

2 112
eje.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

INTERACCION DINAMICA
SUELO-ESTRUCTURA

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A :
ARACELI A. SANCHEZ ENRIQUEZ



MEXICO, D. F.

1994

YES
TALLA ES OREN



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 está 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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

Señorita

ARACELI A. SANCHEZ ENRIQUEZ

Presente.

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-138/94

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **ING. HECTOR SANGINES GARCIA**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

"INTERACCION DINAMICA SUELO-ESTRUCTURA"

- I. INTRODUCCION**
- II. INTERACCION DINAMICA SUELO-ESTRUCTURA**
- III. PROGRAMA PLUSH**
- IV. EJEMPLO DE APLICACION**
- V. CONCLUSIONES**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cd. Universidad, a 25 de agosto de 1994.

EL DIRECTOR



ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS/RCR*nl

A MI MADRE

*Por tu dedicación y apoyo en todas las etapas de mi vida.
Por haberme enseñado que no hay nada imposible si tenemos la confianza
en nosotros mismos.*

A MI PADRE

*Por tu apoyo en todos mis proyectos y por cada uno de tus consejos porque
has estado conmigo en los momentos más difíciles brindandome tu cariño
y confianza*

*A mis hermanos Manuel,
Carlos, Víctor, Armando,
Sandra, José Luis, Rodolfo,
Héctor, Fernando y Juan,
ya que todos han contribuido
a mi formación como profesionalista
y como ser humano.*

*A mis mejores amigos Martha, Alberto
Mario, Martín, Sergio y Víctor
por su comprensión y su
incondicionable amistad.*

*Al Ing. Héctor Sangines
por su apoyo, amistad y
paciencia y sobre todo
por su ayuda para la
realización de esta tesis.*

*Al M.I. Roberto Magaña,
Ing. Reginaldo Hernández
por su tiempo y su apoyo.*

*Al Ing. José A. Kuri
Abdala por sus enseñanzas
y su confianza.*

*A mis profesores ya que
ellos sembraron la semilla
que hoy esta germinando*

*A mis cuñadas y sobrinos que
durante mi carrera me ayudaron
y me apoyaron*

*Al Ing. Ricardo Padilla por
sus consejos y su ayuda.*

*A ti porque estuviste junto a
mi, me escuchaste y reíste
conmigo.*

*Al Ing. Gilberto Hernández
por enseñarme que los problemas
son menos cuando se sabe sonreír.*

*A todos aquellos que durante
mi estancia en la Universidad
me apoyaron.*

*A Agustín y Aurora porque
me enseñaron que para la amistad
no hay tiempo ni edad.*

*A todos mis compañeros y
profesores del CCH Sur.*

*A mis tios y a mi abuelita por
su cariño y paciencia.*

INDICE

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

<i>Introducción dinámica suelo-estructura</i>	2
<i>Cimentación de maquinaria</i>	3
<i>Movimientos dinámicos admisibles</i>	4
<i>Cargas dinámicas originadas por maquinaria</i>	5

CAPITULO 2

INTERACCION DINAMICA SUELO-ESTRUCTURA

<i>El problema de Interacción suelo-estructura</i>	8
<i>Análisis de Interacción suelo-estructura</i>	8
<i>Análisis Dinámico de Sistemas suelo-estructura</i>	10
<i>Respuesta Dinámica de Sistemas suelo-estructura</i>	10
<i>Ecuaciones de movimiento</i>	14

CAPITULO 3

PROGRAMA PLUSH

<i>Procedimiento probabilístico para el análisis de interacción suelo-estructura</i>	20
<i>Resumen del método</i>	23
<i>Funciones de transferencia</i>	24
<i>Estructura del programa</i>	30
<i>Subprogramas</i>	33
<i>Cintas</i>	38
<i>Cambios al programa</i>	46

CAPITULO IV

EJEMPLO DE APLICACION

<i>Ejemplo de Ing. Raul Flores Berrones</i>	51
<i>Aplicación del programa</i>	62

CAPITULO V

CONCLUSIONES

69

REFERENCIAS

70

CAPITULO 1
Introducción

INTERACCIÓN DINÁMICA SUELO-ESTRUCTURA

El problema dinámico de la interacción suelo-estructura tiene dos aspectos importantes para la Ingeniería sísmica.

- 1. El comportamiento dinámico de una estructura puede ser afectado por las propiedades del suelo.*
- 2. El movimiento registrado en la base y en la vecindad de la estructura durante un sismo no es el mismo que se obtiene si la estructura no estuviera presente.*

En términos de las propiedades dinámicas del sistema, este acoplamiento dinámico o interacción entre estructura y el suelo generalmente producirá:

Una reducción en la frecuencia natural del sistema con respecto a la frecuencia de la estructura apoyada sobre un suelo rígido.

Disipación de una parte de la energía vibratoria de la estructura mediante la radiación de ondas dentro del subsuelo, también habrá pérdidas de energía producidas por la fricción interna en el suelo.

Una modificación del movimiento de la base de la estructura con respecto al movimiento libre del terreno.

Aunque todos estos efectos se manifiestan hasta cierto grado en toda la estructura, desde el punto de vista ingenieril es importante determinar las condiciones bajo las cuales la interacción suelo-estructura afectará en forma notable el comportamiento de la estructura. Para esto, es necesario desarrollar métodos de análisis y diseño que consideren el fenómeno de interacción.

Dadas las propiedades físicas del suelo, la geometría del sistema y la naturaleza de la excitación sísmica, es sumamente difícil analizar el sistema suelo-estructura sin antes hacer suposiciones que simplifiquen el problema.

Es común representar el suelo como un semiespacio elástico, homogéneo isótropico o como un medio discreto constituido por resortes lineales y amortiguadores viscosos. La estructura, también generalmente elástica, descansa sobre la superficie del terreno.

CIMENTACION DE MAQUINARIA

Los criterios dinámicos que se utilizan en la actualidad para el diseño de cimentaciones de maquinaria, pueden clasificarse en dos grupos:

- 1. Considerando al suelo como un medio elástico.*
- 2. Considerando al suelo como un semiespacio elástico.*

En realidad ninguna de las dos idealizaciones es correcta. Ya que al considerar el suelo como una cama de resortes, se estarán despreciando fenómenos muy importantes, entre ellos, la dispersión de energía en el terreno y la propagación de ondas en su superficie, pero teniéndose la ventaja de que una vez determinados los parámetros del suelo idealizado, el análisis dinámico del sistema maquinaria-cimentación-suelo resultará muy sencillo, utilizando métodos semiempíricos para el diseño de la cimentación de maquinaria.

Por otra parte, la idealización del suelo como un semiespacio, permite considerar fenómenos mencionados anteriormente pero complicándose el análisis elástico y que debido a la estratificación en muchas ocasiones no puede considerarse como medio semienfinito, calculados con métodos teóricos como el modelo de elemento finito.

El diseño de cimentaciones de maquinaria debe satisfacer que:

Los esfuerzos inducidos en las cimentaciones por la operación de la

máquina, en combinación con los esfuerzos debidos a otras fuentes, no deben exceder los límites permisibles para el material que constituye la cimentación.

El suelo debe ser capaz de soportar fuerzas periódicas que se transmiten a través de las superficies de contacto, sin sufrir asentamientos importantes.

El movimiento de la cimentación y el terreno en que descansa, para cualquier modo de vibración y cualquier combinación de cargas y velocidades de operación, no debe ser objetable para la máquina misma, ni para máquinas, conexiones o estructuras vecinas, ni para personas que se encuentren en lugares inmediatos.

MOVIMIENTOS DINAMICOS ADMISIBLES

Una cimentación sometida a una carga dinámica periódica sufrirá un desplazamiento dinámico de la misma frecuencia que la carga aplicada. Las velocidades y aceleraciones máximas de la cimentación pueden expresarse en función del desplazamiento y frecuencia máximos.

En caso de cimentaciones sometidas a cargas estáticas, el criterio básico para el dimensionamiento de cimentaciones de maquinaria es el de asentamientos admisibles. Es necesario realizar un cálculo dinámico para asegurar el cumplimiento de estos criterios. En este cálculo puede representarse el sistema máquina-cimentación-terreno por un sistema equivalente masa-resorte-amortiguador, que variará de un problema a otro según el número de modos de movimiento que pueda sufrir el sistema real. (Barkan 1962).

CARGAS DINAMICAS ORIGINADAS POR MAQUINARIA

Se consideran 2 tipos de cargas dinámicas originadas por la maquinaria. La primera es la carga conocida debida al funcionamiento de la máquina. Por ejemplo los impactos en una fragua de martillo o la inercia del pistón en una máquina reciprocante. Las cargas conocidas usualmente pueden ser calculadas u obtenidas del fabricante. Las segundas son las cargas desconocidas, debidas, a desbalanceo, uso y operación a velocidades distintas de la velocidad de diseño. Las características de las cargas desconocidas son de difícil determinación por lo que los fabricantes rehúsan proveer valores de tales cargas.

Las máquinas se clasifican en cuatro grupos:

máquinas reciprocantes y rotatorias motores y compresoras

máquinas de impacto

turbinas

máquinas especiales tales como: torres de radar, plataformas de empuje para pruebas de motores de jets y cohetes, transformadores mecánicos.

El modelo de elemento finito idealiza al continuo de suelo como un sistema de elementos interconectados en número finito de puntos nodales. Tratándose de problemas planos de esfuerzos o deformaciones, la sección de la estructura por analizar se divide en elementos rectangulares o triangulares, refiriéndose estos últimos.

En la mayoría de los modelos de elemento finito se considera que el suelo es linealmente elástico. Para obtener la descripción de la respuesta del suelo deberán formularse las matrices de rigidez y de masa. El tiempo de respuesta, la historia de desplazamientos, velocidad y aceleración pueden calcularse para cualquier punto nodal.

Para este modelo, el módulo de rigidez, la relación de Poisson o módulo de compresibilidad, el peso unitario del suelo y el coeficiente de amortiguamiento deberán ser definidos. El módulo y el peso unitario puede variar de elemento a elemento representando suelo o roca de diferentes profundidades.

Este método permite estudiar geometría y movimientos más complejos.

El modelo descrito aproxima las propiedades no lineales del suelo usando un módulo lineal y un amortiguamiento equivalente.

El presente trabajo consiste en la presentación de un programa que al ser modificado nos ofrece una solución para el diseño de estructuras al considerar el comportamiento del suelo en relación a un movimiento vibratorio de una máquina obteniendo esfuerzos, deformaciones y desplazamientos dependiendo de las condiciones físicas del suelo, la geometría del sistema.

Se considera el método de elemento finito para discretizar la región de tal forma que la malla sea lo más fina posible para que el resultado sea el más óptimo aunque con la consecuencia de que el computo será más tardado por lo cual nos enfrentamos al problema de aproximación contra economía.

CAPITULO 2
Interacción dinámica suelo-estructura

EL PROBLEMA DE INTERACCION SUELO-ESTRUCTURA

El problema de Interacción se desarrolla por el acoplamiento de los movimientos del suelo y de la cimentación del edificio. Al arribar la ondas sísmicas a la superficie del suelo generan movimientos en las estructuras desplantadas sobre él, si los desplazamientos en el terreno libre, U_s , son diferentes de los de la cimentación, U_p , se dice que la estructura y el terreno están acoplados y, por tanto, hay interacción suelo-estructura. Por otro lado, si $U_s = U_p$, el fenómeno de interacción no se desarrolla.

En general la interacción dinámica involucra tres efectos (Seed, 1986):

1. La variación espacial de los movimientos del terreno libre tiende a ser eliminada por la presencia de una cimentación rígida; la magnitud de este efecto depende del área y rigidez de la cimentación y del grado de heterogeneidad de los movimientos de campo libre.

2. Cuando un edificio es excitado en su base presenta una resistencia inercial al movimiento dinámico en la superestructura que persiste durante toda la excitación. Este efecto, denominado interacción inercial, resulta en cambios en la presión de contacto entre la cimentación y el suelo, el período efectivo de la estructura se incrementa con respecto al calculado para la condición de apoyo rígido.

3. Si la cimentación de un edificio está desplantada a una profundidad significativa, la base y las paredes exteriores de la cimentación interactúan con el suelo, desarrollando el fenómeno denominado interacción cinemática. Debido a que la intensidad de los movimientos sísmicos en el terreno libre disminuyen con la profundidad, el efecto de la interacción cinemática en la respuesta de las estructuras puede ser significativo.

ANALISIS DE INTERACCION SUELO-ESTRUCTURA**1. Efecto de profundidad de desplante**

La profundidad a la que se desplanta una cimentación afecta de dos formas la

respuesta dinámica de un edificio. Por un lado la intensidad de los movimientos sísmicos disminuye con la profundidad, lo cual indica que existe una posibilidad de que las vibraciones que le lleguen a la estructura sean menores al incrementarse la profundidad de desplante. Para una estructura dada al aumentar la profundidad a la que se desplanta la cimentación el vector de carga disminuye, indicando que la sollicitación sísmica es menos severa.

2. Efecto del tipo de cimentación

Para muchos de los edificios con 12 o 18 niveles que se construyen en la zona del Lago de la ciudad de México se considera, en general, que las dos alternativas más viables para cimentarlos son pilotes de punta o cajones. Sin embargo un factor que no se considera actualmente, para decidir sobre el tipo de cimentación, es su capacidad para atenuar los movimientos sísmicos a los que estará sometida la estructura.

3. Efecto de estructuras vecinas

En lo anterior se considera que el edificio está aislado; sin embargo, en zonas urbanas es difícil encontrar esta condición debido a la alta densidad de construcciones. La presencia de una estructura modifica los movimientos sísmicos en el campo libre cercano, lo cual apunta hacia la posibilidad de que el espectro de piso de un edificio aislado sea modificado cuando se tenga otra estructura cerca de él.

4. Efecto de la flexibilidad del suelo en el periodo efectivo de las estructuras

Si se considera como periodo efectivo de un edificio aquel que corresponde al sistema suelo-estructura, entonces resulta evidente que al aumentar la flexibilidad del depósito de suelo se incrementará el periodo efectivo. Así, la misma estructura desplantada sobre roca tendrá un periodo efectivo menor que desplantada sobre suelo.

ANALISIS DINAMICO DE SISTEMAS SUELO ESTRUCTURA

Los problemas dinámicos se pueden clasificar en tres categorías fig. 2.1:

a) CIMENTACION DE MAQUINARIA.

En el problema de vibración de maquinaria la excitación dinámica se especifica al nivel de la cimentación y generalmente consiste de una oscilación de frecuencias conocidas.

b) RESPUESTA DINAMICA A EXPLOSIONES.

En el problema de respuesta dinámica a ondas superficiales causadas por explosiones, la excitación consiste normalmente de ondas de corta duración.

c) RESPUESTA SISMICA DE ESTRUCTURAS MASIVAS.

En el problema de respuesta sísmica, la excitación dinámica se especifica normalmente a cierta profundidad de un estrato rocoso o, en la superficie del depósito de suelo de cimentación, cuando no se tiene registro del sismo en roca.

La excitación dinámica consiste en general en un histograma de aceleraciones con un amplio contenido de frecuencias.

RESPUESTA DINAMICA DE SISTEMAS SUELO-ESTRUCTURA.

Las características en el análisis dinámico de estructuras desplantadas sobre materiales flexibles son: la evaluación de la relación que existe entre las características de la excitación sísmica del suelo de cimentación, las condiciones geológicas del sitio, las condiciones locales del depósito de suelo y la respuesta de las estructuras a la excitación sísmica. Los aspectos esenciales de este problema son:

1. Las condiciones locales del suelo y las condiciones geológicas del sitio afectan en general las características de la excitación sísmica, en términos de su máxima aceleración fig 2.2. Es necesario evaluar la magnitud de estos efectos con el fin de establecer criterios de diseño apropiados.

Es notorio el efecto del tipo de suelo en las formas de los espectros especialmente para períodos mayores que 0.5 seg; para valores superiores las amplificaciones espectrales son mayores para depósitos profundos de suelos no cohesivos y depósitos de arcilla blanda media que para condiciones de roca y depósitos de suelos rígidos.

2. Durante la excitación dinámica las estructuras interactúan con el suelo de cimentación. Por lo tanto, es necesario evaluar los efectos de esta interacción sobre la respuesta dinámica de las estructuras. El fenómeno de interacción suelo-estructura se manifiesta por la diferencia entre el movimiento u_1 en la base de la estructura y el movimiento u_0 en la superficie del terreno lejos del sitio de cimentación, como se indica en la fig 2.3. Este movimiento puede ser, en general vertical, horizontal, de cabeceo y de torsión.

Debido a que el campo sísmico en el cual se va a colocar una estructura no se conoce y atendiendo a los dos espectros antes mencionados, por el problema básico de interacción suelo-estructura involucra el cálculo de la respuesta de una o más estructuras, en un sitio particular, a partir de una excitación de diseño dada (punto de control) del sitio antes de la construcción de la estructura (análisis de campo libre). Una vez que se conocen las características del suelo de cimentación y de la estructura.

Los problemas de respuesta de campo libre y de interacción son de índole diferente; sin embargo, en principio se pueden formular en términos de modelos continuos o discretos.

Algunas de las ventajas de los modelos que utilizan el método del elemento finito son:

- a) permiten tomar en cuenta la no linealidad y la heterogeneidad del suelo;*
- b) se pueden simular condiciones de frontera más representativas que con modelos continuos.*

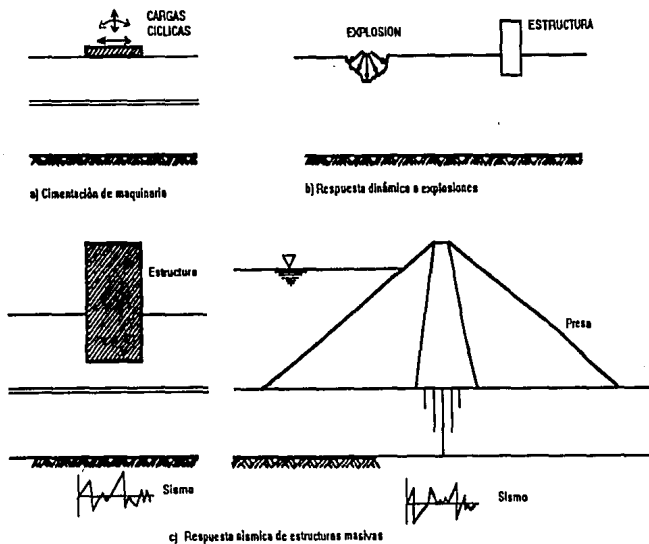


Fig. 2.1 Problemas Dinámicos en Geotecnia

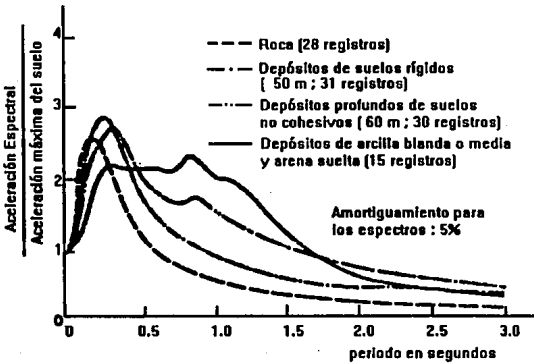
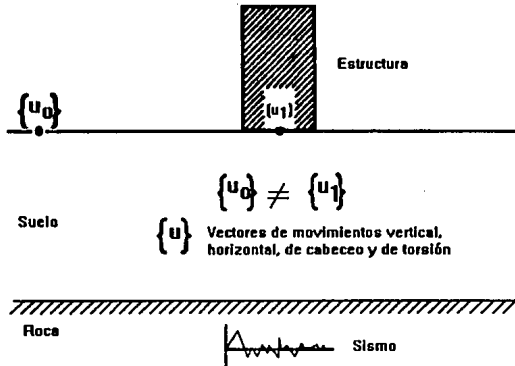


Fig. 2.2 Espectros de aceleración promedio para diferentes condiciones locales

Fig. 2.3 Definición de la interacción suelo-estructura



Los modelos continuos tienen la ventaja de uso de geometrías simples y materiales lineales. Pero su utilidad se restringe al análisis de vibración de maquinaria, de problemas de interacción para estructuras con cimentación superficial y algunos tipos de problemas de respuesta de campo libre.

ECUACIONES DE MOVIMIENTO

La teoría que se presenta se refiere a modelos de deformación plana, con propiedades viscoelásticas lineales, fig. 2.4. El modelo consiste en tres regiones: dos zonas estratificadas semi-infinitas (campo libre) y una zona central dentro de la cual pueden existir estratos de geometría irregular (problema de interacción). La frontera inferior del campo libre se supone rígida pero no necesariamente fija.

La frontera inferior del problema de interacción puede ser rígida o flexible, con una condición de frontera viscosa para simular la existencia de un semi-espacio elástico debajo de esta región.

El sistema que se va a analizar corresponde a la estructura y el suelo que la rodea fig 2.5a., este sistema se descompone en dos modelos, el campo libre fig. 2.5b. y el incremental que es equivalente a un problema de vibración de maquinaria fig. 2.5c. Superponiendo las soluciones de estos dos modelos se obtiene la respuesta dinámica del sistema suelo-estructura. Entonces los desplazamientos del sistema suelo-estructura $\{u_i\}$ se obtienen de la siguiente ecuación:

$$\{u_i\} = \{u_o\} + \{u_s\} \quad 2.1$$

Donde $\{u_o\}$ y $\{u_s\}$ son los vectores de desplazamientos en el campo libre y en el modelo incremental, respectivamente.

Todas las masas y rigideces son las mismas, excepto que la parte estructural del modelo de la fig. 2.5b no tiene masas ni rigideces y para este modelo los nudos en la estructura arriba de la superficie del terreno se suponen fijos.

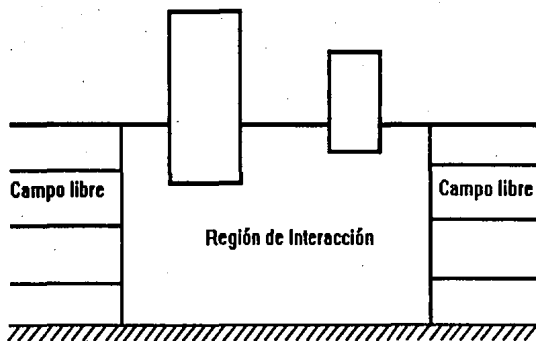


Fig. 2.4 Modelo para el problema de interacción suelo-estructura

Suponiendo que las fronteras están lejos de la estructura fig. 2.5a la ecuación de movimiento para el problema de interacción es:

$$[M]\{\ddot{u}_i\} + [C]\{\dot{u}_i\} + [K]\{u_i\} = \{F_i\} \quad 2.2$$

Donde $[M]$, $[C]$ y $[K]$ son las matrices totales de masa, amortiguamiento y rigidez, respectivamente; y $\{F_i\}$ es la excitación dinámica actuando en las fronteras del modelo.

Debido a que los nudos fijos en la estructura no afectan la respuesta del depósito de suelo fig 2.5b la ecuación de movimiento para el problema de campo libre es;

$$[M]\{\ddot{u}_o\} + [C]\{\dot{u}_o\} + [K]\{u_o\} = \{F_o\} \quad 2.3$$

Donde $[M]$, $[C]$ y $[K]$ son las matrices totales de masa, amortiguamiento y rigidez, respectivamente de campo libre.

Sustituyendo las ecuación 2.1 y 2.2 en la ecuación 2.3 se obtiene la ecuación de movimiento para el modelo incremental:

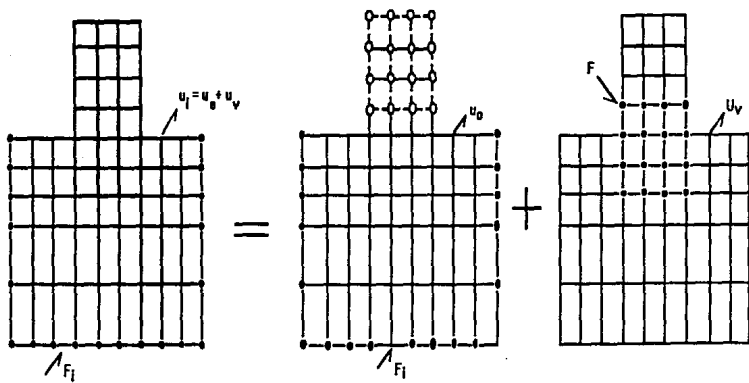
$$[M]\{\ddot{u}_i\} + [C]\{\dot{u}_i\} + [K]\{u_i\} = \{F\} \quad 2.4$$

Donde

$$\{F\} = ([M_d] - [M])\{\ddot{u}_o\} + ([C] - [C])\{\dot{u}_o\} + ([K_d] - [K])\{u_o\} \quad 2.5$$

Es el vector de carga y puede determinarse de los desplazamientos del campo libre calculados con la ecuación 2.3. Es importante notar que el vector de carga $\{F\}$ depende sólo de la diferencia entre las propiedades de la estructura y del suelo excavado.

Los desplazamientos totales $\{u_i\}$ del problema de interacción suelo-estructura se calculan por superposición.



a) Problema de Interacción

b) Problema de campo libre

● Nodos cargados

O Nodos fijos

c) Problema de vibración

Fig. 2.5 Etapas de superposición para el problema de interacción

Podemos obtener las siguientes características de este fenómeno:

a) Para el problema de interacción, se necesitan únicamente los movimientos del campo libre que ocurren dentro del volumen de suelo que se excava para el desplante de la estructura. Lo que implica que para estructuras desplantadas en suelos blandos, el análisis de campo libre es quizá la parte más importante del problema de interacción, debido a que estos sitios los movimientos de campo libre varían significativamente con la profundidad para simular el fenómenos de interacción puede conducir a resultados erróneos.

b) Para estructuras desplantadas a cierta profundidad la importancia del fenómeno de interacción depende de la diferencia entre las masas y rigideces de la estructura y del volumen de suelo excavado.

c) El análisis es válido para sistemas lineales. Pero el efecto no lineal se puede tomar en cuenta con un procedimiento equivalente lineal, que consiste en resolver el problema linealmente pero iterando en una relación esfuerzo-deformación para incluir el cambio de rigidez del suelo con el nivel de deformaciones desarrollado por la excitación dinámica.

Para resolver el problema de Interacción suelo-estructura se cuenta con programas de computadora como por ejemplo el Plush, Flush, etc. el análisis presentada considero el plush como el programa que se podía modificar ya que toma en consideración algunos elementos como las características del suelo, la rigidez de la subestructura, así como el espectro de respuesta de un sismo que puede ser adaptado para simular el de una máquina. A continuación se presentará un esbozo de lo que es el programa así como algunas de las modificaciones que se hicieron con la finalidad de aplicarlo a la cimentación de maquinaria.

CAPITULO 3
Programa Plush

El siguiente capítulo nos permite conocer básicamente la estructura del programa Plush, en el cual se trabajó para representar el estudio de interacción suelo-estructura dinámica, en este programa se trabaja fundamentalmente con campo libre y sismo los cuales se trataron de eliminar ya que en análisis de interacción no se requieren.

El programa de computadora PLUSH es un desarrollo ulterior de los programas de respuesta de elemento finito LUSH y FLUSH (Lismer Et Al; 1974-1975) que fueron diseñados para realizar análisis de interacción suelo estructura sísmica. El nuevo programa contiene las características básicas de FLUSH, por ejemplo fronteras trasmisoras para simular la extensión infinita de la masa de suelo, elementos barra, una capacidad aproximada 3-D, deconvolución en el campo libre con el programa, interacción en propiedades de suelos para simular efectos no lineales, etc.

La diferencia principal entre PLUSH y FLUSH es la forma en que se considera la excitación de entrada. Mientras que en FLUSH la excitación de entrada se especifica como la historia de aceleración en el tiempo, en PLUSH se define en términos de un espectro de estímulo de entrada o de un espectro de respuesta media. En el último caso, el espectro de respuesta de diseño se convierte en un espectro de estímulo correspondiente dentro del programa. Así el PLUSH considera como un número infinito de movimientos posibles de entrada y salida simultáneamente aceleraciones máximas, espectros de respuesta, etc., consistente en estimaciones estadísticas de estas variables con límites de confianza apropiados

PROCEDIMIENTO PROBABILISTICO PARA EL ANÁLISIS DE INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA

Debido a la naturaleza aleatoria de los movimientos sísmicos, una de las mayores incertidumbres en el análisis de respuesta sísmica es la definición de la excitación de entrada. La aproximación más común para diseños de ingeniería ha sido el uso de un procedimiento determinístico en la cual una sola historia de tiempo de aceleración (control de movimiento) se especifica en un cierto punto (el punto de control) en el campo libre. El control de movimiento usualmente se define como un movimiento que satisface un espectro de respuesta de diseño dado. De cualquier manera, un espectro de respuesta no define el control de movimiento en forma única y los datos disponibles han demostrado que las respuestas calculadas mediante esta aproximación son significativamente

dependientes del caso particular de historia de tiempo usado. Por lo tanto es necesario realizar el análisis repetidamente con muchas historias de tiempo generadas del mismo espectro de respuesta para tomar en cuenta las incertidumbres introducidas.

Una alternativa a la aproximación determinística sería el considerar los eventos sísmicos como un proceso aleatorio. Se está de acuerdo generalmente en que los movimientos sísmicos pueden ser tratados como procesos gaussianos de significancia cero. Así en proceso aleatorio se caracteriza completamente mediante un espectro de potencia. Usando teorías de vibración aleatoria, varios de los picos de respuesta de un sistema lineal debido a tal excitación pueden calcularse para un límite de confianza dado (probabilidad de no excedencia). Físicamente tal definición del medio sísmico sería equivalente a un ensamble infinito de historias de tiempo con el mismo contenido de frecuencia principal, pero con una relación de fase aleatoriamente distribuida entre los componentes individuales de frecuencia.

Un procedimiento analítico usando esta aproximación probabilística fue presentado por Romo (1977) y Romo Et Al (1977) para el análisis de interacción suelo-estructura. Ellos propusieron considerar el espectro de diseño como la respuesta extrema media de cierto proceso aleatorio equivalente. El espectro de potencia equivalente del proceso fue estimado, usando teoría del valor extremo, del espectro de respuesta de diseño dado.

Conociendo la entrada del espectro de potencia, los espectros de potencia de salida resultantes fueron calculados mediante el análisis de respuesta en el dominio de las frecuencias del sistema suelo-estructura. Debido a la complicada geometría de tales sistemas, resulta mas conveniente hacerlo a través de elemento finito. Una vez obtenido el espectro de potencia de salida en todos los puntos del sistema, cantidades de respuesta pico tales como aceleraciones máximas y amplitudes de deformación compatibles con sus niveles de confianza pueden ser calculados para cada punto. Varios espectros de respuesta también se pueden obtener pasando el espectro de estímulos de salida a través de un sistema de un solo grado de libertad.

Un programa de computadora, similar al programa FLUSH, fue desarrollado por Romo (1977), el cual puede realizar este tipo de análisis. Este programa, PLUSH, ha sido mejorado desde entonces con un mejor algoritmo para desempeñar las estimaciones probabilísticas y con características mejores de entrada/salida. En las siguientes secciones se describirá un breve resumen de la teoría mencionada y de las características de este programa mejorado.

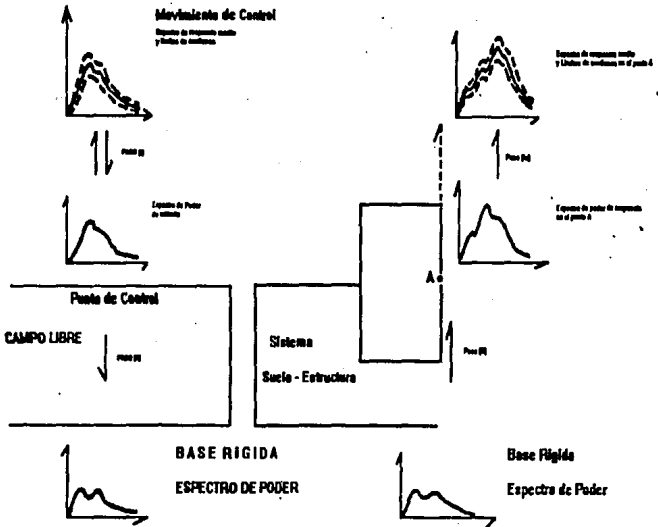


Fig. 3.1 REPRESENTACION DE UN ANALISIS SISMICO

RESUMEN DEL MÉTODO

El método probabilístico usado en el programa PLUSH para evaluar la interacción dinámica entre el suelo y la estructura es conceptualmente similar a aquel propuesto por Seed e Idriss (1973) para el análisis determinístico. El método, que es ilustrado por la figura 3.1, involucra cinco pasos básicos y puede ser resumido como sigue:

I. Del espectro de respuesta medio de diseño, dado en algún nivel del campo libre, se calcula el espectro de potencia de entrada correspondiente.

II. El espectro de potencia de entrada se deconvoluciona para encontrar el espectro de potencia en la base rígida asumida por el modelo de elemento finito.

III. Una vez que el espectro de potencia de la base rígida es conocido, se obtienen espectros de estímulos de salida, en diferentes lugares en el sistema suelo-estructura a través del análisis de frecuencia del modelo de elemento finito.

IV. Del espectro de potencia de salida obtenido en el paso tres, se evalúan valores extremos de aceleraciones, esfuerzos, deformaciones, momentos, etc., en términos de los límites de confianza especificados.

V. Para calcular el espectro de respuesta de salida, los espectros de potencia de salida del paso tres se usan como entrada al sistemas de un solo grado de libertad de diferentes frecuencias naturales. De los espectros de potencia de salida resultantes, espectros de respuesta (valores extremos de respuesta) son evaluados, también en términos de los límites de confianza.

El análisis debe ser realizado iterativamente para considerar la dependencia natural de las deformaciones de suelos no lineales, por ejemplo, en cada interacción el análisis es lineal pero las propiedades del suelo se ajustan de iteración en iteración hasta que las amplitudes de deformación calculadas sean compatibles con las propiedades del suelo usadas en el análisis.

FUNCIONES DE TRANSFERENCIA

Asumiendo un proceso aleatorio estacionario, los pasos dos y tres pueden ser alcanzados en términos de la bien conocida relación entrada/salida de teorías de vibración aleatoria, ver Crandall y Mark (1963):

$$P^o(W) = H(W)^2 P^i(W) \quad 3.1$$

Donde $P^i(w)$ es el espectro de potencia de entrada, $H(w)$ es la función de transferencia compleja que caracteriza el sistema, $P^o(w)$ es el espectro de salida, w es la frecuencia

Las funciones complejas de transferencia de la ecuación 3.1 deben ser obtenidas resolviendo la ecuación de movimiento en el dominio de frecuencias. Para un sistema de un solo grado de libertad la ecuación de movimiento es:

$$\ddot{X}(t) + 2B\omega_n \dot{X}(t) + \omega_n^2 X(t) = \ddot{Y}(t) \quad 3.2$$

Donde $X(t)$ es el desplazamiento relativo de la masa respecto a su apoyo y la $Y(t)$ es la historia de aceleración en el apoyo, ω_n y β son la frecuencia natural y el amortiguamiento del sistema, respectivamente.

Haciendo la sustitución de $Y(t) = \exp(i\omega t)$ y $x(t) = H(\omega) \exp(i\omega t)$ en la ecuación 3.2 y cancelando los términos $\exp(i\omega t)$, la función compleja de transferencia para el desplazamiento relativo se obtiene como sigue:

$$H(\omega) = \frac{-1}{\omega^2 - \omega^2 + 2i\beta\omega} \quad 3.3$$

donde $i = \sqrt{-1}$

Las funciones complejas de transferencia para sistemas de grados de libertad múltiples no pueden ser definidos en forma tan simplista. De cualquier manera, pueden obtenerse resolviendo las ecuaciones de movimiento para un modelo de elemento finito del sistema en el dominio de frecuencias. El grado de complejidad de las funciones complejas de transferencia es influenciado directamente por la complejidad del modelo analítico usado para representar el sistema suelo-estructura. Lysmer Et Al (1974-1975) ha desarrollado un procedimiento numérico para un modelo suelo-estructura como el presentado en la fig. 3.2. Este modelo incluye fronteras viscosas en los lados planos de la capa usada en el análisis para simular la propagación de la onda de energía en la dirección perpendicular al eje de la capa, y fronteras transmisoras situadas en las fronteras laterales para simular los efectos dinámicos del sistema de suelo semiinfinito viscoelástico horizontalmente estratificado mas allá de la región de elemento finito.

La ecuación de movimiento para la representación de elemento finito, arriba descrita, del sistema suelo-estructura puede escribirse:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} - \{m\}\ddot{y} - \{V\} + \{F\} - \{T\} \quad 3.4$$

Donde: $[M]$, $[K]$ son las matrices de masa y rigidez de deformación plana, respectivamente, de una capa de espesor unitario, $\{u\}$ son los desplazamientos de los puntos nodales relativos a la base rígida $\{m\}$ es el vector relacionado con $[M]$ y con la dirección de la aceleración de la base rígida, $y''(t)$. Puede incluirse en el amortiguamiento del material formando $[K]$ de un modulo complejo: $G^* = G \exp(2i\beta)$, donde β es la fracción de amortiguamiento crítico.

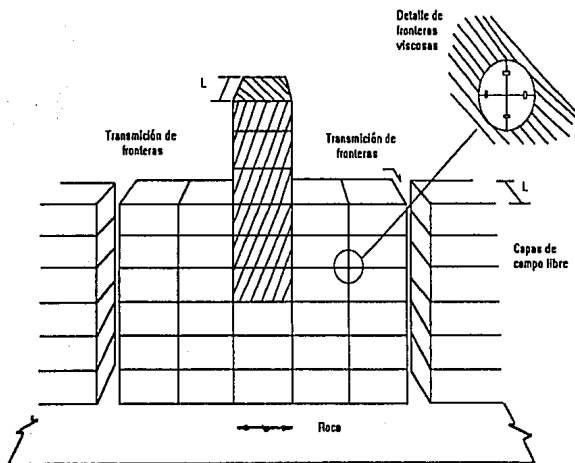


Fig. 3.2 Modelo suelo-estructura

Las fuerzas $\{V\}$ debidas a las fronteras viscosas en los lados planos de las capas son, de acuerdo a Hwang Et Al (1975):

$$\{V\} = \frac{1}{L} [C] (\dot{u} - \dot{u}_f) \quad 3.5$$

Donde L es el espesor de la capa, $[C]$ es la matriz diagonal que contiene las características de amortiguamiento de los amortiguadores asignados al modelo, $\{\dot{u}\}$ son las velocidades del campo libre.

Las fuerzas $\{F\}$, que están dadas por:

$$\{F\} = [G] \{u_f\} \quad 3.6$$

simplemente representan las fuerzas actuando en el plano vertical en el campo libre y no involucran transmisión horizontal de la onda de energía, $[G]$ es una matriz de rigidez de frecuencia independiente simple formada de los módulos complejos de los estratos del suelo en el campo libre.

Las fuerzas $\{T\}$ que están relacionadas a la transmisión horizontal de energía a través de las fronteras laterales están dadas por:

$$\{T\} = ([R] + [L]) (\{u\} - \{u_f\}) \quad 3.7$$

Donde $[R]$ y $[L]$ son matrices de rigidez simétricas de frontera de frecuencia dependiente inicialmente introducidas por Lysmer y Drake (1972) y Waas (1972). Estas matrices representan el efecto dinámico exacto del sistema viscoelástico semiinfinito mostrado en la fig. 3.2 en ambos extremos del modelo y toman en cuenta pérdidas por radiación en direcciones horizontales dentro de la capa de análisis.

Utilizando el método de respuesta compleja la ec. (3.4) puede escribirse en el dominio de frecuencias como:

$$\begin{aligned}
 & ([K] + [R]_r + [L]_r + (i\omega_r/L) [C] - \omega_r^2 [M]) \{U\}_r = \\
 & -\{m\} Y_r + ([G] + [R]_r + [L]_r + (i\omega_r/L) [C]) \{U\}_r, \quad 3.8
 \end{aligned}$$

Para este conjunto de ecuaciones las amplitudes de desplazamiento $\{U\}_r$, pueden ser obtenidas ω_r , $r = 0, 1, 2, \dots$, del movimiento de entrada por eliminación gaussiana.

Los movimientos del campo libre, $\{u\}_r$, que aparecen en las ecuaciones 3.5, 3.6 y 3.7 se calculan por separado asumiendo que el campo libre esta constituido por estratos horizontales de suelo y que la excitación sísmica consiste en la propagación vertical de ondas P o S. Las amplitudes del campo libre, $\{U\}_r$, se calculan de

$$[K_f]_r \{U\}_r = -\{m\} Y_r$$

o

$$(H_f)_r = \frac{\{U_f\}_r}{Y_r} = -[K_f]_r^{-1} \{m\} \quad 3.9$$

donde

$$[K_f]_r = [K_r] - \omega_r^2 [M_r]$$

Donde: $[K_r]$ y $[M_r]$ son las matrices de rigidez y de masa del sistema

estratificado, $\{H_r\}$, es un vector que contiene los valores de amplificación (funciones complejas de transferencia) desde la aceleración de la base rígida hasta los desplazamientos de los estratos. Sustituyendo la ec. (3.9) en la ec. (3.8) se obtiene la ec. de movimiento en su forma final:

$$[K]_r \{U\}_r = \{P\}_r, Y^m, \quad 3.10$$

donde $[K]_r$ es la matriz de rigidez dependiente de la frecuencia:

$$[K]_r = [K] + [R]_r + [L]_r + (i\omega_r/L) [C] - \omega_r^2 [M] \quad 3.11$$

y

$$[P]_r = ([G] + [R]_r + [L]_r + (i\omega_r/L) [C]) \{H_r\}_r - \{m\} \quad 3.12$$

Es el vector de carga correspondiente al movimiento de amplitud unitaria en la base rígida. Las funciones complejas de transferencia para el sistema suelo estructura pueden obtenerse estableciendo $y^m = 1$ y $\{U_r\} = \{h(\omega_r)\}$ en la ec 3.10. así:

$$[K]_r \{H(\omega_r)\} = \{P\}_r, \quad 3.13$$

Que puede ser resuelta para $\{H(\omega_r)\}$ mediante eliminación gaussiana para todas las frecuencias $r = 0, 1, 2, \dots$, de movimiento de entrada.

Las ec. (3.1), (3.9) y (3.11 - 3.13) proporcionaran los recursos para alcanzar los pasos (II), (III) del método de análisis

ESTRUCTURA DE PROGRAMA

El programa de computadora PLUSH fue desarrollado en las computadoras LBL/CDC pero es escrito en un código restringido de FORTRAN IV que hace fácilmente convertible a la mayoría de los modernos sistemas de computadora con más de 130 K (octal) de velocidad de alto almacenaje. El programa puede operar en tres modos, todos producen un completo registro de datos de entrada pertinente y un estado legal de cálculo.

MODEL. EL MODO DE INICIACIÓN

En este modo todos los datos de entrada son por tarjetas perforadas y es esencial que el programa siga el esbozo de procedimiento de la sección anterior. Durante la ejecución de una cinta magnética, TAPEI, son escritas conteniendo un registro permanente de todo los datos de entrada, la información en los movimientos de campo libre, de la transmisión de límites, y de todas las funciones de traslado calculadas durante las iteraciones anteriores. Los puntos de interpolación de las funciones de traslado no son grabados en la cinta. Al final de la ejecución ambos cálculos de las propiedades del suelo (viejos y nuevos) son salvados en el TAPEI para usarse en iteraciones subsiguientes en el MODE3. La estimación anterior es aquella que corresponde a la solución generada en la interacción anterior.

MODE2. EL MODO DE EXTRACCIÓN

El MODE2 extrae detalles de la solución en TAPEI usando una amplificación de funciones almacenadas en cinta. El TAPEI permanece inalterado. Las operaciones en este modo son relativamente pequeñas ya que las ecuaciones no lineales tienen que ser solucionadas y ha sido fundamentalmente práctico un solo monitoreo del movimiento de algunos puntos durante la iteración inicial, produciendo una corrida del TAPEI, son extraídos los detalles de la solución final usando el MODE2. Éste puede ser que se lleve un poco más de tiempo al ser requerida la información.

En este modo es posible especificar un movimiento nuevo de control con el mismo punto de control y dirección como el del movimiento original. Cuando se hace un nuevo control de nodos se deben especificar los usos de programa, así como las funciones de traslado para generar el movimiento original. Por lo tanto, el movimiento nuevo de control tiene que ser tal que introduzca esencialmente las mismas tensiones en el suelo como el movimiento original.

MODE3. EL MODO DE ITERACION

En el MODE3 se inician las iteraciones más usadas en las propiedades del suelo nuevo o viejo como cálculos iniciales. Este modo es muy práctico para solicitudes de el programa PLUSH en la aplicación de ejemplos reales al hacer las iteraciones en las propiedades del suelo. En este modo el programa lee primero el TAPE1 e inmediatamente copia su contenido en TAPE2. El Programa forma una matriz nueva de rigidez con las propiedades nuevas del suelo que fueron archivadas en TAPE1 durante la iteración previa. Un nuevo movimiento de control, en el mismo punto de control, pero quizás con una frecuencia nueva aislada, puede ser especificado. Cuando esto ocurre el programa recalcula el campo libre. También en este modo es posible cambiar las condiciones fijas de frontera.

La ventaja de utilizar la propiedades del suelo viejo es que éste hace posible la generación de varias soluciones, en una cinta diferente, correspondiente a las mismas propiedades de suelo pero con movimientos diferentes de control y/o condiciones fijas de frontera. Ésto es especialmente útil para modelos simétricos, en otros casos en que es deseable superponer dos soluciones para el mismo modelo este par de soluciones son correspondientes a movimientos verticales y horizontales de control, respectivamente.

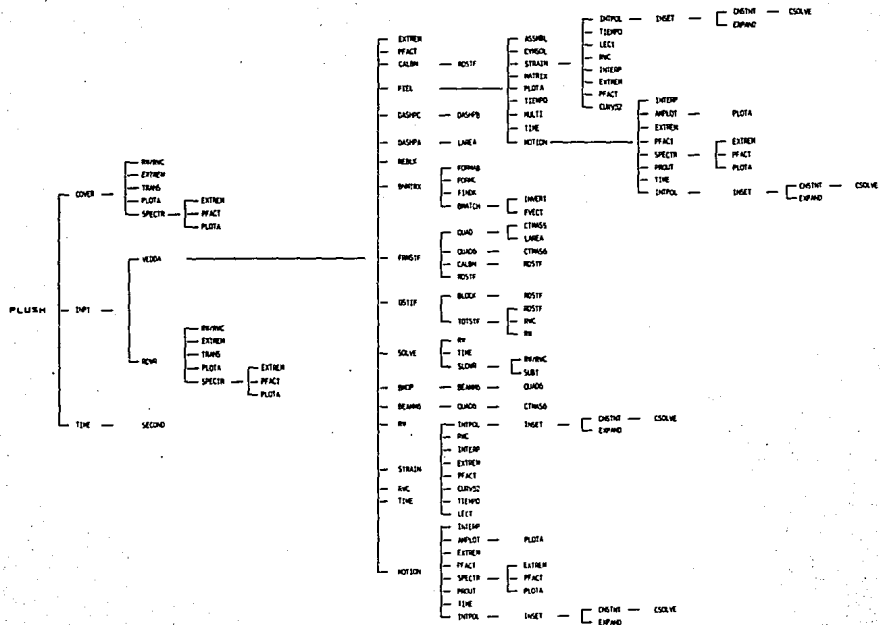


DIAGRAMA DE FLUJO
sin modificaciones

SUBPROGRAMAS

La versión CDC 7600 del PLUSH consiste de un programa principal, PLUSH, más 54 subrutinas. La secuencia de llamada es ilustrada por el diagrama de la Fig. 3.3. Los detalles son dados en la tabla 3.1 y son descritas brevemente abajo. El sistema de rutinas CDC se componen de tres subrutinas, LOCF, SETFLS y SECOND. Las cuales son llamadas por las subrutinas LOC, MCORE y TIME respectivamente. La conversión de otros sistemas requieren cambios en las subrutinas INPT, LOC, MCORE, RDWR, TIEMPO Y VEDDA.

- PLUSH** Éste es el programa principal. Consiste principalmente de tarjetas de comentarios que describen los datos de entrada, y una serie de aclaraciones que componen de un largo campo para el almacenaje dinámico, subrutina MCORE, y el bloque COMMON
- AMPLOT** Genera las funciones de traslado.
- ASSMBL** Formación de la matriz de rigidez de frecuencia dependiente [K] y el vector de carga
- BEAMM6** Cálculo de funciones de traslado para momentos y fuerzas axiales en elementos de viga.
- BLOCK** Instala en un bloque la matriz de rigidez y el perfil de la ecuación para la subrutina GSTIF
- BTMACH** Forma y escribe las matrices de límite [R], y [L], en TAPE23.
- BMOP** Calcula la curva de momentos en los elementos de la viga.
- BNMTRX** Subrutina controladora de transmisión de fronteras.
- CALBN** Reordena los elementos rígidos de la matriz de masas en TAPEU.
- COVER** Impresión de salida sobre la página.
- CTMASS** Formación de la matriz de consistencia masa para elementos sólidos.

-
- CTMASS6** Formación de matriz consistente de masa para elementos de viga.
- CURV52** Calcula la compatibilidad de esfuerzos para las propiedades del suelo con las curvas de materiales.
- CYMSOL** Parte de la solución de la ecuación simétrica, asociando las ecuaciones lineales con coeficientes complejos.
- DASHPA** Formación de la matriz diagonal [C] para fronteras viscosos
- DASHPB** Forma para cada frecuencia el vector de cargas de fronteras viscosas
- DASHPC** Controla la subrutina para DASHPB.
- EXTREM** Calcula la norma de desviación, la frecuencia característica y forma el factor para un dado espectro de poder.
- FIELD** Deconvoluciona el movimiento de campo libre.
- FINDK** Solución de la ecuación $([A]k^2 + i[B]k + [C]) \{V\} = \{0\}$ para el cálculo de las transmisión de fronteras.
- FORMAB** Formación de las matrices [A] y [B].
- FORMC** Formación de la matriz [C].
- FRMSTF** Formación de la matriz de rigidez modificada y vector de carga en la Eq. 3.10. La matriz es llevada en bloque a TAPE11.
- FVECT** Forma, el vector de carga ver Eq. 3.3, en la transmisión de fronteras.
- GSTIF** Ésta subrutina instala el perfil lineal de ecuaciones, determinando la posición de cada elemento en la matriz global de rigidez, y calcula la información de bloque.
- INPT** Lee datos de entrada de tarjetas (MODO1) o TAPE1 (MODO2 o MODO3) y copia TAPE1 dentro TAPE2 (MODO3) mantiene constante el almacenaje dinámico a lo largo del campo, e imprime los datos de entrada.
- INTERP** Interpola las amplitudes de la función amplificada.
- INVERT** Invierte la parte central de la matriz compleja.
-

LAREA	<i>Forma la matriz de masas para elementos sólidos.</i>
LOC	<i>Llamada del sistema CDC a la rutina LOCF. EL argumento XX(1) = Es la primer variable en blanco</i>
MATRIX	<i>Forma las matrices de rigidez y de masa para el cálculo del movimiento en el campo libre</i>
MCORE	<i>Llamada del sistema CDC 7600 a la rutina SETFLS para las series requeridas a lo largo de campo en etapas diferentes de ejecución.</i>
MOTION	<i>Controla el cálculo de cantidades de respuesta.</i>
MULTI	<i>Forma el vector de cargas para cálculo de movimientos de campo libre.</i>
PFAC	<i>Calcula el valor máximo de un espectro de poder y da los parámetros del espectro .</i>
PLOTA	<i>Imprime en papel el espectro de respuesta y las funciones de traslado. El control de conducción de ésta subrutina es un sistema dependiente. Por lo tanto, el formato de esta subrutina puede ser cambiado al utilizar una computadora diferente de una CDC.</i>
PROUT	<i>Imprime la tabla anterior mostrando la máxima aceleración de nodos seleccionados.</i>
QUAD	<i>Formación de la matriz de rigidez y de masas medias para elementos sólidos.</i>
QUAD6	<i>Formación de matriz de rigidez y de consistencia de masas para elementos de viga.</i>
RDSTF	<i>Controla la lectura y escritura en TAPE11 y TAPE12 que contiene a la matriz de rigidez.</i>
REBLCK	<i>Relaciona a la matriz diagonal [C] con las fronteras viscosas, Eq. 3.2.</i>
RDWR	
RW	<i>Controla el rebobinado y retroceso del espaciado de cintas.</i>
SECOND	<i>Subrutina del sistema CDC llamada por la subrutina TIEMPO, lee el Reloj</i>

del sistema (en segundos transcurrido desde el inicio de ejecución)

- SETFLS** Subrutina del sistema CDC para cambiar el requisito del núcleo durante la ejecución. Llamada por la subrutina MCORE. El argumento de la integral es un campo mas largo del requerido.
- SLOWR** Soluciona la ecuación para las ecuaciones simétricas lineales en variables complejas. Usa el método de activo de eliminación de columna de Gauss.
- SOLVE** Controla la solución de la ecuación SLOW.
- SPECTR** Calcula el espectro de respuesta y llama a PLOTA para imprimir.
- STRAIN** Cálculo de tensiones en el campo libre de los estratos del suelo, de los elementos sólidos y la determinación subsiguiente haciendo compatible las curvas de las propiedades de los materiales (por la subrutina CURV52)
- SUBT** Controla la formación y modifica la matriz de rigideces en la Eq. 3.11.
- TIEMPO** Controla el TIEMPO de ejecución, es llamado por el sistema CDS en la subrutina SECOND, que da el tiempo desde el inicio de ejecución (en segundos)
- TOTSTF** Forma la matriz de rigideces global.
- TRANS** Calcula la equivalencia del espectro de potencia con respecto al espectro de respuesta.
- VEDDA** Esta subrutina es importante, es el corazón del sistema PLUSH. Controla el análisis de elemento finito, lee y modifica el movimiento de control, controla el uso de cintas, la formación de condiciones de frontera, y la sucesión de las iteraciones en las propiedades del suelo. También controla el calculo del maximo espectro de respuesta a través de la subrutina MOTION

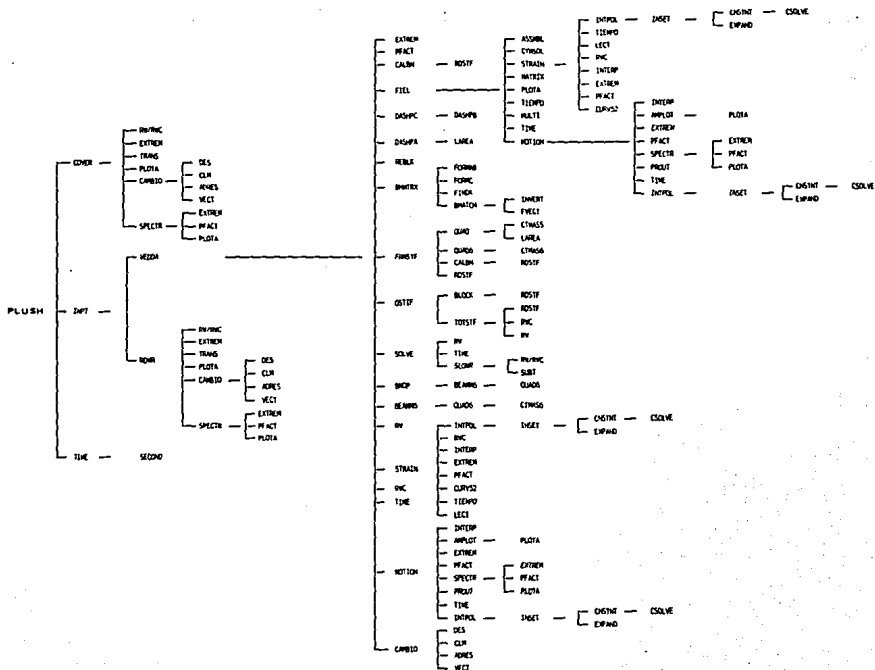


FIG. 3-7 DIAGRAMA DE FLUJO
con modificaciones

CINTAS

El programa usa un total de 27 cintas. Únicamente TAPE1 y TAPE2 son cintas física, las otras 25 cintas son simuladas en discos magnéticos o tambores.

Las operaciones en los MODE1 y MODE2 requieren de ser almacenadas en una cinta, TAPE1. Las dos Cintas, TAPE1 y TAPE2, tiene que ser montadas para MODE3. TAPE1 y TAPE2 son generadas para ser usadas en TAPE1 para la ejecución en MODE2 o MODE3.

La escritura y lectura de la serie para las cintas es dada en la Tabla 3.1 los números subrayados indicados en las cintas son usados directamente por la subrutina

Los números de Cinta no subrayados indican cintas usadas por subrutinas llamadas por alguna otra subrutina. Los contenidos de las cintas son los siguientes:

TAPE1	<i>Es la cinta de entrada principal para MODE2 o MODE3. Contiene los datos de todos los puntos de entrada propuestos por las propiedades de los materiales y para la siguiente iteración, las funciones finales de traslado, matrices viscosas y transmisión de fronteras, etc.</i>
TAPE2	<i>Copia el TAPE1 generado en las etapas iniciales de MODO3</i>
TAPE3	<i>Funciones de Traslado para la capacidad de movimientos de la matriz de fronteras viscosas y el vector de carga</i>
TAPE4	<i>Controla el movimiento en el dominio de frecuencia. Deformaciones de las funciones de traslado.</i>
TAPE5	<i>Matriz global de rigidez para cada bloque.</i>
TAPE6	<i>Matriz de rigidez y de masas de la capa.</i>
TAPE7	<i>Funciones de transferencia para movimientos de salida (interpolación de puntos no incluidos) Movimiento de la base rígida. Nuevas propiedades de los materiales para todas elementos. Bloque de matriz de rigidez e</i>

-
- información de dimensión para cada bloque.*
- TAPE8** *Información del cálculo de la frecuencia de respuesta.*
- TAPE9** *Funciones de traslado de para los movimientos de campo libre en puntos donde la capacidad es requerida. Bloque de la matriz de rigidez global.*
- TAPE10** *Almacena temporalmente la información de cada elemento. Traslado de funciones para calculos de esfuerzos en el campo libre.*
- TAPE11** *Elementos de masa y matrices de rigidez. Localizacion de elementos.*
- TAPE12** *Semejante a TAPE11.*
- TAPE13** *Información del tamaño de bloque*
- TAPE14** *Información del tamaño de bloque*
- TAPE15** *Entero o blanco.*
- TAPE16** *Información del tamaño de bloque*
- TAPE17** *Información del tamaño de bloque*
- TAPE18** *Información del tamaño del bloque de la matriz de rigidez*
- TAPE19** *Informacion del tamaño de bloque*
- TAPE20** *Bloque de la matriz de rigidez global.*
- TAPE21** *Bloque de la matriz de masas global.*
- TAPE22** *Igual a TAPE21*
- TAPE23** *Matriz de transmisión de fronteras.*
- TAPE24** *Solución del dominio de frecuencia en campo libre. Propiedades del suelo viejo en campo libre*
- TAPE 25** *Vector de carga para transmisión de fronteras.*
- TAPE26** *Vector de carga de frecuencias independientes ver Eq. 3.11.*
-

TAPE 27 *Matriz de rigidez [C] y vector de carga relativo a fronteras viscosas, ver Eq. 3.5.*

<i>Programa</i>	<i>Llamada</i>	<i>Llamadas por</i>	<i>Escritas en cintas</i>	<i>Lidas para cintas</i>
<i>PLUSH</i>	<i>COVER, INPUT, TIME</i>	<i>Nombre del programa</i>		
<i>AMPLOT</i>	<i>PLOTA</i>	<i>MOTION</i>		
<i>ASSMBL</i>		<i>FIELD</i>		<i>6</i>
<i>BEAMM6</i>	<i>QUAD6</i>	<i>VEDDA</i>		
<i>BLOCK</i>	<i>RDSTF</i>	<i>GSTIF</i>	<i>11, 13, 17</i>	<i>11</i>
<i>BMATCH</i>	<i>FVECT, INVERT</i>	<i>BNMTRX</i>	<i>23, 25</i>	<i>24</i>
<i>BMOP</i>	<i>BEAMM6</i>	<i>VEDDA</i>		
<i>BNMTRX</i>	<i>BTMACH, FINDK, FORMAB, FORMC</i>	<i>VEDDA</i>	<i>1, 23, 25</i>	<i>23, 24, 25</i>
<i>CALBN</i>	<i>RDSTF</i>	<i>VEDDA</i>	<i>11</i>	<i>11</i>
<i>COVER</i>		<i>PLUSH</i>		
<i>CTMASS</i>		<i>QUAD</i>		
<i>CTMAS6</i>		<i>QUAD6</i>		
<i>CURV52</i>		<i>FIELD, STRAIN</i>		
<i>CYMSOL</i>		<i>FIELD</i>		
<i>DASHPA</i>	<i>LAREA</i>	<i>VEDDA</i>		
<i>DASHPB</i>		<i>DASHPC</i>	<i>1, 3</i>	<i>24</i>
<i>DASHPC</i>	<i>DASHPB</i>	<i>VEDDA</i>	<i>1, 3</i>	<i>24</i>

Tabla II. LLAMADA DE SECUENCIAS DE SUBROUTINAS Y UNIDADES DE CINTA

<i>Programa</i>	<i>Llamada</i>	<i>Llamadas por</i>	<i>Escritas en Cintas</i>	<i>Lidas para cintas</i>
EXTREM				
FIELD	ASSMBL, CURV52, CYMSOL, LOC, MATRIX, MCORE, STRAIN, MULTI, PLOTA, MOTION, TIME	VEDDA	<u>1, 4, 6, 7, 9, 10, 24,</u> <u>26</u>	<u>4, 6, 7, 9, 10,</u> <u>24,26</u>
FINDK		BNMTRX		
FORMAB		BNMTRX		
FORMC		BNMTRX		
FRMSTF	CALBN, QUAD, QUAD6, RDSTF	VEDDA	11, 12	11, 12
FVECT		BMATCH	<u>25</u>	
GSTIF	BLOCK, TOTSTF	VEDDA	5, 11, 13, 14, 17	6, 11, 13, 17
INPT	MCORE, RDWR, VEDDA	PLUSH	1, 2, 3-27	<u>1, 3, 4-27</u>
INTERP		MOTION, STRAIN		
INVERT		BMATCH		
LAREA		DASHPA, QUAD		
LOC	Rutina del sistema LOCF	INPT, VEDDA		
LOCF		LOC		
MATRIX		FIELD	<u>6</u>	
MCORE	Rutina del sistema SETFLS	INPT, VEDDA		

Tabla II. LLAMADA DE SECUENCIAS DE SUBROUTINAS Y UNIDADES DE CINTA

<i>Programa</i>	<i>Llamada</i>	<i>Llamadas por</i>	<i>Escritas en cintas</i>	<i>Leídas para cintas</i>
MOTION	INTERP, AMPLOT, EXTREM, PFACT, SPECTR, PROUT, TIME	FIELD, VEDDA	<u>4</u>	<u>3, 7, 9</u>
MULTI		FIELD	<u>26</u>	
PFACT		MOTION, STRAIN, SPECTR, VEDDA, STRAIN		
PLOTA		AMPLOT, SPECTR		
PROUT		MOTION		
QUAD	CTMASS, LAREA	FRMSTF		
QUAD6	CTMAS6	BEAMM6		
RDSTF		BLOCK, CALBN, FRMSTF, TOTSTF	<u>11, 12</u>	<u>11, 12</u>
RDWR	RW, PLOTA, SPECTR, TRANS	INPT	<u>1, 2, 3, 15, 23, 24, 25, 26</u>	<u>1, 15</u>
REBLK		VEDDA	<u>27</u>	<u>3, 14</u>
RW		RDWR, SLOWR, STRAIN, TOTSTF	<u>4, 5, 8, 15, 20, 21, 22</u>	<u>4, 5, 8, 10, 15, 20, 21, 22</u>
SECOND		TIME		
SETFLS		MCORE		
SLOWR	RW, SUBT	SOLVE	<u>7, 8, 16, 18, 19, 20, 21, 22</u>	<u>4, 5, 8, 10, 15, 20, 21, 22</u>

Tabla II. LLAMADA DE SECUENCIAS DE SUBROUTINAS Y UNIDADES DE CINTA

<i>Programa</i>	<i>Llamadas</i>	<i>Llamadas por</i>	<i>Escritas en cintas</i>	<i>Leídas por cintas</i>
SOLVE	RW, SLOWR, TIME	VEDDA	<u>1, 7, 8, 16, 18, 19,</u> <u>20, 21, 22</u>	5, 14, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 25, 26, 27
SPECTR	EXTREM, PFACT, PLOTA	RDWR, MOTION		
STRAIN	CURVS2, INTERP, EXTREM, PFACT, RW	FIELD, VEDDA		4, 10
SUBT		SLOWR		<u>23, 25, 26, 27</u>
TIME	Rutina del sistema SECOND	FIELD, PLUSH, MOTION, SOLVE, STRAIN, VEDDA		
TOTSTF	RDSTF, RW	GSTIF	5, 11, <u>14</u>	<u>6, 11, 13, 17</u>
TRANS		RDWR		
VEDDA	EXTREM, PFACT, CALBN, FIELD, BNMTRX, DASHPA, DSHPC, REBLK, FRMSTF, GSTIF, SOLVE, BMOP, BEAMM6, STRAIN, MOTION, TIME, LOC, MCore, RW	INPT	<u>1, 3, 4, 5, 6, 7, 8,</u> <u>9, 10, 11, 12, 13,</u> <u>14, 15, 16, 17, 18,</u> <u>199, 20, 21, 22, 23,</u> <u>24, 25, 26, 27</u>	<u>1, 3, 4, 5, 6, 7, 8,</u> <u>9, 10, 11, 12, 13,</u> <u>14, 15, 16, 17, 18,</u> <u>199, 20, 21, 22, 23,</u> <u>24, 25, 26, 27</u>

Tabla II. LLAMADA DE SECUENCIAS DE SUBROUTINAS Y UNIDADES DE CINTA

El método usado en el PLUSH (análisis probabilista) para evaluar la interacción dinámica suelo-estructura es conceptualmente similar al propuesto por Seed & Idriss para análisis deterministas.

La metodología que sigue el programa es la siguiente:

1. Con el espectro de respuesta [Control Motión] (dato) se calcula el espectro de potencia [Input Power Spectrum] fig 3.1

En el programa Plush, la excitación se considera como un proceso aleatorio, así el proceso es completamente caracterizado por el espectro de potencia.

2. Se deconvoluciona el espectro de potencia [Input power spectrum] para obtener el espectro de potencia en la base rígida del campo libre [Rigid Base Power Spectrum].

3. Con el espectro de potencia en la base rígida se puede obtener la respuesta en cualquier punto del suelo [Response Power Espectro at point A], y con ello se puede obtener aceleración, esfuerzos, deformaciones, momentos, etc. en el campo libre.

La respuesta en el campo libre se debe exclusivamente al suelo sin considerar la estructura.

En estos primeros pasos, se calculan fuerzas debidas a los límites viscosos, límites laterales del campo libre, etc. Por lo que la ecuación general de movimiento del sistema suelo-estructura resulta ser la siguiente:

$$[M] \{\ddot{u}\} = [k] \{u\} - \{m\}y'' - \{V\} = \{F\} - \{T\} \quad (1)$$

Donde:

$[M]$ = matriz de masas

$[k]$ = matriz de rigideces

$\{u\}$ = desplazamientos relativos del punto nodal a la base rígida

$\{m\}$ = vector de masas función de $[M]$

$\{y''\}$ = aceleración en la base rígida

$\{V\}$ = vector de fuerzas debido a los límites viscosos

$\{F\}$ y $\{T\}$ = vector de fuerzas en un plano vertical del campo libre, que contempla o no la transmisión de energía en forma horizontal.

Usando el método de la respuesta compleja, en el que se trabaja en el dominio de la frecuencia, la ecuación anterior se puede escribir de la siguiente manera:

$$\{K\}, \{H(w)\} = \{P\}, \quad (\text{ecuación 3.13})$$

$$[K], = [K] + [R], + [L], + (iw, L)[C] - w,^2 [M] \quad (\text{ecuación 3.11})$$

$$\{P\}, = ([G] + [R], + [L], + ((iw, L)[C]) \{H\}, - \{m\} \quad (\text{ecuación 3.12})$$

$\{H(w)\}$ función de amplificación

Al obtener la solución (aplicando eliminación de Gauss) a está ecuación, se tiene resuelta la totalidad del problema, puesto que faltaría calcular los desplazamientos, los esfuerzos, las velocidades, etc.

CAMBIOS AL PROGRAMA

Los problemas para aplicar el programa a vibración de maquinaria son los siguientes:

1. La maquinaria al estar trabajando genera vibraciones con una frecuencia determinada, y el programa analiza cualquier problema en diferentes frecuencias.

2. La maquinaria al vibrar aplica una fuerza determinada solo en algunos puntos nodales en solo una frecuencia (solo en los puntos donde se apoya la máquina), y el programa no tiene esa opción de dar fuerzas específicas para una sola frecuencia. Esto es que si se le da una fuerza, esta será utilizada en todas las frecuencias.

Para considerar estas variantes debido a vibraciones de maquinaria, se realizaron al programa los siguientes cambios:

I. En la ecuación 3.11 se sumo algebraicamente el siguiente termino

$$- w_j^2 [M']$$

donde:

w_j = es la frecuencia de vibración de la máquina

$[M']$ = es la matriz diagonal que contiene la fuerza aplicada por la máquina (sólo en algunos puntos).

II. En la ecuación 3.12 se sumo algebraicamente el siguiente término:

$$-\{m'\}$$

que es el vector de fuerzas que contiene la masa aplicada en sólo algunos puntos

por ejemplo:

1						
M_1 2						
M_2 3						
M_3						
4						
						M_4
						n

Punto nodal	direc	1		2		3		4		5		6		7		n	
		x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y		
1	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.... 0
	y	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.... 0
2	x	0	0	m_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.... 0
	y	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.... 0
3	x	0	0	0	0	m_2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.... 0
	y	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.... 0
4	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.... 0
	y	0	0	0	0	0	0	0	m_3	0	0	0	0	0	0	0	.... 0
5	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.... 0
	y	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.... 0
n	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.... .
	y	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.... m_4

Las masas se encuentran aplicadas en:

m_1 el punto nodal 2 con dirección horizontal

m_2 el punto nodal 3 con dirección horizontal

m_3 el punto nodal 4 con dirección vertical

m_4 el punto nodal n con dirección vertical

En el vector $\{m'\}$ se observa que los valores de m se encuentran en solo algunos puntos

Punto nodal	direcc	
	x	y
1	x	0
	y	0
2	x	m'_1
	y	0
3	x	m'_2
	y	0
4	x	0
	y	m'_3
5	x	0
	y	0
n	x	0
	y	m'_4

CAPITULO 4
Ejemplo de aplicación

Al desarrollar esta tesis se consideró que había que justificar las modificaciones del programa, es decir requeríamos de un ejemplo ya resuelto que nos proporcionara la seguridad de que las soluciones obtenidas por el programa fueran las correctas o al menos se tuviera una aproximación aceptable.

Para lo cual se tomo como modelo un ejemplo realizado por el Dr. Ricardo Flores Berrones, el cual se desarrolla a continuación para ejemplificar.

EJEMPLO DE APLICACION

Se requiere determinar las dimensiones de la cimentación cuadrada de una máquina que pesa 2720 Kg, sujeta a una fuerza dinámica de 680 Kg, que opera con una frecuencia de 10 cps. Los requisitos que debe cumplir la cimentación son: 1) La máquina necesita quedar a 2 m sobre el nivel natural del terreno, y 2) La velocidad de las partículas debe ser menor de 0.075 cm/seg.

Datos:

Se trata de un suelo limoarcilloarenoso duro, con un peso volumetrico igual a 1.92 ton/m³.

$$\mu = 0.35$$

$$G = 1.13 * 10^3 \text{ Kg/cm}_2$$

Diseño. Conforme la tabla 4.I, el valor de k para cimentaciones cuadradas está dado por

$$k_v = \frac{G}{1-\mu} 2.16B$$

por lo que al sustituir los valores se obtiene

$$K, 3.75 * 10^7 \text{ B (B, en metros)}$$

4.1

Si se supone que la frecuencia de operación es relativamente pequeña con respecto a la de resonancia, se puede aplicar la simplificación:

$$V_{\max} = \Omega X_0 = \Omega \frac{P_0}{K} \left| \frac{1}{1 - (\Omega/\omega)^2} \right|$$

$$V_{\text{diseño}} = \Omega \frac{P_0}{K}$$

o sea que el valor requerido de k será

$$k = \frac{P^2 \Omega}{\text{velocidad de diseño} / \text{factor de seguridad}} \quad 4.2$$

$$k = \frac{680 * (2 \pi * 10)}{0.075/2} \text{ Kg/cm}$$

$$k = 1.14 * 10^6 * 100 \text{ Kg/m}$$

De las ecs 4.1 y 4.2 se obtiene que $B = 3 \text{ m}$; por lo tanto, la cimentación mostrada en al fig. 4.1 puede suponerse como diseño.

Revisión del diseño

Para un análisis más detallado, se calculará la masa total del sistema

a) Masa de la máquina (M_m)

$$M_m = \frac{2720}{9.8} = 278 \frac{\text{Kg}}{\text{m/seg}^2}$$

b) Masa de suelo (M_s)

$$M_s = \frac{\text{vol} \cdot \gamma_{\text{concreto}}}{9.8} = \frac{3 \cdot 3 \cdot 2.6 \cdot 2400}{9.8} = \frac{56\ 160}{9.8}$$

$$M_s = 5\ 730 \text{ Kg/m/seg}^2$$

c) Masa efectiva del suelo (M_e)

$$\text{Radio equivalente} = \sqrt{(BL)/\pi} = 1.69 \text{ m}$$

$$R^3 = 4.85 \text{ m}^3$$

$$b = \frac{M}{pR^3} = \frac{5\ 730 + 278}{\frac{1920 \cdot 4.85}{9.8}}$$

$$B_e = \frac{1 - \mu}{4} b = \frac{0.65 \cdot 6}{4} = 0.975$$

De la tabla 4.1

$$M_d = 0.27 \frac{M}{B} = \frac{0.27(6008)}{0.975} = 1663 \frac{\text{Kg}}{\text{m/seg}^2}$$

d) Masa total

Esta masa está dada por:

$$\begin{aligned} M_m + M_c + M_d &= 278 + 5730 + 1663 \\ &= 7671 \text{ Kg/m/seg}^2 \end{aligned}$$

Profundidad equivalente

Se estima ahora el punto medio del bulbo de presiones para ello primero se calcularán los esfuerzos por peso al nivel de desplante.

$$\Gamma, (@3/4 D) = 0.42 * 6.54 + 3/4 * 3.38 * 1.92 = 7.6$$

$$\text{Profundidad equivalente} = \frac{7.6}{1.92} = 4 \text{ m}$$

De la fig. 4.2 se deduce un valor $C_s = 230 \text{ m/seg}$. Calculando el valor de G se tiene

$$G = 230 * \frac{1920}{1} = 1.03 * 10^7 \text{ Kg/m} = 1.03 * 10^3 \text{ Kg/cm}$$

y

$$G = 1.03 * 10^7 * 2.16 * 3 = 1.03 * 10^{10} \text{ Kg/m}$$

Nota: En el calculo de k se ha estado despreciando la profundidad de encajonamiento de 0.6 m; ello se debe a que dicha profundidad es relativamente pequeña y que al despreciarla se está dentro del lado de la seguridad.

Por tanto, la frecuencia natural del sistema es

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}}$$

sustituyendo valores

$$f_n = 18.4 \text{ cps}$$

$$V_{mx} = \Omega \frac{P_0}{k} \frac{1}{1 - (\Omega/\omega)^2}$$

sustituyendo valores

$$V_{mx} = 2 * \pi * \frac{680}{1.03 * 10^6} \frac{1}{1 - (\frac{10}{18.4})^2}$$

$$V_{mx} = 5.8 * 10^{-4} \text{ m/seg} = 0.058 \text{ cm/seg} < 0.075 \text{ cm/seg}$$

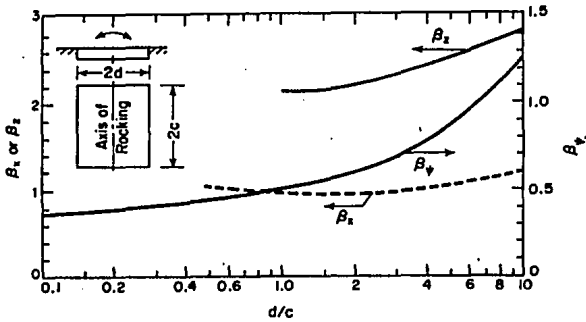
Si se quiere tener un factor de seguridad mayor de $0.075/0.058 = 1.29$, deberá procurarse aumentar k sin que M aumente, lo que se consigue, por ejemplo, al ampliar la base de la cimentación, pero reduciendo las dimensiones superiores.

MOVIMIENTO	CONSTANTE DE RESORTE
<i>Vertical</i>	$k_v = (G/(1-\nu)) * \beta_v \sqrt{BL}^{**}$
<i>Horizontal</i>	$k_h = 2(1-\nu) G\beta_h \sqrt{BL}$
<i>Cabeceo</i>	$k_r = (G/(1-\nu)) * \beta_r BL^2$

TABLA 4.1

Nota: Los valores de β_v , β_h , β_r , están dados por la gráfica. 4.1

*** B = ancho de la cimentación, L = Longitud de la cimentación (en el plano de rotación en caso de cabeceo)*



Grafica 4.1 Coeficientes B_x , B_y y B_z para zapatas rectangulares

Nota: $B_x = B_y$, $B_z = B_x$ y $B_y = B_z$, $L/B = d/c$

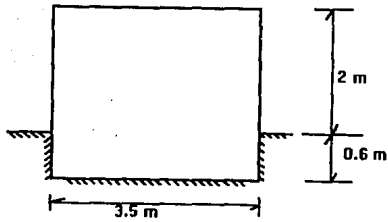


Fig. 4.1 Dimensiones preliminares del diseño de cimentación

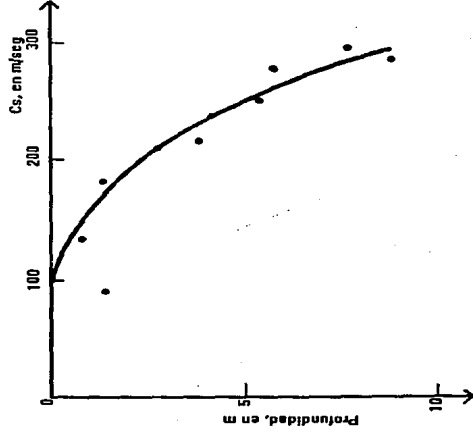


Fig. 4.2 Valores in situ de Cs -vs- profundidad

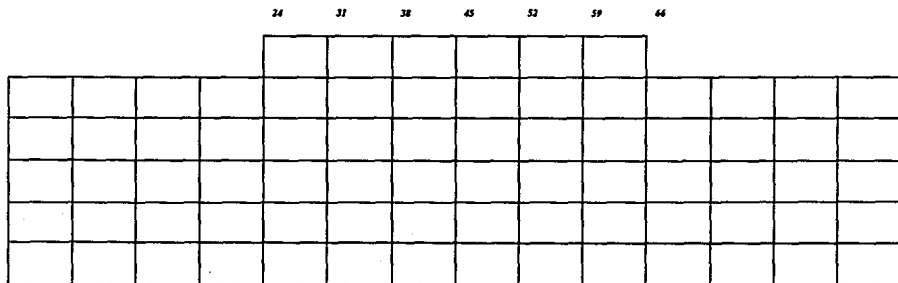


Fig. 4.3 Formación de la malla

En la figura 4.3 se muestra la forma en que se genera la malla indicando los puntos en donde se hace el análisis. A continuación se ofrecen los resultados obtenidos por el Plush, tomando en cuenta los datos de diseño del ejemplo del Dr. Flores Berrones. Se analiza con una frecuencia de 10 cps.

Se observa que los puntos opuestos son simétricos, con lo que se cumple una de las condiciones de equilibrio. El punto 45 se encuentra en el centro de la zona de análisis.

Aparecen 2 valores ya que se trabaja con números complejos.

**1 FLORES BERRONES CIMENTACION CON MAQUINA CARGA EN LB VERTICAL
MOTION AT NODAL POINT 24
MAXIMUM ACCELERATION = 0.0000
POWER SPECTRUM**

0.1,	1.66427343052E-21,	0
1.0,	2.64066643273E-19,	0
2.5,	7.9431422917E-21,	0
5.0,	8.7115995244E-19,	0
7.5,	5.8172952695E-18,	0
10.0,	3.33920184765E-18,	0
15.0,	6.4833416692E-18,	0
20.0,	8.6511913525E-18,	0

**1 FLORES BERRONES CIMENTACION CON MAQUINA CARGA EN LB VERTICAL
MOTION AT NODAL POINT 24
MAXIMUM VELOCITY = 0.0000**

.1000E+00,.1847E-09,.1477E-09,.2470E-09,.3604E-11,.2882E-11,.4820E-11,0
.1000E+01,.1074E-08,.8592E-09,.1437E-08,.2096E-09,.1676E-09,.2804E-09,0
.2500E+01,.1669E-09,.1335E-09,.2232E-09,.8141E-10,.6510E-10,.1089E-09,0
.5000E+01,.8701E-09,.6958E-09,.1164E-08,.8461E-09,.6750E-09,.1134E-08,0
.7500E+01,.1830E-08,.1463E-08,.2447E-08,.2597E-08,.2027E-08,.3530E-08,0
.1000E+02,.1216E-08,.9727E-09,.1627E-08,.2343E-08,.1849E-08,.3161E-08,0
.1500E+02,.1377E-08,.1101E-08,.1841E-08,.4037E-08,.3211E-08,.5415E-08,0
.2000E+02,.1378E-08,.1102E-08,.1843E-08,.5444E-08,.4358E-08,.7267E-08,0

**I FLORES BERRONES CIMENTACION CON MAQUINA CARGA EN LB VERTICAL
MOTION AT NODAL POINT 31
MAXIMUM ACCELERATION = 0.0000
POWER SPECTRUM**

0.1,	7.5714386324E-22,	0
1.0,	1.20121027879E-19,	0
2.5,	3.6138290303E-21,	0
5.0,	3.95752587535E-19,	0
7.5,	2.63981809347E-18,	0
10.0,	1.5173449995E-18,	0
15.0,	2.96658051463E-18,	0
20.0,	3.99917117527E-18,	0

**I FLORES BERRONES CIMENTACION CON MAQUINA CARGA EN LB VERTICAL
MOTION AT NODAL POINT 31
MAXIMUM VELOCITY = 0.0000**

.1000E+00,.1246E-09,.9961E-10,.1666E-09,.2431E-11,.1944E-11,.3251E-11,0
.1000E+01,.7247E-09,.5795E-09,.9692E-09,.1414E-09,.1131E-09,.1891E-09,0
.2500E+01,.1126E-09,.9001E-10,.1506E-09,.5491E-10,.4391E-10,.7344E-10,0
.5000E+01,.5864E-09,.4689E-09,.7843E-09,.5719E-09,.4570E-09,.7652E-09,0
.7500E+01,.1233E-08,.9857E-09,.1649E-08,.1775E-08,.1402E-08,.2394E-08,0
.1000E+02,.8199E-09,.6556E-09,.1097E-08,.1597E-08,.1272E-08,.2140E-08,0
.1500E+02,.9312E-09,.7446E-09,.1245E-08,.2758E-08,.2212E-08,.3678E-08,0
.2000E+02,.9366E-09,.7490E-09,.1253E-08,.3739E-08,.3019E-08,.4961E-08,0

**I FLORES BERRONES CIMENTACION CON MAQUINA CARGA EN LB VERTICAL
MOTION AT NODAL POINT 38
MAXIMUM ACCELERATION = 0.0000
POWER SPECTRUM**

0.1,	1.89556394664E-22,	0
1.0,	3.00726334652E-20,	0
2.5,	9.0476537816E-22,	0
5.0,	9.9079011948E-20,	0
7.5,	6.6103777811E-19,	0

10.0,	3.80210867103E-19,	0
15.0,	7.4503682916E-19,	0
20.0,	1.00761149735E-18,	0

**1 FLORES BERRONES CIMENTACION CON MAQUINA CARGA EN LB VERTICAL
MOTION AT NODAL POINT 38
MAXIMUM VELOCITY = 0.0000**

.1000E+00,.6233E-10,.4984E-10,.8336E-10,.1216E-11,.9725E-12,.1627E-11,0
.1000E+01,.3626E-09,.2899E-09,.4849E-09,.7075E-10,.5657E-10,.9463E-10,0
.2500E+01,.5632E-10,.4504E-10,.7533E-10,.2748E-10,.2197E-10,.3675E-10,0
.5000E+01,.2934E-09,.2346E-09,.3924E-09,.2862E-09,.2289E-09,.3829E-09,0
.7500E+01,.6168E-09,.4932E-09,.8250E-09,.9028E-09,.7217E-09,.1208E-08,0
.1000E+02,.4104E-09,.3282E-09,.5489E-09,.8030E-09,.6430E-09,.1073E-08,0
.1500E+02,.4666E-09,.3732E-09,.6241E-09,.1384E-08,.1115E-08,.1840E-08,0
.2000E+02,.4701E-09,.3759E-09,.6287E-09,.1864E-08,.1504E-08,.2475E-08,0

**1 FLORES BERRONES CIMENTACION CON MAQUINA CARGA EN LB VERTICAL
MOTION AT NODAL POINT 45
MAXIMUM ACCELERATIONS = 0.0000
POWER SPECTRUM**

0.1,	2.62046051008E-37,	0
1.0,	6.6754793992E-36,	0
2.5,	7.5379083965E-38,	0
5.0,	5.9858192817E-34,	0
7.5,	6.1535904523E-34,	0
10.0,	1.85833639205E-34,	0
15.0,	5.29637419745E-36,	0
20.0,	1.0839842747E-35,	0

**1 FLORES BERRONES CIMENTACION CON MAQUINA CARGA EN LB VERTICAL
MOTION AT NODAL POINT 45
MAXIMUM VELOCITY = 0.0000**

.1000E+00,.2317E-17,.1853E-17,.3099E-17,.4522E-19,.3616E-19,.6048E-19,0

.1000E+01,.5405E-17,.4322E-17,.7229E-17,.1055E-17,.8433E-18,.1411E-17,0
 .2500E+01,.7007E-18,.5603E-18,.9371E-18,.3418E-18,.2733E-18,.4571E-18,0
 .5000E+01,.2275E-16,.1819E-16,.3043E-16,.2220E-16,.1775E-16,.2969E-16,0
 .7500E+01,.1898E-16,.1518E-16,.2539E-16,.2778E-16,.2221E-16,.3715E-16,0
 .1000E+02,.9388E-17,.7507E-17,.1256E-16,.1832E-16,.1465E-16,.2450E-16,0
 .1500E+02,.2474E-17,.1978E-17,.3309E-17,.7242E-17,.5791E-17,.9685E-17,0
 .2000E+02,.2221E-17,.1776E-17,.2970E-17,.8667E-17,.6931E-17,.1159E-16,0

**I FLORES BERRONES CIMENTACION CON MAQUINA CARGA EN LB VERTICAL
 MOTION AT NODAL POINT 52
 MAXIMUM ACCELERATION = 0.0000
 POWER SPECTRUM**

0.1,	1.89556422767E-22,	0
1.0,	3.00726352322E-20,	0
2.5,	9.0476534565E-22,	0
5.0,	9.9079040925E-20,	0
7.5,	6.6103785375E-19,	0
10.0,	3.8021089867E-19,	0
15.0,	7.450368352E-19,	0
20.0,	1.0076115012E-18,	0

**I FLORES BERRONES CIMENTACION CON MAQUINA CARGA EN LB VERTICAL
 MOTION AT NODAL POINT 52
 MAXIMUM VELOCITY = 0.0000**

.1000E+00,.6233E-10,.4984E-10,.8336E-10,.1216E-11,.9725E-12,.1627E-11,0
 .1000E+01,.3626E-09,.2899E-09,.4849E-09,.7075E-10,.5657E-10,.9463E-10,0
 .2500E+01,.5632E-10,.4504E-10,.7533E-10,.2748E-10,.2197E-10,.3675E-10,0
 .5000E+01,.2934E-09,.2346E-09,.3924E-09,.2862E-09,.2289E-09,.3829E-09,0
 .7500E+01,.6168E-09,.4932E-09,.8250E-09,.9028E-09,.7217E-09,.1208E-08,0
 .1000E+02,.4104E-09,.3282E-09,.5489E-09,.8030E-09,.6430E-09,.1073E-08,0
 .1500E+02,.4666E-09,.3732E-09,.6241E-09,.1384E-08,.1115E-08,.1840E-08,0
 .2000E+02,.4701E-09,.3759E-09,.6287E-09,.1864E-08,.1504E-08,.2475E-08,0

**I FLORES BERRONES CIMENTACION CON MAQUINA CARGA EN LB VERTICAL
 MOTION AT NODAL POINT 59**

MAXIMUM ACCELERATION = 0.0000

POWER SPECTRUM

0.1,	7.5714391845E-22,	0
1.0,	1.20121031579E-19,	0
2.5,	3.61382896768E-21,	0
5.0,	3.95752644394E-19,	0
7.5,	2.63981824299E-18,	0
10.0,	1.51734506171E-18,	0
15.0,	2.96658052677E-18,	0
20.0,	3.99917118285E-18,	0

**I FLORES BERRONES CIMENTACION CON MAQUINA CARGA EN LB VERTICAL
MOTION AT NODAL POINT 59**

MAXIMUM VELOCITY = 0.0000

.1000E+00,.1246E-09,.9961E-10,.1666E-09,.2431E-11,.1944E-11,.3251E-11,0
 .1000E+01,.7247E-09,.5795E-09,.9692E-09,.1414E-09,.1131E-09,.1891E-09,0
 .2500E+01,.1126E-09,.9001E-10,.1506E-09,.5491E-10,.4391E-10,.7344E-10,0
 .5000E+01,.5864E-09,.4689E-09,.7843E-09,.5719E-09,.4570E-09,.7652E-09,0
 .7500E+01,.1233E-08,.9857E-09,.1649E-08,.1775E-08,.1402E-08,.2394E-08,0
 .1000E+02,.8199E-09,.6556E-09,.1097E-08,.1597E-08,.1272E-08,.2140E-08,0
 .1500E+02,.9312E-09,.7446E-09,.1245E-08,.2758E-08,.2212E-08,.3678E-08,0
 .2000E+02,.9366E-09,.7490E-09,.1253E-08,.3739E-08,.3019E-08,.4961E-08,0

**I FLORES BERRONES CIMENTACION CON MAQUINA CARGA EN LB VERTICAL
MOTION AT NODAL POINT 66**

MAXIMUM ACCELERATION = 0.0000

POWER SPECTRUM

0.1,	1.66427350962E-21,	0
1.0,	2.64066648693E-19,	0
2.5,	7.9431422035E-21,	0
5.0,	8.7116003479E-19,	0
7.5,	5.8172954841E-18,	0
10.0,	3.33920193629E-18,	0
15.0,	6.4833416872E-18,	0
20.0,	8.6511913633E-18,	0

**I FLORES BERRONES CIMENTACION CON MAQUINA CARGA EN LB VERTICAL
MOTION AT NODAL POINT 66
MAXIMUM VELOCITY = 0.0000**

.1000E+00,.1847E-09,.1477E-09,.2470E-09,.3604E-11,.2882E-11,.4820E-11,0
.1000E+01,.1074E-08,.8592E-09,.1437E-08,.2096E-09,.1676E-09,.2804E-09,0
.2500E+01,.1669E-09,.1335E-09,.2232E-09,.8141E-10,.6510E-10,.1089E-09,0
.5000E+01,.8701E-09,.6958E-09,.1164E-08,.8461E-09,.6750E-09,.1134E-08,0
.7500E+01,.1830E-08,.1463E-08,.2447E-08,.2597E-08,.2027E-08,.3530E-08,0
.1000E+02,.1216E-08,.9727E-09,.1627E-08,.2343E-08,.1849E-08,.3161E-08,0
.1500E+02,.1377E-08,.1101E-08,.1841E-08,.4037E-08,.3211E-08,.5415E-08,0
.2000E+02,.1378E-08,.1102E-08,.1843E-08,.5444E-08,.4358E-08,.7267E-08,0

CAPITULO 5
Conclusiones

Para la validación de las modificaciones del Plush, se ha tomado el ejemplo del Dr. Raul Flores Berrones, aunque entre los dos métodos no hay punto de comparación ya que ambos consideran datos diferentes.

El Dr. Flores Berrones se basa en un método semiempírico, en el que se idealiza al suelo como un medio semiinfinito, homogéneo, elástico e isótropo y en la obtención de los parámetros es por medio de gráficas.

En tanto el Plush, hace uso de una discretización por medio del elemento finito, haciendo tantas iteraciones como se requieran con la finalidad de obtener una solución óptima. Se basa en métodos probabilísticos y no en gráficas.

El Dr. Flores considera la carga en un punto, en tanto el Plush, se considera repartida en la corona de la estructura.

La comparación es con la finalidad de obtener una aceleración de valor aproximado al ofrecido por el Dr. Flores Berrones, para lo cual se han tomado los valores del mismo ejemplo.

No se puede considerar que el Programa arroja resultados netamente confiables, ya que aún existen errores, pero para los fines de esta tesis no se han considerado, ya que se encuentran fuera de los objetivos propuestos. Pero nos ha permitido un avance importante, por lo cual se debe considerar que existe todavía mucho trabajo de investigación.

Muchos autores se han enfocado a este análisis pero para estructuras masivas, el programa se enfoca no solo a estas sino ha obras de menor magnitud, para las cuales aun no todo esta dicho.

El problema mayor del Plush para el análisis de un sistema de vibración de maquinaria se encuentra en la entrada de campo libre, ya que aún no logramos desligar completamente los datos del sismo del mismo programa. Ya que este tiene una gran influencia en los resultados del programa.

Se tiene problema en la interpretación del programa a la hora de leer el espectro de respuesta de la máquina y transformarlo a lo que sería el espectro

de respuesta del sismo.

La realización de esta tesis nos ha permitido adentrarnos a un tema sumamente difícil ya que ha sido trabajado por muy pocos investigadores debido a que se debe suponer un modelo de idealización que tiene muchas delimitaciones. Lo que ha provocado el poco avance en cuanto a información.

Los problemas a los que se enfrenta el Ingeniero de cimentaciones es a las propiedades físicas del suelo, la geometría del sistema y la naturaleza de la excitación sísmica, por lo cual se requiere de una simplificación del sistema, el método más simple que se encontró fue el del elemento finito, que debido a la discretización que realiza de la región en estudio, su solución ofrece deformaciones, aceleraciones y desplazamientos de la estructura con respecto de la región.

Uno de los objetivos de esta investigación fue la aplicación del análisis dinámico suelo-estructura para la cimentación de maquinaria con la finalidad que en el diseño de este tipo de cimentación no se excedan los límites permisibles del material que constituye la cimentación debido a los esfuerzos provocados en la cimentación por la máquina.

El suelo debe soportar las cargas y fuerzas sísmicas sin que se produzcan asentamientos considerables, ni para la estructura de diseño como para las estructuras vecinas.

El Instituto de Ingeniería ha puesto gran énfasis en aportar nuevas investigaciones que conlleven a un mejor diseño evitando con ello los grandes problemas estructurales a los que suele enfrentarse el Ingeniero Civil.

En el análisis dinámico de estructuras desplantadas en materiales flexibles se debe de tomar en cuenta, la relación existente entre las características de la excitación sísmica del suelo de cimentación y de las estructuras, las condiciones geológicas y locales del depósito de suelo.

La evaluación de los efectos de la interacción dinámica del suelo sobre la respuesta dinámica de las estructuras.

REFERENCIAS

Dinámica de suelos y estructuras aplicadas a la ingeniería sísmica

***Rafael Colindres Selva
Editorial Limusa***

Introducción a la Dinámica de Suelos

Tesis de Licenciatura de Ing. Pilar Colina B.

Manual del programa Plush

***Miguel Romo-Organista, Jen-Hwa Chen, John Lysmer, H. Bolton Seed
College of Engineering
University of California
Berkeley, California***

Análisis dinámico de sistemas suelo-estructura y presas de tierra

***Artículo de Dr. Miguel P. Romo
Instituto de Ingeniería, UNAM***

Parámetros de diseño en cimentación de maquinaria

***Dr. R. Flores Berrones
Instituto de Ingeniería, UNAM***

Interacción dinámica entre estructuras masivas y subsuelo

Jacobo Bielak

Elaborado para Instituto de investigaciones de la industria eléctrica Comisión Federal de Electricidad

UNAM

Método del elemento finito

M.I. Roberto Magaña del Toro

Instituto de Ingeniería, UNAM.

Interacción suelo-estructura y Diseño estructural de cimentaciones

Memorias del Simposio realizado en septiembre de 1991

Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos

Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica

Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural

Apuntes del curso de Dinámica de suelos de los Ing. Agustín Deneneghi C. y Héctor Sanginés G.