

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERIA

U. N. A. M.

TRABAJO DE INVESTIGACION II

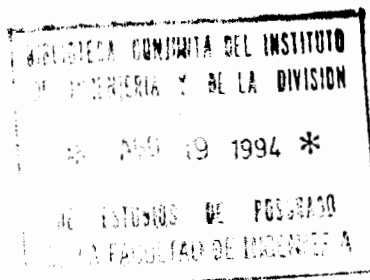
"RESPUESTA PROBABILISTA DE PILOTES ANTE LA
INCIDENCIA DE ONDAS SH"

AREA: ESTRUCTURAS

ASESOR: DRA. SONIA E. RUIZ G.

ALUMNO: JULIO ERNESTO LIRA

SEMESTRE: 88-II



I N D I C E

I.-	Introducción.....	1
II.-	Características del problema.....	3
III.-	Modelo matemático.....	6
IV.-	Resultados.....	10
V.-	Conclusiones.....	12
VI.-	Programa de computadora	14
	Referencias.....	28

INTRODUCCION

Los métodos disponibles para el diseño de pilotes incluyen diferentes aproximaciones que varían desde considerar fuerzas estáticas aplicadas en la cabeza del pilote hasta utilizar el método del elemento finito (con elementos de sección circular). Soluciones intermedias como las que presentan el sistema suelo-pilote-estructura con elementos mecánicos concentrados tales como resortes, masas y amortiguadores también han sido propuestos en la literatura. La excitación sísmica se considera generalmente actuando en un estrato subyacente, aunque en algunos casos se supone aplicada a lo largo del fuste del pilote.

Sin embargo ninguno de los métodos de análisis disponibles considera el efecto del defasamiento de las ondas sísmicas en la respuesta dinámica de pilotes. Este efecto puede ser importante en el caso de pilotes de gran longitud, como los utilizados en la cimentación de estructuras marinas piloteadas.

En este trabajo se presenta un modelo probabilista que describe la respuesta dinámica de un pilote aislado sujeto a ondas sísmicas que actúan fuera de fase a lo largo del mismo. Se hace la hipótesis de que los trenes de ondas viajan verticalmente y se caracterizan mediante densidades espectrales que corresponden a espectros de diseño sísmico para un sitio específico.

CARACTERISTICAS DEL PROBLEMA

La fuente de excitación que emplearemos en este trabajo son ondas sísmicas, las cuales sabemos que se propagan desde la fuente de acuerdo con las propiedades mecánicas del medio en que viajan y, por supuesto de las características de la fuente misma. Como este fenómeno es muy complejo se ha recurrido a simplificaciones e hipótesis que representan en forma satisfactoria las principales propiedades de las ondas.

Utilizaremos ondas elásticas del tipo secundarias, polarizadas horizontalmente (conocidas como SH), las cuales consideran su propagación en medios isótropos, continuos y elásticos lineales.

La propagación de las ondas SH está gobernada por la siguiente ecuación

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = \frac{1}{\beta^2} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}$$

que es precisamente la ecuación de onda en dos dimensiones.

Estas ondas si se reflejan mantienen el mismo ángulo de incidencia, conservando su forma original.

El pilote lo modelaremos con un conjunto de elementos rectos que interactúan con el suelo a través de sistemas de resortes y amortiguadores, según el modelo de Winkler. Las propiedades de dichos elementos tales como amortiguamiento y viscosidad se obtienen de las propiedades del estrato de suelo al que sustituyen, las cuales varían con la profundidad del estrato.

Si se desea hacer participar en el análisis el efecto que induce la presencia de la estructura en la cabeza del pilote, se puede representar con la prolongación del pilote con una masa con-

centrada en dicho extremo (ver figura no. 1).

No es difícil observar que el planteamiento del presente problema tiene características similares a los de otros casos, tales como las tuberías que son elementos de gran longitud, similar o menor rigidez y que también se ven sometidas a excitaciones sísmicas, en las cuales también se desprecian (sin análisis previo) los efectos de desfaseamiento en el arribo de las ondas. Para este caso se antoja factible realizar unos cambios menores en el álgebra y así poder realizar un análisis paramétrico.

MODELO MATEMATICO

El modelo del sistema suelo-pilote-estructura se presenta esquemáticamente en la figura no.1. Básicamente consiste en un modelo del tipo Winkler.

Respuesta dinámica del pilote.- La ecuación del movimiento del sistema suelo-pilote-estructura se expresa como sigue:

$$M \ddot{X} + C \dot{X} + K X = P(t) \dots \quad (1)$$

donde M, C y K son las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez respectivamente; x son los desplazamientos del sistema, P(t) es la excitación dinámica.

Para el problema que nos interesa, conviene separar los grados de libertad, X, en los correspondientes al pilote, x, y a los de sus apoyos, z. Entonces, la ecuación 1 se puede describir como:

$$\begin{bmatrix} M_{xx} & 0 \\ 0 & M_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{z} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{xx} & C_{xz} \\ C_{zx} & C_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xz} \\ K_{zx} & K_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ F \end{Bmatrix} \dots \quad (2)$$

donde F es el vector de fuerzas correspondientes a las reacciones en los apoyos del pilote. La respuesta dinámica del pilote en sí se obtiene de la ecuación 2:

$$M_{xx} \ddot{x} + C_{xx} \dot{x} + K_{xx} x = -C_{xz} \dot{z} - K_{xz} z \dots \quad (3)$$

Es importante notar que en esta expresión se incluye el efecto del suelo en la respuesta del pilote, por medio de los términos del lado derecho de la ecuación. Debido al efecto de propagación de las ondas los desplazamientos del pilote, x, están compuestos por una componente estática, s, y una dinámica, r, de tal forma que $x = s + r$. Suponiendo que la estructura está libre de fuerzas externas y separando x en sus componentes s y r, la ecuación 3 se

escribe como sigue:

$$M_{xx} \ddot{r} + C_{xx} \dot{r} + K_{xx} r = -M_{xx} B \ddot{z} - [C_{xx} B + C_{xz}] \dot{z} \dots \quad (4)$$

donde $Bz = -K_{xx}^{-1} K_{xz} z = s$ (componente estática del desplazamiento x).

Utilizando análisis modal, la ecuación 4 puede transformarse en una expresión para evaluar la respuesta del pilote, x , directamente. Haciendo $\ddot{r} = z \alpha$, donde z es la matriz modal y α es el vector que define las amplitudes de los modos, la i -ésima componente de x se calcula como sigue:

$$x_i = \sum_j B_{ij} z + \sum_j Z_{ij} \int_0^t \omega_j(\tau) h_{ij}(t-\tau) d\tau \dots \quad (5)$$

donde ω_j es la j -ésima frecuencia de vibración, ξ_j es el amortiguamiento modal, $h_j(t) = 1/\omega_j \{ \exp(-\xi_j \omega_j t) \} \sin(\omega_j' t)$;

$$\omega_j' = \omega_j \sqrt{1 - \xi_j^2}$$

Función de autocorrelación de la respuesta.- La función de autocorrelación, $R_x(t_1, t_2)$, se define como: $E[x(t_1), x(t_2)]$ donde $E[\cdot]$ significa la esperanza matemática. Suponiendo la excitación sísmica como un proceso estocástico estacionario, la función de autocorrelación de la respuesta, x , está dada por la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} R_x(\tau_2) = & B R_{zz} B^T - \int_0^t B R_{zz}(\tau_2 + \tau) g^T h(\tau) z^T d\tau \\ & - \int_0^t B R_{zz}(\tau_2 + \tau) f^T h(\tau) Z^T d\tau \\ & - \int_0^t Z h(\tau) g R_{zz}(\tau_2 - \tau) B^T d\tau \\ & - \int_0^t Z h(\tau) f R_{zz}(\tau_2 - \tau) B^T d\tau \\ & + \int_0^t \int_0^t \{ Z h(\tau) g (R_{zz} g^T + R_{zz} f^T) (\tau_2 - \tau + \tau_1) \\ & + Z h(\tau) f (R_{zz} g^T + R_{zz} f^T) (\tau_2 - \tau + \tau_1) \} h(\tau_1) Z^T d\tau d\tau_1 \dots (6) \end{aligned}$$

donde R_{ab} es la matriz de correlación cruzada de a y b ; $h(z)$ es la matriz diagonal que contiene la respuesta a un impulso unitario de un oscilador simple asociado a cada modo; $g = Z^T M_{xx} B$

$$y \quad f = Z^T (C_{xx} B + C_{xz}).$$

Densidad espectral de la respuesta.- La densidad espectral, $S_x(\omega)$, se define como la transformada de Fourier de la función de autocorrelación:

$$S_x(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) \exp(-i\omega\tau) d\tau \quad \dots \quad (7)$$

Sustituyendo el valor de $R_x(\tau)$ dado por la ecuación 6 en la ecuación 7, se obtiene la respuesta del pilote en el dominio de la frecuencia (*). Así la respuesta se calcula con la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} S_x(\omega) = & B \frac{S_{\ddot{z}\ddot{z}}(\omega)}{\omega^4} B^T + B \frac{S_{\ddot{z}\ddot{z}}(\omega)}{\omega^2} g^T H^* Z^T \\ & - B \frac{S_{\ddot{z}\ddot{z}}(\omega)}{i\omega^3} f^T H^* Z^T + Z H g \frac{S_{\ddot{z}\ddot{z}}(\omega)}{\omega^2} B^T \\ & + Z H f \frac{S_{\ddot{z}\ddot{z}}(\omega)}{i\omega^3} B^T + Z H g S_{\ddot{z}\ddot{z}}(\omega) g^T H^* Z^T \\ & - Z H g \frac{S_{\ddot{z}\ddot{z}}(\omega)}{i\omega} f^T H^* Z^T + Z H f \frac{S_{\ddot{z}\ddot{z}}(\omega)}{i\omega} g^T H^* Z^T \\ & + Z H f \frac{S_{\ddot{z}\ddot{z}}(\omega)}{\omega^2} f^T H^* Z^T \quad \dots \quad (8) \end{aligned}$$

donde S_{ab} es la matriz de densidad espectral cruzada de a y b ; H es la transformada de Fourier de $h(t)$; y H^* es el complejo conjugado de H .

(*).- Trabajar en el dominio de la frecuencia presenta ventajas computacionales ya que las integrales de convolución de la ecuación 6 se transforman en productos algebraicos.

RESULTADOS

El modelo matemático presentado en el capítulo anterior se aplica a un sistema pilote-suelo como el que se indica en la figura no. 1 al final de este trabajo.

El efecto de la estructura se incluye en los análisis por medio de una prolongación del pilote y una masa concentrada en su extremo.

El tren de ondas sísmicas que actúa sobre el sistema pilote-suelo se caracterizó por la densidad espectral de aceleraciones presentado en la figura no. 2 , que corresponde al espectro de potencia propuesto por Tajimi-Kanai.

Hasta el momento en que se escribió el presente reporte no se tienen resultados del todo corroborados, ya que se encuentran aún en fase de prueba y verificación de los mismos.

CONCLUSIONES

En este trabajo se propone un procedimiento probabilista para el análisis sísmico de pilotes aislados sujetos a un tren de ondas que viajan verticalmente (ya que esta consideración induce mayor efecto en los defasamientos que si tuviesen un ángulo de incidencia diferente). La formulación considera los movimientos fuera de fase inducidos por el paso de las ondas, que pueden ser de gran significancia, y por lo tanto, deben ser consideradas en el diseño.

Para mostrar la importancia de dicho defasamiento en función de las características del sistema pilote-suelo-estructura y de la excitación sísmica se deberán estudiar como fase inmediata posterior a este trabajo, la respuesta del sistema ante trenes de ondas de diferente longitud, así como variar las diversas propiedades inherentes al sistema para completar un estudio paramétrico que nos permita emitir un juicio fundado en los múltiples casos. Cabe hacer notar que los pilotes por ser estructuras largas, ante este tipo de excitación pueden sufrir momentos flexionantes grandes que son inducidos proporcionalmente por los desplazamientos.

PROGRAMA DE COMPUTADORA

```

$DEBUG
$NLARGE
$NOFLOATCALLS
C
C      P R O G R A M A      P R I N C I P A L
C
C
      DIMENSION RR(21),XX(100),R(20),AI(20),CK(20,20),A(20)
      * ,STK(20,20),AA(37),ZM(20),FP(20),AMORT(20),HA(20),BB(20,20)
      * ,ZMB(20,20),B(20,20),D(20,20),AAA(20),X(20,20),XT(20,20),G(20,20)
      * ,ALT(20),S(20,20),BBT(20,20),BSB(20,20),ZMX(20,20),XTMX(20,20)
      * ,AMX(20,20),AMB(20,20),F(20,20),XTCK(20,20),XTK(20,20)
      * ,XTKX(20,20),GT(20,20)
      * ,PFSI(20),ZIMH(20),REH(20),ZMOD(20),FT(20,20),DK(20,20)
      DIMENSION REHXT(20,20),ZIMXT(20,20),SEGR(20,20),SEGI(20,20)
      * ,XREH(20,20),XRHG(20,20),SBT(20,20),TERR(20,20),XZIMH(20,20)
      * ,XZIHG(20,20),TERI(20,20),DL(20,20),DLREH(20,20),CUARI(20,20)
      * ,DLZIMH(20,20),CUARR(20,20),XRRHF(20,20),QUINI(20,20),XZIHF(20,20)
      * ,QUINR(20,20),GS(20,20),GSGT(20,20),RSGGT(20,20),SEXRA(20,20)
      * ,SEXIA(20,20),ZIG(20,20),SEXIB(20,20),SEXRB(20,20),SEXRA(20,20)
      * ,XSXRA(20,20),XSXIB(20,20),SEXI(20,20),GSFT(20,20),RGSFT(20,20)
      * ,SEPIA(20,20),SEPRIA(20,20),ZIF(20,20),SEPRB(20,20),SEPIB(20,20)
      DIMENSION XSPIA(20,20),SEPI(20,20),XSPRA(20,20),SEPR(20,20)
      * ,FSGT(20,20),RFSGT(20,20),XOTIA(20,20),XOTRA(20,20),ZIFG(20,20)
      * ,XOTRB(20,20),XOTIB(20,20),XXOTI(20,20),XOCTI(20,20),XXOTR(20,20)
      * ,XOCTR(20,20),FSFT(20,20),RFSFT(20,20),XNVRA(20,20),XNVIA(20,20)
      * ,ZIFT(20,20),XNVIB(20,20),XNVRB(20,20),XXNVR(20,20),XNOVR(20,20)
      * ,XXNIB(20,20),XNOVI(20,20),SACELR(20,20),SACELI(20,20)
      * ,C(40),MW(40),ABSSA(20,20),ABSSD(20,20),DATOS(20,40),FS(20,20)
      CHARACTER*10 TSTR,DSTR
      OPEN(5,FILE=' ',ACCESS='SEQUENTIAL',FORM='FORMATTED',STATUS='OLD')
      OPEN(6,FILE=' ',ACCESS='SEQUENTIAL',FORM='FORMATTED',STATUS='NEW')
      OPEN(7,FILE=' ',ACCESS='SEQUENTIAL',FORM='FORMATTED',STATUS='NEW')
      CALL TIME (10,TSTR)
      WRITE(*,*) 'TIEMPO EL INICIO=',TSTR
      CALL DATE (10,DSTR)
      WRITE(*,*) 'FECHA DE EJECUCION=',DSTR
      READ(5,1000)NE,NX,ICODE,NW,IDIN,IDENS
      IDIN=0 CASO DON FORMULACION ESTATICA+DINAMICA
      C      IDIN=1 CSO CON FORMULACION SOLO DINAMICA
      C
      WRITE(6,2000) NE,NX,NW
      2000 FORMAT(' NUMERO DE ELEMENTOS =',I4, /
      * , ' NUMERO DE SECCIONES TRANSVERSALES DIFERENTES=',I4, /
      * , ' NUMERO DE FRECUENCIAS=',I4)
      C
      1000 FORMAT(6I5)
      READ(5,1010)H,ELAS,RO,ZM1
      WRITE(6,2010) H,ELAS,RO,ZM1
      2010 FORMAT(' LONGITUD DE CADA INCREMENTO =',F10.4 /
      * , ' MODULO DE ELASTICIDAD =',F10.0 /, ' DENSIDAD =',F10.7 /
      * , ' MASA CONCENTRADA EN LA PARTE SUPERIOR DEL PILOTE =',F10.0)
      1010 FORMAT(F10.4,F10.0,F10.7,F10.0)
      NU=NE+1
      NU1=NU
      READ(5,1030)VEL
      1030 FORMAT(F10.4)

```

```

WRITE(6,1032) VEL
1032 FORMAT(' VELOCIDAD DE PROPAGACION DE LAS ONDAS SV =',
  *F10.1)
DO 10 K=1,NX
  10 READ(5,1020)RR(K),XX(K),AA(K)
1020 FORMAT(F15.0,2F10.3)
  WRITE(6,2021)
  WRITE(6,2020) (XX(J),RR(J),J=1,NX)
2020 FORMAT(2E14.7)
2021 FORMAT(/,' PROFUNDIDAD ', ' **EI**')
DO 14 I=1,NU
  14 READ(5,1025)PP(I),AMORT(I)
1025 FORMAT(2F10.3)
  WRITE(6,2026)
  WRITE(6,2025) (PP(J),AMORT(J),J=1,NU)
  PP(1)=PP(1)*H/2
  PP(NU)=PP(NU)*H/2
  AMORT(1)=AMORT(1)*H/2
  AMORT(NU)=AMORT(NU)*H/2
DO 15 I=2,NU-1
  PP(I)=PP(I)*H
  15 AMORT(I)=AMORT(I)*H
  WRITE(6,2027)
  WRITE(6,2025) (PP(J),AMORT(J),J=1,NU)
2025 FORMAT(2E14.7)
2026 FORMAT(/,'CTES. DEL RESORTE Y AMORTIGUADOR')
2027 FORMAT(/,'CTES. MODIFICADAS DEL RESORTE Y AMORTIGUADOR')
DO 1026 I=1,NW
1026 READ(5,1027)WW(I)
1027 FORMAT(F10.3)
  WRITE(*,*) ' *** EL PROGRAMA TERMINO DE LEER LOS DATOS ***'
  WRITE(*,*) ' *** ESPERE EL FINAL DEL PROGRAMA ***'
DO 30 I=1,NU
  30 HA(I)=H
DO 32 I=1,NE
  32 ALT(I)=H*I
  BY=0.
  K=1
  AA(NX+1)=AA(NX)
  RR(NX+1)=RR(NX)
DO 20 J=1,NU
  25 DIST=BY*H
999 FORMAT(1X,'J=',I5,1X,'K=',1X,I5,'REM=',E10.5,1X,'XX(J)=' ,E10.5,
  *1X,'D=' ,E10.5)
  REM=XX(K)-DIST
  IF(REM) 21,22,23
  23 R(J)=RR(K)
  AI(J)=R(J)/ELAS
  A(J)=AA(K)
  GO TO 24
  21 K=K+1
  GO TO 25
  22 R(J)=(RR(K)+RR(K+1))/2.
  A(J)=(AA(K)+AA(K+1))/2.
  AI(J)=R(J)/ELAS

```

```

24 BY=BY+1.
20 CONTINUE
WRITE(6,1031) (R(J),J=1,NU)
1031 FORMAT('R',2X,5E10.4)
CALL STPILE(ELAS,AI,STK,CK,NU1,ICODE,NE,HA)
DO 26 I=1,NU1
26 STK(I,I)=STK(I,I)+PP(I)
WRITE(6,2050) (STK(I,I),I=1,NU1)
DO 29 I=1,NU1
DO 29 J=1,NU1
29 D(I,J)=STK(I,J)
2030 FORMAT(5E12.5)
2050 FORMAT('STK',5E12.5)
2070 FORMAT(4X,5E12.5)
CALL INVER(STK,NU1)
2060 FORMAT(8X,8F14.8)
CALL MULTD(STK,NU1,PP,BB)
IF(IDIN.EQ.0)GO TO 42
DO 41 I=1,NU1
DO 41 J=1,NU1
41 BB(I,J)=0.
42 CONTINUE
2080 FORMAT(5E12.5)
CALL MASAS(A,H,RO,ZM,NU1,NX,ZM1)
WRITE(6,2040) (ZM(J),J=1,NU1)
2040 FORMAT('ZM',E12.5)
CALL MULTD1(ZM,NU1,BB,ZMB)
WRITE(6,2029) (AMORT(I),I=1,NU1)
2029 FORMAT('AMORT',1E12.6)
CALL MULTD1(AMORT,NU1,BB,AMB)
2100 FORMAT(2X,5E12.5)
DO 46 I=1,NU1
DO 46 J=1,NU1
46 B(I,J)=0.
DO 47 I=1,NU1
AMB(I,I)=AMB(I,I)-AMORT(I)
47 B(I,I)=ZM(I)
CALL VALORE(D,B,NU1,AAA,X)
DO 49 I=1,NU1
DO 49 J=1,NU1
BBT(I,J)=BB(J,I)
49 XT(I,J)=X(J,I)
CALL MATMPY(XT,NU1,NU1,ZMB,NU1,G)
CALL MATMPY(XT,NU1,NU1,AMB,NU1,F)
2200 FORMAT(7X,5E12.5)
CALL MULTD1(ZM,NU1,X,ZMX)
CALL MATMPY(XT,NU1,NU1,ZMX,NU1,XTMX)
DO 54 I=1,NU1
DO 54 J=1,NU1
G(I,J)=G(I,J)/XTMX(I,I)
F(I,J)=F(I,J)/XTMX(I,I)
GT(I,J)=G(J,I)
54 FT(I,J)=F(J,I)
CALL MULTD1(AMORT,NU1,X,AMX)
CALL MATMPY(XT,NU1,NU1,AMX,NU1,XTCX)

```

```

CALL MATMPY(XT,NU1,NU1,D,NU1,XTK)
CALL MATMPY(XTK,NU1,NU1,X,NU1,XTKX)
DO 62 I=1,NU1
62 PPSI(I)=0.5*XTKX(I,I)/SQRT(XTKX(I,I)*XTMX(I,I))
CALL DEN1(WW,C,NW)
DO 96 II=1,NW
CONA=1.
CONB=1.
CONC=1.
W=WW(II)
W2=W*W
W3=W*W2
W4=W2*W2
SF1=C(II)
IF(W.LE.3.5)SF1=1.
CALL DENSID(VEL,ALT,NU1,S,W,NU,SF1,IDENS)
CALL MATMPY(BB,NU1,NU1,S,NU1,CK)
CALL MATMPY(CK,NU1,NU1,BBT,NU1,BSB)
IF(W.LE.3.5)CONA=-92.66*W4
IF(W.LE.3.5)CONB=906.2*W2
IF(W.LE.3.5)CONC=0.
DO 71 I=1,NU1
DO 71 J=1,NU1
71 BSB(I,J)=BSB(I,J)*CONA/W4
CALL TRANSF(W,PPSI,AAA,NU1,ZIMH,REH)
DO 69 I=1,NU1
69 ZMOD(I)=SQRT(REH(I)**2+ZIMH(I)**2)
CALL MATMPY(CK,NU1,NU1,GT,NU1,DK)
CALL MULTD1(REH,NU1,XT,REHXT)
CALL MATMPY(DK,NU1,NU1,REHXT,NU1,SEGR)
DO 63 I=1,NU1
DO 63 J=1,NU1
63 SEGR(I,J)=SEGR(I,J)*CONB/W2
CALL MULTD1(ZIMH,NU1,XT,ZIMXT)
CALL MATMPY(DK,NU1,NU1,ZIMXT,NU1,SEGI)
DO 72 I=1,NU1
DO 72 J=1,NU1
72 SEGI(I,J)=-SEGI(I,J)*CONB/W2
CALL MULTD(X,NU1,REH,XREH)
CALL MATMPY(XREH,NU1,NU1,G,NU1,XRHG)
CALL MATMPY(S,NU1,NU1,BBT,NU1,SBT)
CALL MATMPY(XRHG,NU1,NU1,SBT,NU1,TERR)
DO 64 I=1,NU1
DO 64 J=1,NU1
64 TERR(I,J)=TERR(I,J)*CONB/W2
CALL MULTD(X,NU1,ZIMH,XZIMH)
CALL MATMPY(XZIMH,NU1,NU1,G,NU1,XZIHG)
CALL MATMPY(XZIHG,NU1,NU1,SBT,NU1,TERI)
DO 73 I=1,NU1
DO 73 J=1,NU1
73 TERI(I,J)=TERI(I,J)*CONB/W2
CALL MATMPY(CK,NU1,NU1,FT,NU1,DL)
CALL MULTD(DL,NU1,REH,DLREH)
CALL MATMPY(DLREH,NU1,NU1,XT,NU1,CUARI)
DO 74 I=1,NU1

```



```
DO 74 J=1,NU1
74 CUARI(J,I)=CUARI(J,I)*CONC/W3
CALL MULTD(DL,NU1,ZIMH,DLZIMH)
CALL MATMPY(DLZIMH,NU1,NU1,XT,NU1,CUARR)
DO 75 I=1,NU1
DO 75 J=1,NU1
75 CUARR(J,I)=CUARR(J,I)*CONC/W3
CALL MATMPY(XREH,NU1,NU1,F,NU1,XRHF)
CALL MATMPY(XRHF,NU1,NU1,SBT,NU1,QUINI)
DO 76 I=1,NU1
DO 76 J=1,NU1
76 QUINI(J,I)=QUINI(J,I)*CONC/W3
CALL MATMPY(XZIMH,NU1,NU1,F,NU1,XZIH)
CALL MATMPY(XZIH,NU1,NU1,SBT,NU1,QUINR)
DO 77 I=1,NU1
DO 77 J=1,NU1
77 QUINR(J,I)=QUINR(J,I)*CONC/W3
CALL MATMPY(G,NU1,NU1,S,NU1,GS)
CALL MATMPY(GS,NU1,NU1,GT,NU1,GSGT)
CALL MULTD1(REH,NU1,GSGT,RGSGT)
CALL MULTD(RGSGT,NU1,REH,SEXRA)
CALL MULTD(RGSGT,NU1,ZIMH,SEXIA)
CALL MULTD1(ZIMH,NU1,GSGT,ZIG)
CALL MULTD(ZIG,NU1,REH,SEXIB)
CALL MULTD(ZIG,NU1,ZIMH,SEXRB)
DO 78 I=1,NU1
DO 78 J=1,NU1
78 SEXRA(J,I)=SEXRA(J,I)+SEXRB(J,I)
CALL MATMPY(X,NU1,NU1,SEXRA,NU1,XXSRA)
CALL MATMPY(XXSRA,NU1,NU1,XT,NU1,SEXR)
DO 79 I=1,NU1
DO 79 J=1,NU1
79 SEXIB(J,I)=SEXIB(J,I)-SEXIA(J,I)
CALL MATMPY(X,NU1,NU1,SEXIB,NU1,XXSIB)
CALL MATMPY(XXSIB,NU1,NU1,XT,NU1,SEXI)
DO 98 I=1,NU1
DO 98 J=1,NU1
SEXR(J,I)=SEXR(J,I)*CONC
98 SEXI(J,I)=SEXI(J,I)*CONC
CALL MATMPY(GS,NU1,NU1,FT,NU1,GSFT)
CALL MULTD1(REH,NU1,GSFT,RGSFT)
CALL MULTD(RGSFT,NU1,REH,SEPIA)
CALL MULTD(RGSFT,NU1,ZIMH,SEPIB)
CALL MULTD1(ZIMH,NU1,GSFT,ZIF)
CALL MULTD(ZIF,NU1,REH,SEPRB)
CALL MULTD(ZIF,NU1,ZIMH,SEPIB)
DO 80 I=1,NU1
DO 80 J=1,NU1
80 SEPIA(J,I)=SEPIA(J,I)+SEPIB(J,I)
CALL MATMPY(X,NU1,NU1,SEPIA,NU1,XSPIA)
CALL MATMPY(XSPIA,NU1,NU1,XT,NU1,SEPI)
DO 81 I=1,NU1
DO 81 J=1,NU1
81 SEPI(J,I)=SEPI(J,I)*CONC/W
DO 82 I=1,NU1
```

```

      DO 82 J=1,NU1
82  SEPR(J,I)=SEPR(J,I)-SEPRB(J,I)
      CALL MATMPY(X,NU1,NU1,SEPR,NU1,XSPRA)
      CALL MATMPY(XSPRA,NU1,NU1,XT,NU1,SEPR)
      DO 83 I=1,NU1
      DO 83 J=1,NU1
83  SEPR(J,I)=SEPR(J,I)*CONC/W
      CALL MATMPY(F,NU1,NU1,S,NU1,FS)
      CALL MATMPY(FS,NU1,NU1,GT,NU1,FSGT)
      CALL MULTD1(REH,NU1,FSGT,RFSGT)
      CALL MULTD(RFSGT,NU1,REH,XOTIA)
      CALL MULTD(RFSGT,NU1,ZIMH,XOTRA)
      CALL MULTD1(ZIMH,NU1,FSGT,ZIFG)
      CALL MULTD(ZIFG,NU1,REH,XOTRB)
      CALL MULTD(ZIFG,NU1,ZIMH,XOTIB)
      DO 84 I=1,NU1
      DO 84 J=1,NU1
84  XOTIA(J,I)=XOTIA(J,I)+XOTIB(J,I)
      CALL MATMPY(X,NU1,NU1,XOTIA,NU1,XXOTI)
      CALL MATMPY(XXOTI,NU1,NU1,XT,NU1,XOCTI)
      DO 85 I=1,NU1
      DO 85 J=1,NU1
85  XOCTI(J,I)=XOCTI(J,I)*CONC/W
      DO 86 I=1,NU1
      DO 86 J=1,NU1
86  XOTRA(J,I)=XOTRA(J,I)-XOTRB(J,I)
      CALL MATMPY(X,NU1,NU1,XOTRA,NU1,XXOTR)
      CALL MATMPY(XXOTR,NU1,NU1,XT,NU1,XOCTR)
      DO 87 I=1,NU1
      DO 87 J=1,NU1
87  XOCTR(J,I)=XOCTR(J,I)*CONC/W
      CALL MATMPY(FS,NU1,NU1,FT,NU1,FSFT)
      CALL MULTD1(REH,NU1,FSFT,RFSFT)
      CALL MULTD(RFSFT,NU1,REH,XNVRA)
      CALL MULTD(RFSFT,NU1,ZIMH,XNVIA)
      CALL MULTD1(ZIMH,NU1,FSFT,ZIFT)
      CALL MULTD(ZIFT,NU1,REH,XNVIB)
      CALL MULTD(ZIFT,NU1,ZIMH,XNVRB)
      DO 88 I=1,NU1
      DO 88 J=1,NU1
88  XNVRA(J,I)=XNVRA(J,I)+XNVRB(J,I)
      CALL MATMPY(X,NU1,NU1,XNVRA,NU1,XXNVR)
      CALL MATMPY(XXNVR,NU1,NU1,XT,NU1,XNOVR)
      DO 89 I=1,NU1
      DO 89 J=1,NU1
89  XNOVR(J,I)=XNOVR(J,I)*CONB/W2
      DO 90 I=1,NU1
      DO 90 J=1,NU1
90  XNVIB(J,I)=XNVIB(J,I)-XNVIA(J,I)
      CALL MATMPY(X,NU1,NU1,XNVIB,NU1,XXNIB)
      CALL MATMPY(XXNIB,NU1,NU1,XT,NU1,XNOVI)
      DO 91 I=1,NU1
      DO 91 J=1,NU1
91  XNOVI(J,I)=XNOVI(J,I)*CONB/W2
      DO 92 I=1,NU1

```

```

DO 92 J=1,NU1
92 SACELR(I,J)=BSB(I,J)+SEGR(I,J)+TERR(I,J)+CUARR(I,J)
  *+QUINR(I,J)+SEX(R(I,J)+SEPR(I,J)+XOCTR(I,J)+XNOVR(I,J)
DO 9999 I=1,NU1
9999 WRITE(6,9998) I,BSB(I,I),SEGR(I,I),TERR(I,I),CUARR(I,I)
  *,QUINR(I,I),SEX(R(I,I),SEPR(I,I),XOCTR(I,I),XNOVR(I,I)
9998 FORMAT(3X,I10,9E10.4)
DO 94 I=1,NU1
DO 94 J=1,NU1
94 SACELI(I,J)=SEGI(I,J)+TERI(I,J)+CUARI(I,J)+QUINI(I,J)
  *+SEXI(I,J)+SEPI(I,J)+XOCTI(I,J)+XNOVI(I,J)
WRITE(6,8888)
8888 FORMAT(3X,'-----')
DO 9997 I=1,NU1
9997 WRITE(6,9996) I,SEGI(I,I),TERI(I,I),CUARI(I,I),QUINI(I,I),
  *SEXI(I,I),SEPI(I,I),XOCTI(I,I),XNOVI(I,I)
9996 FORMAT(3X,I10,8E10.4)
DO 97 I=1,NU1
DO 97 J=1,NU1
97 ABSSD(I,J)=SQRT(SACELR(I,J)**2+SACELI(I,J)**2)
WRITE(6,444) W
DO 110 J=1,NU1
110 DATOS(J,II)=ABSSD(J,J)
96 CONTINUE
DO 111 II=1,NW
DO 111 J =1,NU1
111 WRITE(7,212) J,DATOS(J,II)
212 FORMAT(I10,' ',E14.8)
CLOSE(7)
100 FORMAT(10E10.3)
150 FORMAT(/5E10.3)
200 FORMAT(E10.3)
444 FORMAT(5X,'FRECUENCIA = ',F10.3,/)
2400 FORMAT(5X,I5,3(E14.7,2X))
CALL TIME (10,DSTR)
WRITE(*,*) 'TIEMPO AL TERMINO=',TSTR
END
SUBROUTINE STPILE(E,AI,STK,CK,NU,ICODE,NE,HA)
DIMENSION AK(50),BK(50),CK(NU,NU),STK(NU,NU),AI(NU),HA(NE)
NS=NE
N=NS+1
DO 10 I=1,N
AK(I)=0.
DO 10 J=1,N
CK(I,J)=0.
10 STK(I,J)=0.
DO 20 I=1,NS
H=HA(I)
S=E*AI(I)/H
S1=6.*S/H
S2=2.*S1/H
AK(I)=AK(I)+4.*S
I1=I+1
AK(I1)=4.*S
BK(I)=2.*S

```

```

      CK(I,I)=CK(I,I)+S1
      CK(I,I1)=-S1
      CK(I1,I)=S1
      CK(I1,I1)=-S1
      STK(I,I)=STK(I,I)+S2
      STK(I,I1)=-S2
      STK(I1,I)=-S2
20  STK(I1,I1)=S2
      GO TO (21,22),ICODE
22  AK(1)=1.
      BK(1)=0.
      CK(1,1)=0.
      CK(1,2)=0.
21  NS=NE+1
      N1=NE
      DO 23 I=1,N1
        I1=I+1
        AK(I1)=AK(I1)-BK(I)*BK(I)/AK(I)
        DO 24 J=1,I1
24  CK(I1,J)=CK(I1,J)-BK(I)*CK(I,J)/AK(I)
23  CONTINUE
        DO 25 J=1,NS
25  CK(NS,J)=CK(NS,J)/AK(NS)
        DO 26 II=1,N1
          I=NS-II
          I1=I+1
          DO 27 J=1,NS
27  CK(I,J)=(CK(I,J)-BK(I)*CK(I1,J))/AK(I)
26  CONTINUE
          DO 30 I=1,N1
            H=HA(I)
            I1=I+1
            S=6.*E*AI(I)/(H*H)
            DO 30 J=1,NS
              STK(I,J)=STK(I,J)-S*(CK(I,J)+CK(I1,J))
30  STK(I1,J)=STK(I1,J)+S*(CK(I,J)+CK(I1,J))
      RETURN
      END
      SUBROUTINE MASAS(A,H,RO,ZM,NU1,NX,ZM1)
      DIMENSION A(NU1),ZM(NU1)
      ZM(1)=RO*H*0.5*A(1)+ZM1
      DO 10 I=2,NU1-1
10  ZM(I)=RO*H*A(I)
      ZM(NU1)=RO*H*A(NU1)/2
      RETURN
      END
      SUBROUTINE INVER(A,NMAX)
      DIMENSION A(NMAX,NMAX)
      DO 20 N=1,NMAX
        D=A(N,N)
        IF(D.EQ.0)GO TO 20
        DO 21 J=1,NMAX
21  A(N,J)=-A(N,J)/D
        DO 24 I=1,NMAX
          IF(N-I) 23,24,23

```

```

23 DO 27 J=1,NMAX
    IF(N-J) 26,27,26
26 A(I,J)=A(I,J)+A(I,N)*A(N,J)
27 CONTINUE
24 A(I,N)=A(I,N)/D
    A(N,N)=1.0/D
20 CONTINUE
    RETURN
    END
    SUBROUTINE MULTD(A,NU,B,C)
    DIMENSION A(NU,NU),B(NU),C(NU,NU)
    DO 10 I=1,NU
    DO 10 J= 1,NU
10 C(I,J)=A(I,J)*B(J)
    RETURN
    END
    SUBROUTINE MULTD1(A,NU,B,C)
    DIMENSION A(NU),B(NU,NU),C(NU,NU)
    DO 10 I=1,NU
    DO 10 J=1,NU
10 C(I,J)=A(I)*B(I,J)
    RETURN
    END
    SUBROUTINE VALORE(A,B,NU1,EIG,EIGM)
    DIMENSION A(NU1,NU1),B(NU1,NU1)
    *,XX(20,20),C(20,20),X(20,20),AAA(20,20),EIG(NU1)
    *,EIGM(NU1,NU1)
    DO 85 I=1,NU1
85 B(I,I)=1./SQRT(B(I,I))
    CALL MATMPY(B,NU1,NU1,A,NU1,C)
    CALL MATMPY(C,NU1,NU1,B,NU1,AAA)
    CALL JACOBI(NU1,AAA,1,NR,XX)
    CALL MATMPY(B,NU1,NU1,XX,NU1,X)
    DO 82 I=1,NU1
    K=NU1-I+1
    EIG(I)=SQRT(AAA(K,K))
    DO 82 J=1,NU1
82 EIGM(J,I)=X(J,K)
    WRITE(6,80)NR
80 FORMAT(/25H EL NUMERO DE ROTACION = ,I3/)
    DO 46 J=1,NU1
    IF(J-1)44,44,70
44 WRITE(6,50)J,EIG(J)
46 WRITE(6,60)(EIGM(I,J), I=1,NU1)
50 FORMAT(13H EIGENVALOR (,I2,4H ) =,F15.5)
60 FORMAT(5X,'EIGENVECTORES',/5X,5F15.5)
70 CONTINUE
    RETURN
    END
    SUBROUTINE MATMPY(A,N,M,B,L,C)
    DIMENSION A(N,M),B(M,L),C(N,L)
    DO 5 I=1,N
    DO 5 J=1,L
    C(I,J)=0.
    DO 5 K=1,M

```

```

5 C(I,J)=C(I,J)+A(I,K)*B(K,J)
  RETURN
  END
  SUBROUTINE JACOBI(N,Q,JVEC,M,V)
  DIMENSION Q(N,N),V(N,N),X(20),IH(20)
  IF(JVEC) 10,15,10
10 DO 14 I=1,N
  DO 14 J=1,N
  IF (I-J) 12,11,12
11 V(I,J)=1.0
  GO TO 14
12 V(I,J)=0.
14 CONTINUE
15 M=0
17 MI=N-1
  DO 30 I=1,MI
  X(I)=0.
  MJ=I+1
  DO 30 J=MJ,N
  IF (X(I)-ABS(Q(I,J))) 20,20,30
20 X(I)=ABS(Q(I,J))
  IH(I)=J
30 CONTINUE
40 DO 70 I=1,MI
  IF(I-1) 60,60,45
45 IF (XMAX-X(I)) 60,70,70
60 XMAX=X(I)
  IP=I
  JP=IH(I)
70 CONTINUE
  EPSI=0.00001
  IF(XMAX-EPSI) 1000,1000,148
148 M=M+1
  IF(Q(IP,IP)-Q(JP,JP)) 150,151,151
150 TANG=-2.*Q(IP,JP)/(ABS(Q(IP,IP)-Q(JP,JP))
  *+SQRT((Q(IP,IP)-Q(JP,JP))**2+4.*Q(IP,JP)**2))
  GO TO 160
151 TANG=+2.*Q(IP,JP)/(ABS(Q(IP,IP)-Q(JP,JP))+SQRT
  *((Q(IP,IP)-Q(JP,JP))**2+4.*Q(IP,JP)**2))
160 COSN=1.0/SQRT(1.0+TANG**2)
  SINE=TANG*COSN
  QII=Q(IP,IP)
  Q(IP,IP)=COSN**2*(QII+TANG*(2.*Q(IP,JP)+TANG*Q(JP,JP)))
  Q(JP,JP)=COSN**2*(Q(JP,JP)-TANG*(2.*Q(IP,JP)-TANG*QII))
  Q(IP,JP)=0.
  Q(JP,IP)=0.
  IF (Q(IP,IP)-Q(JP,JP)) 152,153,153
152 TEMP=Q(IP,IP)
  Q(IP,IP)=Q(JP,JP)
  Q(JP,JP)=TEMP
  IF (SINE) 154,155,155
154 TEMP=+COSN
  GO TO 170
155 TEMP=-COSN
170 COSN=ABS(SINE)

```

```

      SINE=TEMP
153 DO 350 I=1,MI
      IF (I-IP) 210,350,200
200 IF (I-JP) 210,350,210
210 IF (IH(I)-IP) 230,240,230
230 IF (IH(I)-JP) 350,240,350
240 K=IH(I)
250 TEMP=Q(I,K)
      Q(I,K)=0.
      MJ=I+1
      X(I)=0.
      DO 320 J=MJ,N
      IF (X(I)-ABS(Q(I,J))) 300,300,320
300 X(I)=ABS(Q(I,J))
      IH(I)=J
320 CONTINUE
      Q(I,K)=TEMP
350 CONTINUE
      X(IP)=0.
      X(JP)=0.
      DO 530 I=1,N
      IF (I-IP) 370,530,420
370 TEMP=Q(I,IP)
      Q(I,IP)=COSN*TEMP+SINE*Q(I,JP)
      IF (X(I)-ABS(Q(I,IP))) 380,390,390
380 X(I)=ABS(Q(I,IP))
      IH(I)=IP
390 Q(I,JP)=-SINE*TEMP+COSN*Q(I,JP)
      IF (X(I)-ABS(Q(I,JP))) 400,530,530
400 X(I)=ABS(Q(I,JP))
      IH(I)=JP
      GO TO 530
420 IF (I-JP) 430,530,480
430 TEMP=Q(IP,I)
      Q(IP,I)=COSN*TEMP+SINE*Q(I,JP)
      IF (X(IP)-ABS(Q(IP,I))) 440,450,450
440 X(IP)=ABS(Q(IP,I))
      IH(IP)=I
450 Q(I,JP)=-SINE*TEMP+COSN*Q(I,JP)
      IF (X(I)-ABS(Q(I,JP))) 400,530,530
480 TEMP=Q(IP,I)
      Q(IP,I)=COSN*TEMP+SINE*Q(JP,I)
      IF (X(IP)-ABS(Q(IP,I))) 490,500,500
490 X(IP)=ABS(Q(IP,I))
      IH(IP)=I
500 Q(JP,I)=-SINE*TEMP+COSN*Q(JP,I)
      IF (X(JP)-ABS(Q(JP,I))) 510,530,530
510 X(JP)=ABS(Q(JP,I))
      IH(JP)=I
530 CONTINUE
      IF (JVEC) 540,40,540
540 DO 550 I=1,N
      TEMP=V(I,IP)
      V(I,IP)=COSN*TEMP+SINE*V(I,JP)
550 V(I,JP)=-SINE*TEMP+COSN*V(I,JP)

```

```

      GO TO 40
1000 RETURN
      END
      SUBROUTINE DENSID(VEL,X,NU1,S,W,NU,SF1,IDENS)
      DIMENSION X(NU),S(NU1,NU1)
      IF(IDENS.EQ.1) GO TO 18
      DO 40 I=1,NU
      DO 40 J=1,NU
      DIST=X(J)-X(I)
      DIST1=X(J)+X(I)
      TIE=W*DIST/VEL
      TIE1=W*DIST1/VEL
40  S(I+1,J+1)=(2*COS(TIE)+2*COS(TIE1))*SF1
      DO 15 I=1,NU1
15  S(1,I)=0.
      DO 17 I=1,NU
      DO 17 J=I+1,NU1
17  S(J,I)=S(I,J)
      GO TO 20
18  CONTINUE
      DO 21 I=1,NU1
      DO 21 J=1,NU1
21  S(I,J)=0.0
      DO 19 I=1,NU1
19  S(I,I)=SF1
20  RETURN
      END
      SUBROUTINE TRANSF(W,PPSI,AAA,NU1,ZIMH,REH)
      DIMENSION PPSI(NU1),AAA(NU1),ZIMH(NU1),REH(NU1)
      DO 10 I=1,NU1
      A1=1.-(AAA(I)*AAA(I)/(W*W))
      A2=A1*A1
      C1=(2.*PPSI(I)*AAA(I))/W
      C2=C1*C1
      A=A2+C2
      REH(I)=A1/A
10  ZIMH(I)=C1/A
      RETURN
      END
      SUBROUTINE MULT(C,A,B,N,M,L,NDIM)
      DIMENSION C(NDIM,L),A(NDIM,NDIM),B(NDIM,L)
      DO 100 I=1,N
      DO 100 J=1,L
      C(I,J)=0.
      DO 100 K=1,M
100  C(I,J)=C(I,J)+A(I,K)*B(K,J)
      RETURN
      END
      SUBROUTINE DEN1(WW,C,NW)
      DIMENSION WW(NW),C(NW)
      AK=5091.01
      AK12=0.0134
      AK22=0.1914
      DO 10 I=1,NW
      W=WW(I)

```

```
W2=W*W  
10 C(I)=AK*(EXP(-AK12*W2)-EXP(-AK22*W2))  
RETURN  
END
```

REFERENCIAS

- (1) Ruíz, Sonia E., Romo, Miguel P., "Movimiento de pilotes ante ondas sísmicas", Trabajo desarrollado en el Instituto de Ingeniería (sin publicar).
- (2) Sánchez-Sesma, "propagación de ondas elásticas en un medio seminfinito", Instituto de Ingeniería, UNAM, Reporte interno.
- (3) Zeevaert, L., "Interacción suelo-estructura de cimentación", LIMUSA, México 1980.
- (4) Flores-Berrones R. y Whitman R.V., "Seismic response of end-bearing piles", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol 108, No. GT4, pp. 554-569
- (5) Penzien, J., et al., "Seismic analysis of bridges on long piles", Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, EM3, pp.223-235, mayo 1964.
- (6) Kanai, K., "Semi-empirical formula for the seismic characteristics of the ground", Bulletin of the Earthquake Research Institute, Universidad de Tokyo, Japón, vol. 35, pp. 309-325, junio 1957.
- (7) Kuhlmeier, R. L., "Static and dynamic laterally loaded floating piles", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol. 105, No. GT2, pp. 289-304, febrero 1979.

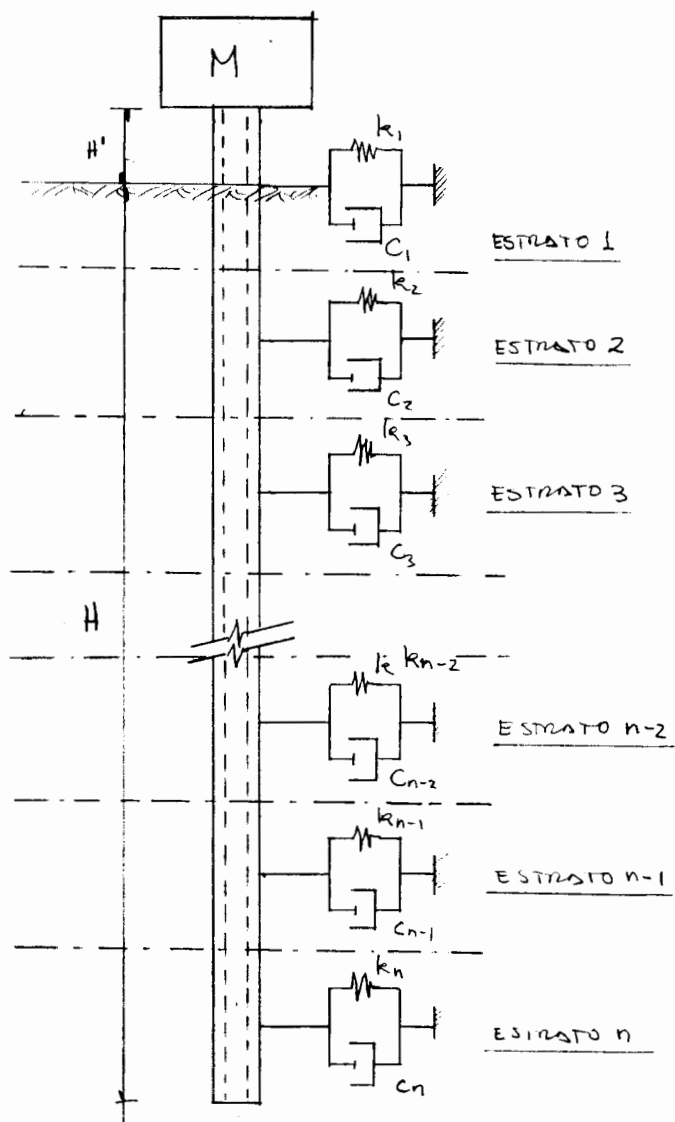


Fig. 1 Modelo del pilote a analizar.

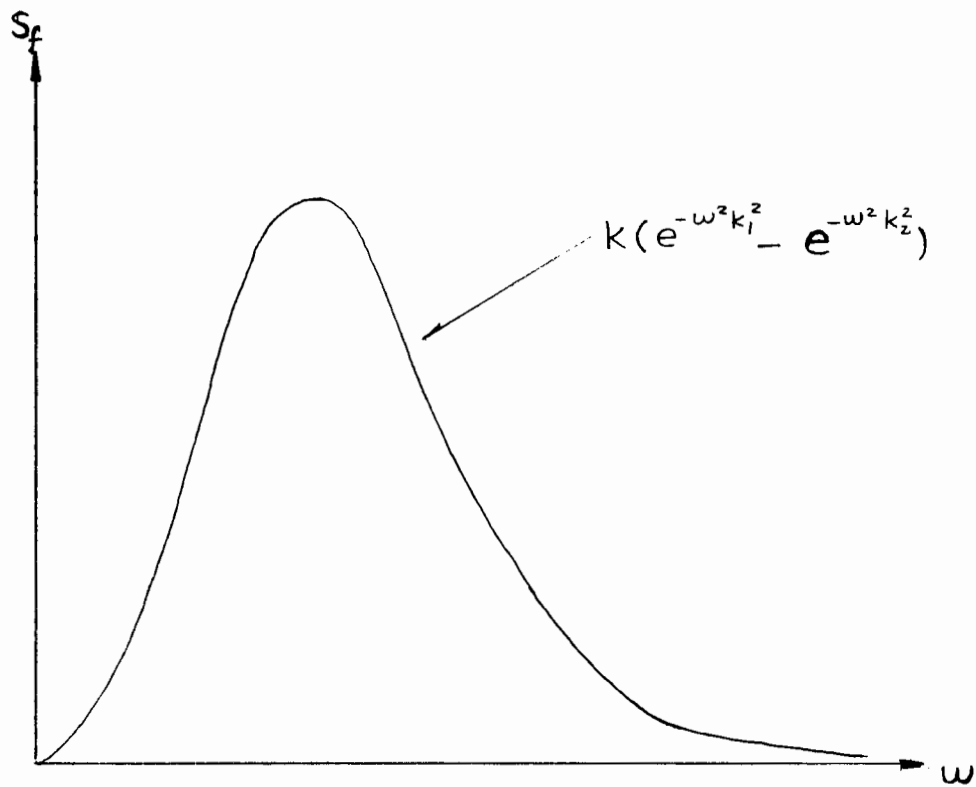


Fig. 2 Densidad espectral de aceleraciones de la excitación.

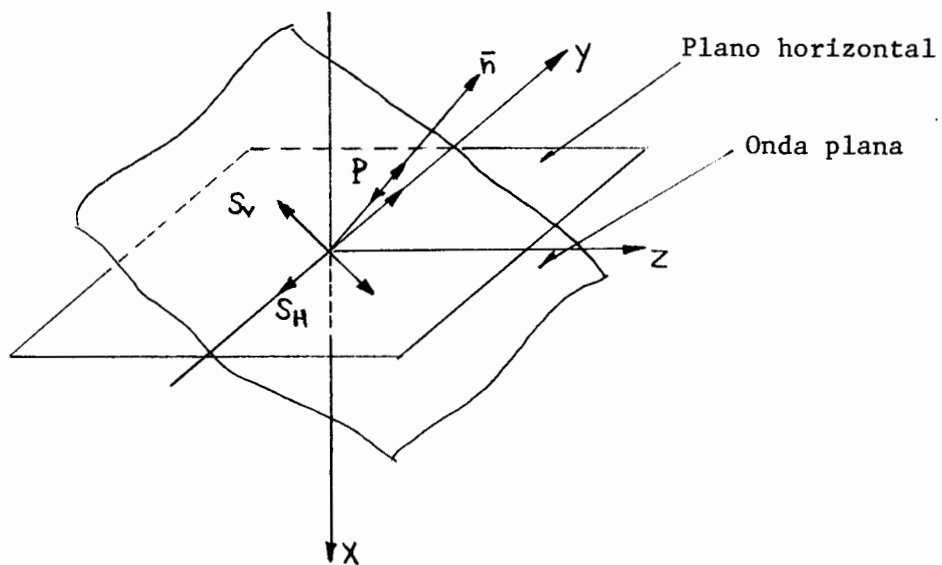


Fig. 3 Frente de onda plana y sus componentes.