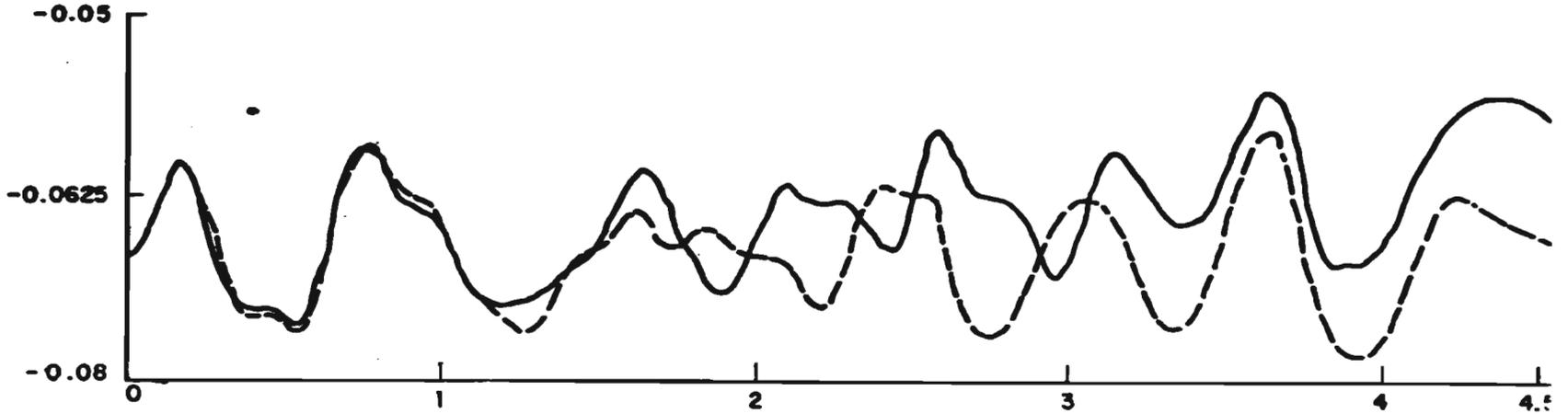
Desplazamientos, en m



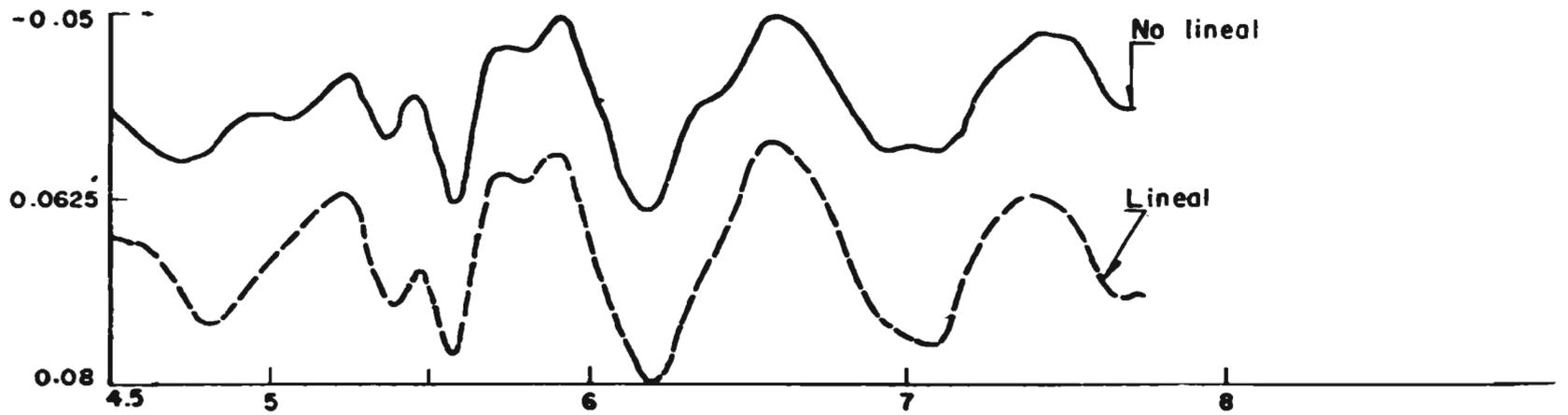
Tiempo, en seg.

Fig. 4.11 ñ Variación de desplazamientos relativos durante el temblor 2, en el punto nodal 18 de la presa

Desplazamientos , en m

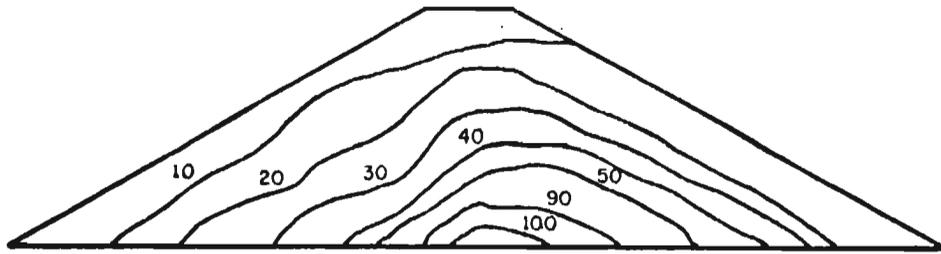


COMPONENTE VERTICAL

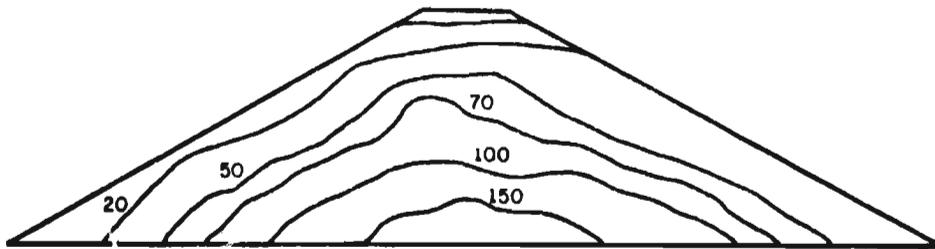


Tiempo , en seg

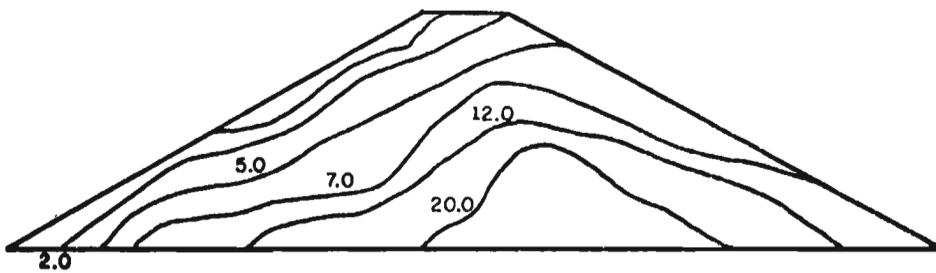
Fig 4.11 σ Variación de desplazamientos relativos durante el temblor 2 en el punto nodo de la presa



a) Esfuerzo normal, σ_x , en ton/m²

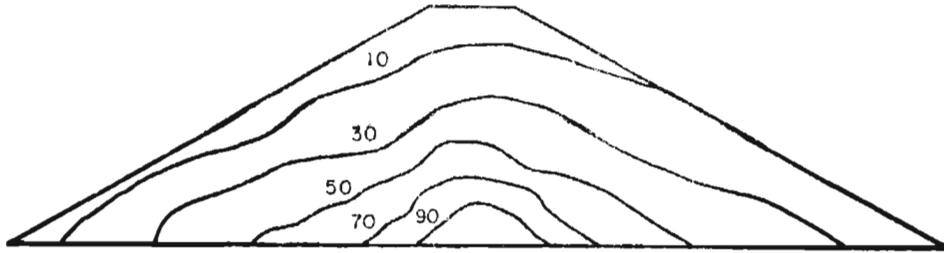


b) Esfuerzo normal, σ_y , en ton/m²

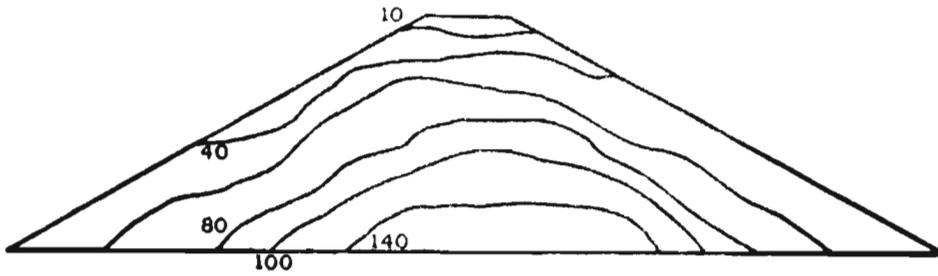


c) Esfuerzo cortante, τ_{xy} , en ton/m²

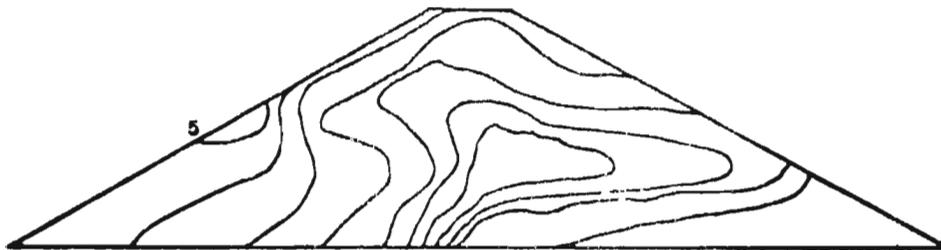
Fig 4.12 Distribución de esfuerzos para $t = 2$ seg



a) Esfuerzo normal, σ_x , en ton/m²

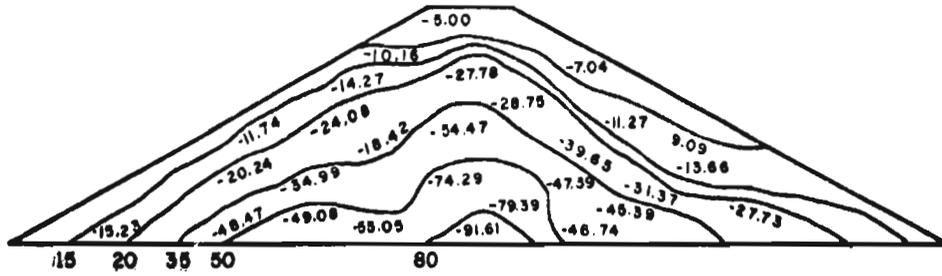


b) Esfuerzo normal, σ_y , en ton/m²

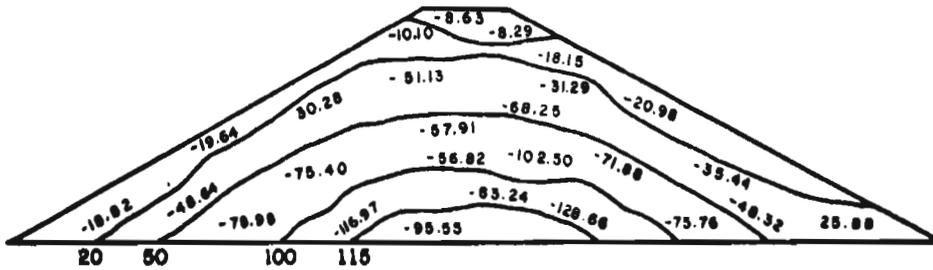


c) Esfuerzo cortante, τ_{xy} , en ton/m²

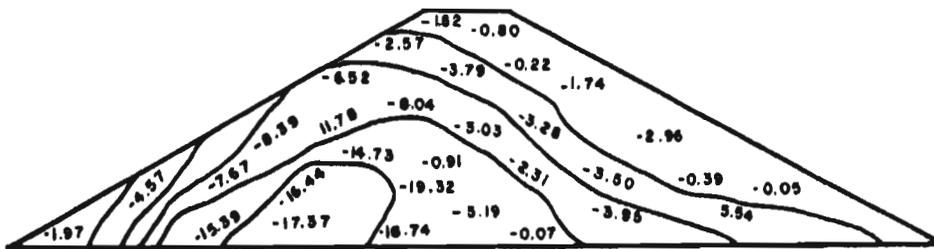
Fig 4.13 Distribución de esfuerzos para $t = 6$ seg



a) Esfuerzo normal, σ_x , en ton/m^2

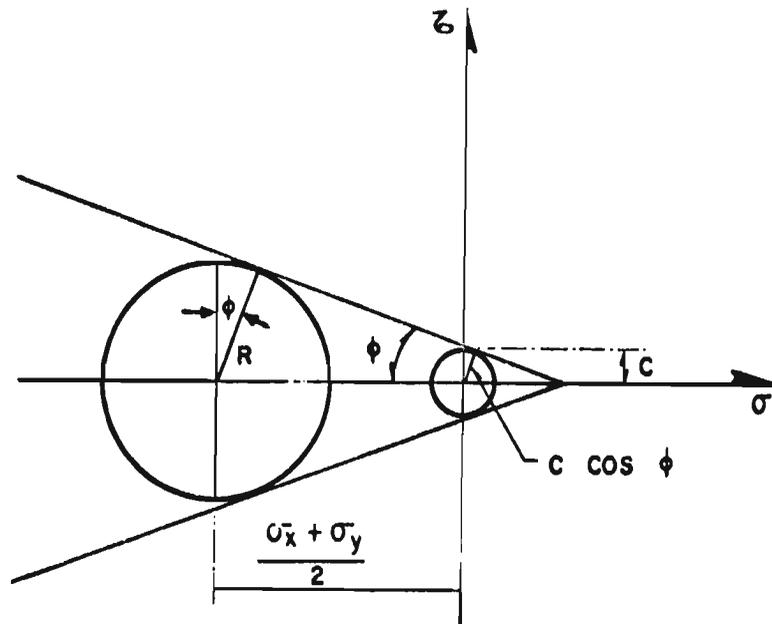


b) Esfuerzo normal, σ_y , en ton/m^2



c) Esfuerzo cortante, τ_{xy} , en ton/m^2

Fig 4.14 Distribución de esfuerzos para $t = 8$ seg



ϕ Angulo de fricción interna
C Cohesión

Fig A.1 Hipótesis Mohr - Coulomb

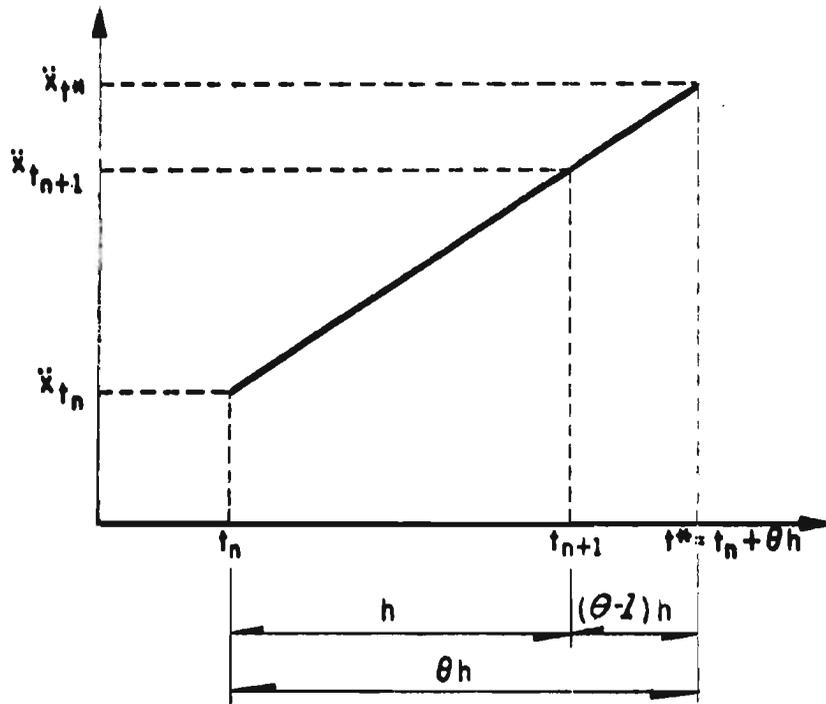


Fig B.1 Esquema para la Integración paso a paso en el método θ de Wilson

APENDICE A. OBTENCION MATRICIAL DE LA RELACION ESFUERZO-DEFORMACION PARA UN SUELO COHESIVO-FRICCIONANTE EN EL QUE ES VALIDO EL CRITERIO DE VON MISES SIN ENDURECIMIENTO Y CONDICION DE FLUENCIA DE COULOMB

Con base en la teoría general de Green y Nahgdi y en las relaciones incrementales esfuerzo-deformación, se obtienen en forma matricial las relaciones esfuerzo-deformación para un material elastoplástico en el que es válido el criterio de Von Mises.

La relación incremental esfuerzo-deformación en forma matricial es

$$d \underline{\sigma} = D d \underline{\epsilon}^e$$

(A.1)

donde \underline{D} está definida por la ec 3.34 para estados planos y material homogéneo lineal e isótropo, $\underline{\sigma}$ es el vector de esfuerzos en la configuración deformada, y $\underline{\epsilon}^e$ es el vector de deformaciones en su forma lineal (expresión válida para comportamiento puramente elástico).

La relación incremental esfuerzo-deformación en el intervalo plástico, en forma matricial, es

$$d \underline{\sigma} = \underline{D}^P d \underline{\epsilon} \quad (A.2)$$

donde $\underline{\epsilon}$ es el vector de deformaciones y \underline{D}^P es la matriz que relaciona esfuerzos con deformaciones

\underline{D}^P para un material en el que es válido el criterio de Von Mises resulta ser (Saeed Yagmahi, 1969), en forma matricial

$$\underline{D}^P = \underline{D} - \underline{D} \underline{A} \quad (A.3)$$

donde

$$\underline{A} = b^{-1} \underline{q} \underline{q}^T \underline{D} \quad (A.4)$$

y b está definida como

$$b = \underline{q}^T \underline{D} \underline{q} \quad (A.5)$$

siendo

$$\underline{q}^T = \left\langle \frac{\partial f}{\partial \sigma_x} \quad \frac{\partial f}{\partial \sigma_y} \quad \frac{\partial f}{\partial \sigma_{xy}} \right\rangle \quad (A.6)$$

Para el caso particular de suelos cohesivos friccionantes en los que se supone la condición de fluencia de Coulomb (Drucker y PRAGER, 1952), la falla del suelo depende del esfuerzo cortante función de la cohesión, fricción y esfuerzos $f = R^2 - r^2$ (fig A.1), en la cual

$$R = c \cos \phi - \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \sin \phi \quad (\text{A.7})$$

$$r = \frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2}{2} + \tau_{xy}^2 \quad (\text{A.8})$$

donde:

c cohesión

ϕ ángulo de fricción interna

σ_x esfuerzo normal en la dirección x

σ_y esfuerzo normal en la dirección y

τ_{xy} esfuerzo cortante

R radio del círculo de Mohr correspondiente a la falla

r radio del círculo de Mohr correspondiente a cualquier estado distinto del de la falla.

Sustituyendo las ecs 1.12 y 1.13 en la ec 1.11

$$f = \frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2}{2} + \tau_{xy}^2 - \left[C \cos \phi - \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \sin \phi \right]^2 \quad (\text{A.9})$$

La hipótesis de suponer el suelo perfectamente plástico consiste en no considerar el efecto del agua, siendo para muchos casos este efecto de importancia ya que la presión de poro puede ser significativa.

Haciendo

$$a = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \quad ; \quad b = \tau_{xy}$$

$$d = C \cos \phi - \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \operatorname{sen} \phi$$

$$f = a^2 + b^2 - d^2$$

$$\{q\} = \begin{Bmatrix} a + d \operatorname{sen} \phi \\ -a + d \operatorname{sen} \phi \\ 2b \end{Bmatrix} \quad (\text{A.10})$$

$$b = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} d^2 (\operatorname{sen}^2 \phi - 2\nu + 1) \quad (\text{A.11})$$

Haciendo

$$C_1 = d \operatorname{sen} \phi \quad ; \quad C_2 = C_1 / (1-2\nu)$$

sustituyendo las ecs A.10 y A.11 en la ec A.4, se tiene

$$\underline{\Lambda} = \frac{1}{2d^2 \left(1 + \frac{\operatorname{sen}^2 \phi}{1-2\nu}\right)} \begin{bmatrix} (a+C_1)(a+C_2) & (a+C_1)(-a+C_2) & (a+C_1)\left(\frac{C}{2}\right) \\ (-a+C_1)(a+C_2) & (-a+C_1)(-a+C_2) & (-a+C_1)\left(\frac{C}{2}\right) \\ C(a+C_2) & C(-a+C_2) & \left(\frac{C}{2}\right)^2 \end{bmatrix} \quad (\text{A.12})$$

**APENDICE B. METODO θ DE WILSON PARA INTEGRAR LAS ECUACIONES
DE EQUILIBRIO DINAMICO DE SISTEMAS DISCRETOS**

Un procedimiento para obtener la solución de la ecuación de movimiento de un sistema discreto del tipo 4.1 es el método de integración directa paso a paso, y el que aquí se utiliza es el método θ de Wilson.

Dicho método se desarrolló en la Universidad de California, en Berkeley, y es una subclase de los métodos de Runge-Kutta y es específicamente del tipo cerrado predictor corrector (Cervantes y Alduncin, 1971).

El método consiste en desarrollar en primer término unas fórmulas predictoras, otras correctoras y en asegurar la estabilidad

de la solución.

B.1 Desarrollo del método

Considerando la hipótesis de la variación lineal de la aceleración en el intervalo $\tau = \theta \Delta t$, se tiene (fig B.1):

$$\frac{\ddot{X}_{t^*} - \ddot{X}_t}{\Delta t \theta} = \frac{\ddot{X}_{t+\tau} - \ddot{X}_t}{\tau}$$

$$\ddot{X}_{t+\tau} = \ddot{X}_t + \frac{\tau}{\Delta t \theta} (\ddot{X}_{t^*} - \ddot{X}_t) \quad (B.1)$$

integrando

$$\dot{X}_{t+\tau} = \dot{X}_t + \tau \ddot{X}_t + \frac{\tau^2}{2\theta \Delta t} (\ddot{X}_{t^*} - \ddot{X}_t)$$

$$X_{t+\tau} = X_t + \tau \dot{X}_t + \frac{\tau^2}{2} \ddot{X}_t + \frac{\tau^3}{3\theta \Delta t} (\ddot{X}_{t^*} - \ddot{X}_t)$$

Considerando $\tau = \Delta t$ en la ec B.1:

$$\ddot{X}_{t+\Delta t} = \ddot{X}_t + \frac{1}{\theta} (\ddot{X}_{t^*} - \ddot{X}_t) = (1 - \frac{1}{\theta}) \ddot{X}_t + \frac{1}{\theta} \ddot{X}_{t^*} \quad (B.2)$$

Para $\tau = \theta \Delta t$

$$\dot{X}_{t^*} = \dot{X}_{t+\theta \Delta t} = \dot{X}_t + \frac{\theta \Delta t}{2} (\ddot{X}_{t^*} + \ddot{X}_t) \quad (B.3)$$

Para $\theta = 1$

$$\dot{\underline{X}}_{t+\Delta t} = \dot{\underline{X}}_t + \frac{\Delta t}{2} (\ddot{\underline{X}}_{t+\Delta t} + \ddot{\underline{X}}_t) \quad (\text{B.4})$$

$$\underline{X}_{t+\Delta t} = \underline{X}_t + \Delta t \dot{\underline{X}}_t + \frac{\Delta t^2}{6} (\ddot{\underline{X}}_{t+\Delta t} + 2\ddot{\underline{X}}_t)$$

De las ecs B.3 y B.4 se puede obtener $\ddot{\underline{X}}_{t+\Delta t}$, $\dot{\underline{X}}_{t+\Delta t}$ y $\underline{X}_{t+\Delta t}$ en función de $\ddot{\underline{X}}_t$, $\dot{\underline{X}}_t$, \underline{X}_t y $\ddot{\underline{X}}_{t^*}$.

B.1.1 Caso lineal

Para el caso de sistemas lineales, la ecuación de movimiento que debe cumplirse para t^* es:

$$\underline{M} \ddot{\underline{X}}_{t^*} + \underline{C} \dot{\underline{X}}_{t^*} + \underline{K} \underline{X}_{t^*} = \underline{P}_{t^*} \quad (\text{B.5})$$

donde

$$\underline{P}_{t^*} = \underline{P}_t + (\underline{P}_{t+\Delta t} - \underline{P}_t)$$

$\ddot{\underline{X}}_{t^*}$ y $\dot{\underline{X}}_{t^*}$ se pueden valor de las ecs B.3 en función \underline{X}_{t^*} , o sea

$$\ddot{\underline{X}}_{t^*} = \frac{6}{\theta^2 \Delta t^2} (\underline{X}_{t^*} - \underline{X}_t) - \frac{6}{\theta \Delta t} \dot{\underline{X}}_t - 2\ddot{\underline{X}}_t \quad (\text{B.6})$$

$$\dot{\underline{X}}_{t^*} = \frac{3}{\theta \Delta t} (\underline{X}_{t^*} - \underline{X}_t) - 2\dot{\underline{X}}_t - \frac{\theta \Delta t}{2} \ddot{\underline{X}}_t \quad (\text{B.7})$$

Sustituyendo las ecs B.6 y B.7 en la ec B.5 y considerando

$$\underline{C} = \alpha \underline{M} + \beta \underline{K}$$

$$\underline{M} \left[\frac{6}{\theta^2 \Delta t^2} (\underline{x}_{t^*} - \underline{x}_t) - \frac{6}{\theta \Delta t} \dot{\underline{x}}_t - 2\ddot{\underline{x}}_t \right] + (\alpha \underline{M} + \beta \underline{K}) \left[\frac{3}{\theta \Delta t} (\underline{x}_{t^*} - \underline{x}_t) - 2\dot{\underline{x}}_t - \frac{\theta \Delta t}{2} \ddot{\underline{x}}_t \right] +$$

$$+ \underline{K} \underline{x}_{t^*} = \underline{P}_{t^*}$$

arreglando términos

$$\underline{x}_{t^*} \left\{ \left(\frac{6}{\theta^2 \Delta t^2} + \frac{3\alpha}{\theta \Delta t} \right) \underline{M} + \underline{K} \left(\frac{3\beta}{\theta \Delta t} + 1 \right) \right\} + \underline{K} \left\{ \frac{-3\beta}{\theta \Delta t} \underline{x}_t - 2\beta \dot{\underline{x}}_t - \frac{\theta \Delta t}{2} \ddot{\underline{x}}_t \beta \right\}$$

$$= \underline{P}_{t^*} + \underline{M} \left[\underline{x}_t \left(\frac{6}{\theta^2 \Delta t^2} + \frac{3\alpha}{\theta \Delta t} \right) + \dot{\underline{x}}_t \left(\frac{6}{\theta \Delta t} + 2\alpha \right) + \ddot{\underline{x}}_t \left(2 + \frac{\theta \Delta t \alpha}{2} \right) \right] \quad (\text{B.8})$$

$$\text{Si } \tau = \theta \Delta t \quad ; \quad b_0 = 1 + \frac{3\beta}{\tau}$$

$$b_1 = \left(\frac{6}{\tau^2} + \frac{3}{\tau} \alpha \right) \quad ; \quad b_2 = \frac{b_1}{b_0}$$

$$\bar{K} = b_2 \underline{M} + \underline{K} \quad ; \quad \underline{K} = \bar{K} - b_2 \underline{M}$$

entonces

$$b_0 \underline{x}_{t^*} \bar{K} + (\bar{K} - b_2 \underline{M}) \left(\frac{3\beta}{\tau} \underline{x}_t - 2\beta \dot{\underline{x}}_t - \frac{\tau}{2} \beta \ddot{\underline{x}}_t \right) = \underline{P}_{t^*} +$$

$$+ \underline{M} \left[\underline{x}_t \left(\frac{6}{\tau^2} + \frac{3\alpha}{\tau} \right) + \dot{\underline{x}}_t \left(\frac{6}{\tau} + 2\alpha \right) + \ddot{\underline{x}}_t \left(2 + \frac{\tau \alpha}{2} \right) \right]$$

ordenando y haciendo

$$\underline{D} = b_0 \underline{x}_{t^*} - \frac{3\beta}{\tau} \underline{x}_t - 2\beta \dot{\underline{x}}_t - \frac{\tau}{2} \ddot{\underline{x}}_t$$

(B.9)

$$\bar{K} \underline{D} = \underline{P}_{t^*} + \underline{M} \left\{ \underline{x}_t \left[\frac{6}{\tau^2} + \frac{3}{\tau} (\alpha - \beta b_2) \right] + \dot{\underline{x}}_t \left[\frac{6}{\tau} + 2(\alpha - \beta b_2) \right] + \right.$$

$$\left. + \ddot{\underline{x}}_t \left[2 + \left(\frac{\tau}{2} \alpha - \beta b_2 \right) \right] \right\}$$

haciendo

$$b_3 = \alpha - \beta b_2$$

$$b_4 = \frac{6}{\tau^2} + \frac{3}{\tau} b_3$$

$$b_5 = \frac{6}{\tau} + 2b_3$$

$$b_6 = 2 + \frac{\tau}{2} b_3$$

$$\bar{K} \underline{D} = \underline{P}_{t^*} + M(b_4 \underline{X}_t + b_5 \dot{\underline{X}}_t + b_6 \ddot{\underline{X}}_t) \quad (\text{B.10})$$

Se valúa \underline{D} resolviendo el sistema B.10 y de la expresión B.9 se tiene

$$\underline{X}_{t^*} = \frac{1}{b_0} \underline{D} + \frac{3\beta}{\tau} \underline{X}_t + 2\beta \dot{\underline{X}}_t + \frac{\tau}{2} \beta \ddot{\underline{X}}_t \quad (\text{B.11})$$

Sustituyendo la ec B.11 en la ec B.6

$$\underline{X}_{t^*} = \frac{6}{\tau^2 b_0} \left(D + \frac{3\beta}{\tau} \underline{X}_t + 2\beta \dot{\underline{X}}_t + \frac{\tau}{2} \beta \ddot{\underline{X}}_t \right) - \frac{6}{\tau^2} \underline{X}_t - \frac{6}{\tau} \dot{\underline{X}}_t - 2\ddot{\underline{X}}_t$$

$$\begin{aligned} \ddot{\underline{X}}_{t^*} = & \frac{6}{\tau^2 b_0} \underline{D} + \underline{X}_t \left(\frac{3\beta}{\tau} - b_0 \right) \frac{6}{\tau^2 b_0} + \dot{\underline{X}}_t \left((2\beta - \tau b_0) \right) \frac{6}{\tau^2 b_0} \\ & + \ddot{\underline{X}}_t \left(\frac{\tau}{2} \beta - \frac{\tau^2 b_0}{3} \right) \frac{6}{\tau^2 b_0} \end{aligned} \quad (\text{B.12})$$

Substituyendo la ec B. 12 en la ec B. 2 y haciendo

$$\begin{aligned} b_7 = \frac{6}{\theta \tau^2 b_0} \quad ; \quad b_8 = \frac{3}{\tau} \beta b_7 - \frac{6}{\theta \tau^2} \\ b_9 = 2\beta b_7 - \frac{6}{\theta \tau^2} \quad ; \quad b_{10} = 1 - \frac{3}{\theta} + \frac{\tau}{2} \beta b_7 \end{aligned}$$

$$\underline{X}_{t+\Delta t} = b_7 \underline{D} + b_8 \underline{X}_t + b_9 \dot{\underline{X}}_t + b_{10} \ddot{\underline{X}}_t \quad (\text{B.13})$$

finalmente, si $b_{11} = \frac{\Delta t}{2}$, $b_{12} = \frac{\Delta t^2}{6}$, las ecs. B.4 resultan

$$\dot{\underline{X}}_{t+\Delta t} = \dot{\underline{X}}_t + b_{11} (\ddot{\underline{X}}_{t+\Delta t} + \ddot{\underline{X}}_t) \quad (\text{B.14})$$

$$\underline{X}_{t+\Delta t} = \underline{X}_t + \Delta t \dot{\underline{X}}_t + b_{12} (\ddot{\underline{X}}_{t+\Delta t} + 2\ddot{\underline{X}}_t)$$

Así, con las ecs B.13 y B.14 se obtiene la solución para $t+\Delta t$.

En la tabla B.1 se presenta el resumen del algoritmo para el análisis paso a paso de sistemas estructurales lineales.

B. 1. 2 Caso no lineal.

Para el análisis paso a paso de sistemas estructurales no lineales, la ecuación incremental de movimiento que debe cumplirse para t^* es:

$$\underline{M} \Delta \ddot{\underline{X}}_t + \underline{C} \Delta \dot{\underline{X}}_t + \underline{K} \Delta \underline{X}_t = \underline{P}_{t^*} - \underline{M} \ddot{\underline{X}}_t - \underline{C} \dot{\underline{X}}_t - \underline{F}_t \quad (\text{B.15})$$

$\ddot{\underline{X}}_{t^*}$ se puede obtener al resolver la ec. B.15 y utilizando las relaciones

$$\Delta \underline{X}_t = \underline{X}_{t^*} - \underline{X}_t \quad (\text{B.16})$$

$$\Delta \dot{\underline{X}}_t = \dot{\underline{X}}_{t^*} - \dot{\underline{X}}_t \quad (\text{B.17})$$

$$\Delta \ddot{\underline{X}}_t = \ddot{\underline{X}}_{t^*} - \ddot{\underline{X}}_t \quad (\text{B.18})$$

de la siguiente forma se sustituye B.17 y B.18 en B.15

$$\begin{aligned} \underline{M} \ddot{\underline{X}}_{t^*} + \underline{C} \dot{\underline{X}}_{t^*} + \underline{K} \Delta \underline{X}_t &= \underline{P}_{t^*} - \underline{F}_t \\ \underline{M} \left[\frac{6}{\tau^2} (\Delta \underline{X}_t) - \frac{6}{\tau} \dot{\underline{X}}_t - 2\ddot{\underline{X}}_t \right] &+ \\ \underline{C} \left[\frac{3}{\tau} (\Delta \underline{X}_t) - 2\dot{\underline{X}}_t - \frac{\tau}{2} \ddot{\underline{X}}_t \right] &+ \\ + \underline{K} \Delta \underline{X}_t &= \underline{P}_{t^*} - \underline{F}_t \end{aligned}$$

ordenando términos

$$\Delta \underline{X}_t \left[\frac{6}{\tau^2} \underline{M} + \frac{3}{\tau} \underline{C} + \underline{K} \right] = \underline{P}_{t^*} - \underline{F}_t + \underline{M} \left(\frac{6}{\tau} \dot{\underline{X}}_t + 2\ddot{\underline{X}}_t \right) + \underline{C} \left(2\dot{\underline{X}}_t + \frac{\tau}{2} \ddot{\underline{X}}_t \right)$$

$$\text{Si } a_0 = \frac{6}{\tau^2} \quad ; \quad a_1 = \frac{3}{\tau}$$

$$a_2 = 2a_1 \quad ; \quad a_3 = \frac{\tau}{2}$$

y resolviendo el sistema se obtiene $\Delta \underline{X}_t$

De la ec B.16

$$\underline{X}_{t^*} = \underline{X}_t - \Delta \underline{X}_t \quad (\text{B.19})$$

Sustituyendo la ec B.19 en la ec B.6

$$\ddot{\underline{X}}_{t^*} = \frac{6}{\tau^2} (\Delta \underline{X}_t) - \frac{6}{\tau} \dot{\underline{X}}_t - 2\ddot{\underline{X}}_t \quad (\text{B.20})$$

Sustituyendo esta última ecuación en la ec B.2

$$\ddot{\underline{X}}_{t+\Delta t} = (1 - \frac{1}{\theta}) \ddot{\underline{X}}_t + \frac{1}{\theta} (\frac{6}{\tau^2} \Delta \underline{X}_t - \frac{6}{\tau} \dot{\underline{X}}_t - 2\ddot{\underline{X}}_t)$$

Si

$$a_4 = \frac{6}{\tau^2 \theta} = \frac{a_2}{\theta}$$

$$a_5 = -\frac{6}{\tau} = -\frac{2a_1}{\theta} = -\frac{a_2}{\theta}$$

$$a_6 = 1 - 3/\theta$$

$$\ddot{\underline{X}}_{t+\Delta t} = a_4 \Delta \underline{X}_t + a_5 \dot{\underline{X}}_t + a_6 \ddot{\underline{X}}_t \quad (\text{B.21})$$

Finalmente, si $a_7 = \frac{\Delta t}{2}$ y $a_8 = \frac{\Delta t^2}{6}$, sustituyendo en B.4

$$\dot{\underline{x}}_{t+\Delta t} = \dot{\underline{x}}_t + a_7 (\ddot{\underline{x}}_{t+\Delta t} + \ddot{\underline{x}}_t) \quad (\text{B.22})$$

$$\underline{x}_{t+\Delta t} = \underline{x}_t + \Delta t \dot{\underline{x}}_t + a_8 (\ddot{\underline{x}}_{t+\Delta t} + 2\ddot{\underline{x}}_t) \quad (\text{B.23})$$

Así, con las ecs. B.21, B.22 y B.23 se obtiene la solución
 $t + \Delta t$.

En la tabla B.2 se presenta el resumen del algoritmo para el
análisis paso a paso de sistemas estructurales no lineales.

APENDICE C. PROGRAMAS DE COMPUTADORA PARA EL ANALISIS SISMICO
DE TERRAPLENES

C.1 Organización de programas

Los programas de computadora desarrollados para cuantificar la respuesta sísmica de terraplenes ante temblores, utilizando una formulación incremental y el método del elemento finito, se agrupan en siete, los cuales trabajan en forma secuencial, y son:

1. Programa para calcular las frecuencias, periodos y configuraciones naturales de vibración
2. Programa para el análisis incremental estático, simulando el proceso de construcción
3. Programa para la formulación de datos de los programas 5 y 6
4. Programa para procesar los datos de los acelerogramas

5. Programa para el cálculo de las fuerzas hidrodinámicas
6. Programa para el cálculo de la respuesta sísmica en forma incremental
7. Programa para representar los resultados en forma gráfica.

A continuación se presenta la descripción, detalles de entrada, salida y listados en lenguaje Fortran de cada uno de ellos.

C.2 Programa de computadora para calcular frecuencias, periodos y configuraciones naturales de vibración de la presa

C.2.1 Objetivo

El propósito del programa es calcular el ancho de semibanda, la matriz de masas, la matriz de rigideces, las frecuencias en CPS y en rad/seg, los periodos en seg, y las configuraciones naturales de vibración de la cortina. La estructura se idealiza con elementos finitos triangulares para estados planos de deformación. El método utilizado para resolver el problema de valores característicos es el conocido con el nombre de Jacobi. Los arreglos se trabajan con el sistema denominado memoria dinámica.

C.2.2 Datos de entrada

La siguiente secuencia de tarjetas perforadas define la estructura que se va a analizar

1. Tarjeta título (12A6),

De las columnas 1 a 72 se puede perforar cualquier información alfa-numérico para identificar el problema en particular

2. Tarjeta de control (5I5)

Columnas

| | |
|---------|---|
| 1 - 5 | N° de elementos |
| 6 - 10 | N° de puntos nodales |
| 11 - 15 | Primer nudo prescrito |
| 16 - 20 | N° de materiales |
| 21 - 25 | N° de frecuencias y configuraciones no dales |

La numeración de los puntos nodales deberá efectuarse de manera que se satisfagan dos condiciones:

- a) Los nudos de la base se consideran con desplazamientos prescritos y serán los últimos en la numeración y deberá ser secuencial, de ahí la razón del dato contenido en las columnas 11 a 15 (fig 4.4).
- b) Se procurará que la numeración de dos nudos con desplazamiento, no prescritos, sea tal que la diferencia entre nudos contiguos sea mínima, pues con ello se obtiene un ancho de semibanda mínimo y se ocupará menos memoria en la computadora.

3. Tarjetas de elementos y tipo de material (415)

Se requiere una tarjeta por cada elemento y contiene información de los nudos que limitan cada elemento dados en sentido contrario a las manecillas del reloj, y se da el número del material que le corresponde (fig 3.2):

Columnas

| | |
|---------|---------------------------------------|
| 1 - 5 | Punto nodal I |
| 6 - 10 | Punto nodal J |
| 11 - 15 | Punto nodal K |
| 16 - 20 | N° que identifica el tipo de material |

4. Tarjetas de puntos nodales (2F 10.2)

Una tarjeta para cada punto nodal. Contiene las coordenadas de cada punto referidas a un sistema cartesiano. Se deben colocar en orden creciente. Las unidades se dan en metros.

Columnas

| | |
|---------|----------|
| 1 - 10 | Abscisa |
| 11 - 20 | Ordenada |

5. Tarjetas de materiales (3 F10.3)

Una tarjeta por cada tipo de material y puestas en orden.

Columnas

| | |
|---------|--------------------------------------|
| 1 - 10 | Módulo de Young en ton/m^2 |
| 11 - 20 | Coefficiente de Poisson |
| 21 - 30 | Peso volumétrico en ton/m^3 |

C.2.3 Impresiones y resultados

El programa imprime:

1. Título del problema
2. Número de elementos
3. Primer nudo prescrito
4. Número total de puntos
5. Número de tipos de material
6. El ancho de semibanda, y en caso de solicitar un número de modos mayor que dicho ancho se escribe una nota
7. La matriz nodal
8. Las coordenadas de los nudos
9. Las propiedades de materiales

10. Los valores característicos, frecuencias naturales, en rad/seg y en ciclos por segundo, así como el periodo de cada modo, en segundos
11. Los vectores característicos (formas modales)

C.2.4 Archivos

Utiliza cuatro archivos de disco magnético según se especifica en el listado adjunto.

C.2.5 Limitaciones

La dimensión del arreglo A del programa principal dependerá de la capacidad de la máquina. Para una estructura determinada tendrá como mínimo el dado por el máximo de las expresiones proporcionadas en la primera tarjeta de comentario del programa principal, donde (ver listado)

| | |
|------|-------------------------------------|
| NF | N° de grados de libertad |
| NBAN | ancho de semibanda |
| NEL | N° de elementos |
| NTP | N° de puntos nodales |
| NTIP | N° de tipos de material |
| NEV | N° de frecuencias naturales desadas |

C.3 Programa para el análisis de esfuerzos en terraplenes durante el proceso de construcción

C.3.1 Propósito

Calcular historia de esfuerzos a medida que el terraplén se construye por capas horizontales hasta llegar a su terminación.

C.3.2 Entrada de datos

1. Tarjeta título (12 A 6).

De las cols 1 a 72 se perfora un encabezado para identificar la información del problema

2. Tarjeta de control (3 I 5)

2.1 Datos del problema

Columnas

| | |
|---------|------------------------------|
| 1 - 5 | N° de etapas de construcción |
| 6 - 10 | N° total de puntos |
| 10 - 15 | N° de tipos de material |

2.2 Arreglo con el número de elementos (16 I 5) de cada etapa del proceso.

2.3 Arreglo con los números a partir del cual en cada etapa los desplazamientos son prescritos (16 I 5)

La numeración de los elementos debe ser progresiva a partir de la primera capa y así sucesivamente, de tal manera que cada número de elementos de una etapa no sean menores que los de la anterior.

La numeración de los nudos debe hacerse en orden progresivo a partir del primero no prescrito de cada capa.

3. Tarjetas de puntos nodales (2 F 10.2)

Una tarjeta por cada punto nodal con las coordenadas de cada punto, referidas a un sistema cartesiano. Se deben colocar en orden creciente según la numeración

de nudos, sus unidades son metros.

Columnas

1 - 10 Abscisa

11 - 20 Ordenada

4. Tarjetas de materiales (5 F 10.3)

Una tarjeta por cada tipo de material y puestas en orden.

Columnas

1 - 10 Módulo de Young (ton/m^2)

11 - 20 Coeficiente de Poisson

21 - 30 Peso volumétrico (ton/m^3)

31 - 40 Cohesión

41 - 50 Tangente del ángulo de fricción interna

5. Tarjetas de elementos y tipo de material (4 I 5)

Se requiere una tarjeta por cada elemento con información de los nudos que limitan cada elemento (fig 3.2) dados en el sentido contrario a las manecillas del reloj, y el número del material que le corresponde.

Columnas

1 - 5 Punto nodal I

6 - 10 Punto nodal J

11 - 15 Punto nodal K

16 - 20 N° que identifica el tipo de material

El programa imprime

1. Título del problema
2. Número de etapas de construcción
3. Número total de puntos nodales
4. Número de tipos de material
5. Arreglo del primer nudo prescrito en cada etapa
6. Para cada etapa de construcción
 - a) matriz nodal
 - b) ancho de semibanda
 - c) arreglo de elementos plastificados
 - d) vector de desplazamientos
 - e) arreglo de esfuerzos σ_x , σ_y , τ_{xy}
 - f) esfuerzos y direcciones principales

C.3.4 Archivos

Utiliza un archivo de disco magnético (listado, Apéndice A).
Guarda la respuesta obtenida del análisis.

C.3.5 Limitaciones

La dimensión del arreglo A del programa principal dependerá de la capacidad de la máquina. Para una estructura dada tendrá como mínimo el proporcionado por la expresión de la primera tarjeta de comentario del programa principal (listado, Apéndice A).

| | |
|------|--------------------------|
| NEI | N° de elementos |
| NTP | N° total de puntos |
| NF | N° de grados de libertad |
| NB1 | 1er nudo prescrito |
| NBAN | Ancho de semibanda |

C.3.6 Tiempo estimado

El tiempo de máquina que se emplea depende del número de elementos en que se discretiza el medio y del ancho de semibanda obtenido. El tiempo utilizado para una estructura discretizada en 54 elementos para cinco etapas de construcción con un ancho de banda de 20, fue aproximadamente de 18 seg.

C.4 Programa de computadora para información necesaria en los programas descritos en C.6, C.7 y C.8

C.4.1 Propósito

Calcular el ancho de semibanda, la matriz de masas, matriz de rigideces, fuerzas dinámicas para aceleración unitaria, triangulación de la matriz de rigideces y coeficientes que se utilizan en el método de integración.

C.4.2 Datos de entrada

1. Tarjeta título (12 A 6). De las cols 1 a 72 se perfora un encabezado para identificar la información del problema
2. Tarjeta de control (715)

Columnas

| | |
|---------|---------------------------------------|
| 1 - 5 | N° de elementos |
| 6 - 10 | Primer nudo prescrito |
| 11 - 15 | N° total de puntos |
| 16 - 20 | N° de materiales |
| 21 - 25 | N° de puntos de presión Hidrodinámica |
| 26 - 30 | N° de modos del agua |

La numeración de los puntos nodales debe satisfacer dos

condiciones:

- a) Los nudos con desplazamientos prescritos serán los últimos en numerar en forma secuencial; esta condición implica el dato de las columnas 11 - 15.
- b) La numeración de los puntos no prescritos deberá ser tal que la diferencia entre nudos contiguos sea mínima. Entre menor sea dicha diferencia, menor será el ancho de semibanda y por tanto menor la memoria de máquina que se ocupa.

Los puntos con presión hidrodinámica se consideran del nivel del agua hasta la base de la presa.

El número de modos del agua en general se considera como tres, ya que la participación de más modos no resulta considerable.

3. Tarjetas de elementos y tipo de material (415)

Se requiere una tarjeta por cada elemento con información de los nudos que limitan cada elemento dados en sentido contrario a las manecillas del reloj, el número del material que le corresponde (fig 3.2)

Columnas

- 1 - 5 Punto nodal I
- 6 - 10 Punto nodal J
- 11 - 15 Punto nodal K
- 16 - 20 N° que identifica el tipo de material

4. Tarjetas de puntos nodales (2 F 10.2)

Una tarjeta por cada punto nodal con las coordenadas de cada uno, referidas a un sistema cartesiano. Deben colocarse

en orden creciente. Las unidades se consideran en metros.

Columnas

1 - 10 Abscisa

11 - 20 Ordenada

5. Tarjetas de materiales (3 F 10.0)

Una por cada tipo de material, colocadas en orden.

Columnas

1 - 10 Módulo de Young, ton/m^2

11 - 20 Coeficiente de Poisson

21 - 30 Peso volumétrico en ton/m^3

6. Tarjetas de puntos de presión (1615)

Contienen los puntos nodales, sometidos a la acción del agua, y la numeración de los puntos de presión. El orden se presenta decreciente.

7. Tarjeta de altura máxima probable del agua e intervalo de integración (2 F 10.0)

Columnas

1 - 10 Altura máxima probable del agua

11 - 20 Intervalo de integración

8. Tarjeta de coeficiente BETA (F 10.0)

Columnas

1 - 10 Coeficiente BETA

9. Tarjetas de coeficientes ALFA (8 F 10.0)

El número de tarjetas depende del número de grados de libertad. Deben estar ordenadas.

Impresiones y resultados

El programa imprime

1. Título del problema
2. Número de elementos
3. Primer nudo prescrito
4. Número total de puntos
5. Número de tipos de materiales
6. Número de puntos de presión
7. Número de grados de libertad
8. Número de modos del agua
9. Matriz nodal
10. Ancho de semibanda
11. Propiedades de los materiales
12. Coordenadas de los nudos
13. Coordenadas de los puntos de presión
14. Distribución de presiones hidroestáticas
15. Fuerzas hidroestáticas
16. Fuerzas dinámicas
17. Intervalo de integración
18. Coeficiente Beta

C.4.3 Archivos

Utiliza dos archivos de disco magnético según se especifica en el listado adjunto.

C.5 Programa de computadora para procesar los datos de los a- celerogramas

C.5.1 Propósito

Preparar los datos de la excitación sísmica a la que se someterá la estructura. En caso de que el intervalo de integra - ción sea menor que el del temblor, se interpola. Se valúa la excitación en el tiempo t^* necesario para el método de inte - gración. La información se guarda en disco magnético.

C.5.2 Entrada de datos

1. Tarjeta título (12 A 6).

De las cols 1 a 72 se perfora un encabezado para identificar la información del problema.

2. Tarjeta de control (I5)

Columnas 1 - 6 Número de sismos

3. Tarjeta de intervalo de integración (F 10.0)

Columnas 1 - 10 Intervalo de integración;

4. Tarjeta de parametros de la excitación (20X, F10.0, 10X,I10)

Columnas

21 - 30 Intervalo del temblor

41 - 50 N° de puntos del temblor

5. Tarjeta de aceleraciones del temblor (8 F 9.5)

La cantidad de tarjetas dependerá del número de puntos del temblor. Las unidades deben ir en m/seg^2 .

C.5.3 Impresiones y resultados

El programa imprime

1. Título del problema

2. Número de sismos por procesar
3. Intervalo de integración
4. Intervalo del temblor
5. N° de puntos del temblor
6. Aceleraciones del temblor

C.5.4 Archivos

Utiliza tantos archivos de disco magnético como número de sismos se desea procesar.

C.5.5 Limitaciones

Están sujetas al tipo de máquina que se utilice y a las dimensiones de los arreglos A y T. La dimensión de estos arreglos depende del número de puntos del temblor y puede variarse según convenga.

C.6 Programa de computadora para el cálculo de las fuerzas hidrodinámicas

C.6.1 Propósito

Calcular las fuerzas hidrodinámicas concentradas en los puntos de presión, para ser utilizadas en el cálculo de la respuesta.

C.6.2 Entrada de datos

1. Tarjeta título (12 A 6)

De las cols 1 a 72 se perfora un encabezado para identificar la información del problema.

2. Tarjeta de control (12 a 15)

Columnas

- 1 - 5 N° del FILE DATO 1/PREHID (ver listado)
- 6 - 10 N° del FILE DATO 1/PHFALL (ver listado)
- 11 - 15 N° del FILE DATO 1/PHTWIL (ver listado)
- 16 - 20 N° de puntos del temblor

3. Tarjeta de intervalos (2 F 10.0)

Columnas

- 1 - 10 Intervalo del componente horizontal del tem
blor
- 11 - 20 Intervalo de integración

4. Tarjetas de datos del componente horizontal (8 F 9.5)

El número de tarjetas depende del total de puntos del temblor.

C.6.3 Impresiones y resultados

El programa imprime

1. Título del problema
2. N° de cada FILE que se utiliza
3. N° de puntos del temblor
4. Intervalo del componente horizontal
5. Intervalo de integración

C.6.4 Archivos

Utiliza cinco archivos de disco magnético según se es
pecifica en el listado .

C.7 Programa para el cálculo de la respuesta sísmica en forma incremental.

C.7.1 Propósito

Obtener la respuesta sísmica de terraplenes resolviendo las ecuaciones de equilibrio con el método θ de Wilson.

C.7.2 Entrada de datos

1. Tarjeta título (16A5).

De las columnas 1 a 80 se perfora un encabezado para identificar la información del problema.

2. Tarjeta de control (16 I 5)

Contiene los archivos donde se guarda la respuesta de aceleración y desplazamientos.

Columnas

| | | |
|---------|----------------|-----------|
| 1 - 5 | N° del archivo | DESP/PlX2 |
| 6 - 10 | N° del archivo | DESP/PlX2 |
| 11 - 15 | N° del archivo | ACEL/PlX2 |
| 16 - 20 | N° del archivo | ACEL/PlY2 |
| 21 - 25 | N° del archivo | ESF/Pl |

3. Tarjeta de control 2 (16I5)

Indices para variación de parámetros en la respuesta.

Columnas

| | |
|-------|---|
| 1 - 5 | Indicador de presión de poro |
| 1 | considera el efecto de la presión de poro |
| 0 | no lo considera |
| | (Este efecto esta en estudio por lo que el indicador debe valer cero) |

- 6 - 10 Indicador de no linealidades
 - 1 considera las dos no linealidades
 - 0 considera no linealidad del material
- 11 - 15 Indicador de componentes del acelerograma
 - 1 considera únicamente la componente vertical
 - 0 considera las dos
- 16 - 20 Indicador del problema elástico
 - 1 considera el problema elástico
 - 0 no lo considera

4. Tarjeta de control 3 (16I5)

Columns

- 1 - 5 N° de nudos en donde la respuesta de desplazamientos y aceleraciones se guarde en disco
- 6 - 10 N° de elementos en donde la respuesta de esfuerzos se guarde en disco.

5. Arreglo de números de nudos (16I5)

Contiene la numeración de los nudos de los puntos donde se requiera guardar la respuesta.

6. Arreglo de números de elementos (16I5)

Contiene la numeración de los elementos en donde se requiera guardar esfuerzos.

C.7.2 Impresiones y resultados

El programa imprime

1. Título del problema
2. Aceleraciones, velocidades y desplazamientos
3. Elementos plastificados

4. Esfuerzos σ_x , σ_y y τ_{xy}

C.7.3 Utiliza 9 archivos de disco magnético para leer la información de los sismos, los datos de material, características geométricas y fuerzas hidrodinámicas. Además se emplean 6 archivos para guardar la respuesta de aceleraciones desplazamientos y esfuerzos.

C.8 Programas de computadora.

C.8.1 Listado del programa para calcular las frecuencias, periodos y configuraciones naturales de vibración.

```
$ SET SINGLE LIST
FILE 1=EIGVEC/BANEIG,UNIT=DISK,SAVE=30,AREA= 50,RECORD=1023
FILE 2=RSNCN /BANEIG,UNIT=DISK,SAVE=30,AREA= 50,RECORD=1023
FILE 3=VALOR/CINTA8,UNIT=DISK,SAVE=30,AREA=50,RECORD=1023
FILE 4=FSFUER/CINTA8,UNIT=DISK,SAVE=30,AREA=1000,RECORD=2
FILE 5=FILEINP,UNIT=READER
FILE 6=FILEOUT,UNIT=PRINTER
DIMENSION A(10000)
DIMENSION TITULO(12)
READ (5,7) TITULO
WRITE (6,8) TITULO
READ (5,1) NEL,NTP,NB1,NTIP,NEV
WRITE (6,3) NEL,NB1,NTP,NTIP
N=(NB1-1)*2
N1=1
N2=N1+N
N3=N2+NEL*4
CALL FORBAN(A(N2),NEL,NB1,NBAN,NEV)
N4=N3+N*NBAN
N5=N4+NTP
N6=N5+NTP
N7=N6+NTIP
N8=N7+NTIP
N9=N8+NTIP
CALL FORMR (N,A(N1),A(N2),A(N3),A(N4),A(N5),A(N6),A(N7),A(N8),
*          A(N9),NEL,NTP,NB1,NTIP,NBAN)
WRITE (6,5)
CALL PRIME (A(N4),NTP,2)
WRITE (6,6)
CALL PRIME (A(N6),NTIP,3)
TEJ=TIME(2)/60.
TES=TIME(3)/60.
WRITE (6,57) TEJ,TES
IF (NEL .EQ. 0) GO TO 1000
K1=N4+N
K2=K1+N
K3=K2+N
K4=K3+N
K5=K4+NEV
NW=N*NBAN
CALL BANEIG(A(N1),A(N3),A(N3),A(N4),A(K1),A(K2),A(K3),A(K4),
1          N,NBAN,NEV,NW)
TEJ=TIME(2)/60.
TES=TIME(3)/60.
WRITE (6,57) TEJ,TES
NF=N
CALL LEE(A(K4),NBAN,1,0,3)
CALL LEE(A(N3),NF,NBAN,0,3)
REWIND 3
LOCK 3
WRITE (6,10)
DO 95 J=1,NEV
```

```
I=K4+J-1
IF(A(I).LE.0.) GO TO 94
AI1=A(I)**(.5)
AI2=AI1/6.28318
AI3=1./AI2
WRITE (6,25) J,A(I),AI1,AI2,AI3
GO TO 95
94 WRITE (6,24) J,A(I)
95 CONTINUE
WRITE (6,23)
CALL PRIME(A(N3),N,NEV)
TEJ=TIME(2)/60.
TES=TIME(3)/60.
WRITE (6,57) TEJ, TES
GO TO 1001
1000 WRITE (6,22)
1001 CALL FECHA
CALL EXIT
1 FORMAT (5I5)
2 FORMAT (8F10.0)
3 FORMAT (///20X,'NUMERO DE ELEMENTOS           =',I5//20X,
*      'PRIMER NUDO PRESCRITO           =',I5//20X,
*      'NUMERO TOTAL DE PUNTOS           =',I5//20X,
*      'NUMERO DE TIPOS DE MATERIALES=',I5)
5 FORMAT (///10X,'COORDENADAS X-Y'//)
6 FORMAT (///10X,'PROPIEDADES DE LOS TIPOS DE MATERIALES'//10X,
*      'MODULOS DE POISSON==PESOS ESPECIFICOS==MODULOS DE YOUNG'//)
7 FORMAT (12A6)
8 FORMAT (///12A6///)
10 FORMAT(///10X,'NODO NO.',5X,'VALORES CARACTERIST.',5X,'FREC. CIRC.'
1      ',RAD/SEG',5X,'FREC. CIRC. EN CPS',5X,'PERIODOS EN SEG.'//)
22 FORMAT(///10X,'ERROR:(AREA.LE.0.)')
23 FORMAT(///20X,'CONFIGURACIONES NATURALES'//)
24 FORMAT(///20X,'EIGENVALOR NO.',I5,5X,'ES NEGATIVO,CON VALOR=',
1      E20.8//)
25 FORMAT(10X,I8,4(5X,E20.8))
57 FORMAT(///10X,'TIEMPO DE EJECUCION           =',F10.4,5X,'SEG'/10X,
1      'TIEMPO DE ENTRADA Y SALIDA =',F10.4,5X,'SEG')
END
```

```
SUBROUTINE LEE(A,NF,NBAN,IND,IFL)
DIMENSION A(NF,NBAN)
IF(IND.EQ.0) GO TO 10
DO 1 J=1,NBAN
1 READ (IFL) (A(I,J),I=1,NF)
RETURN
10 DO 2 J=1,NBAN
2 WRITE (IFL) (A(I,J),I=1,NF)
RETURN
END
```

```
SUBROUTINE FORBAN (NOD,NEL,NB1,NBAN,NEV)
DIMENSION NOD(NEL,4)
READ (5,8) ((NOD(I,J),J=1,4),I=1,NEL)
KK=0
DO 29 N=1,NEL
DO 29 IJ=1,2
K1=NOD(N,IJ)
IF (K1 .GE. NB1) GO TO 29
I2=IJ+1
DO 29 JJ=I2,3
K2=NOD(N,JJ)
IF (K2 .GE. NB1) GO TO 29
M=ABS(K2-K1)
IF (M .GT. KK) KK=M
29 CONTINUE
NBAN=2*(KK+1)
WRITE (6,1) NBAN
IF(NBAN,GE,NEV) GO TO 30
WRITE (6,2) NEV,NBAN
NEV=NBAN
30 RETURN
1 FORMAT(///10X,'ANCHO DE SEMIBANDA =',I5)
2 FORMAT(//10X,'SE QUERIAN',I4,2X,'MODOS PERO SOLO SE CALCULARAN',
1 I7//)
3 FORMAT (4I5)
END
```

```
SUBROUTINE PRIME (A,NR,NC)
DIMENSION A(NR,NC)
DO 1 L=1,NC,8
M=L+7
IF(M.GT,NC)M=NC
WRITE (6,2) (K,K=L,M)
DO 1 I=1,NR
1 WRITE (6,3) I,(A(I,J),J=L,M)
RETURN
2 FORMAT (/10X,I3,7(12X,I3)/)
3 FORMAT (1X,I3,8(1PE15.7))
END
```

```
SUBROUTINE FORMR (NF,Z,NOD,RT,X,Y,PU,PVO,EY,MAG,NEL,NTP,NB1,  
5 NTIP,NBAN)  
DIMENSION Z(NF),RT(NF,NBAN),X(NTP),Y(NTP),PU(NTIP),  
* PVO(NTIP),EY(NTIP),NOD(NEL,4),MAG(NEL,6),S(6,6)  
DIMENSION C(3,6),D(3,3),B(3,6)  
READ (5,5) (X(I),Y(I),I=1,NTP)  
READ (5,3) (EY(I),PU(I),PVO(I),I=1,NTIP)  
WRITE (6,4)  
WRITE (6,4) ((NOD(I,J),J=1,4),I=1,NEL)  
REWIND 4  
WRITE (4) NEL  
DO 10 N=1,NEL  
DO 10 J=1,3  
MAG(N,2+J-1)=2*NOD(N,J)-1  
MAG(N,2+J)=2*NOD(N,J)  
WRITE (4) MAG(N,2+J-1),MAG(N,2+J)  
IF (NOD(N,J) .GE. NB1) GO TO 50  
GO TO 10  
50 MAG(N,2+J-1)=0  
MAG(N,2+J)=0  
10 CONTINUE  
DO 13 N=1,NEL  
I=NOD(N,1)  
J=NOD(N,2)  
K=NOD(N,3)  
IJK=NOD(N,4)  
PUA=PU(IJK)  
PVA=PVO(IJK)  
E=EY(IJK)  
XIJ=X(I)-X(J)  
XIK=X(I)-X(K)  
XJK=X(J)-X(K)  
YIJ=Y(I)-Y(J)  
YIK=Y(I)-Y(K)  
YJK=Y(J)-Y(K)  
AREA=0.5*(XIK*YJK-XJK*YIK)  
IF (AREA .LE. 0) GO TO 100  
CONS=E/((1.+PUA)*(1.-2.*PUA))  
D(1,1)=1.-PUA  
D(1,2)=PUA  
D(3,3)=.5*PUA  
D(2,2)=D(1,1)  
D(2,1)=D(1,2)  
DO 23 II=1,3  
DO 23 JJ=1,3  
23 D(II,JJ)=CONS*D(II,JJ)  
AREA2=AREA*2  
B(1,1)=YJK/AREA2  
B(1,3)=-YIK/AREA2  
B(1,5)=YIJ/AREA2  
B(2,2)=-XJK/AREA2  
B(2,4)=XIK/AREA2  
B(2,6)=-XIJ/AREA2  
B(3,1)=B(2,2)  
B(3,2)=B(1,1)  
B(3,3)=B(2,4)  
B(3,4)=B(1,3)  
B(3,5)=B(2,6)  
B(3,6)=B(1,5)
```

```
DO 22 II=1,3
DO 22 JJ=1,6
SUMA=0,
DO 33 KK=1,3
33 SUMA=SUMA+D(II, KK)*B(KK, JJ)
22 C(II, JJ)=SUMA
DO 44 L8=1,3
DO 44 L9=1,6
44 WRITE (4) C(L8, L9)
W=AREA*PV/29,43
IF (I .GE. NB1) GO TO 11
Z(2*I-1)=Z(2*I-1)+W
Z(2*I)=Z(2*I-1)
11 IF (J .GE. NB1) GO TO 12
Z(2*J-1)=Z(2*J-1)+W
Z(2*J)=Z(2*J-1)
12 IF (K .GE. NB1) GO TO 20
Z(2*K-1)=Z(2*K-1)+W
Z(2*K)=Z(2*K-1)
20 C1=1.-PUA
C2=.5*(1.-2.*PUA)
S(1,1)=C1*YJK**2+C2*XJK**2
S(1,2)=- (PUA+C2)*XJK*YJK
S(2,2)=C1*XJK**2+C2*YJK**2
S(1,3)=-C1*YIK*YJK-C2*XIK*XJK
S(2,3)=PUA*XJK*YIK+C2*XIK*YJK
S(3,3)=C1*YIK**2+C2*XIK**2
S(1,4)=PUA*XIK*YJK+C2*XJK*YIK
S(2,4)=-C1*XIK*XJK-C2*YIK*YJK
S(3,4)=- (PUA+C2)*XIK*YIK
S(4,4)=C1*XIK**2+C2*YIK**2
S(1,5)=C1*YIJ*YJK+C2*XIJ*XJK
S(2,5)=-PUA*XJK*YIJ-C2*XIJ*YJK
S(3,5)=-C1*YIJ*YIK-C2*XIJ*XIK
S(4,5)=PUA*XIK*YIJ+C2*XIJ*YIK
S(5,5)=C1*YIJ**2+C2*XIJ**2
S(1,6)=-PUA*XIJ*YJK-C2*XJK*YIJ
S(2,6)=C1*XIJ*XJK+C2*YIJ*YJK
S(3,6)=PUA*XIJ*YIK+C2*XIK*YIJ
S(4,6)=-C1*XIJ*XIK-C2*YIJ*YIK
S(5,6)=- (PUA+C2)*XIJ*YIJ
S(6,6)=C1*XIJ**2+C2*YIJ**2
DO 14 I=2,6
L=I-1
DO 14 J=1,L
S(I, J)=S(J, I)
14 CONTINUE
C1=E/(4.*AREA*(1.+PUA)*(1.-2.*PUA))
DO 15 I=1,6
DO 15 J=1,6
S(I, J)=S(I, J)*C1
15 CONTINUE
DO 16 KL=1,6
IF (MAG(N, KL) .EQ. 0) GO TO 16
KK=MAG(N, KL)
DO 17 LK=1,6
IF (MAG(N, LK) .EQ. 0) GO TO 17
LL=MAG(N, LK)-KK+1
IF(LL.LE,0) GO TO 17
RT(KK, LL)=RT(KK, LL)+S(KL, LK)
```

```
17 CONTINUE
16 CONTINUE
13 CONTINUE
  REWIND 3
  WRITE (3) NF
  WRITE (3) (Z(L),L=1,NF)
  REWIND 4
  LOCK 4
  GO TO 18
100 NEL=0
  WRITE (6,7) N
18 RETURN
3 FORMAT(3F10.0)
4 FORMAT (///10X,'MATRIZ NODAL'//)
5 FORMAT(2F10.6)
7 FORMAT (10X,4I8)
END
```

```
SUBROUTINE BANEIG(SMASS,A,V,B,SN,CN,R,EV,NN,MM,NEV,NW)
DIMENSION SMASS(NN),A(NN,MM),V(NW),B(NN),SN(NN),CN(NN),R(NN),
1      EV(NEV),NEBC(2)
C      *****
C      INICIALIZA
C      *****
      TOL = 1.0E-12
      IFLAG = 0
      NLOOP = 5
      NSMAX = 50
      PSHIFT = 0.
      MM1 = MM + 1
      NW = NN*MM
      NEIG = 0
      NR = NN
      NNR = NN - 1
      REWIND 1
      REWIND 2
C      *****
C      REDUCCION AL PROBLEMA CLASICO DE EIGENVALORES A*X=E*X
C      *****
      TRACE = 0.
      DO 120 I = 1,NN
      TRACE = TRACE + ABS(A(I,1))
      X = SMASS(I)
      IF (X.GT.0.) GO TO 110
      PRINT 12, I
      IFLAG = 1
      GO TO 120
110  SMASS(I) = 1./SQRT(X)
120  CONTINUE
      IF (IFLAG.NE.0) STOP
      DO 130 I = 1,NN
      L = I - 1
      MR = MINO (MM,NN-I+1)
      DO 130 J = 1,MR
      K = L + J
130  A(I,J) = A(I,J)*SMASS(I)*SMASS(K)
C      *****
C      MODIFICACION DE A POR CONDICIONES DE FRONTERA
C      *****
      IF (NBC.LE.0) GO TO 150
      DO 140 N = 1,NBC
      I = NEBC(N)
      A(I,1) = 100.*TRACE
      DO 140 J = 2,MM
      A(I,J) = 0.
      L = I - J + 1
      IF (L.LE.0) GO TO 140
      A(L,J) = 0.
140  CONTINUE
C      *****
C      TRANSFORMACION DE A EN UN ARREGLO UNIDIMENSIONAL V
C      *****
150  DO 160 J = 2,MM
      L = NN*(J-1)
      M = NN - J + 1
      DO 160 I = 1,M
      K = L + I
```

```
160 V(K) = A(I,J)
    CALL LEE(A,NN,MM,0,1)
C *****
C CALCULO DEL EIGENVALOR MINIMO Y SU EIGENVECTOR ASOCIADO DE A
C POR ITERACION INVERSA
C *****
1000 NEIG = NEIG + 1
    E1 = 0.
    SHIFT = 0.
    NS = 0
    KKK = 2
    CALL BANSOL (NR,MM,NN,V,B,0)
    DO 170 I = NR,NN
170 B(I) = 0.
    DO 180 I = 1,NR
180 B(I) = 1.
    IF (NBC.LE.0) GO TO 200
    DO 190 N = 1,NBC
        I = NERC(N)
190 B(I) = 0.
200 NS = NS + 1
    CALL BANSOL (NR,MM,NN,V,B,KKK)
    KKK = 1
    E = 0.
    DO 220 I = 1,NR
    IF (ABS(B(I)).GT.ABS(E)) E = B(I)
220 CONTINUE
    E = 1./E
    EPS = (E-E1)/E*100.
    DO 230 I = 1,NR
230 B(I) = B(I)*E
    E1 = E
    IF (ABS(EPS).GT.1..AND.NS.LT.15) GO TO 200
    NL = NLOOP + 3
250 DO 260 I = 1,NR
260 R(I) = B(I)
    NS = NS + 1
    CALL BANSOL (NR,MM,NN,V,B,1)
    E = 0.
    DO 300 I = 1,NR
    IF (ABS(B(I)).GT.ABS(E)) E = B(I)
300 CONTINUE
    DMAX = 0.
    SUMD = 0.
    DO 320 I = 1,NR
    B(I) = B(I)/E
    D = ABS(B(I)-R(I))
    SUMD = SUMD + D**2
    IF (D.GT.DMAX) DMAX = D
320 CONTINUE
    IF (DMAX.LE.TOL.OR.NS.GE.NSMAX) GO TO 400
    NL = NL + 1
    IF (NL.LT.NLOOP) GO TO 250
    REWIND 1
    CALL LEE(A,NN,MM,1,1)
    NL = 0
    X = 0.
    Y = 0.
    DO 340 I = 1,NR
    X = X + B(I)*R(I)
```

```
340 Y = Y + B(I)*B(I)
    SHIFT = SHIFT + AMAX1(1.,4.*SUMD,0,9)*X/(Y+E)
    DO 350 I = 1, NR
350 V(I) = V(I) - SHIFT
    CALL BANSOL (NR,MM,NN,V,B,0)
    GO TO 250
400 X = 0.
    Y = 0.
    DO 420 I = 1, NR
    X = X + B(I)*R(I)
420 Y = Y + B(I)*B(I)
    SHIFT = SHIFT + X/(Y+E)
    EV(NEIG) = SHIFT + PSHIFT
    SHIFT = SHIFT - TOL
    PSHIFT = EV(NEIG) - TOL
    Y = SQRT(Y)
    DO 430 I = 1, NN
430 R(I) = B(I)/Y
    IF (NEIG.GE.NEV) GO TO 650
C *****
C REDUCCION DE LA MATRIZ EN BANDA
C *****
    REWIND 1
    CALL LEE(A,NN,MM,1,1)
    DO 450 NX = 1, NR
    FB = R(NX)
    IF (FB.NE.0.) GO TO 480
450 CONTINUE
480 DO 500 I = 1, NR
    L = NW + I
    V(I) = V(I) - SHIFT
500 V(L) = 0.
    NRS = NR - 1
    NR1 = NR + 1
    Q1 = R(1)**2
    S2 = 0.
    C = 1.
    DO 600 I = 1, NRS
    K = I + 1
    Q = Q1 + R(K)**2
    IF (I.LT.NX) GO TO 550
    S2 = Q1/Q
    C = R(K)/SQRT(Q)
    IF (FB.LT.0.) C = -C
550 S = SQRT(S2)
    C2 = C*C
    SN(I) = S
    CN(I) = C
    Q1 = Q
    L = NN + I
    A11 = V(I)
    A22 = V(K)
    A12 = V(L)
    X = 2.*A12*S*C
    V(I) = A11*C2 + A22*S2 - X
    V(K) = A22*C2 + A11*S2 + X
    V(L) = A12*(C2-S2) + (A11-A22)*S*C
    MR = MINO (I,MM)
    IF (MR.LE.1) GO TO 570
    L1 = I
```

```
DO 560 J = 2,MR
L1 = L1 + NNR
L2 = L1 + NN
A1 = V(L1)
A2 = V(L2)
V(L1) = A1*C - A2*S
560 V(L2) = A2*C + A1*S
570 MR = MINO (NM1, NR1-I)
IF (MR.LT.3) GO TO 598
L2 = K
DO 580 J = 3,MR
L2 = L2 + NN
L1 = L2 + NNR
A1 = V(L1)
A2 = V(L2)
V(L1) = A1*C - A2*S
580 V(L2) = A2*C + A1*S
598 CONTINUE
600 CONTINUE
```

```
C *****
C MATRIZ REDUCIDA, EIGENVECTORES, SENOS Y COSENOS DE MATRICES JACOBI
C GIRADAS ALMACENADAS EN DISCO
C *****
```

```
REWIND 1
CALL LEE(A, NN, MM, 0, 1)
WRITE (2) (R(I), SN(I), CN(I), I=1, NN)
NR = NR - 1
IF (NBC.LE.0) GO TO 1000
DO 620 N = 1, NBC
I = NEBC(N)
IF (I.GE.NX) NEBC(N) = I - 1
620 CONTINUE
GO TO 1000
```

```
C *****
C RECUPERACION DE EIGENVECTORES DE LA MATRIZ ORIGINAL Y
C COMPROBACION DEL ARREGLO DE LOS EIGENVALORES
C *****
```

```
650 DO 700 I = 1, NN
700 A(I, NEV) = R(I)
IF (NEV.LE.1) GO TO 900
LL = NEV - 1
DO 800 N = 1, LL
M = NEV - N
NRS = NN - M
NR = NRS + 1
BACKSPACE 2
READ (2) (A(I, H), SN(I), CN(I), I=1, NN)
BACKSPACE 2
KK = M + 1
DO 800 L = 1, NRS
I = NR - L
K = I + 1
DO 800 J = KK, NEV
A1 = A(I, J)
A2 = A(K, J)
A(I, J) = A1*CN(I) + A2*SN(I)
800 A(K, J) = A2*CN(I) - A1*SN(I)
DO 830 K = 1, LL
M = LL - K + 1
DO 830 J = 1, M
```

```
E1 = EV(J)
E2 = EV(J+1)
IF (E1.LT.E2) GO TO 828
EV(J+1) = E1
EV(J) = E2
DO 820 I = 1,NN
TEMP = A(I,J)
A(I,J) = A(I,J+1)
820 A(I,J+1) = TEMP
828 CONTINUE
830 CONTINUE
900 DO 920 I = 1,NN
X = SHASS(I)
SHASS(I) = 1./X**2
DO 920 J = 1,NEV
920 A(I,J) = A(I,J)*X
RETURN
12 FORMAT (///10X,'HASA .LE. QUE CERO, ECUACION=' ,I5)
END
```

```
SUBROUTINE BANSOL (NN,MM,NDIM,A,B,KKK)
C *****
C NUCLEO PARA RESOLVER ECUACIONES ALGEBRAICAS EN BANDA
C KKK = 0 TRIANGULARIZA MATRIZ A
C KKK = 1 REDUCE Y SUSTITUYE DE REGRESO EL VECTOR B
C KKK = 2 SUSTITUYE DE REGRESO EL VECTOR B
C *****
DIMENSION A(NDIM,1), B(1)
NR = NN - 1
IF (KKK=1) 100,300,400
100 DO 200 N = 1,NR
M = N - 1
IF (A(N,1).EQ.0.) A(N,1) = 1.0E-16
PIVOT = A(N,1)
MR = MINO (MM,NN-M)
DO 200 L = 2,MR
C = A(N,L)/PIVOT
IF (C.EQ.0.) GO TO 200
I = M + L
J = 0
DO 180 K = L,MR
J = J + 1
180 A(I,J) = A(I,J) - C*A(N,K)
A(N,L) = C
200 CONTINUE
IF (A(NN,1).EQ.0.) A(NN,1) = 1.0E-16
GO TO 500
300 DO 350 N = 1,NR
M = N - 1
MR = MINO (MM,NN-M)
C = B(N)
B(N) = C/A(N,1)
DO 350 L = 2,MR
I = M + L
350 B(I) = B(I) - A(N,L)*C
400 B(NN) = B(NN)/A(NN,1)
DO 450 K = 2,NN
H = NN - K
N = M + 1
MR = MINO (MM,K)
DO 450 L = 2,MR
I = M + L
450 B(N) = B(N) - A(N,L)*B(I)
500 RETURN
END
```

```
SUBROUTINE FECHA
INSTITUTO DE INGENIERIA, UNAM, MEXICO, SECCION DE COMPUTACION,
ENERO DE 1971, SERIE DE PROGRAMAS PARA COMPUTADORA, SUBROUTINA FECH A
DA LA FECHA EN B5500 O B6700, CODIGO BCL A, FLORES VICTORIA
LOGICAL CUAL, BURRA
INTEGER TIEMPO, AÑO, MES, DIA, HORA, MIN, DIAS, EFMAMJ
DIMENSION DIAS(11), LUMA(7), MJVSD(7), EFMAMJ(12), JASOND(12)
1 FORMAT(/30X,A3,A6,I3,4H DE A4,A6,6H DE 19I2,4X,I2,1HI2,11H HORAS
1 CON F8.4,10H SEGUNDOS,/)
DATA ERA, DIA, NDIA, MES, AÑO /5*0/
DATA DIAS/31,28,31,30,31,30,31,31,30,31,30/
DATA LUMA/2*6H ,30HMIE V D /
DATA MJVSD/42H LUNESMARTESRICOLESJUEVESIERNESABADODOMINGO/
DATA EFMAMJ/12H F ,6*6H ,23HSEPT OC NOV DIC /
DATA JASOND/72H ENEROEDRERO MARZO ABRIL MAYO JUNIO JULIOAGOSTAIEM
1BRETUGRE IEMBREIEMBRE// CUAL, BURRA/ .FALSE., .FALSE./
EDAD = TIME( 0 )
TIEMPO= TIME( 1 )
IF( EDAD ,EQ, ERA ) GO TO 9
IF( CUAL ) GO TO 2
SEG = 1H5
SEG = CONCAT( 1H ,SEG,12,12,6 )
IF( SEG .NE. 1H5 ) BURRA = ,TRUE.
CUAL = ,TRUE.
2 IF( BURRA ) GO TO 3
NDIA = ( CONCAT( 0,EDAD,42,30,6 ) *10.0 + CONCAT( 0,EDAD,42,36,6 )
1) *10.0 + CONCAT( 0,EDAD,42,42,6 )
AÑO = CONCAT( 0,EDAD,42,16,6 ) *10.0 + CONCAT( 0,EDAD,42,24,6 )
GO TO 4
3 NDIA = ( CONCAT( 0,EDAD, 5,17,6 ) *10.0 + CONCAT( 0,EDAD, 5,11,6 )
1) *10.0 + CONCAT( 0,EDAD, 5, 5,6 )
AÑO = CONCAT( 0,EDAD, 5,29,6 ) *10.0 + CONCAT( 0,EDAD, 5,23,6 )
4 HORA = AÑO
MES = 0
ERA = EDAD
IF( MOD( AÑO, 4 ) .EQ. 0 ) DIAS( 2 ) = 29
DO 5 I = 1, 11
IF( NDIA .LE. DIAS(I) ) GO TO 6
MES = MES + 1
5 NDIA = NDIA - DIAS(I)
6 IF( MES .LT. 2 ) GO TO 7
MIN = MES - 1
GO TO 8
7 MIN = MES + 11
HORA = AÑO - 1
8 MES = MES + 1
DIA = MOD( (MIN*26-2)/10 + NDIA + HORA + HORA/4, 7 ) + 1
9 HORA = TIEMPO/216000
MIN = MOD( TIEMPO/3600, 60 )
SEG = AMOD( TIEMPO/60.0, 60.0 )
WRITE (6,1) LUMA(DIA), MJVSD(DIA), NDIA, EFMAMJ(MES), JASOND(MES),
1 AÑO, HORA, MIN, SEG
RETURN
END
```

C.8.2 Listado del programa para el análisis incremental estático simulando el proceso de construcción.

```
FILE S=GA02,UNIT=RTALK
FILE 8=GUARDA/DATPS,UNIT=DISK,SAVE=30,AREA=10,RECORD=1023
COMMON LETAP
DIMENSION A(13000),HELEH(10),NB(10)
READ 1,NETAP,HTP,HTIP,NHIV
PRINT 1,NETAP,HTP,HTIP

REF 1,(HELEH(H),H=1,NETAP)
PRINT 1,(HELEH(H),H=1,NETAP)
REF 1,(NB(H),H=1,NETAP)
PRINT 1,(NB(H),H=1,NETAP)
1 FORMAT (16I5)
NEC=1
IFAC=1
FAC=IFAC
RFAC=1./FAC
NEL=HELEH(NETAP)
NB1=NB(NETAP)
NF=2*HTP
ND=NEL
NDF=NF
NBAH=20
N0=1
N1=N0+NEL
N2=N1+NEL*4
N3=N2+HTP
N4=N3+HTP
N5=N4+HTIP
N6=N5+HTIP
N7=N6+HTIP
N8=N7+HTIP
N9=N8+HTIP
N10=N9+NEL*6
N11=N10+18*NEL
N12=N11+36*NEL
M1=N12+NF
M2=M1+3*NEL
M3=M2+NF
M4=M3+NEL
M5=M4+NF
M6=M5+NF
M7=M6+NF+NBAH
M8=M7+NEL
M9=M8+NF
L1=M9+NF
L2=L1+6*NEL
L3=L2+9*NEL
L4=L3+18*NEL
L5=L4+NF+NBAH
L6=L5+NEL
L7=L6+NEL
L8=L7+NEL
```

```
L9=L8+HEL
K1=L9+9*HEL
K2=K1+3*HEL
K3=K2+3*HEL
K4=K3+HEL
K5=K4+7*HEL
CALL LEGDAT (A(L2),A(N3),A(N4),A(N5),A(N6),A(N7),A(N8),HTP,NTIP)
H=1
H=1
IETAP=0
DO 10 HH=1,HTAP
  IETAP=HTP
  HEL=HELEH(HH)
  HB1=HB(HH)
  HF=2*(HB1-1)
  CALL FORBAN(A(N1),HF,VBAN,HB1,HEL,HD,H)
  DO 14 HE=H,HEL
    CALL BIG (A(H1),A(H2),A(H3),A(H5),A(H6),A(H7),A(N8),A(H9),A(H10),
1     A(H11),A(H3),A(L4),A(L1),A(L2),A(L3),A(L5),A(L6),A(L7),A(L8),
2     HB1,HTP,HEL,HF,VBAN,HTIP,HE,A(H4),HD,HDF,A(N0))
    CALL CARGA (A(H1),A(H5),A(H2),A(H3),HF,HB1,HF,HTIP,HEL,HD)
14  CALL EPSANO(A(N9),A(L9),A(N11),HE,HF,HBAN,HEL,HD,HDF,1)
    CALL PRIME(A(H2),1,HF,1)
    L=0
    CALL SOL (A(L4),H,IETAP,L,HF,HEL,HBAN,A(N9),A(N11),A(H10),HD,IPG,
1  IPGG,A(H12),A(H1),A(H2),A(H3),A(H4),A(H5),A(H6),A(H7),A(H8),A(H9),
2  A(L1),A(L2),A(L3),A(N0),A(L5),A(L6),A(L7),A(L8),A(L9),A(K1),
3  A(K2),A(K3),A(K4),A(K5),HEC,HDF)
    L=1
    IETAP=HEL
    H=4
10  H=HEL+1
    CALL FSEPRI(A(H1),A(K5),HEL)
    CALL TIEMPO
    DO 17 HH=1,HHIV
      READ 1,HEC,HPF
      K5=K4+HEL
      K6=K5+HEC
      K7=K6+HPF
      K8=K7+HPF
      K9=K8+HPF
      K10=K9+HEL
      CALL HIBEST (A(K9),A(K5),A(K6),A(K7),A(K8),A(H2),A(K3),HEC,HPF,
1     HF,HEL,A(K4),A(H3),HB1,A(H1),HD)
      CALL PRIME(A(H2),1,HF,1)
      CALL SOL (A(L4),4,IETAP,1,HF,HEL,HBAN,A(N9),A(N11),A(H10),HD,IPG,
1  IPGG,A(H12),A(H1),A(H2),A(H3),A(H4),A(H5),A(H6),A(H7),A(H8),A(H9),
2  A(L1),A(L2),A(L3),A(N0),A(L5),A(L6),A(L7),A(L8),A(L9),A(K1),
3  A(K2),A(K3),A(K4),A(K5),HEC,HDF)
      CALL GRABA(A(H11),A(L9),A(H7),A(H1),A(H5),A(N9),A(H10),A(K4),HD,
1     HEL,HF,A(H8),A(H2),A(K1))
      CALL EXIT
    END
```

```
SUBROUTINE LECDAT (X,Y,EY,PU,PVO,COE,FRI,NTP,NTIP)
DIMENSION X(NTP),Y(NTP),EY(NTIP),PU(NTIP),PVO(NTIP),COE(NTIP),
1 FRI(NTIP)
READ 2,(X(I),Y(I),I=1,NTP)
PRINT 2,(X(I),Y(I),I=1,NTP)
2 FORMAT(2F10.3)
READ 3,(EY(I),PU(I),PVO(I),COE(I),FRI(I),I=1,NTIP)
PRINT 3,(EY(I),PU(I),PVO(I),COE(I),FRI(I),I=1,NTIP)
3 FORMAT(5F10.3)
RETURN
END
```

```
SUBROUTINE FORBAN(NOD,NF,NDA,N,NB1,NEL,ND,NH)
DIMENSION NOD(ND,4)
READ 71,((NOD(NI,I),I=1,4),NI=1,NH,NEL)
71 FORMAT(4I5)
PRINT 3,(I,(NOD(I,J),J=1,4),I=1,NEL)
3 FORMAT (///10X,"MATRIZ NODAL"//(5X,I5,3X,4I5))
KK=0
DO 29 N=1,NEL
DO 30 IJ=1,2
K1=NOD(N,IJ)
IF (K1 .GE. NB1) GO TO 30
I2=IJ+1
DO 31 JJ=I2,3
K2=NOD(N,JJ)
IF (K2 .GE. NB1) GO TO 31
M=IABS(K2-K1)
31 CONTINUE
30 CONTINUE
IF (N.GT.KK)KK=M
29 CONTINUE
NBAN=2*KK+2
PRINT 2,NBAN
2 FORMAT (///10X,"ANCHO DE LA SEÑALANDA =",I5/)
RETURN
END
```

```

SUBROUTINE FIG (ND, X, Y, PU, PVO, COE, FRI, LH, R, S, APEAS, RT, MAG, D, ZB,
1  SENO, COSENO, PO, SEN2, NB1, NTP, NLL, HF, NGAH, NTP, H, EY, ND, NDF, COEH)
DIMENSION MAG(6, NEL), LU(NB, 6), RT(NDF, NBAR), X(NTP), Y(NTP),
1  AREAS(NEL), B(3, 6, NEL), ZB(18, NEL), SENO(NEL), COSENO(NEL),
2  D(3, 3, NEL), S(NB, 6, 6), C(6, 6),
2  EY(NTP), PU(NTP), PVO(NTP), COE(NTP), FRI(NTP), SEN2(NEL), PO (
3  NEL), COEH(NEL)
DIMENSION NOD(ND, 4)
ND2=(NB1-1)*2
DO 114 JJ=1, 3
MAG(2*JJ-1, 1)=2*NOD(N, JJ)-1
114 MAG(2*JJ, 1)=2*NOD(N, JJ)
I=MAG(2, 1)+0.5
J=MAG(4, 1)+0.5
K=MAG(6, 1)+0.5
XIJ=X(I)-X(J)
XIK=X(I)-X(K)
XJK=X(J)-X(K)
YIJ=Y(I)-Y(J)
YIK=Y(I)-Y(K)
YJK=Y(J)-Y(K)
AREA=0.5*(XIK*YJK-XJK*YIK)
IF(AREA.LE.0.)GO TO 17
AREAS(N)=AREA
AREA2=AREA*2.
B(1, 1, N)=YJK/AREA2
B(1, 3, N)=-YIK/AREA2
B(1, 5, N)=YIJ/AREA2
B(2, 2, N)=-XJK/AREA2
B(2, 4, N)=XIK/AREA2
B(2, 6, N)=-XIJ/AREA2
B(3, 1, N)=B(2, 2, N)
B(3, 2, N)=B(1, 1, N)
B(3, 3, N)=B(2, 4, N) B(3, 5, N)=B(2, 6, N)
B(3, 4, N)=B(1, 3, N) B(3, 6, N)=B(1, 5, N)
DO 50 II=1, 6
ZB(II, N)=B(1, II, N)
JJ=II+6
ZB(JJ, N)=B(2, II, N)
KK=II+12
ZB(KK, N)=B(3, II, N)
LH(N, II)=MAG(II, N)
IF(LH(N, II).GT.ND2)LH(N, II)=0
50 CONTINUE
IJK=NOD(N, 4)
PUA=PU(IJK)
PV=PVO(IJK)
COE(N)=COE(IJK)
E=EY(IJK)
FRICC=FRI(IJK)
ANGULO= ATAN(FRICC)
SENO(N)=SIN(ANGULO)
COSENO(N)=COS(ANGULO)
PO(N)=1./(1.-2.*PUA)
SEN2(N)=1.+SENO(N)**2*PU(N)
D(1, 1, N)=1.-PUA
D(1, 2, N)=PUA
D(2, 2, N)=D(1, 1, N)
D(2, 1, N)=D(1, 2, N)

```

```
D(3,3,H)=0.5*PUA
CONS=E/((1.+PUA)*(1.-2.*PUA))
DO 23 II=1,3
DO 23 JJ=1,3
23 D(II,JJ,H)=CONS*D(II,JJ,H)
CALL SRIG(S,D,B,AREAS,H,NEL,H0)
GO TO 22
17 PRINT 31,H
GO TO 22
22 RETURN
31 FORMAT (///10X,"ERROR AREA .I.E.0.ELEMENTO=","15/)
END
```

```
SUBROUTINE CARGA (H0D,PV0,DP,AREAS,H1,NB1,IF,NTIP,NEL,H0)
DIMENSION H0D(H0,4),DP(NF),PV0(NTIP),AREAS(NEL)
I=H0D(H1,1)
J=H0D(H1,2)
K=H0D(H1,3)
IJK=H0D(H1,4)
PV=PV0(IJK)
W=AREAS(H1)*PV/3.
W=-W
IY=2*I
JY=2*J
KY=2*K
N=H1
IF(I.GE.NB1)GO TO 50
DP(IY)=DP(IY)+W
50 IF(J.GE.NB1)GO TO 51
DP(JY)=DP(JY)+W
51 IF(K.GE.NB1)GO TO 14
DP(KY)=DP(KY)+W
14 RETURN
END
```

```
SUBROUTINE SRIG(S,D,B,AREAS,H,NEL,H0)
DIMENSION S(H0,6,6),D(3,3,NEL),B(3,6,NEL),AREAS(NEL)
DO 12 II=1,3
DO 12 JJ=1,6
SUMA=0.
DO 33 KK=1,3
33 SUMA=SUMA+D(II,KK,N)*B(KK,JJ,H)
12 C(II,JJ)=SUMA
DO 32 II=1,6
DO 32 JJ=1,6
SUMA=0.
DO 43 KK=1,3
43 SUMA=SUMA+B(KK,II,H)*C(KK,JJ)
32 S(H,II,JJ)=SUMA*AREAS(H)
RETURN
END
```

```
SUBROUTINE EPSAN(BHAG,RT,S,N,HP,NBAN,NEL,ND,NDF,SIG)
DIMENSION BHAG(ND,6),RT(NDF,NBAN),S(ND,6,6)
DO 16 KL=1,6
IF(BHAG(N,KL).EQ.0)GO TO 16
KK=BHAG(N,KL)
DO 16 LE=1,6
IF(BHAG(N,LE).EQ.0)GO TO 16
LL=BHAG(N,LE)-KK+1
IF(LL.LE.0)GO TO 16
RT(KK,LL)=RT(KK,LL)+S(N,KL,LE)*SIG
16 CONTINUE
RETURN
END
```

```
SUBROUTINE HIDEST (U,NECP,NPFH,PHEX,PHEY,DP,INDICE,NEC,NPF,NF,NEL
1 ,UF,AREA,NB1,NDD,ND)
DIMENSION NECP(NEC),NPFH(NPF),PHEX(NPF),PHEY(NPF),UF(NEL),DP(NF)
1 ,INDICE(NEL),U(NEC)
DIMENSION AREA(NEL),NDD(ND,4)
1 FORMAT(18I5)
2 FORMAT(2F10,3)
3 FORMAT(8F10,3)
READ 1,(NECP(I),I=1,NEC)
READ 1,(NPFH(I),I=1,NPF)
READ 2,(PHEX(I),PHEY(I),I=1,NPF)
READ 3,(U(I),I=1,NEC)
ALFA=ATAN(0.5)
BETA=ATAN(5)
DO 18 N1=1,NPF
N2=NPFH(N1)+2
P=PHEX(N1)/SIN(ALFA)
PX=P*SIN(BETA)
PY=P+COS(BETA)
DP(N2)=DP(N2)+PY
18 DP(N2-1)=DP(N2-1)+PX
DO 19 N1=1,NEC
NE=NECP(N1)
PES0=AREA(NE)/3.+0.68
I=NDD(NE,1)
J=NDD(NE,2)
K=NDD(NE,3)
IY=2.+I
JY=2.+J
ZY=2.+Z
H=PES0
IF(I.GE.NB1)GO TO 50
DP(IY)=DP(IY)+H
50 IF(J.GE.NB1)GO TO 51
DP(JY)=DP(JY)+H
51 IF(K.GE.NB1)GO TO 19
DP(KY)=DP(KY)+H
19 UF(NE)=0.
RETURN
END
```

```
SUBROUTINE SOLBANK(N,NBAN,UB,X,HDF)
DIMENSION U(HDF,1),B(1),X(1)
DO 10 I=1,N
10 X(I)=0.
DO 1 I=1,N
J=I-NBAN+1
IF(I+1.LT.NBAN) J=1
SUM=B(I)
IF(I-1.EQ.0)GO TO 1
DO 2 K=J,I-1
2 SUM=SUM-U(K,I-K+1)*X(K)
1 X(I)=SUM+U(I,1)
DO 3 L=1,N
I=N-L+1
J=I-NBAN-1
IF(J.GT.N) J=N
SUM=X(I)
IF(J.EQ.0)GO TO 3
DO 4 K=I+1,J
4 SUM=SUM-U(K,I-K+1)*X(K)
3 X(I)=SUM+U(I,1)
RETURN
END
```

```
SUBROUTINE AUXBANK(N,NBAN,A,IE,HDF)
DIMENSION A(HDF,1)
DO 10 I=1,N
IP=N-I+1
IF(NBAN.LT.IP) IP=NBAN
DO 10 J=1,IP
IQ=NBAN-J
IF(I-1.LT.IQ) IQ=I-1
SUM=A(I,J)
IF(IQ.EQ.0)GO TO 13
DO 12 K=1,IQ
12 SUM=SUM-A(I-K,K+1)*A(I-K,J+K)
13 IF(J.NE.1) GO TO 18
IF(SUM.LE.0.) GO TO 19
TEMP=1./SORT(SUM)
A(I,J)=TEMP
GO TO 10
19 IE=1
GO TO 15
18 A(I,J)=SUM*TEMP
10 CONTINUE
15 RETURN
END
```

```
SUBROUTINE FINE (A,HR,HC,HDF)
DIMENSION A(HDF,1)
DO 1 I=1,HC,B
H=L+7
IF(H.GT.HC)H=HC
PRINT 2,(K,K=L,H)
DO 1 I=1,HR
1 PRINT 3,I,(A(I,J),J=L,H)
RETURN
2 FORMAT (/10X,I3,7(12X,I3)/)
3 FORMAT (1X,I3,8(1PE15.7))
END
```

```
SUBROUTINE SOL(ST,IND,IETAP,INC,HF,NEL,NBAH,LH,S,ZB,ND,IP
1 G,IPGG,H,ESF,DP,AREA,DKO,D,RT,IP,DP1,DU,MAG,DE,B,COE,SENO,COSENO,
2 PUA,SEN2,RK01,DEFOR,DTTA,INDICE,UF,HECP,NEC,HDF)
DIMENSION ST(HDF,NBAH),H(HF),ESF(3,NEL),DP(HF),AREA(NEL),DKO(NF),
1D(HF),RT(HDF,NBAH),IP(NEL),DP1(NF),DU(HF),MAG(6,NEL),DE(3,3,NEL),
2 D(16,NEL),COE(NEL),SENO(NEL),COSENO(NEL),PUA(NEL),SEN2(NEL),
3 RK01(3,3,NEL),DEFOR(3,NEL),DTTA(3,NEL),INDICE(NEL)
COMMON IETAP
DIMENSION
1 DU1(172),DE(3),DTAD(3),F(6),AA(3,3),
2 AB(6,3,61),HHH(6),UF(NEL),HECP(NEC)
DIMENSION LH(ND,6),S(40,6,6),ZB(3,6,NEL)
DIMENSION TAD(3,200)
DO 79 H=1,NEL
DO 77 I=1,6
AB(I,1,H)=B(I,H)
II=6+I
AB(I,2,H)=B(II,H)
III=12+I
77 AB(I,3,H)=B(III,H)
79 CONTINUE
IF(IND.EQ.2)GO TO 200
DO 16 H=1,NEL
IF(IND.EQ.1)GO TO 300
IF(H.GT.IETAP)GO TO 300
SIGMAX=ESF(1,H)
SIGMAY=ESF(2,H)
TAOXY=ESF(3,H)
SIGMA=SIGMAY+2*UF(H)
B1=COE(H)+COSENO(H)-(SIGMAX+SIGMA)*.5*SENO(N)
IF(B1.LE.0)GO TO 300
B12=B1*B1
501 A1=(SIGMAX-SIGMAY)*0.5
RAD2=A1*A1+TAOXY*TAOXY
F1=RAD2*B12
IF(H.EQ.20)PRINT 1000,F1,B1
1000 FORMAT(8E15.8)
```

```
IF(F1.E.0)GO TO 502
RAD=SQRT(RAD2)
COC=R1/RAD
TAOXY=TAOXY*COC
ESF(3,H)=TAOXY
YYY=ABS(A1)
XXX=COC*YYY
XXY=ABS(XXX)
DELT=YYY-XXX
IF(SIGHAX.GT.SIGHAY)DELT=-DELT
SIGHAX=SIGHAX+DELT
SIGHAY=SIGHAY-DELT
ESF(1,H)=SIGHAX
ESF(2,H)=SIGHAY
SIGHA=SIGHAY+2.*UF(H)
D1=COE(H)*COSENO(H)-(SIGHAX+SIGHA)*.5*SENO(N)
D12=D1*D1
A1=(SIGHAX-SIGHAY)*0.5
F1=0.1
502 C1=2*TAOXY
D1=D1*SENO(N)
HH=.5/(D12*SENO2(H)+F1)
A1D1=A1+D1*PUA(H)
AHD1=-A1+D1*PUA(H)
IF(IP(H).EQ.0)GO TO 2)
PLANDA=DEFOR(1,N)*A1D1+DEFOR(2,N)*AHD1+DEFOR(3,N)*TAOXY+0.5*F1/
DE(3,3,H))*HH
IF(PLANDA.GT.0)GO TO 19
IP(H)=0
NI3=NI3+1
GO TO 300
19 IPG=IPG+1
20 IF(F1.GT.0)GO TO 22
IF(SENO(N).NE.0)GO TO 300
OC=(SIGHAX+SIGHA)*0.5
OB=A1
R=SQRT(TAOXY**2+OB**2)
SMIH=OC-R
SMAX=OC+R
IF(SMIH.GT.COE(H))GO TO 22
IF(SMAX.GT.COE(H))GO TO 22
GO TO 300
22 IP(H)=1
IPG=IPG+1
21 HH1=HH/(2.*DE(3,3,H))
IF(PLANDA.NE.0)GO TO 177
179 CE=0.
GO TO 178
177 CE=HH1+F1/PLANDA
IF(CE.EQ.1)GO TO 179
178 CTE=1./(1.-CE)
CTE=1.
AD=(A1+D1)*HH+CTE
AHD=(-A1+D1)*HH+CTE
C1=C1*HH+CTE
AA(1,1)=1.-AD+A1D1
AA(1,2)=-AD+AHD1
```

```
AA(1,3)=-TAQXY*AD
AA(2,1)=-AMP*A1D1
AA(2,2)=1.-AMP*AMP1
AA(2,3)=-TAQXY*AMP
AA(3,1)=-C1*A1D1
AA(3,2)=-C1*AMP1
AA(3,3)=1.-C1*TAQXY
HH=-F1*HH
C DTTA(1,H)=A1D1*HH
C DTTA(2,H)=AMP1*HH
C DTTA(3,H)=TAQXY*HH
DO 72 J=1,3
DO 72 I=1,3
SUMA=0.
DO 73 K=1,3
73 SUMA=SUMA+DE(I,K,H)*AA(K,J)
72 RK01(I,J,H)=SUMA
IF(METAP.LT.3)GO TO 2000
PRINT 120,H
PRINT 1000,A1,B1,C1,D1,F1
2000 CALL ENSAMB(LM,ST,S,N,HF,NBAN,NEL,ND,NDF,-1)
2001 CALL SRIG(S,RK01,ZB,AREA,N,NEL,ND)
2002 CALL ENSAMB(LM,ST,S,N,HF,NBAN,NEL,ND,NDF,1)
GO TO 16
300 DO 310 J=1,3
DTTA(J,H)=0.
DO 310 I=1,3
310 RK01(I,J,H)=DE(I,J,H)
CALL ENSAMB(LM,ST,S,N,HF,NBAN,NEL,ND,NDF,-1)
CALL SRIG(S,RK01,ZB,AREA,N,NEL,ND)
CALL ENSAMB(LM,ST,S,N,HF,NBAN,NEL,ND,NDF,1)
16 CONTINUE
IPGG=IPG
200 DO 2 I=1,HF
FREST=DP1(I)
DP1(1)=DP(I)-FREST
2 DU(I)=0.
209 DO 97 J=1,NEL
DO 97 I=1,3
97 DEFGR(I,J)=0.
DO 15 NI=1,HF
DO 15 NJ=1,NBAN
15 RT(NI,NJ)=ST(NI,NJ)
CALL AUXBAN(HF,NBAN,RT,IC,NDF)
IF(IC.EQ.1)GO TO 41
199 CALL SOLBAN(HF,NBAN,RT,DP1,H,NDF)
IB=0
DO 12 H=1,NEL
DO 95 J=1,6
K=HAG(J,H)
HHH(J)=H(K)
95 CONTINUE
96 DO 55 I=1,3
SUMA=0.
DO 54 J=1,6
54 SUMA=SUMA+AE(J,I,H)*HHH(J)
```

```
DEF(I)=SUMA
55 DEFCH(I,N)=(UFOR(I,N)+SUMA
DO 83 I=1,3
DTA=DTA(I,1)
320 SUMA=0.
DO 84 J=1,3
84 SUMA = SUMA+FKO1(I,J,N)*DEF(J)
83 DTAU(I)=SUMA+DTA
SIGMAX=ESF(1,N)+DTAU(1)
SIGMAX=ESF(2,N)+DTAU(2)
TACXY=ESF(3,N)+DTAU(3)
SIGMA=SIGMAX+2*UF(N)
B1=COS(EN)*COS(EN)-(SIGMAX+SIGMA)*.5*SENO(N)
IF(B1.GT.0)GO TO 890
IF(INDICE(N).EQ.1)GO TO 86
INDICE(N)=1
CALL ENSAMB(LM,ST,S,V,NF,NBAN,NEL,ND,NDF,-1)
DO 89 I=1,3
DO 90 J=1,3
90 RKC1(I,J,N)=0.
89 CONTINUE
IB=IP+1
PRINT 130,N
PRINT 1000,G1,B1,ESF(1,N),ESF(2,N),ESF(3,N)
GO TO 86
890 INDICE(N)=0
86 DO 85 J=1,3
85 TAU(J,N)=DTAU(J)
12 CONTINUE
IF(IB.GT.0) GO TO 209
DO 1 I=1,NF
1 DP1(I)=0.
DO 321 N=1,NEL
DO 322 J=1,3
322 ESF(J,N)=ESF(J,N)+TAU(J,N)
DO 28 I=1,6
SUMA=0.
DO 29 J=1,3
29 SUMA=SUMA+AD(I,J,N)*ESF(J,N)
28 F(I)=SUMA*AREA(N)
DO 31 I=1,6
K=MAG(I,N)
31 DP1(K)=DP1(K)+F(I)
321 CONTINUE
26 DO 7 I=1,NF
7 D(I)=D(I)+H(I)
CALL PRIME(DP,1,NF,1)
PRINT 114,(J,D(J),J=1,NF)
PRINT 115,(I,(ESF(J,I),J=1,3),I=1,NEL)
PRINT 120,(IP(I),I=1,NEL)
RETURN
41 PRINT 4
4 FORHAT(///10X,"ERROR EN LA FORMULACION DE LA MATRIZ K"/)
114 FORHAT(2X,I10,E20.6)
115 FORHAT(2X,I10,3E20.6)
120 FORHAT(16I5)
130 FORHAT(///10X,"ELEMENTO CO RIGIDEZ NULA,N="I5/)
RETURN
END
```

```
SUBROUTINE GRABA(S,ZDE,IP,ESF,D,LN,B,UF,ND,NEL,NF,DP1,P,DEFOR)
DIMENSION S(ND,6,6),ZDE(3,3,NEL),IP(NEL),ESF(3,NEL),D(NF),
1 LN(ND,6),B(3,6,NEL),UF(NEL),DP1(NF),P(NF),DEFOR(3,NEL)
REWIND 8
WRITE(8) (D(J),J=1,NF)
WRITE(8) ((DEFOR(I,J),J=1,NEL),I=1,3)
WRITE(8) (P(J),J=1,NF)
DO 1601 I=1,6
1601 WRITE(8) ((S(N,I,J),N=1,NEL),J=1,6)
WRITE(8) ((ZDE(I,J,N),N=1,NEL),J=1,3),I=1,3)
WRITE(8) (IP(I),I=1,NEL)
WRITE(8) ((LSF(I,J),J=1,NEL),I=1,3)
WRITE(8) ((LN(N,I),N=1,NEL),I=1,6)
WRITE(8) (((B(I,J,N),N=1,NEL),J=1,6),I=1,3)
WRITE(8) (UF(I),I=1,NEL)
REWIND 8
LOCK 8
RETURN
END
```

```
SUBROUTINE TIEMPO
TEJ=TIME(2)/60.
TES=TIME(3)/60.
PRINT 57,TEJ,TES
57 FORMAT(//10X,"TIEMPO DE EJECUCION          =",F10.4,5X,"SEG"/10X,
1 "TIEMPO DE ENTRADA Y SALIDA =",F10.4,5X,"SEG")
RETURN
END
```

```
SUBROUTINE ESFPR1(ESF,ESFUTR,NEL)
DIMENSION ESF(3,NEL),ESFUER(7,NEL)
DO 3 NF =1,NEL
  SIGMAX=ESF(1,NE)
  SIGMAY=ESF(2,NE)
  TAOXY=ESF(3,NE)
  OC=(SIGMAX+SIGMAY)/2.
  OD=(SIGMAX-SIGMAY)/2.
  R=SQRT(TAOXY**2+OD**2)
  SHIH=OC-R
  SHAX=OC+R
  TAOHAX=(SHAX-SHIH)/2.
  IF(TAOXY.EQ.0)GO TO 10
  ANGULO=28.64789*ATAN(TAOXY/OD)
  GO TO 11
10 ANGULO=0.
11 ESFUTR(1,NE)=SIGMAX
  ESFUER(2,NE)=SIGMAY
  ESFUER(3,NE)=TAOXY
  ESFUER(4,NE)=SHAX
  ESFUER(5,NE)=SHIH
  ESFUER(6,NE)=TAOHAX
  ESFUER(7,NE)=ANGULO
3 CONTINUE
DO 4 N=1,NEL
4 PRINT 20,N,(ESFUER(I,N),I=1,7)
  RETURN
20 FORMAT(5X,I3,7(1PE15.5))
END
```

C.8.3 Listado del programa para la organización de datos.

```
FILE 1=DATOS/PREHID,UNIT=DISK,SAVE=30,AREA=142,RECORD=1
FILE 5=VPOG,UNIT=READER
FILE 9=DATOS/CONF,UNIT=DISK,SAVE=30,AREA=7,RECORD=172
FILE 10=DATOS/FIG,UNIT=DISK,SAVE=30,AREA=30,RECORD=1023
FILE 11=DATOS/ELEN,UNIT=DISK,SAVE=30,AREA=700,RECORD=18,BLOCKING=
* 10
FILE 12=DATOS/PROP,UNIT=DISK,SAVE=30,AREA=400,RECORD=10,BLOCKING=
* 10
COMMON
1 NEL, NB1, NTP, NTIP, NPP, NF, NMUD, NEAN, NI,
2 NOI(163,4), NPIP(15), Z(172), PESO(172), XP(15), YP(15), RT(172,20)
READ 1, NEL, NB1, NTP, NTIP, NPP, NMUD
NF=2*(NB1-1)
DD 50 IN=1, NF
50 Z(IN)=0.
NPP2=NPP*2
PRINT 2, NEL, NB1, NTP, NTIP, NPP, NF, NMUD

CALL FORBAH
TEJ=TIME(2)/60.
TES=TIME(3)/60.
PRINT 57, TEJ, TES
CALL FORIH
IF (NEL.EQ. 0) GO TO 7
TEJ=TIME(2)/60.
TES=TIME(3)/60.
PRINT 57, TEJ, TES
CALL AUXPRE
TEJ=TIME(2)/60.
TES=TIME(3)/60.
PRINT 57, TEJ, TES
CALL COEUIL
7 TEJ=TIME(2)/60.

TES=TIME(3)/60.
PRINT 57, TEJ, TES
100 CALL EXIT
1 FORMAT (8I5)
2 FORMAT (///20X, "NUMERO DE ELEMENTOS", //15//20X,
* "PRIMER NUDO PRESCRITO", //15//20X,
* "NUMERO TOTAL DE PUNTOS", //15//20X,
* "NUMERO DE TIPOS DE MATERIALES", //15//20X,
* "NUMERO DE PUNTOS DE PRESION", //15//20X,
* "NUMERO DE GRADOS DE LIBERTAD", //15//20X,
* "NUMERO DE MODOS DEL AGUA", //15)
57 FORMAT(//10X, "TIEMPO DE EJECUCION", //F10.4,5X, "SLG"/10X,
1 "TIEMPO DE ENTRADA Y SALIDA", //F10.4,5X, "SEC")
END
```

```
SUBROUTINE FORBAN
COMMON
1  NEL, NE1, NTF, NTIP, NPP, NF, NHOD, NBAN, HI
2  NOD(163,4), NPPF(15), Z(172), PESO(172), XP(15), YP(15), RT(172,20)
  READ 1, ((NOD(I,J), J=1,4), I=1, NEL)
1  FORMAT(4I5)
  PRINT 3, (I, (NOD(I,J), J=1,4), I=1, NEL)
3  FORMAT (///10X,"MATRIZ NODAL"// (5X, I5, 3X, 4I5))
  KK=0
  DO 29 II=1, NEL
  DO 29 IJ=1, 2
  K1=NOD(N, IJ)
  IF (K1 .GE. NB1) GO TO 29
  I2=IJ+1
  DO 29 JJ=I2, 3
  K2=NOD(N, JJ)
  IF (K2 .GE. NB1) GO TO 29
  H=ABS(K2-K1)
  IF (H.LT.KK) KK=H
29 CONTINUE
  NBAN=2+KK+2
  PRINT 2, NBAN
2  FORMAT (///10X,"ANCHO DE LA SEMIBANDA =", I5/)
  RETURN
  END
```

```
SUBROUTINE FORFK
COMMON
1  NEL, NB1, NTP, NTIP, NPP, NF, NHOD, NBAR, HI,
2  NOI(163,4), PPF(15), Z(172), PESO(172), XP(15), YP(15), FT(172,20)
DIMENSION X(102), Y(102), FY(31), PU(31), PVO(31), MAG(163,6),
1  ST(172,20), AREAS(163), COE(21), FRI(21)
DIMENSION S(6,6), C(3,6), D(3,3), B(3,6)
DIMENSION NPROP(163), NMAT2(100), NMAT3(100)
DIMENSION DESP(172)
DIMENSION CC(3,6,163), ESF(163,3)
DIMENSION LM(163,6)
DIMENSION ESFUF(7,54), AUX(3,54)
READ 5, (X(I), Y(I), I=1, NTP)
READ 3, (EY(I), PU(I), PVO(I), I=1, NTIP)
READ 6, MAT, NM2, NM3
READ 6, (NMAT2(I), I=1, NM2)
READ 6, (NMAT3(I), I=1, NM3)
READ 5, (COE(I), FRI(I), I=1, MAT)
READ 6, (NPF(J), J=1, NPP)
PRINT 14
PRINT 55, (X(I), Y(I), I=1, NTP)
PRINT 13
PRINT 37, (EY(I), PU(I), PVO(I), I=1, NTIP)
DO 306 N=1, NEL
306 NPROP(N)=1
DO 307 I=1, NM2
K=NMAT2(I)
307 NPROP(K)=2
DO 308 I=1, NM3
K=NMAT3(I)
308 NPROP(K)=3
REWIND 10
REWIND 11
REWIND 12
WRITE (10) NF, NBAR, NEL, NPP
WRITE (10) (NPF(I), I=1, NPP)
DO 51 I=1, NF
DO 51 J=1, NBAR
51 RT(I,J)=0.0
DO 113 J=1, NPP
K=NPF(J)
113 YP(J)=Y(K)
PRINT 15
PRINT 55, (XP(I), YP(I), I=1, NPP)
DO 10 N=1, NEL
DO 10 J=1, 3
MAG(N,2*J-1)=2*NOD(N,J)-1
MAG(N,2*J)=2*NOD(N,J)
LM(N,2*J-1)=MAG(N,2*J-1)
LM(N,2*J)=MAG(N,2*J)
WRITE (11) MAG(N,2*J-1), MAG(N,2*J)
IF (NOD(N,J) .GE. ND1) GO TO 50
GO TO 10
50 MAG(N,2*J-1)=0
MAG(N,2*J)=0
10 CONTINUE
DO 11 N=1, NEL
I=NOD(N,1)
```

```
J=I*DD(I,2)
K=I*DD(I,3)
IJK=I*DD(I,4)
IHAT=I*PROF(I)
POA=PL(IJK)
PV=PV(IJK)
T=TY(IJK)
COEH=COE(IHAT)
FRICC=FRIC(IHAT)
ANGULO=ATAN(FRICC)
SENO=SIN(ANGULO)
COSENO=COS(ANGULO)
R(I,12)=COEH*SENO*COSENO*POA
XIJ=X(I)-X(J)
XIK=X(I)-X(K)
XJK=X(J)-X(K)
YIJ=Y(I)-Y(J)
YIK=Y(I)-Y(K)
YJK=Y(J)-Y(K)
AREA=0.5*(XIK*YJK-XJK*YIK)
IF (AREA .LE. 0.) GO TO 17
AREAS(I)=AREA
CONS=PI/((1.+POA)*(1.+2.*POA))
D(1,1)=1.-POA
D(1,2)=POA
D(3,3)=.5*POA
D(2,2)=D(1,1)
D(2,4)=D(1,2)
DO 23 II=1,3
DO 23 JJ=1,3
23 D(I,II)=CONS*D(II,II)
WRITE (11) ((D(L1,L2),L1=1,3),L2=1,3)
AREA2=AREA*2.
B(1,1)=YJK/AREA2
B(1,3)=YIK/AREA2
B(1,5)=YIJ/AREA2
B(2,2)=XJK/AREA2
B(2,4)=XIK/AREA2
B(2,6)=XIJ/AREA2
B(3,1)=B(2,2)
B(3,2)=B(1,1)
B(3,3)=B(2,4)
B(3,4)=B(1,3)
B(3,5)=B(2,6)
B(3,6)=B(1,5)
WRITE (11) ((B(L8,L9),L9=1,6),L8=1,3)
DO 12 II=1,3
DO 12 JJ=1,6
SUMA=0.
DO 33 KK=1,3
33 SUMA=SUMA+D(II,KK)*D(KK,JJ)
D(II,II)=SUMA
12 D(II,II)=SUMA
PV=2.2
V=AREA*PV/29.43
IF (J.GE.NB1)GO TO 71
Z(I+2-1)=Z(I+2-1)+W
Z(I+2)=Z(I+2-1)
71 IF (J.GE.NB1)GO TO 72
Z(J+2-1)=Z(J+2-1)+W
```

```
21 PRINT 24
18 FETURN
5  FORMAT(2F10:0)
3  FORMAT(3F10:0)
37 FORMAT(3F15:6)
55 FORMAT(2E15:6)
8  FORMAT (16I5)
13 FORMAT (///10X,"MODULO DE POISSON---PESOS ESPECIFICOS---",
*      "MODULOS DE YOUNG"/)
14 FORMAT (///10X,"COORDENADAS X---Y"/)
15 FORMAT (///10X,"COORDENADAS X---Y DE LA FRONTERA"/)
19 FORMAT (///10X,"MATRIZ DE RIGIDECESES"/)
24 FORMAT(///10X,"ERROR EN LA FORMULACION DE LA MATRIZ DE RIGIDECESES")
31 FORMAT (///10X,"ERROR AREA,LE.0. ELEMENTO=",15/)
END
```

```
SUBROUTINE AUXPRE
COMMON
1  MEL, NB1, NTP, NTIP, NPP, HF, NHOD, NBAN, HI
2  NOC(163,4), NPFR(15), Z(172), PESO(172), XP(15), YP(15), PT(172,20)
DIMENSION P(15), FE(30), DH(15), PU(15,3), FDU(15,3), PP(30)
READ 1, H, HI
PI=3.1415926
NPP1=NPP*1
NPP2=NPP*2
GAN=1.
DO 20 J=1, NPP1
K=J+1
P(J)=(H-YP(J))*GAN
20 DH(J)=YP(J)-YP(K)
P(NPP)=(H-YP(NPP))*GAN
PRINT 2
CALL PRIME(P,1,NPP,1)
FE(1)=0.
FE(2)=DH(1)*(2.*P(1)+P(2))/6.
DO 21 J=2, NPP1
I=J-1
K=J+1
FE(2*J)=(2.*P(J)+P(K))*DH(J)/6.
21 FE(2*J-1)=(P(I)+2.*P(J))*DH(I)/6.
FE(2*NPP-1)=(2.*P(NPP)+P(NPP1))*DH(NPP1)/6.
FE(2*NPP)=0.
PRINT 3
CALL PRIME(FE,1,NPP2,1)
C1=8.*GAN*H/(9.81*PI**2)
C2=PI/(2.*H)
DO 22 N=1, NHOD
C3=2*N-1
C4=(.1)**(N+1)/C3**2
DO 22 IZ=1, NPP
22 PU(IZ,N)=C1*C4*CO5(C2*C3*YP(IZ))
DO 31 N=1, NHOD
R=DH(1)/DH(2)
FDU(1,N)=DH(1)*(PU(1,N)*(4.+3.*R)/(1.+R)+PU(2,N)*(R+2.)-
*      PU(3,N)*R**2/(1.+R))/12.
DO 29 J=2, NPP1
```

```
Z(J+2)=Z(J+2-1)
72 IF(K.GC.NB1)GO TO 73
Z(K+2-1)=Z(K+2-1)+W
Z(K+2)=Z(K+2-1)
73 DO 32 II=1,6
DO 32 JJ=1,6
SUMA=0.
DO 43 KK=1,3
43 SUMA=SUMA+B(KK,II)*C(KK,JJ)
32 S(II,JJ)=SUMA*AREA
DO 16 KL=1,6
IF (MAG(H,KL) .EQ. 0) GO TO 16
KK=MAG(N,KL)
DO 16 LK=1,6
IF (MAG(H,LK) .EQ. 0) GO TO 16
L=MAG(N,LK)+KK+1
IF(LL.LE.0) GO TO 16
RT(KK,LL)=RT(KK,LL)+S(KL,LK)
16 CONTINUE
11 CONTINUE
WRITE (10) (AREFAS(H),N=1,NEL)
WRITE (10) (Z(H),H=1,NF)
DO 47 J=1,NBAN
47 WRITE (10) (RT(I,J),I=1,NF)
PRINT 19
CALL PRIME (RT,NF,NBAN,172)
CALL PRIME(2,1,NF,1)
NF2=NF/2
DO 53 I=1,NF
DO 53 J=1,NBAN
53 ST(I,J)=RT(I,J)
CALL AUXBAN(NF,NBAN,ST,IE,172)
IF(IE.EQ.1)GO TO 21
DO 40 IP=1,NF2
40 PESO(2*IP)=Z(2*IP)*9.81
CALL PRIME(PESO,1,NF,1)
CALL PRIME(ST,NF,NBAN,172)
CALL SOLBAN(NF,NBAN,ST,PESO,DESP,172)
CALL PRIME(DESP,1,NF,1)
DO 700 N=1,NEL
DO 701 J=1,3
SJM=0.
DO 702 I=1,6
K=LM(K,I)
702 SUM=SUM+CC(J,I,N)*DESP(K)
701 CSF(N,J)=SUM
700 CONTINUE
CALL PRIME(CSF,NEL,3,163)
DO 1000 LI=1,3
DO 1000 LJ=1,NEL
1000 AUX(LI,LJ)=CSF(LJ,LI)
CALL ESFPRI(AUX,ESFUER,NEL)
REWIND 11
LOCK 11
REWIND 12
LOCK 12
GO TO 18
17 NEL=0
PRINT 31,N
GO TO 18
```

```
I=J-1
K=J+1
R=DH(I)/DH(J)
PH1=DH(I)*(PU(I,N)*(2.+R)/(1.+R)+PU(J,N)*(4.+R)-
* FU(K,N)*R**2/(1.+R))/12.
R=1./R
PH2=DH(J)*(PU(K,N)*(2.+R)/(1.+R)+PU(J,N)*(4.+R)-
* PU(I,N)*R**2/(1.+R))/12.
29 FDU(J,H)=PH1+PH2
J=NPP1
31 FDU(K,H)=DH(J)*(FU(K,H)*(4.+3.*R)/(1.+R)+PU(J,N)*(R+2.)-
* PU(I,N)*R**2/(1.+R))/12.
TETA=ATAN((YP(1)-YP(2))/(XP(1)-XP(2)))
TETA=90.-TETA*180./PI
STETA=SIN(TETA)
CTETA=COS(TETA)
PRINT 4
CALL PRIME(FDU,NPP,NMOD,15)
REWIND 1

WRITE (1) NPP
WRITE (1) NMOD
WRITE (1) H
WRITE (1) HI
WRITE (1) TETA
WRITE (1) STETA
WRITE (1) CTETA
DO 5 N=1,NMOD
DO 5 I=1,NPP
5 WRITE (1) FDU(I,N)
REWIND 1
LOCK 1
DO 10 I=1,NPP
FZA=FE(2*I-1)+FE(2*I)
PP(2*I-1)=FZA*STETA
10 PP(2*I)=FZA*CTETA
DO 11 J=1,NPP
K=HPFR(J)
IF(K.GE.NB1)GO TO 11
PESQ(2*K)=PESQ(2*K)+PP(2*J)
PESQ(2*K-1)=PESQ(2*K-1)+PP(2*J-1)
11 CONTINUE
WRITE (10) (PESQ(I),I=1,NF)
CALL PRIME(PESQ,1,NF,1)
RETURN
1 FORMAT (2F10.0)
2 FORMAT (///10X,"DISTRIBUCION DE PRESIONES HIDROSTATICAS"/)
3 FORMAT(///10X,"FUERZAS HIDROSTATICAS"/)
4 FORMAT(///10X,"FUERZAS DINAMICAS UNITARIAS"/)
END
```

```
SUBROUTINE COEMIL
COMMON
1  HEC, HB1,HTP,HTIP,NPP,NF,HHOD,HBAN,HI,
2  HOC(163,4),HPPF(15),Z(172),PESD(172),XP(15),YP(15),RT(172,20)
DIMENSION ALFA(172),A3(172),A1(172),A2(172),DKO(172)
READ 1,BETA
READ 1,(ALFA(I),I=1,NF)
PRINT 2,HI,BETA
TETA=10./7.
TAU=TETA*HI
A0=1.+3.*BETA/TAU
A4=6./(TETA*TAU**2+A0)
A5=(18.*BETA/(TAU**3+A0)-6./TAU**2)/TETA
A6=(12.*BETA/(TAU**2+A0)-6./TAU)/TETA
A7=1.+3.*BETA/(TETA*TAU*A0)=3./TETA
DO 20 J=1,NF
B0=(6./TAU**2+3.*ALFA(J)/TAU)/A0
ZZ=Z(J)
CC=ALFA(J)-BETA*B0
A1(J)=ZZ*(6./TAU**2+3.*CC/TAU)
A2(J)=ZZ*(6./TAU+2.*CC)
A3(J)=ZZ*(2.+5*TAU*CC)
ZZ=ZZ*B0
DKO(J)=ZZ
20 RT(J,1)=RT(J,1)+ZZ
CALL AUXLAN (NF,HFAN,RT,IE,172)
IF (IE .EQ. 1) GO TO 21
DO 47 J=1,HBAN
47 WRITE (10) (RT(I,J),I=1,NF)
REWIND 9
WRITE (9) HB1,A0,A4,A5,A6,BETA,HI
WRITE (9) (ALFA(I),I=1,NF)
WRITE (9) (A1(I),I=1,NF)
WRITE (9) (A2(I),I=1,NF)
WRITE (9) (A3(I),I=1,NF)
WRITE (9) (Z(I),I=1,NF)
WRITE (9) (DKO(I),I=1,NF)
REWIND 9
LOCK 9
REWIND 10
LOCK 10
PRINT 3
CALL PRINC (RT,HF,HBAN,172)
PRINT 1000,HB1,A0,A4,A5,A6,BETA,HI
1000 FORMAT(ZE15.6)
CALL PRINC(ALFA,1,NF,1)
CALL PRINC(A1,1,NF,1)
CALL PRINC(A2,1,NF,1)
CALL PRINC(A3,1,NF,1)
CALL PRINC(Z,1,NF,1)
CALL PRINC(DKO,1,NF,1)
GO TO 22
21 PRINT 4
CALL EXIT
22 RETURN
1 FORMAT (8F10.0)
2 FORMAT (///10X,"INTERVALO DE INTLGRACION =",E10.4//10X,
* "COEFICIENTE BETA =",E10.4/)
3 FBRMAT (///10X,"MATRIZ DE RIGIDECES TRIANGULARIZADA"/)
4 FORMAT (///10X,"ERROR EN LA FORMULACION DE LA MATRIZ K"/)
```

```
SUBROUTINE AUXBAN(N,NBAN,A,IL,NDS)
DIMENSION A(NDS,1)
DO 10 I=1,N
IP=N-I+1
IF(NBAN.LT.IP) IP=NBAN
DO 10 J=1,IP
IQ=NBAN-J
IF(I=1.LT.IQ) IQ=I-1
SUM=A(I,J)
IF(IQ.EQ.0)GO TO 13
DO 12 K=1,IQ
12 SUM=SUM+A(I-K,K+1)*A(I-K,J+K)
13 IF(J.NE.1) GO TO 18
IF(SUM.LE.0.) GO TO 19
TEMP=1./SQRT(SUM)
A(I,J)=TEMP
GO TO 10
19 IE=1
GO TO 15
18 A(I,J)=SUM*TEMP
10 CONTINUE
15 RETURN
END
```

```
SUBROUTINE SOLBAN(N,NBAN,U,B,X,NDF)
DIMENSION U(NDF,1),B(1),X(1)
DO 1 I=1,N
J=I-NBAN+1
IF(I+1.LE.NBAN) J=1
SUM=B(I)
IF(I=1.EQ.0)GO TO 1
DO 2 K=J,I-1
2 SUM=SUM+U(K,I-K+1)*X(K)
1 X(I)=SUM+U(I,1)
DO 3 L=1,N
I=N-L+1
J=I+NBAN-1
IF(J.GT.N) J=N
SUM=X(I)
IF(J.EQ.0)GO TO 3
DO 4 K=I+1,J
4 SUM=SUM+U(I,K-I+1)*X(K)
3 X(I)=SUM+U(I,1)
RETURN
END
```

```
SUBROUTINE PRIME (A, NR, NC, NCA)
DIMENSION A(NCA, 1)
DO 1 L=1, NC, 8
M=L+7
IF (M.GT. NC) M=NC
PRINT 2, (K, K=L, M)
DO 1 I=1, NR
1 PRINT 3, I, (A(I, J), J=L, M)
RETURN
2 FORMAT (/10X, I3, 7(12X, I3)/)
3 FORMAT (1X, I3, 8(1PE15.7))
END
```

```
SUBROUTINE ESFPRI(ESF, ESFUER, NEL)
DIMENSION ESF(3, NEL), ESFUER(7, NEL)
DO 3 NE = 1, NEL
SIGMAX=ESF(1, NE)
SIGMAY=ESF(2, NE)
TAUXY=ESF(3, NE)
DC=(SIGMAX+SIGMAY)/2.
GB=(SIGMAX-SIGMAY)/2.
R=SQRT(TAUXY**2&GB**2)
SMIN=DC-R
SMAX=DC+R
TADMAY=(SMAX-SMIN)/2.
IF (TAUXY.EQ.0) GO TO 10
ANGULO=28.64769*ATAN(TAUXY/GB)
GO TO 11
10 ANGULO=0.
11 ESFUER(1, NE)=SIGMAX
ESFUER(2, NE)=SIGMAY
ESFUER(3, NE)=TAUXY
ESFUER(4, NE)=SMAX
ESFUER(5, NE)=SMIN
ESFUER(6, NE)=TADMAY
ESFUER(7, NE)=ANGULO
3 CONTINUE
DO 4 N=1, NEL
4 PRINT 20, N, (ESFUER(I, N), I=1, 7)
RETURN
20 FORMAT(5X, I3, 7(1PE15.5))
END
```

C.8.4 Listado del programa para procesar los datos de los acelerogramas.

```
FILE 11=SISH01/CONXI,UNIT=DISK,SAVE=30,AREA=2000,RECORD=1
FILE 12=SISH01/CONXM,UNIT=DISK,SAVE=30,AREA=2000,RECORD=1
FILE 13=SISH01/CONYT,UNIT=DISK,SAVE=30,AREA=2000,RECORD=1
FILE 14=SISH01/CONYI,UNIT=DISK,SAVE=30,AREA=2000,RECORD=1
DIMENSION TITULO(12)
READ 3, NSISM

PRINT 4, NSISM

TETA=10./7.
DO 1 I=1, NSISM
  READ 6, TITULO
  PRINT 8, TITULO
  READ 2, HI
  PRINT 5, HI
  READ 3, IFL1, IFL2
  1 CALL EXITA (HI, IFL1, IFL2, TETA)
  TES=TIME(3)/60.
  TEJ=TIME(2)/60.
  PRINT 57, TEJ, TES
  CALL EXIT
  2 FORMAT (F10.0)
  3 FORMAT(2I5)
  4 FORMAT(///20X,"NUMERO DE SISHOS =",I5)
  5 FORMAT(///20X,"INTERVALO DE INTEGRACION",F10.5)
  6 FORMAT (12A6)
  8 FORMAT (///12A6///)
57 FORMAT(///10X,"TIEMPO DE EJECUCION          =",F10.4,5X,"SEG"/10X,
  1 "TIEMPO DE ENTRADA Y SALIDA =",F10.4,5X,"SEG")
  END

SUBROUTINE EXITA (HI, IFL1, IFL2, TETA)
DIMENSION A(5000), T(5000)
READ 1, DT, NPT
READ 8, FESC
PRINT 7, DT, NPT, FESC
READ 2, (A(I), I=1, NPT)
IF(FESC.EQ.1.)GO TO 12
DO 13 I=1, NPT
13 A(I)=A(I)*FESC
12 REWIND IF2
PRINT 9, (I, A(I), I=1, NPT)
IF (HI=DT) 14, 10, 15
```

```
14 DO 3 I=1,NPT
3 T(I)=DT*(I-1)
NXY=NPT
CALL INTPOL (NXY,T,A,HI,NP,IF1)
READ (IF1) NP
PEAD (IF1) A1
WRITE (IF2) NP
WRITE (IF2) A1
READ (IF1) A1
DO 4 I=2,NP
READ (IF1) A2
ACEL=A1+(A2-A1)*(TETA-1.)
A1=A2
4 WRITE (IF2) ACFL
GO TO 11
10 REWIND IF1
WRITE (IF1) NPT
DO 6 I=1,NPT
6 WRITE (IF1) A(I)
WRITE (IF1) XYZ
WRITE (IF2) NPT
WRITE (IF2) A(I)
NPT1=NPT+1
A(NPT1)=0.
DO 5 I=2,NPT
ACEL=A(I)+(A(I+1)-A(I))*(TETA-1.)
5 WRITE (IF2) ACFL
GO TO 12
15 REWIND IF1
IH=INT(HI/DT)
NPTT=NPT/IH
WRITE (IF1) NPTT
DO 16 J=1,NPTT,IH
16 WRITE (IF1) A(J)
WRITE (IF1) XYZ
REWIND IF1
READ (IF1) NP
READ (IF1) A1
WRITE (IF2) NP
WRITE (IF2) A1
READ (IF1) A1
DO 17 I=2,NP
READ (IF1) A2
ACEL=A1+(A2-A1)*(TETA-1.)
A1=A2
17 WRITE (IF2) ACFL
11 REWIND IF1
LOCK IF1
REWIND IF2
LOCK IF2
RETURN
1 FORMAT (F10.0,I10)
2 FORMAT (8F9.5)
7 FORMAT (//20X,"INTERVALO DEL TEMBLOR =",F10.5,
* //20X,"NUMERO DE PUNTOS DEL TEMBLOR =",I5,
* //20X,"FACTOR DE ESCALA =",F10.3)
8 FORMAT(F10.0)
9 FORMAT(///10X,"TEMBLOR"//,(6(I5,E15.6)))
```

```
SUBROUTINE INTPOL(N,X,Y,DELTA,M,IFL)
DIMENSION X(1),Y(1)
REWIND IFL
N=INT(X(N)/DELTA)+1
WRITE (IFL) M
IF (DELTA .GE. (X(2)-X(1))) GO TO 4
DO 17 I=1,N-1
II=N+2-I
Y(II)=Y(II-1)
17 X(II)=X(II-1)
Y(2)=(Y(3)-Y(1))*(DELTA-X(1))/(X(3)-X(1))+Y(1)
X(2)=DELTA
N=N+1
4 LL=1
K=1
5 IL=K+3
JK=K+2
IF (IL.EQ.N) JK=N
DO 10 L=LL,N
XD=(L-1)*DELTA
IF(XD.GT.X(JK)) GO TO 15
YD=0.0
DO 30 J=K,IL
P=1.0
DO 20 I=K,IL
IF (I.NE.J) P=P*(XD-X(I))/(X(J)-X(I))
20 CONTINUE
30 YD=YD+Y(J)*P
10 WRITE (IFL) YD
WRITE (IFL) XYX1
REWIND IFL
RETURN
15 LL=L
K=K+1
GO TO 5
END
```

```
SUBROUTINE PRIME (A,NR,NC)
DIMENSION A(NR,NC)
DO 1 L=1,NC-8
M=L+7
IF(M.GT.NC)M=NC
PRINT 2,(K,K=L,M)
DO 1 I=1,NR
1 PRINT 3,I,(A(I,J)),J=L,M)
RETURN
2 FORMAT (/10X,I3,7(12X,I3)/)
3 FORMAT (1X,I3,8(1PE15.7))
END
```

C.8.5 Listado del programa para calcular fuerzas hidrodinámicas.

```

FILE 1=DATOS/PREHID,UNIT=DISK,SAVE=30,RECORD=1
FILE 2=GA02/SISHO/TERMOD,UNIT=DISK,SAVE=30,AREA=3000,RECORD=1
FILE 3=GA02/AUX/PHNIL,UNIT=DISK,SAVE=30,AREA=2000,RECORD=30
FILE 5=GA02,UNIT=READER
FILE 15=DATOS/FHID,UNIT=DISK,SAVE=30,AREA=2000,RECORD=30
COMMON
1      IFF,IFPV,NP
  DIMENSION TITULO(12)
  READ 6,TITULO
  PRINT 8,TITULO

  READ 1,IFP,IFPW,NF
  PRINT 3
  PRINT 1,IFP,IFPW
  PRINT 4,NF
  CALL FREHID
  TEJ=TIME(2)/60.
  TES=TIME(3)/60.
  PRINT 57,TEJ,TFS
1  FORMAT(16I5)
3  FORMAT(///10X,"NUMERO DE CADA FILE"/)
4  FORMAT(///10X,"NUMERO DE PUNTOS DEL TENBLOR =",I5)
6  FORMAT (12A6)
8  FORMAT (///12A6///)
57 FORMAT(//10X,"TIEMPO DE EJECUCION          =",F10.4,5X,"SEG"/10X,
1   "TIEMPO DE ENTRADA Y SALIDA =",F10.4,5X,"SEC")
  CALL EXIT
  END

```

```

SUBROUTINE PREHID
COMMON
1      IFF,IFPV,NP
  DIMENSION WZ(3),VZ(3),F(3),AH(3),VM(3),DM(3),FX(15),FD(15),
*      FDU(15,3),PHT(30)
  DIMENSION ACEL(5000),TIEMPO(5000)
  DIMENSION A(3,10000),FDU(15,2000)
  REWIND IFPW
  REWIND IFP
  READ (IFP) NFP
  READ (IFP) NMOD
  NPP2=NPP*2
  READ (IFP) H
  READ (IFP) HWI
  READ (IFP) TETA
  READ (IFP) STETA
  READ (IFP) CTETA
  DO 5 I=1,NMOD
  DO 5 J=1,NPP
5  READ (IFP) FDU(I,J)
  REWIND IFP
  LOCK IFP
  C1=1.-TETA/100.
  CW=2260.13856/H
  ZET=0.15
  READ 1,HINT,HT

```

```
DO 3 I=1,IP
ACEL(I)=ACEL(I)*6.
3 TIEMPO(I)=HINT*(I-1)
NPW=INT(TIEMPO(NP)/HWI)+1
NXY=NF
CALL INTPOL(NXY,TIEMPO,ACEL,HI,NP,2)
DO 26 H=1,NHOD
W=CW*(2.*H-1)
WZ(N)=W*ZET
W2(N)=W**2
26 F(N)=1./(1.+HI*WZ(N)+HI*HI*W2(N)/6.)
READ (2) AX
DO 24 IT=2,NP
READ (2) AX
25 DO 27 H=1,NHOD
XA=VN(H)+HI*AN(N)/2.
XB=DM(H)+HI*VM(N)+HI*HI*AM(N)/3.
AN(N)=F(N)*(-AX-2.*WZ(N)*XA-W2(N)*XB)
A(N,IT)=AN(N)
VM(N)=XA+HI*AN(N)/2.
27 DM(N)=XB+HI*HI*AN(N)/6.
24 CONTINUE
REWIND 2
LOCK 2
IA=INT(HHI/HI)
NP=NXY
DO 31 IT=2,NPW
IN=IA*(IT-1)+1
DO 28 IZ=1,NPP
FD(IZ)=0.
DO 28 H=1,NHOD
AA=A(N,IH)
28 FD(IZ)=FD(IZ)+FDD(IZ,N)*AA
DO 30 I=1,NPP
FD(I)=FD(I)*C1
30 FDD(I,IT)=FD(I)
31 CONTINUE
TET=10./7.
DO 32 IT=2,NPW
DO 33 I=1,NPP
F1X=FDD(I,IT)
F2X=FDD(I,IT+1)
FUERZA=F1X+(F2X-F1X)*(TET-1.)
PHT(2*I-1)=FUERZA*STETA
33 PHT(2*I)=FUERZA*CTETA
WRITE (IFPW) (PHT(I),I=1,NPP2)
32 CONTINUE
REWIND IFPW
LOCK IFPW
1 FORMAT(2F10.0)
2 FORMAT(8F9.5)
22 FORMAT (/60X,15)
1000 FORMAT(8E15.6)
RETURN
END
```

```
SUBROUTINE INTPOL(N,X,Y,DELTA,M,IFL)
DIMENSION X(1),Y(1)
REWIND IFL
N=INT(X(N)/DELTA)+1
IF (DELTA .GE. (X(2)-X(1))) GO TO 4
DO 17 I=1,N-1
  II=N+2-I
  Y(II)=Y(II-1)
17 X(II)=X(II-1)
  Y(2)=(Y(3)-Y(1))*(DELTA-X(1))/(X(3)-X(1))+Y(1)
  X(2)=DELTA
  N=N+1
4 LL=1
  K=1
5 IL=K+3
  JK=K+2
  IF (IL.EQ.N) JK=N
  DO 10 L=LL,N
  XD=(L-1)*DELTA
  IF(XD.GT.X(JK)) GO TO 15
  YD=0.0
  DO 30 J=K,IL
  P=1.0
  DO 20 I=K,IL
  IF (I.NE.J) P=P*(XD-X(I))/(X(J)-X(I))
20 CONTINUE
30 YD=YD+Y(J)*P
10 WRITE (IFL) YD
  WRITE (IFL) XX1
  REWIND IFL
  RETURN
15 LL=L
  K=K+1
  GO TO 5
END
```

```
SUBROUTINE PRIME (A,NR,NC)
DIMENSION A(NR,NC)
DO 1 L=1,NC/8
  H=L+7
  IF(H.GT.NC)H=NC
  PRINT 2,(K,K=L,N)
  DO 1 I=1,HR
1 PRINT 3,I,(A(I,J),J=L,N)
  RETURN
2 FORMAT (/10X,I3,7(12X,I3)/)
3 FORMAT (1X,I3,8(1PE15.7))
END
```

C.8.6 Listado del programa para el cálculo de la respuesta sísmica.

```

FILE 1=SISK01/CONXW,UNIT=DISK,AREA=2000,RECORD=1
FILE 2=SISK01/CONYW1,UNIT=DISK,AREA=2000,RECORD=1
FILE 5=CA02,UNIT=READER
FILE 8=GUARDA/DATOS,UNIT=DISK,SAVE=30,RECORD=1023
FILE 9=DATOS/COEF,UNIT=DISK,SAVE=30,RECORD=172
FILE 10=DATOS/RIG,UNIT=DISK,SAVE=30,RECORD=1023
FILE 11=DATOS/ELEN,UNIT=DISK,SAVE=30,RECORD=18,BLOCKING=10
FILE 12=DATOS/PRCP,UNIT=DISK,SAVE=30,RECORD=10,BLOCKING=10
FILE 15=DATOS/FHID,UNIT=DISK,AREA=2000,RECORD=30
FILE 20=DESP/P1X2,UNIT=DISK,SAVE=30,AREA=6000,RECORD=1,BLOCKING=30
FILE 21=DESP/P1Y2,UNIT=DISK,SAVE=30,AREA=6000,RECORD=1,BLOCKING=30
FILE 22=ACEL/P1X2,UNIT=DISK,SAVE=30,AREA=6000,RECORD=1,BLOCKING=30
FILE 23=ACEL/P1Y2,UNIT=DISK,SAVE=30,AREA=6000,RECORD=1,BLOCKING=30
FILE 32=DESP/P4X2,UNIT=DISK,SAVE=30,AREA=6000,RECORD=1,BLOCKING=30
FILE 33=DESP/P4Y2,UNIT=DISK,SAVE=30,AREA=6000,RECORD=1,BLOCKING=30
FILE 34=ACEL/P4X2,UNIT=DISK,SAVE=30,AREA=6000,RECORD=1,BLOCKING=30
FILE 35=ACEL/P4Y2,UNIT=DISK,SAVE=30,AREA=6000,RECORD=1,BLOCKING=30
COMMON/C1/
1  NF,IEL,MBAN,IPG,IPGG,N1,N2,N3,N4,NTP,A4,A5,A6,A7,A8,HI,
2  UP(172),ESF(3,163),DP(172),AREA(163),DKO(172),D(172)/C2/
3  RT(172,20),IP(163),DP1(172),DD(172),HAG(6,172),ZDE(3,3,172),
4  ZDE(18,163),COE(163),SEND(163),COSEND(163),PUA(163),SEN2(163),
5  RK01(3,3,163),DEFOR(3,163),DTTA(3,163),
6  UF(163),SDE(163),FKC(200),RECP(50),OMAX(100),INDICE(100),
7  CICLO(100),IPD(200),SKC(100),SDMAX(100),NEC
8  ,S(163,6,6),ST(172,20),LH(163,6),B(3,6,163)
9  ,X(172),Y(172),V(172),A(172),DDD(172)
DIMENSION Z(172),
1  HPFR(15),VV(172),AA(172), PA(172),
2  P(172),PHT(30)
DIMENSION HUD(10),NELEN(10)
DIMENSION TITULO(16)
1000 FORMAT(9F13.3)
1001 FORMAT(6I10)
5000 FORMAT(16I5)
5001 FORMAT(2F10.0)
5002 FORMAT(8F10.3)
5003 FORMAT(16A5)
DO 407 I=1,16
READ 5003,TITULO
PRINT 5004,TITULO

```

```
407 CONTINUE
5004 FORMAT(///10X,10A5///)
      READ 5000,IFDX,IFDY,IFAX,IFAY,IFSDEI,IFSDES,IESF
      PRINT 5000,IFDX,IFDY,IFAX,IFAY,IFSDEI,IFSDES
      READ 5000,N1,N2,N3,N4
      READ 5000,NINT,NE1,NTP,NEC
      READ 5001,(X(I),Y(I),I=1,NTP)
      PRINT 5001,(X(I),Y(I),I=1,NTP)
      READ 5002,ALFA,BETA,HI
      READ 700,I,HUD,PUMF
      READ 700,(HUD(I),I=1,NNUD)
      READ 700,(NELEM(I),I=1,NUNE)
700  FORMAT(16I5)
      READ 5000,(NECP(I),I=1,NEC)
      READ 700,(INDICE(I),I=1,NTP)
      REWIND IFDX
      REWIND IFDY
      REWIND IFAX
      REWIND IFAY
      REWIND IFSDEI
      REWIND IFSDES
      REWIND IESF
      L1=10
      L2=18
      NM=50
      REWIND 10
      READ(10) NF,NBAN,MEL,NPP
      READ (10) (NPP(I),I=1,NPP)
      READ (10) (AREAC(I),I=1,NEL)
      READ (10) (Z(I),I=1,NF)
      TETA=10./7.
      HI2=HI*HI
      TAU=TETA*HI
      TAU2=TAU*TAU
      A0=6./TAU2
      A1=3./TAU
      A2=2.*A1
      A3=TAU/2.
      A4=A0/TETA
      A5=-A2/TETA
      A6=1.-3./TETA
      A7=HI/2.
      A8=HI2/6.
      A2A=A2+2.*ALFA
      A3A=2.+ALFA*A3
      FACT=A1*BETA+1.
      REWIND 11
      DO 200 N=1,NEL
      DO 200 J=2,6,2
200  READ (11) MAG(J=1,N),MAG(J,N)
      DO 210 N=1,NEL
210  READ (11) ((ZDF(I,J,N),I=1,3),J=1,3)
      READ (11) (ZB(I,N),I=1,10)
      REWIND 12
      DO 220 I=1,NEL
      READ (12) CUE(I),SEND(I),COSEND(I),PUA(I)
      IF(N4.EQ.0) GO TO 215
      INT=1
```

```
COE(I)=100
SENO(I)=1.
COSENO(I)=0.
215 PUA(I)=1./(I.-2.*PUA(I))
220 SEN2(I)=1.+SENO(I)**2*PUA(I)
I=20
PRINT 14,I,COE(I),SENO(I),COSENO(I)
NPP2=NPP*2
REWIND 8
READ (8) (DD(J),J=1,NF)
READ (8) ((DEFOR(I,J),J=1,NEL),I=1,3)
READ (8) XXXX
DO 1601 I=1,6
1601 READ (8) XXXXX
READ (8) ((CRK01(I,J,N),N=1,NEL),J=1,3),I=1,3)
READ (8) (IP(I),I=1,NEL)
READ (8) ((LSF(I,J),J=1,NEL),I=1,3)
REWIND 8
LOCK 8
997 CONTINUE
NB2=(NB1-1)*2
DO 900 NE=1,NEL
DO 50 II=1,6
LN(NF,II)=HAG(II,NE)
IF(LN(NE,II).GT.NB2)LN(NE,II)=0
50 CONTINUE
900 CONTINUE
PRINT 1001,NF,'DBA',NEL,NB1,NB2
7 DO 79 NL=1,NTP
KY=2*INDICE(NL)
KX=KY-1
D(KX)=DD(2*NL-1)
79 L(KY)=DD(2*NL)
DO 1 I=1,NF
DKO(I)=Z(I)*(A0+ALFA*A1)
VV(I)=0.
AA(I)=0.
UP(I)=0
V(I)=0.
1 A(I)=0.
PRINT 14,(J,A(J),V(J),D(J),J=1,NF)
PRINT 20,(IP(I),I=1,NEL)
PRINT 15,(I,(ESF(J,I),J=1,3),I=1,NEL)
IF(N1.EQ.0)GO TO 998
DO 502 NN=1,NEC
NE=NECP(NN)
IND(NI)=1
SIGMAX=ESF(1,NF)
SIGMAY=ESF(2,NF)
TAUXY=ESF(3,NE)
OC=(SIGMAX+SIGMAY)/2.
OB=(SIGMAX-SIGMAY)/2.
R=SQRT(TAUXY**2+OB**2)
SHIN=OC-R
SMAX=OC+R
SKC(NN)=SHIN
SDE(NN)=SMAX-SHIN
502 FYC(NN)=SMAX/SHIN
998 CONTINUE
```

```

REWIND 10
LOCK 10
REWIND 1
REWIND 2
READ (1) NP
READ (1) ACX
READ (2) NP
READ (2) ACY
DO 5 N=2,NF,2
AA(N-1)=-ACX
AA(N)=-ACY
A(N-1)=-ACX
5 A(N)=-ACY
NP=480
READ (15) (PCI),I=1,NPP2)
CALL FORNL(ST,X,Y,D,ZB,MAG,DKO,RK01,NB1,NTP,NEL,NF,NBAN,
1 AREA,LM,S,B,ESF)
DO 4 IT=2,NP
PRINT 17,IT
READ (1) ACX1
READ (2) ACY1
AX=ACX1-ACX
AY=ACY1-ACY
ACX=ACX1
ACY=ACY1
IF(N3.EQ.1)GO TO 777
GO TO 778
777 AY=0.
ACY=0.
778 PRINT 15,IT,AX,AY
DO 6 J=2,NP,2
KI=J-1
KP=J
DP(KI)=Z(KI)*(-ACY+V(KI)*A2A+A(KI)*A3A+TETA*(-AX))
DP(KP)=Z(KP)*(-ACY+V(KP)*A2A+A(KP)*A3A+TETA*(-AY))
UP(KI)=BETA*(2.*V(KI)+A3*A(KI))
UP(KP)=BETA*(2.*V(KP)+A3*A(KP))
6 CONTINUE
READ (15) (PHT(I),I=1,NP2)
DO 8 I=1,NP1
K=HPPK(I)
IF(K.GE.NB1)GO TO 8
DPHTY=PHT(2*I)-P(2*I)
DPHTX=PHT(2*I-1)-P(2*I-1)
DP(2*K)=DP(2*K)+DPHTY*TETA+PHT(2*I)
DP(2*I-1)=DP(2*K-1)+DPHTX*TETA+PHT(2*I-1)
P(2*I)=PHT(2*I)
P(2*I-1)=PHT(2*I-1)
8 CONTINUE
CALL SOL(INI,FACT)
DO 12 I=1,NF
VVI=V(I)
AAI=A(I)
A(I)=A4*DD(I)+A5*VVI+A6*AAI
V(I)=VVI+A7*(A(I)+AAI)
D(I)=[(I)+HI*VVI+AB*(A(I)+2.*AAI)
12 CONTINUE
DO 91 K=1,NNUD
K=BNH(K)*2

```

```
ACELX=A(III)+ACX
ACELY=A(III)+ACY
WRITE(IFAX) ACFLX
WRITE(IFAY) ACFLY
WRITE(IFDX) D(III)
WRITE(IFDY) D(III)
91 CONTINUE
DO 92 KL=1,NUNE
NE=NELEM(KL)
92 WRITE(IESF) (ESF(K,NE),K=1,3)
PRINT 20,(IP(I),I=1,NEL)
PRINT 14,L1,A(L1),V(L1),D(L1)
PRINT 14,L2,A(L2),V(L2),D(L2)
PRINT 20,IPGG
IF(N1.EQ.1)CALL PORU(IFSDEI,IFSDES)
IF(CHOB(IT,III).NE.C)GO TO 4
PRINT 14,(J,A(J),V(J),D(J),J=1,NF)
PRINT 20,(IP(I),I=1,NEL)
PRINT 15,(I,(ESF(J,I),J=1,3),I=1,NEL)
CALL YIENPO
4 CONTINUE
REWIND 1
LOCK 1
REWIND 2
LOCK 2
REWIND 11
LOCK 11
REWIND 12
LOCK 12
REWIND 15
LOCK 15
REWIND IFDX
REWIND IFDY
REWIND IFAX
REWIND IFAY
REWIND IESF
LOCK IESF
LOCK IFDX
LOCK IFDY
LOCK IFAX
LOCK IFAY
REWIND IFSDEI
REWIND IFSDES
LOCK IFSDEI
LOCK IFSDES
CALL EXIT
14 FORMAT(2X,I10,3E20.6)
15 FORMAT(2X,I10,3E20.6)
17 FORMAT(/2X,"PUNTO NO",15//)
20 FORMAT(16I5)
END
```

SUBROUTINE PORD(IFSDEI,IFSDES)
COMMON/C1/

- 1 NF=IFL,IBRAN,IPG,IPGG,N1,N2,N3,N4,NTP,A4,A5,A6,A7,A8,PI,
- 2 UP(172),SI(3,163),DP(172),AREA(163),DKO(172),C(172)/C2/
- 3 RT(172,20),IP(163),UF1(172),UD(172),NAG(6,172),ZLF(3,3,172),
- 4 ZL(18,163),CPE(163),SENG(163),CUSENG(163),PUA(163),SFN2(163),
- 5 RKO(3,3,163),DEFOR(3,163),LTYA(3,163),
- 6 UFG(163),SDE(163),FKC(200),HECP(50),DMAX(100),INDICE(100),
- 7 CICLO(160),IPD(200),SKC(100),SDHAX(100),HEC
- 8 ,SS(163,6),ST(172,20),LM(163,6),BB(3,6,163)
- 9 ,YC(172),Y(172),V(172),WA(172),DDD(172)

A=28.

B=0.4

C=1./17.6

PEND=2.5

GO 512 NH=1,NL

IF=LFCP(SHL)

SIGMAX=ESF(1,NF)

SIGMAY=ESF(2,NF)

TADXY=ESF(3,NE)

GC=(SIGMAX+SIGMAY)/2.

GB=(SIGMAX-SIGMAY)/2.

R=SQRT(TADXY**2+GB**2)

SHIN=GC-R

SMAX=GC+R

SD=SMAX-SHIN

IF(NE.EG.18)WRITE (IFSDEI) SD,UF(NN)

IF(NE.EG.41)WRITE (IFSDES) SD,UF(NN)

SDEN=SDE(NE)

S=ABS(SD-SDEN)

IF(S.LE.DMAX(NN))GO TO 11

DMAX(NN)=S

SDMAX(NN)=SD

11 IF(SD.GT.SDEN)GO TO 12

IF(IND(NN).NE.1)GO TO 512

IND(NN)=-1

GO TO 13

12 IF(IRE(NN).NE."1")GO TO 512

IRE(NN)=1

13 CICLO(NN)=CICLO(NN)+1

IF(CICLO(NN).NE.2)GO TO 512

CICLO(NN)=0

DMAX(NN)=0

IF(IP(NE).EQ.1)GO TO 512

CSC=1./SCHQ(NE)

CCT=SENG(NE)/CUSENG(NE)

F3=PEND*FKC(NN)*FKC(NN)

ABSSD=ABS(SDMAX(NN))

ABSSKC=ABS(SKC(NN))

AUX=(A-ABSSD / (C*ABSSKC *F3))/B

AN=10.**AUX

U=-SKC(NN)+ABSSD*.5*(1.-CSC)+CDE(NE)*CCT

PRINT 102,NH

PRINT 101,AN,SDMAX(NN),SKC(NN),F3,AUX,U,SMIN

IF(AN.LE.1.)AN=1.

DU=U/AN

UF(NC)=UF(NE)+DU

SDMAX(NN)=0.

512 CONTINUE

RETURN

```
SUBROUTINE TIEMPO
TEJ=TIME(2)/60.
TES=TIME(3)/60.
PRINT 57,TEJ,TES
57 FORMAT(/10X,"TIEMPO DE EJECUCION          =",F10.4,5X,"SEG"/10X,
1      "TIEMPO DE ENTRADA Y SALIDA =",F10.4,5X,"SEC")
RETURN
END
```

```
SUBROUTINE SOL(IND,FACT)
COMMON/C1/
1  NF,NEL,NBAN,IPG,IPGG,N1,N2,N3,N4,NTP,A4,A5,A6,A7,A8,PI,
2  H(172),ESF(3,163),DP(172),AREA(163),DKO(172),D(172)/C2/
3  RT(172,20),IF(163),DF1(172),DU(172),MAC(6,172),DE(3,3,172),
4  L(18,163),CDF(163),SENO(163),COSENO(163),PUA(163),SEN2(163),
5  RHO1(3,3,163),DEFOR(3,163),LTTA(3,163),
6  UF(163),SDE(163),FKC(200),HECP(50),DHAX(100),INDICE(100),
7  CICLO(100),IPH(200),SKC(100),SDMAX(100),NEC
8  S(163,6,6),ST(172,20),LH(163,6),ZB(3,6,163)
9  X(172),Y(172),V(172),A(172),DDD(172)
DIMENSION
1  DU1(172),DEF(3),DTAD(3),F(6),AA(3,3),
2  AB(6,3,163),HHH(6),INDICA(100)
DIMENSION TAD(3,200)
EQUIVALENCE(AB(1),R(1))
[0 16 N=1,NEL
IF(IND.EQ.1)GO TO 300
SIGMAX=ESF(1,N)
SIGMAY=ESF(2,N)
TAOXY=ESF(3,N)
SIGMA=SIGMAY+2*UF(N)
B1=COE(N)*COSENO(N)-(SIGMAX+SIGMA)*.5*SENO(N)
IF(B1.LE.0)GO TO 300
B12=B1*B1
501 A1=(SIGMAX-SIGMAY)*0.5
RAD2=A1*A1+TAOXY*TAOXY
R1=RAD2-B12
IF(N.EQ.20)PRINT 1000,F1 ,B1
1000 FORMAT(8E15.8)
IF(F1.LE.0)GO TO 502
RAD=SQRT(RAD2)
COC=B1/RAD
TAOXY=TAOXY*COC
ESF(3,N)=TAOXY
YYY=ABS(A1)
XXX=COC*YYY
XXX=ABS(XXX)
DELT=YYY-XXX
IF(SIGMAX.GT.SIGMAY)DELT=-DELT
SIGMAX=SIGMAX+DELT
SIGMAY=SIGMAY-DELT
ESF(1,N)=SIGMAX
ESF(2,N)=SIGMAY
SIGMA=SIGMAY+2*UF(N)
B1=COE(N)*COSENO(N)-(SIGMAX+SIGMA)*.5*SENO(N)
B12=B1*B1
A1=(SIGMAX-SIGMAY)*0.5
```

```
502 C1=2*TAGXY
    B1=B1*SEN0(N)
    DEN=(B12*SEN2(N)+F1)
    HH=.5/(B12*SEN2(N)+F1)
    A1D1=A1+D1*PUA(N)
    AMD1=-A1+D1*PUA(N)
    IF(IP(N).EQ.0)GO TO 20
    PLANDA=(DEFOR(1,N)*A1D1+DEFOR(2,N)*AMD1+DEFOR(3,N)*TADXY+0.5*F1/
/DE(3,3,N))*HH
    IF(PLANDA.GT.0)GO TO 19
    IP(N)=0
    GO TO 300
19 IFG=IFG+1
20 IF(F1.GT.0)GO TO 22
    IF(SEN0(N).NE.0)GO TO 300
    GC=(SIGMAX+SIGMA)*0.5
    DB=A1
    R=SQRT(TADXY**2+GP**2)
    SMIN=GC-R
    SMAX=GC+R
    IF(SMIN.GT.COE(N))GO TO 22
    IF(SMAX.GT.COE(N))GO TO 22
    GO TO 300
22 IP(N)=1
    IFG=IFG+1
21 HH1=HH/(2.*DE(3,3,N))
    IF(PLANDA.NE.0)GO TO 177
179 CE=0.
    GO TO 178
177 CE=HH1*F1/PLANDA
    IF(CE.EQ.1)GO TO 179
178 CTE=1./(1.-CE)
    CTE=1.
    AD=(A1+D1)*HH*CTE
    AMD=(-A1+D1)*HH*CTE
    C1=C1*HH*CTE
    AA(1,1)=1.-AD*A1D1
    AA(1,2)=-AD*AMD1
    AA(1,3)=-TADXY*AD
    AA(2,1)=-AMD*A1D1
    AA(2,2)=1.-AMD*AMD1
    AA(2,3)=-TADXY*AMD
    AA(3,1)=-C1*A1D1
    AA(3,2)=-C1*AMD1
    AA(3,3)=1.-C1*TADXY
    HH'=F1*HH
C   DTTA(1,N)=A1D1*HH
C   DTTA(2,N)=AMD1*HH
C   DTTA(3,N)=TADXY*HH
    DO 72 J=1,3
    DO 72 I=1,3
    SUMA=0.
    DO 73 K=1,3
73 SUMA=SUMA+DE(I,K,N)*AA(K,J)
72 RK01(I,J,N)=SUMA
    GO TO 216
300 DO 310 J=1,3
    DTTA(J,N)=0.
```

```

GO TO 16
216 IF(N2.EQ.0)GO TO 16
CALL ENSABD(LI,ST,S,N,NF,NBAN,NEL,163,172,-1)
CALL SIGCS(RK01,ZI,AREA,N,NEL,163)
CALL ENSARB(LI,ST,S,N,NF,NBAN,NEL,163,172,1)
16 CONTINUE
200 DO 2 I=1,NF
FFEST=DP1(I)
DP1(I)=DP(I)-FFEST
2 DU(I)=0*
209 DO 97 J=1,NEL
DO 97 I=1,3
97 DEFOR(I,J)=0.
IF(N2.EQ.0)GO TO 198
CALL FORNL(ST,X,Y,D,B,NAG,DKO,RK01,NB1,NTP,NEL,NF,NBAN,AREA,LH,
1 S,ZI,LSF)
198 DO 15 NI=1,NF
DO 15 NJ=1,NBAN
15 FT(NI,NJ)=ST(NI,NJ)*FACT
CALL MULCAN(ST,H,DP,NF,NBAN,172)
DO 700 NI=1,NF
DF1(NI)=DF(NI)+DF(NI)
700 CONTINUE
DO 221 J=1,NF
221 FT(J,1)=FT(J,1)+LFO(J)
CALL AUXBAN(NF,NBAN,RT,IE,172)
IF(IE.EQ.1)GO TO 212
199 CALL SOLDAN(NF,NBAN,RT,DP1,DU,172)
DO 112 I=1,NF
VVI=V(I)
AAI=A(I)
ACEL=A4*DU(I)+A5*VVI+A6*AAI
VEL=VVI+A7*(ACEL+AAI)
DD(I)= HI*VVI+A8*(ACEL+2.*AAI)
112 CONTINUE
IB=0
DO 12 H=1,NEL
DO 95 J=1,6
K=NAG(J,H)
HHH(J)=DD(K)
95 CONTINUE
96 DO 55 I=1,3
SUMA=C.
DO 54 J=1,6
54 SUMA=SUMA+AB(J,I,N)*HHH(J)
IFF(I)=SUMA
55 DEFOR(I,N)=DEFOR(I,N)+SUMA
DO 83 I=1,3
DTA=DTA(I,N)
320 SUMA=0.
DO 84 J=1,3
84 SUMA = SUMA+RK01(I,J,N)*DEF(J)
83 DTA(I)=SUMA+DTA
IF(IML.EQ.1)GO TO 86
SIGMAY=ESF(1,N)+DTA(1)
SIGMAY=ESF(2,N)+DTA(2)
TAGXY=ESF(3,N)+DTA(3)
SIGMA=SIGMAY+2*DF(I)

```

```
IF(B1.GT.0)GO TO 890
IF(INDICA(N).EQ.1)GO TO 86
INDICA(N)=1
CALL ENSAMB(LP,ST,S,N,NF,NBAH,NEL,163,172,-1)
DO 89 I=1,3
DO 90 J=1,3
90 RK01(I,J,N)=0.
89 CONTINUE
IB=IB+1
PRINT 130,N
PRINT 1000,F1,F1,COE(N),COSEN(N),SIGMAX,SIGMA,SENO(N)
GO TO 86
890 INDICA(N)=0
86 DO 85 J=1,3
85 TAB(J,N)=DTAD(J)
12 CONTINUE
IF(IB.GT.0) GO TO 209
DO 1 I=1,NF
1 DP1(I)=0.
DO 321 N=1,NEL
DO 322 J=1,3
322 ESF(J,N)=ESF(J,N)+TAD(J,N)
DO 28 I=1,6
SUMA=0.
DO 29 J=1,3
29 SUMA=SUMA+AB(I,J,N)*TAD(J,N)
28 F(I)=SUMA*AREA(N)
DO 31 I=1,6
K=MAG(I,N)
31 DP1(K)=DP1(K)+F(I)
321 CONTINUE
RETURN
212 PRINT 4
CALL EXIT
4 FORMAT(///10X,"ERROR EN LA FORMULACION DE LA MATRIZ K"/)
130 FORMAT(///10X,"ELEMENTO CON RIGIDEZ NULA,N=",I5/)
END
```

```
SUBROUTINE SOLPAR(CI,NBAN,U,B,X,NDU)
DIMENSION U(NDU,1),U(1),X(1)
DO 10 I=1,N
10 X(I)=0.
DO 1 I=1,N
J=I+NBAN+1
IF(I+1.LE.NBAN) J=1
SUM=B(I)
IF(I=1.EQ.0)GO TO 1
DO 2 K=J,I-1
2 SUM=SUM-U(K,I+1)*X(K)
1 X(I)=SUM+U(I,1)
DO 3 L=1,N
I=N-L+1
J=I+NBAN+1
IF(J.GT.N) J=N
SUM=X(I)
IF(J.EQ.0)GO TO 3
DO 4 K=I+1,J
4 SUM=SUM-U(K,I+1)*X(K)
3 X(I)=SUM+U(I,1)
RETURN
END
```

```
SUBROUTINE ENSAMB(MAG,RT,S,N,NF,NBAN,NEL,ND,NDF,SIG)
DIMENSION MAG(ND,6),RT(NDF,NBAN),S(ND,6,6)
DO 16 KL=1,6
IF(MAG(N,KL).EQ.0)GO TO 16
KK=MAG(N,KL)
DO 16 LK=1,6
IF(MAG(N,LK).EQ.0)GO TO 16
LL=MAG(N,LK)-KK+1
IF(LL.LE.0)GO TO 16
RT(KK,LL)=RT(KK,LL)+S(N,KL,LK)*SIG
16 CONTINUE
RETURN
END
```

```
SUBROUTINE SRIG(S,D,B,AREAS,N,NEL,ND)
DIMENSION S(ND,6,6),D(3,3,NEL),B(3,6,NEL),AREAS(NEL),C(6,6)
DO 12 II=1,3
DO 12 JJ=1,6
SUMA=0.
DO 33 KK=1,3
33 SUMA=SUMA+D(II,KK,1)*B(KK,JJ,1)
12 C(II,JJ)=SUMA
DO 32 II=1,6
DO 32 JJ=1,6
SUMA=0.
DO 43 KK=1,3
43 SUMA=SUMA+B(KK,II,1)*C(KK,JJ)
32 S(N,II,JJ)=SUMA*AREAS(N)
RETURN
END
```

```
SUBROUTINE AUXPAN(I,NBAN,A,IE,HDS)
DIMENSION A(HDS,1)
DO 10 I=1,H
  IF=H-I+1
  IF(NBAN.LT.IF) IF=NBAN
  DO 10 J=1,IF
    IQ=NBAN-J
    IF(I-1.LT.IQ) IQ=I-1
    SUM=A(I,J)
    IF(IQ.EQ.0)GO TO 13
    DO 12 K=1,IQ
12  SUM=SUM+A(I-K,K+1)*A(I-K,J+K)
13  IF(J.EQ.1) GO TO 18
    IF(SUM.LE.0.) GO TO 19
    TEMP=1./SQRT(SUM)
    A(I,J)=TEMP
    GO TO 10
19  IE=1
    GO TO 15
18  A(I,J)=SUM*TEMP
10  CONTINUE
15  RETURN
END
```

```
SUBROUTINE MULPAN(A,B,C,N,NBAN,NA)
DIMENSION A(NA,NEAN),B(1),C(1)
DO 10 I=1,H
  F=0.
  K=I-1
  DO 20 J=1,NBAN
    K=K+1
    IF(K.GT.H) GO TO 11
    F=F+A(I,J)*B(K)
20  CONTINUE
11  IF(I.EQ.1) GO TO 12
    IU=I+1
    DO 30 J=2,NBAN
      L=IU-J
      IF(L.LT.1) GO TO 12
      F=F+A(L,J)*B(L)
30  CONTINUE
12  C(I)=F
10  CONTINUE
RETURN
END
```

```
SUBROUTINE PRIME (A,NR,NC,NDA)
DIMENSION A(NDA,1)
DO 1 L=1,NC+8
  H=L+7
  IF(H.GT.NC)H=NC
  PRINT 2,(H,K=L,H)
  DO 1 I=1,HR
1  PRINT 3,I,(A(I,J),J=L,H)
  RETURN
2  FORMAT (/10X,I3,7(12X,I3)/)
3  FORMAT (1X,I3,8(1PF15.7))
```

```
SUBROUTINE FORPIG(MAG,D,D,AREA,NF,NBAN,NEL,RT,S,ESF,G)
DIMENSION MAG(163,6),S(163,6,6),C(3,6),D(3,3,163),B(3,6,163),
1 AREA (163),RT(172,20)
DIMENSION ESF(3,163),G(6,4,163),G1(6,4),SG(6,6)
DO 51 I=1,NF
DO 51 J=1,NBAN
51 RT(I,J)=0.0
DO 11 N=1,NEL
S1=ESF(1,N)
S2=ESF(2,N)
DO 10 IX=1,2
IZ=IX+2
DO 10 IY=1,6
G1(IY,IX)=G(IY,IX,N)*S1
G1(IY,IZ)=G(IY,IZ,N)*S2
10 CONTINUE
DO 9 II=1,6
DO 9 JJ=1,6
SUM=0.
DO 6 KK=1,4
8 SUM=SUM+G1(II,KK)+G(JJ,KK,N)
9 SG(II,JJ)=SUM*AREA(N)
DO 12 II=1,3
DO 12 JJ=1,6
SUMA=0.
DO 33 KK=1,3
33 SUMA=SUMA+D(II,KK,N)+B(KK,JJ,N)
12 C(II,JJ)=SUMA
DO 32 II=1,6
DO 32 JJ=1,6
SUMA=0.
DO 43 KK=1,3
43 SUMA=SUMA+B(KK,II,N)+C(KK,JJ)
32 S(N,II,JJ)=SUMA*AREA(N)
DO 7 II=1,6
DO 7 JJ=1,6
7 S(N,II,JJ)=S(N,II,JJ)+SG(II,JJ)
DO 16 KL=1,6
IF(MAG(N,KL).EQ.0)GO TO 16
KI=MAG(N,KL)
DO 16 LK=1,6
IF(MAG(N,LK).EQ.0)GO TO 16
LI=MAG(N,LK)-KI+1
IF(LL.LE.0)GO TO 16
RT(KK,LL)=RT(KK,LL)+S(N,KL,LK)
16 CONTINUE
11 CONTINUE
RETURN
END
```

```
      SUBROUTINE FORPLCCT,XX,YY,D,ZB,MAG,DKO,RK01,ND1,NTP,NEL,  
1      NF,IFAN,AREAS,LF,S,B,ESF)  
      DIMENSION XX(102),YY(102),D(172),MAG(6,172),DKO(172),  
      ILM(163,6),RT(172,20),S(163,6,6),  
1      X(102),Y(102),AREAS(163),D(3,6,163),ZB(18,163),RK01(3,3,163)  
      DIMENSION G(6,4,163),ESF(3,163)  
      DO 10 I=1,NTP  
      II=2*I-1  
      X(I)=XX(I)+D(II)  
      JJ=2*I  
10  Y(I)=YY(I)+D(JJ)  
      DO 11 N=1,NEL  
      I=MAG(2,N)*0.5  
      J=MAG(4,N)*0.5  
      K=MAG(6,N)*0.5  
      XIJ=X(I)-X(J)  
      XIK=X(I)-X(K)  
      XJK=X(J)-X(K)  
      YIJ=Y(I)-Y(J)  
      YIK=Y(I)-Y(K)  
      YJK=Y(J)-Y(K)  
      AREA=0.5*(XIK*YJK-XJK*YIK)  
      IF (AREA.LE.0.)GO TO 17  
      AREA2=AREA  
      AREA2=AREA*2.  
      E(1,1,N)=YJK/AREA2  
      E(1,3,N)=-YIK/AREA2  
      E(1,5,N)=YIJ/AREA2  
      E(2,2,N)=-XJK/AREA2  
      E(2,4,N)=XIK/AREA2  
      E(2,6,N)=-XIJ/AREA2  
      E(3,1,N)=E(2,2,N)  
      E(3,2,N)=E(1,1,N)  
      E(3,3,N)=E(2,4,N); U(3,5,N)=E(2,6,N)  
      E(3,4,N)=E(1,3,N); U(3,6,N)=E(1,5,N)  
      G(1,1,N)=YJK/AREA2*0.5  
      G(2,2,N)=G(1,1,N)  
      G(3,1,N)=-YIK/AREA2*0.5  
      G(4,2,N)=G(3,1,N)  
      G(5,1,N)=YIJ/AREA2*0.5  
      G(6,2,N)=G(5,1,N)  
      G(1,3,N)=-XJK/AREA2*0.5  
      G(2,4,N)=G(1,3,N)  
      G(3,3,N)=XIK/AREA2*0.5  
      G(4,4,N)=G(3,3,N)  
      G(5,3,N)=-XIJ/AREA2*0.5  
      G(6,4,N)=G(5,3,N)  
      DO 50 II=1,6  
      ZB(II,N)=D(1,II,N)  
      JJ=II+6  
      ZB(JJ,N)=D(2,II,N)  
      FF=II+12  
      ZB(FF,N)=D(3,II,N)  
50  CONTINUE  
11  CONTINUE  
      CALL FORRIG(CI,M,D,RK01,AREAS,NF,IFAN,NEL,RT,S,ESF,G)  
22  RETURN  
17  PRINT 31,N  
      CALL EXIT  
31  FORMAT (17/10X,"***** AREA 163.0 ELEMENTS = 163")
```