

15120



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

SISTEMA DE MICROCOMPUTADORA PARA EL
ANALISIS DE LA RESPUESTA DINAMICA
DE CIMENTACIONES

FALLA DE ORIGEN



T E S I S

Que para obtener el Título de
INGENIERO CIVIL

present a:

DAVID YAÑEZ SANTILLAN

Director de Tesis: M. en C. Francisco Garcia Ranz

México, D. F.

1990



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.

INDICE

TEMA	PAGINA
I INTRODUCCION	1
II RESPUESTA DINAMICA DE SISTEMAS SIMPLES	3
III RESPUESTA DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES PARA MAQUINARIA VIBRATORIA	21
IV RESPUESTA SISMICA DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES	31
V ESTRUCTURA DEL PROGRAMA DE MICROCOMPUTADORA	37
VI MANUAL DEL USUARIO	41
VII CONCLUSIONES	54
REFERENCIAS	56
BIBLIOGRAFIA	57

CAPITULO I

INTRODUCCION

En este trabajo se presenta el sistema de microcomputadora DYS para el análisis de la respuesta de sistemas dinámicos simples de 1 y 2 grados de libertad, así como para el análisis de cimentaciones superficiales sujetas a vibraciones armónicas o arbitrarias (sismos).

En el Capítulo 2 se desarrolla el marco teórico de la respuesta de sistemas simples, tanto para un grado de libertad (1-GDL) como para 2-GDL y donde se discuten los casos de vibración libre y forzada.

En el Capítulo 3 se presentan los fundamentos teóricos de la respuesta de cimentaciones superficiales para maquinaria vibratoria, partiendo de las funciones de impedancia que permiten obtener valores de rigideces y amortiguadores a partir de las características del sistema suelo-cimentación y con éstos poder llevar a cabo el análisis siguiendo los procedimientos presentados en el Capítulo 2.

El Capítulo 4 comprende la respuesta sísmica de cimentaciones superficiales, se presenta una descripción breve de las características de un modelo propuesto para estudiar la interacción suelo-estructura para excitaciones horizontales del terreno de cimentación.

En el Capítulo 5 se muestra en forma general la estructura del sistema interactivo DYS, (programado en el lenguaje QuickBASIC; ref. 1) basado en la teoría expuesta en los Capítulos 2, 3 y 4.

CAPITULO I

El manual de usuario del sistema DYS está contenido en el Capítulo 6, en donde se incluyen ejemplos que ilustran el uso del sistema.

Finalmente, en el Capítulo 7, se consignan las conclusiones de este trabajo

Con el desarrollo de este escrito y del sistema DYS, se cumple con el objetivo fijado cuando se decidió llevar a cabo esta tesis: proporcionar una herramienta docente para la clase de Dinámica de Suelos, de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Con lo cual se puede agilizar el proceso enseñanza-aprendizaje en una forma considerable dado que los fenómenos dinámicos se comprenden mejor cuando se estudian diferentes alternativas. Este es un punto fundamental en el programa de microcomputadora ya que presenta resultados tanto numéricos como gráficos y con lo cual el alumno podrá comparar sus resultados con los del programa o bien llevar a cabo diversos análisis para visualizar las variaciones que sufre la respuesta de un sistema o cimentación ante diversas condiciones.

DYS es útil para estudiantes de licenciatura (Ing. Civil o Ing. Mecánica inclusive), tanto en cursos básicos como en materias optativas, además en los primeros cursos de dinámica de estudiantes de Maestría y en el auxilio de profesionales para analizar rápidamente diferentes alternativas de cimentación y sistemas dinámicos en las etapas de diseño preliminar.

CAPITULO II

RESPUESTA DINAMICA DE SISTEMAS SIMPLES

INTRODUCCION

Para analizar la respuesta de un sistema sometido a vibraciones, en muchos casos y en forma muy satisfactoria se puede idealizar como un sistema lineal de un grado de libertad, compuesto por una masa, un amortiguador viscoso lineal y un resorte elástico lineal.

De esta manera se pueden aplicar las soluciones de modelos matemáticos tradicionales para lograr una aproximación de la respuesta.

Conviene mencionar que en algunos casos no es válido el uso de modelos de un grado de libertad y es necesario emplear modelos con dos grados. En este mismo capítulo se tratan ambos casos. Una vez que se ha representado el problema físico mediante un modelo, se procederá a llevar a cabo el análisis. A continuación se discuten los casos más comunes de movimiento.

MOVIMIENTO VIBRATORIO

El movimiento armónico es el más simple dentro del movimiento vibratorio y se describe matemáticamente como

$$u = C \sin(\omega t - \phi) \quad 2.1$$

y en función del tiempo se ha representado en la figura 2.1.

En donde la constante C representa el desplazamiento máximo desde la posición de equilibrio. La frecuencia circular ω define la relación de oscilaciones en términos de radianes por unidad de tiempo y la frecuencia de la oscilación en términos de ciclos por unidad de tiempo se obtiene como:

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

2.2

El tiempo requerido para que se lleve a cabo un ciclo completo se llama **período**, igual a la razón inversa de la frecuencia

$$T = 1/f$$

2.3

Resta mencionar al **ángulo de fase ϕ** , el cual sirve para definir el tiempo de desfase entre dos movimientos con la misma frecuencia pero los tiempos en los que ocurren sus respectivas amplitudes máximas difieren el uno con respecto al otro. En la figura, ϕ indica el tiempo de referencia con respecto al origen ($t=0$).

Hasta el momento sólo se ha hablado del desplazamiento pero en diversos problemas pueden ser de interés tanto la velocidad como la aceleración, las que se obtienen a partir del primero, derivando respecto al tiempo

$$\text{Desplazamiento} \quad u = C \sin(\omega t - \phi) \quad 2.4$$

$$\text{Velocidad} \quad v = \dot{u} = \omega C \cos(\omega t - \phi) \quad 2.5$$

$$\text{Aceleración} \quad a = \ddot{u} = -\omega^2 C \sin(\omega t - \phi) \quad 2.6$$

Otros tipos de movimientos que se presentan en sistemas físicos se muestran en la figura 2.2, siendo el primer tipo periódico, el segundo arbitrario y el tercero transitorio.

SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD

En sistemas de un grado de libertad para este tipo de análisis, la posición de todas las partículas del sistema pueden ser definidas por una sola variable para cualquier instante de tiempo.

El número de grados de libertad de un sistema es igual al número de variables independientes requeridas para definir la posición de todas las partes del sistema en cualquier instante de tiempo.

VIBRACIONES LIBRES SIN AMORTIGUAMIENTO.

El sistema mostrado en la figura 2.3 consiste en un resorte lineal cuya constante es k , un cuerpo de masa m , o bien peso W en donde $m = W/g$, siendo g la constante de la gravedad y la constante k se puede obtener como la fuerza en el resorte entre la longitud experimentada por el mismo para dicha excitación.

Para este caso el grado de libertad se refiere a que sólo en el sentido vertical puede haber desplazamientos y que no se presentan giros.

La solución del problema se tendrá a partir de un punto de referencia para el cual la fuerza en el resorte es igual al peso del cuerpo y se conoce a esta posición de equilibrio, como el desplazamiento estático mismo que se define como

$$u_s = W/k \quad 2.7$$

Para obtener la ecuación diferencial que rige el movimiento del cuerpo, se parte de la segunda Ley de Newton, en la cual se establece que la suma de fuerzas que actúan sobre la masa es igual a la masa multiplicada por su aceleración. Entonces si se desplaza la masa una cierta distancia u medida desde la posición de equilibrio, el equilibrio de fuerzas se puede expresar como

$$W - (W+ku) = ma \quad 2.8a$$

el cual se puede simplificar a

$$ma + ku = 0 \quad 2.8b$$

De acuerdo con los textos de Ecuaciones Diferenciales, la solución de este tipo de ecuaciones es del tipo

$$u = A \sin \omega t + B \cos \omega t \quad 2.9$$

en donde las constantes A y B se determinan en función de las condiciones iniciales del sistema y ω corresponde a la frecuencia circular natural del sistema valuada como sigue:

$$\omega = \sqrt{k/m}$$

2.10

La frecuencia natural y el periodo del sistema se pueden obtener sustituyendo 2.10 en 2.2 y 2.3 respectivamente.

Si se conocen la posición inicial $u(t=0)=u_0$ y la velocidad inicial $v(t=0)=v_0$ entonces las constantes A y B se pueden valorar como:

$$A = u_0/\omega \quad 2.11a$$

$$B = v_0 \quad 2.11b$$

Para cuando se presentan sistemas con más de un resorte se puede obtener una constante equivalente de modo que si los n resortes están en serie, se obtiene a partir de la sumatoria 2.12a y de estar en paralelo será con 2.12b.

$$k_e = \frac{1}{\sum_1^n 1/k_i} \quad 2.12a$$

$$k_e = \sum_1^n k_i \quad 2.12b$$

VIBRACIONES LIBRES CON AMORTIGUAMIENTO.

Si el sistema es capaz de disipar energía, se tendrá un sistema no conservativo, y se podrá modelar añadiendo al de 1-GDL un amortiguador. Para efectos de introducirlo en un modelo matemático, se considera un amortiguamiento de tipo viscoso, el cual produce una fuerza proporcional a la velocidad de la masa. Dicha proporcionalidad queda definida por la constante c cuyas unidades son FL^{-1} . El sistema considerado se muestra en la figura 2.4.

Partiendo nuevamente de la segunda Ley de Newton, se obtiene la siguiente ecuación de equilibrio

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0 \quad 2.13$$

La solución que satisface esta ecuación se puede expresar como:

$$u = e^{-\zeta \omega_d t} (A \operatorname{sen} \omega_d t + B \operatorname{cos} \omega_d t) \quad 2.14$$

en la ecuación anterior se han introducido dos nuevos parámetros, ζ y ω_d , mismos que se describen a continuación.

Fracción de amortiguamiento crítico (ζ).

Es la relación entre la constante de amortiguamiento y el coeficiente de amortiguamiento crítico (C_c).

$$\zeta = c/C_c \quad 2.15$$

$$C_c = 2m\omega \quad 2.16$$

Con base en el valor de ζ se pueden identificar tres tipos de movimientos según la siguiente clasificación.

Si $\zeta < 1$ el movimiento es subamortiguado, y se presentarán oscilaciones; este es el caso más común en Dinámica de Suelos.

Si $\zeta = 1$ implica que se tiene un amortiguamiento crítico, lo cual conduce a un movimiento sin oscilaciones hasta alcanzar el reposo en vibración libre.

Finalmente si $\zeta > 1$ es un movimiento sobreamortiguado y el efecto del amortiguamiento es tan fuerte que el cuerpo regresa a su posición de equilibrio cuando el tiempo tiende a infinito

Frecuencia angular amortiguada, (ω_d).

Es la velocidad angular del sistema tomando en cuenta la influencia del amortiguamiento viscoso, la cual se puede expresar en función de ω y ζ en la forma

$$\omega_d = \omega(1-\zeta^2)^{\frac{1}{2}} \quad 2.17$$

Los valores de las constantes A y B se evalúan a partir de las condiciones iniciales resultando para el caso de vibraciones libres con amortiguamiento

$$A = u_0 \quad 2.18a$$

$$B = (v_0 + u_0 \zeta \omega) / \omega_d \quad 2.18b$$

VIBRACIONES FORZADAS.

Estableciendo la ecuación de equilibrio dinámico de un sistema como el de la figura 2.5, sujeto a una excitación externa descrita como una función senoidal de amplitud P_0 y frecuencia circular de excitación ω_p , se obtiene la ecuación que rige el movimiento.

$$m\ddot{a} + c\dot{v} + ku = P_0 \text{sen}\omega_p t \quad 2.19a$$

Es conveniente expresar esta última en la forma 2.19b, dividiendo 2.19a por m y sustituyendo $c/m=2\zeta\omega$ y $k/m=\omega^2$

$$\ddot{a} + 2\zeta\omega\dot{v} + \omega^2 u = \omega^2 P_0 \text{sen}\omega_p t \quad 2.19b$$

cuya solución está compuesta por la suma de la solución homogénea (para $P_0=0$, ecuación 2.14) y la solución particular de la ecuación (para $P_0 \neq 0$). Las constantes de integración A y B no se valúan como en 2.18 ya que ahora está involucrada la solución particular y en este caso resultan

$$A = u_0 + 2C\zeta\beta \quad 2.20a$$

$$B = [v_0 + (\omega A - C\omega_p(1-\beta^2))]/\omega_d \quad 2.20b$$

donde

$$C = P_0 \left[(1-\beta^2)^2 + (2\zeta\beta)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} k^{-1} \quad 2.21$$

La solución particular, es de tipo armónica con frecuencia ω_p y debido a que en 2.19 se tiene a la primera y segunda derivada de $u(t)$, entonces la solución debe contener tanto a la función seno como a la coseno, es decir

$$u_p(t) = C_1 \text{sen}\omega_p t + C_2 \text{cos}\omega_p t \quad 2.22$$

Para valuar las constantes C_1 y C_2 se sustituye 2.22 y sus primeras dos derivadas respecto al tiempo (v y a respectivamente) en 2.19b. Como resultado, después de algunas simplificaciones, se obtiene un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas. Resolviendo el sistema:

$$C_1 = (P_0/k) (1-\beta^2) / [(1-\beta^2)^2 + (2\zeta\beta)^2]^{\frac{1}{2}} \quad 2.23a$$

$$C_2 = (P_0/k) (-2\zeta\beta) / [(1-\beta^2)^2 + (2\zeta\beta)^2]^{\frac{1}{2}} \quad 2.23b$$

Substituyendo estos valores en 2.22, y sumando el resultado a la solución de la ecuación homogénea se obtiene la solución general

$$u(t) = e^{-\zeta\omega_d t} (A \operatorname{sen}\omega_d t + B \operatorname{cos}\omega_d t) + \frac{P_0}{k} [(1-\beta^2)^2 + (2\zeta\beta)^2]^{-\frac{1}{2}} [(1-\beta^2)^2 \operatorname{sen}\omega_p t - 2\zeta\beta \operatorname{cos}\omega_p t] \quad 2.24$$

En la ecuación anterior, el primer término representa la respuesta transitoria del sistema y el segundo corresponde a la respuesta establecida. Esta última tiene la misma frecuencia que la excitación aplicada pero fuera de fase respecto a ésta

VIBRACION FORZADA, CARGAS ARBITRARIAS

Para condiciones de carga arbitrarias es conveniente el empleo de la integral de Duhamel, misma que permite conocer la respuesta del sistema ante sollicitaciones diversas, partiendo del equilibrio dinámico según

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = P(t) \quad 2.25$$

donde $P(t)$ es una carga arbitria, función del tiempo, por ejemplo la mostrada en la fig. 2.6.

La solución de la Integral de Duhamel se puede obtener mediante procedimientos analíticos o numéricos. En éstos hay diferentes métodos o esquemas de integración tales como: Simple, Trapezoidal o Simpson.

La respuesta del sistema se puede escribir en la forma

$$u(t) = \frac{1}{m\omega_d} \int_0^t P(\tau) e^{-\zeta\omega_d(t-\tau)} \operatorname{sen}\omega_d(t-\tau) d\tau \quad 2.26$$

Sustituyendo en esta última la igualdad

$$\operatorname{sen} \omega_d(t-\tau) = \operatorname{sen} \omega_d \cos \omega_d \tau - \cos \omega_d \operatorname{sen} \omega_d \tau$$

Se obtiene

$$u(t) = \frac{1}{m \omega_d} \left[\int_0^t P(\tau) e^{-\zeta \omega_d(t-\tau)} \operatorname{sen} \omega_d \cos \omega_d \tau d\tau - \int_0^t P(\tau) e^{-\zeta \omega_d(t-\tau)} \cos \omega_d \operatorname{sen} \omega_d \tau d\tau \right] \quad 2.27$$

Esta última ecuación se puede expresar como

$$u(t) = A(t) \operatorname{sen} \omega_d t - B(t) \cos \omega_d t \quad 2.28$$

en donde

$$A(t) = \frac{1}{m \omega_d} \int_0^t P(\tau) e^{-\zeta \omega_d(t-\tau)} \cos \omega_d \tau d\tau \quad 2.29a$$

$$B(t) = \frac{1}{m \omega_d} \int_0^t P(\tau) e^{-\zeta \omega_d(t-\tau)} \operatorname{sen} \omega_d \tau d\tau \quad 2.29b$$

Resolución de la Integral de Duhamel con el método Simpson.

Para efectuar un proceso de integración paso a paso se requiere dividir el intervalo de tiempo de estudio en n intervalos constantes. Si definimos

$$2\Delta\tau = t_i - t_{i-1}$$

Entonces las integrales en las ecuaciones 2.29 se transforman en

$$\begin{aligned} \Sigma_i^A = & \left[(\Sigma)_{i-1}^A + P(t_i - 2\Delta\tau) \cos \omega_d(t_i - 2\Delta\tau) \right] \exp(-\zeta \omega_d 2\Delta\tau) + \\ & + 4P(t_i - \Delta\tau) \cos \omega_d(t_i - \Delta\tau) \exp(-\zeta \omega_d \Delta\tau) + P(t_i) \cos \omega_d t_i \end{aligned} \quad 2.30a$$

$$\begin{aligned} \Sigma_i^B = & \left[(\Sigma)_{i-1}^B + P(t_i - 2\Delta\tau) \operatorname{sen} \omega_d(t_i - 2\Delta\tau) \right] \exp(-\zeta \omega_d 2\Delta\tau) + \\ & + 4P(t_i - \Delta\tau) \operatorname{sen} \omega_d(t_i - \Delta\tau) \exp(-\zeta \omega_d \Delta\tau) + P(t_i) \operatorname{sen} \omega_d t_i \end{aligned} \quad 2.30b$$

Las ecuaciones 2.30 pueden expresarse como

$$(\Sigma)_1^A = [(\Sigma)_1^A + F(t_i - 2\Delta\tau)] E_1 + F(t_i - \Delta\tau) E_2 + F(t_i) \quad 2.31a$$

$$(\Sigma)_1^B = [(\Sigma)_1^B + G(t_i - 2\Delta\tau)] E_1 + G(t_i - \Delta\tau) E_2 + G(t_i) \quad 2.31b$$

en donde

$$F(t_i - \Delta\tau) = P(t_i - \Delta\tau) \cos \omega \Delta\tau \quad 2.32a$$

$$G(t_i - \Delta\tau) = P(t_i - \Delta\tau) \sin \omega \Delta\tau \quad 2.32b$$

$$E_2 = 4e^{-\zeta \omega \Delta\tau} \quad 2.32c$$

$$E_1 = e^{-\zeta \omega \Delta\tau} \quad 2.32d$$

Finalmente la respuesta paso a paso puede ser valuada con la fórmula recursiva

$$u(t_i) = \frac{\Delta\tau}{m\omega d} \cdot \frac{1}{3} [(\Sigma)_1^A \sin \omega t_i - (\Sigma)_1^B \cos \omega t_i] \quad 2.33$$

Con estos métodos se evalúan los desplazamientos de sistemas de un grado de libertad ante excitación arbitraria en el sistema DYS. Para los otros métodos de integración se obtienen fórmulas recursivas más simples.

SISTEMAS DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

Se consideran dos tipos de sistemas de 2GDL:

Tipo I, dos masas, un grado de libertad cada una,

Tipo II, una masa con dos grados de libertad;

los cuales se ilustran en las figuras 2.7 y 2.8 respectivamente, para el caso en que no existe amortiguamiento.

VIBRACIONES LIBRES, Sistema tipo I

En este caso los elementos que intervienen en el análisis son las masas de cada cuerpo, m_1 y m_2 , conectadas por los resortes k_1 y k_2 . Para esta parte introductoria se desprecia el efecto del amortiguamiento.

Los desplazamientos de este tipo de sistema se denotan u_1 y u_2 relativos a a las masa m_1 y m_2 respectivamente.

Al igual que en el resto de los casos ya analizados, se parte de las ecuaciones de equilibrio dinámico de modo que ahora son dos ecuaciones, una por cada masa y se presentan a continuación con respecto a su posición de reposo

$$m_1 \ddot{a}_1 + k_1 u_1 + k_2 (u_1 - u_2) = 0 \quad 2.34a$$

$$m_2 \ddot{a}_2 + k_2 (u_2 - u_1) = 0 \quad 2.34b$$

La solución, u_1 y u_2 , es de tipo armónico

$$u_1 = A \sin \omega t \quad 2.35a$$

$$u_2 = B \sin \omega t \quad 2.35b$$

Al sustituir 2.35 A, B en 2.34 A, B se llega a

$$-m_1 \omega^2 A \sin \omega t + k_1 A \sin \omega t + k_2 A \sin \omega t - k_2 B \sin \omega t = 0 \quad 2.36a$$

$$-m_2 \omega^2 B \sin \omega t + k_2 B \sin \omega t - k_2 A \sin \omega t = 0 \quad 2.36b$$

Agrupando y simplificando se obtiene el siguiente sistema de orden 2

$$(k_1 + k_2 - m_1 \omega^2) A - k_2 B = 0 \quad 2.37a$$

$$-k_2 A + (k_2 - m_2 \omega^2) B = 0 \quad 2.37b$$

Para una solución no trivial el determinante de la matriz de coeficientes del sistema 2.36 debe ser igual a cero, de modo que se obtiene la ecuación llamada característica

$$(k_1 + k_2 - m_1 \omega^2)(k_2 - m_2 \omega^2) - k_2^2 = 0 \quad 2.38$$

Al desarrollar y simplificar:

$$k_1 k_2 - k_1 m_2 \omega^2 + k_2^2 - k_2 m_2 \omega^2 - k_2 m_1 \omega^2 + m_1 m_2 \omega^4 - k_2^2 = 0 \quad 2.39a$$

$$\omega^4 (m_1 m_2) + \omega^2 (-k_1 m_2 - k_2 m_2 - k_2 m_1) + k_1 k_2 = 0 \quad 2.39b$$

Dividiendo entre $m_1 m_2$, resulta:

$$\omega^4 - \omega^2 \left[\frac{k_1 + k_2}{m_1} + \frac{k_2}{m_2} \right] + \frac{k_1 k_2}{m_1 m_2} = 0 \quad 2.39c$$

De donde es posible obtener los valores de las frecuencias naturales del sistema ω_1^2 y ω_{II}^2 , correspondiendo la menor al modo fundamental de vibración y la mayor a la frecuencia del segundo modo

$$\omega_{I, II}^2 = \frac{1}{2} \left[\frac{k_1 + k_2}{m_1} + \frac{k_2}{m_2} \pm \left(\left[\frac{k_1 + k_2}{m_1} + \frac{k_2}{m_2} \right]^2 - 4 \frac{k_1 k_2}{m_1 m_2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad 2.40$$

Por otra parte se pueden obtener relaciones de amplitud a partir de las ecuaciones 2.37a,b

$$\frac{B}{A} = \frac{k_1 + k_2 - m_1 \omega^2}{k_2} = \frac{k_2}{k_2 - m_2 \omega^2} \quad 2.41$$

Y por otra parte resulta que $u_1 = B_1 \cos \omega t$ junto con $u_2 = B_2 \cos \omega t$ son soluciones de 2.34 por lo tanto la ecuación general para la vibración libre de las dos masas es

$$u_1 = A_1 \sin \omega t + B_1 \cos \omega t \quad 2.42a$$

$$u_2 = A_2 \sin \omega t + B_2 \cos \omega t \quad 2.42b$$

En tal forma que al sustituir los valores de las raíces ω_1 y ω_{II} en 2.42A,B se llega al sistema de ecuaciones que rige este tipo de movimiento

$$u_1 = A_1^I \sin \omega_1 t + B_1^I \cos \omega_1 t + A_1^{II} \sin \omega_{II} t + B_1^{II} \cos \omega_{II} t \quad 2.43a$$

$$u_2 = A_2^I \sin \omega_1 t + B_2^I \cos \omega_1 t + A_2^{II} \sin \omega_{II} t + B_2^{II} \cos \omega_{II} t \quad 2.43b$$

Para conocer el valor de las constantes en las ecuaciones 2.43 se procede a partir de la condiciones iniciales y con ayuda de las relaciones 2.41, mismas que se presentan como:

$$\frac{A_2^I}{A_1^I} = \frac{B_2^I}{B_1^I} = \frac{k_2}{k_2 - m_2 \omega_2^2} = R1 ; \quad \frac{A_2^{II}}{A_1^{II}} = \frac{B_2^{II}}{B_1^{II}} = \frac{k_2}{k_2 - m_2 \omega_{II}^2} = R2 \quad 2.44a, b$$

Se procede de la siguiente manera, en 2.43A, B para $t=0$.

$$u_1(0) = B_1^I + B_1^{II} \quad 2.45a$$

$$u_2(0) = B_2^I + B_2^{II} ; \text{ o bien } u_2(0) = (R1)B_1^I + (R2)B_1^{II} \quad 2.45b$$

Con lo cual es posible llegar a resolver el sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas y haciendo uso de R1 y R2, se pueden obtener en suma, 4 constantes, restando otras tantas que se valúan a partir de las condiciones iniciales de la velocidad, procediendo en forma similar.

Por lo cual queda cubierto este planteamiento y ahora se presenta el sistema tipo 2 de 2 grados de libertad.

Sistema tipo 2.

Destacan en este tipo de sistema, las dimensiones del cuerpo en estudio, mismas que en los otros planteamientos no se requieren.

En las ecuaciones se introduce una constante de rigidez rotacional k_r . Además se requieren los momentos de inercia de la masa (I_0 e I_z) para iniciar el análisis de la respuesta del sistema

$$I_0 = m(b^2 + 4Hc^2) / 12 \quad 2.46$$

$$I_z = I_0 + mHc^2 \quad 2.47$$

Las ecuaciones del equilibrio dinámico de las que se parte son

$$m a_1 + k_h u_1 = -mHc a_2 \quad 2.48a$$

$$I_z a_2 + k_r u_2 = -mHc a_1 \quad 2.48b$$

Es ahora el procedimiento análogo al realizado con el sistema anterior, de manera que suponiendo soluciones del tipo

$$u_1 = B_1 \cos \omega t ; \quad u_2 = B_2 \cos \omega t \quad 2.49a, b$$

Y al sustituir 2.49a, b en 2.48a, b

$$-m\omega^2 B_1 \cos \omega t + k_h B_1 \cos \omega t = mHc\omega^2 B_2 \cos \omega t \quad 2.50a$$

$$-I_x \omega^2 B_2 \cos \omega t + k_r B_2 \cos \omega t = mHc\omega^2 B_1 \cos \omega t \quad 2.50b$$

Se observa que al dividir ambas ecuaciones entre $\cos \omega t$ y agrupando respecto a B_1 y B_2 es fácil plantear un sistema de dos ecuaciones cuyo determinante de los factores debe ser igual a cero a efecto de eliminar la solución trivial.

Resultando

$$B_1 (k_h - m\omega^2) - B_2 (mHc\omega^2) = 0 \quad 2.51a$$

$$B_1 (-mHc\omega^2) + B_2 (k_r - I_x \omega^2) = 0 \quad 2.51b$$

Y obteniendo la ecuación característica

$$m\omega^4 I_x - m\omega^2 k_r - I_x k_h \omega^2 + k_h k_r - m^2 Hc^2 \omega^4 = 0 \quad 2.52$$

Sustituyendo 2.46 en 2.52 y simplificando

$$\omega^4 (I_0 m) - \omega^2 (mk_r + I_x k_h) + k_h k_r = 0 \quad 2.53$$

Con lo cual es posible obtener la solución de la ecuación característica como

$$\omega_{1, II}^2 = \frac{mk_r + I_x k_h \pm \sqrt{(mk_r + I_x k_h)^2 - 4I_0 m k_h k_r}}{2I_0 m} \quad 2.54$$

Y se obtienen relaciones entre las constantes para poder resolver el sistema, a partir de las ecuaciones 2.51

$$\frac{A_2^I}{A_1^I} = \frac{B_2^I}{B_1^I} = \frac{mHc\omega_1^2}{k_r - Ix\omega_1^2} = R1 \quad ; \quad \frac{A_2^{II}}{A_1^{II}} = \frac{B_2^{II}}{B_1^{II}} = \frac{mHc\omega_{II}^2}{k_r - Ix\omega_{II}^2} = R2 \quad 2.55a, b$$

Así se tienen las herramientas necesarias para llevar a cabo la solución del sistema siguiendo el desarrollo mostrado en el caso tipo 1 cuya solución ya fue descrita y a su vez, pueden emplearse las mismas ecuaciones generales de movimiento del sistema anterior.

RESPUESTA ESTABLECIDA CON AMORTIGUAMIENTO.

En este caso sólo se analiza la respuesta armónica establecida amortiguada tanto para el sistema tipo 1 (fig. 2.9) como para el tipo 2 (fig. 2.10). De modo que se introducen en los modelos las funciones de carga armónicas y los valores del amortiguamiento según se puede apreciar en las figuras.

Se presenta a continuación sólomente el planteamiento matemático para el sistema tipo 2, siendo similar el procedimiento para el sistema tipo 1.

Para el sistema tipo 2, figura 2.10, las ecuaciones generales del equilibrio dinámico son

$$m\ddot{u} + mL\ddot{\theta} + k_h u + c_h \dot{u} = P(t) \quad 2.56a$$

$$(I_o + mHc^2)\ddot{\theta} + mHc\ddot{u} + k_r \theta + c_r \dot{\theta} = M(t) \quad 2.56b$$

Las sollicitaciones externas, ya sean de forma senoidal o cosenoidal, se pueden presentar en forma compleja como

$$P(t) = P_o e^{i\omega t} \quad 2.57a$$

$$M(t) = M_o e^{i\omega t} \quad 2.57b$$

Las funciones que satisfacen el sistema conformado por las ecuaciones 2.56 son de la forma:

$$u(t) = \check{u}(w p) e^{i w p t} \quad 2.58a$$

$$\theta(t) = \check{\theta}(w p) e^{i w p t} \quad 2.58b$$

donde $\check{u}(w p)$ y $\check{\theta}(w p)$ son las amplitudes complejas del desplazamiento y del giro del sistema respectivamente.

Por lo que al sustituir 2.57 y 2.58 junto con sus derivadas en 2.56 y dividiendo entre $e^{i w p t}$ resulta

$$[k_h - w p^2 + i w p c_h] \check{u} + [-w p^2 m L^2] \check{\theta} = P_o \quad 2.59a$$

$$[-w p^2 m L^2] + [k_f - w p (I_o + m L^2) + i w p c_f] \check{\theta} = M_o \quad 2.59b$$

o bien

$$k_{11} \check{u} + k_{12} \check{\theta} = P_o \quad 2.60a$$

$$k_{21} \check{u} + k_{22} \check{\theta} = M_o \quad 2.60b$$

donde

$$k_1 = k_h - w p^2 + i w p c_h \quad 2.61a$$

$$k_2 = k_f - w p (I_o + m L^2) + i w p c_f \quad 2.61b$$

$$k_{12} = -w p^2 m L^2 \quad 2.61c$$

o en forma matricial

$$[K] [\check{U}] = [\check{P}] \quad 2.62$$

donde:

[K] : Matriz de rigidez dinámica del sistema

[\check{U}] : Vector de desplazamientos

[\check{P}] : Vector de cargas

La solución del sistema será

$$[\check{U}] = [K]^{-1} [\check{P}] \quad 2.63$$

Efectuando operaciones se llega a:

$$\check{u}(wp) = \frac{K_2 P_0 - k_{12} M_0}{k_{11} k_2 - k_{12}^2} \quad 2.64a$$

$$\check{\theta}(wp) = \frac{K_1 M_0 - k_{12} P_0}{k_{11} k_2 - k_{12}^2} \quad 2.64b$$

Y al sustituir estos valores en 2.58 se pueden conocer las funciones que definen el desplazamiento y el giro del sistema.

Si el sistema de cargas armónico está definido por funciones coseno, la respuesta correspondiente estará dada por la parte imaginaria de 2.58

$$u(t) = \text{IM}[\check{u}(wp)e^{ivpt}] \quad 2.65a$$

$$\theta(t) = \text{IM}[\check{\theta}(wp)e^{ivpt}] \quad 2.65b$$

Y para el caso de ser función senoidal, entonces es la parte real de 2.58

$$u(t) = \text{RE}[\check{u}(wp)e^{ivpt}] \quad 2.66a$$

$$\theta(t) = \text{RE}[\check{\theta}(wp)e^{ivpt}] \quad 2.66b$$

Las ecuaciones 2.64 definen las amplitudes o desplazamientos máximos del sistema, en régimen establecido como función de la frecuencia de excitación wp .

Las gráficas de \check{u} versus wp y $\check{\theta}$ versus wp definen los espectros de respuesta del sistema.

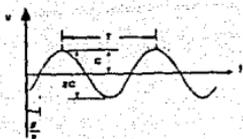
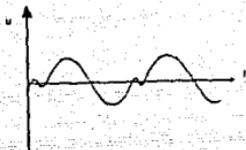
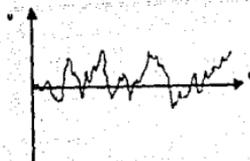


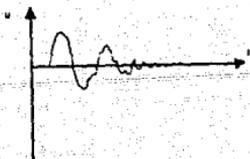
Fig. 2.1 MOVIMIENTO ARMONICO



a) periódicos



b) arbitrarios



c) transitorias

Fig. 2.2 TIPOS DE OSCILACIONES

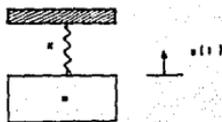


Fig. 2.3 SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD MASA RESORTE

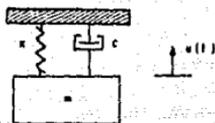


Fig. 2.4 SISTEMA MASA - AMORTIGUADOR - RESORTE

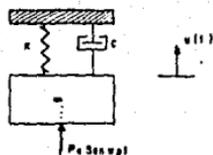


Fig. 2.5 SISTEMA SOMETIDO A EXCITACION ARMONICA

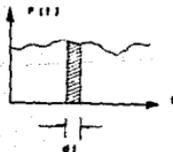


Fig. 2.6 HISTORIA DE CARGA ARBITRARIA

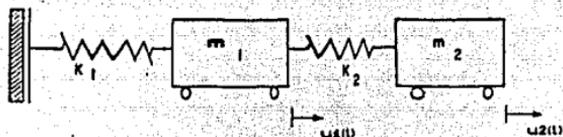


Fig. 2.7 SISTEMA DE 2DGL TIPO 1
SIN AMORTIGUAMIENTO

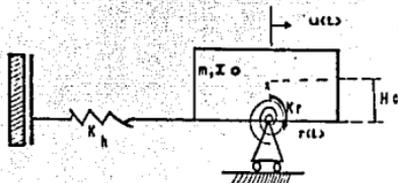


Fig. 2.8 SISTEMA DE 2DGL TIPO 2
SIN AMORTIGUAMIENTO

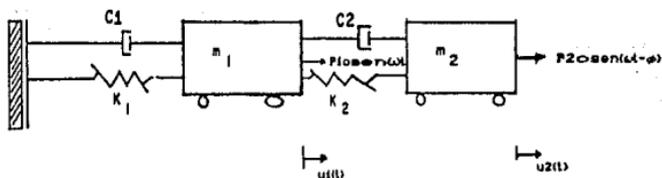


Fig. 2.9 SISTEMA DE 2DGL TIPO 1 SOMETIDO
A EXCITACIONES ARMONICAS

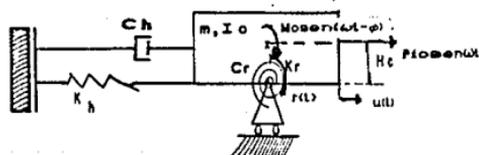


Fig. 2.10 SISTEMA DE 2DGL TIPO 2 SOMETIDO
A EXCITACIONES ARMONICAS

CAPITULO III

RESPUESTA DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES
PARA MAQUINARIA VIBRATORIA

En la industria es común encontrar diversos equipos como motores, generadores, compresores y turbinas entre otros, los cuales generan vibraciones y son transmitidas a la cimentación y al suelo de apoyo.

En estos casos se debe vigilar que la cimentación cumpla de antemano con los requisitos de un análisis estático tradicional para posteriormente llevar a cabo el análisis dinámico y con éste determinar si las vibraciones son excesivas y causan molestias a personas o daños a estructuras o a la misma maquinaria, o si se encuentran dentro de los rangos permisibles y comprobar que el diseño de la cimentación es adecuado para el tipo de máquina que soporta.

Algunos autores recomiendan ciertos métodos para reducir el efecto de las vibraciones tratando en todos los casos de alejar la frecuencia natural del sistema de la frecuencia de operación, evitando así la resonancia del sistema. Dichos métodos quedan fuera del alcance de esta tesis.

En lo que se refiere al tipo de oscilación que produce la maquinaria a la cimentación, son del tipo mostrado en la figura 2.2a, que en última instancia se puede descomponer en componentes armónicos.

Para modelar las cimentaciones es suficiente en la mayoría de los casos plantear sistemas equivalentes a los vistos en el Capítulo 2 con la diferencia que las constantes de los resortes y amortiguadores ahora son tomados según las condiciones del terreno de apoyo en conjunto con la cimentación definidos en la

forma de funciones de impedancia, mismas que dependen de la frecuencia de excitación y de las características propias del sistema.

Todos estos criterios coinciden en señalar, gracias a observaciones analíticas y experimentales, que la rigidez y la capacidad de disipar energía de los sistemas suelo-estructura, dependen principalmente de la frecuencia de excitación, de la forma y profundidad de desplante de la cimentación y de las características físicas y mecánicas de los depósitos de suelo subyacentes.

La función de impedancia del sistema de 1-GDL sirve de base para establecer una analogía práctica con las funciones de impedancia para análisis dinámico de cimentaciones rígidas.

El uso de funciones de impedancia para obtener la respuesta de cimentaciones lleva consigo la idealización del suelo como un material de comportamiento lineal. A pesar de que el suelo es un material claramente no-lineal, las soluciones lineales pueden ser usadas en muchos problemas prácticos en los que se presentan deformaciones pequeñas o moderadas siempre y cuando las propiedades de los suelos sean determinadas con criterio.

La respuesta armónica de una cimentación, o base, rígida apoyada en el suelo puede describirse por seis componentes de movimiento: tres desplazamientos y tres rotaciones, correspondiendo respectivamente a los ejes X, Y, y Z según se puede observar en la figura 3.1.

Para el caso de cimentaciones que poseen dos ejes de simetría en planta (X y Y) e igual profundidad de desplante en toda el área, los modos vertical y torsional se encuentran desacoplados de otros modos de vibrar esto es, una fuerza vertical aplicada en el centro de masa de la cimentación produce solamente desplazamientos verticales, (w) y un momento torsional producirá únicamente rotaciones torsionales, (ϕ),

mientras que los modos horizontal y de cabeceo a lo largo y alrededor de los ejes x o y están asociados con desplazamientos y rotaciones en los mismos ejes, u, θ o v, ψ respectivamente.

Bajo esas condiciones, el movimiento puede descomponerse y estudiarse analizando los diferentes modos de vibrar independientemente. Para el modo vertical, el sistema se reduce a uno de un grado de libertad (1-GDL) como el visto en el Capítulo 2, figura 2.5.

Para los modos horizontales y de cabeceo, transversal o longitudinal, el sistema se reduce a un sistema de 2-GDL (acoplados) para cada uno de los ejes x o y , (figura 2.10). En el caso de cimentaciones superficiales, o muy poco embebidas, los desplazamientos horizontales debidos al cabeceo y las rotaciones debidas a traslaciones horizontales son pequeñas y pueden despreciarse.

Lo anterior implica que esos modos pueden analizarse independientemente como si estuvieran desacoplados.

Si se asocia rigidez a cada uno de los 6 modos discutidos, la matriz de rigideces de la cimentación que relaciona las componentes del movimiento con las fuerzas y momentos aplicados, se puede expresar, incluyendo las rigideces acopladas correspondientes, en la forma

$$[K] \{u\} = \{p\} \quad 3.1a$$

donde

$$\begin{bmatrix} K_x & K_{x\theta} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K_{\theta x} & K_{\theta} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_y & K_{y\psi} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{\psi y} & K_{\psi} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ \theta \\ v \\ \psi \\ w \\ \phi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p_x \\ p_{\theta} \\ p_y \\ p_{\psi} \\ p_z \\ p_{\phi} \end{Bmatrix} \quad 3.1b$$

$$K_{x\theta} = K_{\theta x} ; K_{y\psi} = K_{\psi y}$$

Si la cimentación es circular o cuadrada entonces se tiene que

$$K_x = K_y = K_h; K_\theta = K_\psi = K_r; K_{x\theta} = K_{y\psi} = K_{hr}; \text{ y } K_{\theta x} = K_{\psi y} = K_{rh}; K_{hr} = K_{rh}$$

Considérese el caso de una cimentación rígida de forma circular con masa M y radio R sobre un semiespacio elástico como se muestra en la figura 3.2, sujeto a la acción de una fuerza armónica vertical, las propiedades del semiespacio quedan definidas por su densidad específica ρ , relación de Poisson ν y módulo de cortante G . La fuerza armónica vertical, especificada en forma compleja, se expresa como

$$P(t) = P e^{i\omega t} \quad 3.2$$

donde ω es la frecuencia circular de excitación y P es la amplitud de la fuerza, ya sea constante, $P = P_0$, o una función de ω , $P = P(\omega)$. El objetivo es determinar los desplazamientos verticales, $w(t)$, en la cimentación en estado estacionario.

El sistema así definido puede descomponerse en dos, separando de manera conceptualmente, la cimentación del suelo de apoyo. La reacción del suelo sobre la cimentación es la resultante de la presión de contacto en la interfaz suelo-cimentación, $r(t)$. En esos términos la ecuación de equilibrio dinámico de la cimentación puede escribirse como

$$M \ddot{w}(t) + r(t) = P(t) \quad 3.3$$

Siendo $\ddot{w}(t)$ la segunda derivada de $w(t)$ respecto al tiempo.

La ecuación 3.3 admite fuerzas dinámicas de tensión entre el suelo y la cimentación; en la práctica estas fuerzas son compensadas por las fuerzas asociadas a los esfuerzos estáticos impuestos por el peso propio de la cimentación.

Por otra parte, la acción del cimiento sobre el suelo de apoyo, es igual a $r(t)$ pero con signo contrario, e implica que las condiciones de frontera, en el área de contacto y fuera de ésta se satisfagan. La respuesta en el estado estacionario

implica que las funciones $r(t)$ y $w(t)$ pueden expresarse de la siguientes manera

$$r(t) = R(\omega) e^{i\omega t} \quad 3.4a$$

$$w(t) = W(\omega) e^{i\omega t} \quad 3.4b$$

Las funciones R y W son, respectivamente, las amplitudes complejas de la reacción del suelo y del desplazamiento vertical del suelo en la base de la cimentación, dependientes de la frecuencia de excitación, ω . La relación entre 3.4a y 3.4b se puede expresar como

$$K_V = \frac{r(t)}{w(t)} = \frac{R(\omega) e^{i\omega t}}{W(\omega) e^{i\omega t}} = \frac{R(\omega)}{W(\omega)} \quad 3.5$$

La función K_V define la relación fuerza-desplazamiento del sistema en estado estacionario en cualquier instante t , la cual es igual a la relación de amplitudes complejas respectivas. Se desprende, por lo tanto, que K_V es una función de la frecuencia de excitación, $K_V = K_V(\omega)$.

La ec. 3.5 define el concepto de función de impedancia, o rigidez dinámica, asociado con el sistema suelo-cimentación considerado.

Si se sustituye 3.5 en 3.3, la ecuación que gobierna el movimiento se puede escribir como

$$M \ddot{w}(t) + K_V w(t) = P(t) \quad 3.6$$

Sustituyendo $\ddot{w}(t) = -\omega^2 w(t)$, 3.2 y 3.4b en 3.6 se obtiene

$$\left[-\omega^2 M + K_V \right] W(\omega) e^{i\omega t} = p e^{i\omega t} \quad 3.7$$

Dividiendo por el término $e^{i\omega t}$, se llega a la ecuación de equilibrio correspondiente en el dominio de la frecuencia

$$\left[-\omega^2 M + K_V \right] W(\omega) = P \quad 3.8$$

Despejando a $W(\omega)$ de la última expresión se obtiene la amplitud de los desplazamientos

$$W(\omega) = \frac{P}{K_v - \omega^2 M} \quad 3.9$$

Finalmente, sustituyendo este resultado en 3.4b la respuesta del sistema en el dominio del tiempo puede expresarse como

$$w(t) = \frac{P}{K_v - \omega^2 M} e^{i\omega t} \quad 3.10$$

El problema planteado se resuelve entonces en dos pasos:

1) Evaluación de la función de impedancia del sistema suelo-cimentación como función de la frecuencia de excitación ω y las características del sistema, excluyendo la masa de la cimentación ($M=0$);

2) Cálculo de la respuesta del sistema resolviendo la ecuación de equilibrio 3.6 donde se incluyen los efectos de inercia de la cimentación, y la función de impedancia.

La impedancia representa una función compleja de la frecuencia, la cual se puede expresar para cualquiera de los modos discutidos anteriormente como

$$K_m(\omega) = K_{1m}(\omega) + i K_{2m}(\omega) \quad 3.11$$

donde el subíndice m , denota el modo de vibración. Para una cimentación circular $m=v$ (vertical), h (horizontal), r (rotación o cabeceo) y t (torsión).

La parte real de la función refleja la inercia y la rigidez del suelo de cimentación. La parte imaginaria representa la capacidad del suelo de apoyo de disipar energía en la forma de amortiguamiento histerético. Descomponiendo la parte imaginaria de 3.11, la función de impedancia puede expresarse en la forma

$$K_m(\omega) = K_m(\omega) + i \omega C_m(\omega) \quad 3.12$$

Para fines prácticos y en los casos en que el suelo de cimentación se idealiza de manera simple (caracterizado por una velocidad de onda cortante V_s), resulta conveniente expresar la función de impedancia en términos de la frecuencia adimensional a_0 y como el producto de la rigidez estática correspondiente ($\omega = 0$) y un término complejo que define la variación de la función con la frecuencia. Esto es

$$K_m(\omega) = K_m^0 [k_m(a_0) + i a_0 c_m(a_0)] \quad 3.13$$

Donde K_m^0 denota la rigidez estática del modo m , y la frecuencia adimensional a_0 está definida como

$$a_0 = \frac{\omega R}{V_s} \quad 3.14a$$

$$V_s = \sqrt{G/\rho} \quad 3.14b$$

Siendo R el radio de la cimentación. En 3.13, el término complejo, se nombra parte dinámica de la función de impedancia la cual es dependiente de la frecuencia. Las funciones $k_m(a_0)$ y $c_m(a_0)$ reciben el nombre de coeficientes adimensionales de rigidez y amortiguamiento respectivamente, o rigideces dinámicas adimensionales.

La relación que guardan los coeficientes adimensionales de 3.13 y los términos de la función de impedancia en la forma básica 3.12 es simplemente

$$K_m(\omega) = K_m^0 k_m(a_0) \quad 3.15a$$

$$C_m(\omega) = K_m^0 \frac{R}{V_s} c_m(a_0) \quad 3.15b$$

Para el caso de una cimentación circular superficial sobre un semiespacio elástico homogéneo definido por ρ , ν y G , Veletsos y Verbic (ref. 2) proponen las siguientes aproximaciones de las funciones de impedancia de los modos vertical, horizontal y rotacional (cabeceo):

Modo de vibración (m)	K_m^0
Vertical	$\frac{4GR}{1-\nu}$
Horizontal	$\frac{8GR}{2-\nu}$
Cabeceo	$\frac{8GR^3}{3(1-\nu)}$

Tabla III.1

Los coeficientes k_m y c_m se determinan con las siguientes expresiones y de acuerdo a los valores consignados en la tabla 3.2, obtenidos de la referencia 2.

$$k_h = 1$$

$$c_h = \alpha$$

$$k_r = 1 - \beta_1 \frac{(\beta_2 a_0)^2}{1 + (\beta_2 a_0)^2} - \beta_3 a_0^2$$

$$c_r = \beta_1 \beta_2 \frac{(\beta_2 a_0)^2}{1 + (\beta_2 a_0)^2}$$

$$k_v = 1 - \gamma_1 \frac{(\gamma_2 a_0)^2}{1 + (\gamma_2 a_0)^2} - \gamma_3 a_0^2$$

$$c_v = \gamma_4 + \gamma_1 \gamma_2 \frac{(\gamma_2 a_0)^2}{1 + (\gamma_2 a_0)^2}$$

Coefficiente	$\nu = 0.00$	$\nu = 0.33$	$\nu = 0.45$	$\nu = 0.50$
α	0.775	0.650	0.600	0.600
β_1	0.525	0.500	0.450	0.400
β_2	0.800	0.800	0.800	0.800
β_3	0.000	0.000	0.023	0.027
γ_1	0.250	0.350	-	0.000
γ_2	1.000	0.800	-	0.000
γ_3	0.000	0.000	-	0.170
γ_4	0.850	0.750	-	0.850

Tabla III.2

El sistema DYS ofrece como opciones el análisis de los modos vertical y horizontal-cabeceo, de forma tal que siguiendo estos

lineamientos se obtienen las funciones de impedancia correspondientes.

Además el sistema ofrece la opción de analizar una cimentación sobre un estrato de espesor H , según se puede apreciar en la figura 3.3. El procedimiento es enteramente similar, salvo que las funciones de impedancia, dependen de la relación de Poisson del suelo, del amortiguamiento histerético del mismo y de la relación entre el espesor del estrato y el radio de la cimentación (H/R). Las funciones de impedancia correspondientes a este caso para diferentes H/R , ν y ζ fueron calculados con los programas de elemento finito DHR/SUPLEM y DV/SUPLEM (García Ranz 1987 a y b).

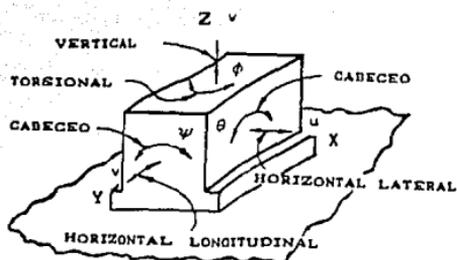


FIG. 3.1 REPRESENTACION DE LOS SEIS GRADOS DE LIBERTAD.

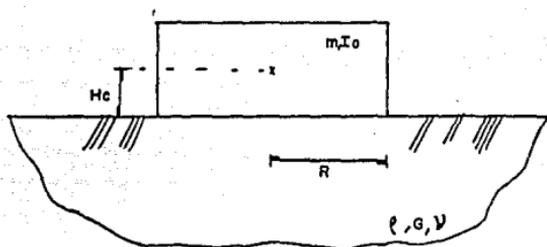


FIG. 3.2 CIMENTACION SOBRE UN SEMIESPACIO

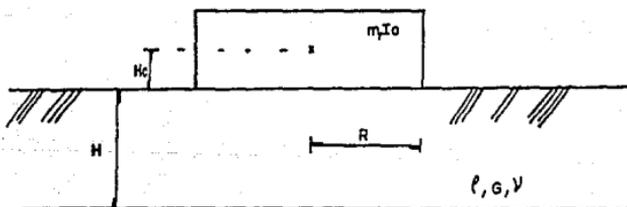


FIG. 3.3 CIMENTACION SOBRE UN ESTRATO.

CAPITULO IV

RESPUESTA SISMICA DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES

Este es un tema que día a día toma mayor importancia dentro de la Ingeniería Civil dada la importancia en relación con la seguridad de las estructuras. Para lo cual, se han desarrollado ciertos modelos para el estudio de la respuesta de cimentaciones ante solicitaciones sísmicas.

Las excitaciones sísmicas son causadas por deslizamiento relativo entre placas continentales, erupciones volcánicas y en casos remotos por detonaciones de explosivos de gran magnitud.

Al igual que en el caso de cimentación para maquinaria, en el caso de análisis sísmico se entiende que el análisis dinámico de la cimentación se lleva a cabo una vez que ésta ha sido revisada para solicitaciones estáticas.

Los movimientos del terreno provocan en la cimentación cargas que dependen de la magnitud del sismo y se traducen en excitaciones que provocan una vibración de los modos horizontal-cabeceo de la cimentación, de manera que se pueden retomar los modelos ya presentados.

Es conveniente indicar que las condiciones locales del suelo influyen determinantemente en la respuesta de una cimentación ya que el efecto de un sismo puede ser diferente en estructuras iguales pero situadas entre sí a una distancia relativamente cercana.

Período fundamental de depósitos estratificados.

Las recomendaciones propias del diseño sísmico de edificios sugiere alejar el periodo de vibración de la estructura del periodo fundamental del suelo. Para obtener el primero existen varios programas de computadora como el *ETABS* (ref. 3), mismo que en base a la configuración geométrica del edificio así como de las propiedades de los materiales y condiciones de carga, determina los periodos fundamentales de vibración del edificio. Respecto al suelo se presenta como opción del sistema *DYS* la opción de valuar los periodos fundamentales de vibración de depósitos de suelo estratificados (figura 4.1) con los datos de cada estrato (ρ , G y ν) para lo cual se emplea como subrutina, el programa *EIGMES* (García, Avilés, 1990).

Para el caso de un sólo estrato se puede obtener el periodo fundamental según la siguiente fórmula

$$T = 4H/V_s \quad 4.1$$

Respuesta debida a excitación armónica del terreno.

La interacción suelo-estructura por estudiar en este capítulo, se refiere a la acción (fuerzas y momentos) que ejerce la estructura sobre el suelo cuando actúa el sismo y se traduce a deformaciones por lo cual el movimiento del terreno será diferente del que ocurriría de no estar la estructura sobre dicho suelo.

Los efectos de la interacción suelo-estructura modifican por lo tanto, los periodos y amortiguamientos de la estructura.

El periodo fundamental de un sistema suelo-estructura, siempre se incrementa, debido a que el conjunto tiene una rigidez menor que la de la estructura desplantada sobre una base rígida.

Respecto al amortiguamiento de la estructura, resulta que puede incrementarse o reducirse.

Pero es conveniente indicar que el tema es muy extenso y entonces se ha decidido en este escrito presentar de manera sencilla, básicamente un modelo de interacción suelo-estructura que se describe a continuación y para toda inquietud de profundizar en el tema se sugiere consultar la referencia 5.

Para fines prácticos, se puede idealizar la interacción suelo estructura como una estructura de un grado de libertad con base rígida y parámetros dinámicos equivalentes, para ser empleados en un modelo que permite cuantificar el periodo fundamental efectivo T_e y el amortiguamiento efectivo ζ , en un modelo de una estructura equivalente cuya respuesta resonante sea la misma que la del sistema real tanto en magnitud como en posición ante una excitación armónica estacionaria de la base.

El modelo matemático empleado se puede observar en la figura 4.2. Está compuesto por una estructura con un grado de libertad en translación horizontal, que se apoya en una cimentación superficial circular rígida con dos grados de libertad (modelo representado en la figura 2.10), desplantada sobre un depósito estratificado horizontalmente (figura 4.1), con base indeformable. En la realidad esta idealización no se cumple, pero resultados de estudios de vibración forzada en un edificio típico de varios pisos con cimentación flexible muestran que la hipótesis de cimentación rígida resulta adecuada para calcular la respuesta dinámica de sistemas suelo-estructura.

El grado de libertad de translación vertical de la cimentación se desprecia porque el componente de aceleración vertical generalmente es pequeño con respecto a los componentes horizontales.

Los grados de libertad correspondientes a torsión no se consideran; éstos pueden ser muy importantes en estructuras irregulares.

Para la solución del problema se procede en forma completamente similar al caso del Capítulo 3, esto es, primero obtener las funciones de impedancia asociadas a la cimentación en estudio y luego con éstas, calcular la respuesta estructural del sistema idealizado con resortes y amortiguadores.

Con lo cual se puede proceder a plantear el sistema de ecuaciones diferenciales que gobierna el movimiento del modelo con tres grados de libertad dado por

$$[M] \{\ddot{U}(t)\} + [C] \{\dot{U}(t)\} + [K] \{U(t)\} = -U_g(t) \{\ddot{M}\} \quad 4.2$$

donde: $\ddot{U}(t)$ es la aceleración del basamento rígido;

$\{\ddot{M}\}^T = \{M_o, M_o+M_c, M_oH_o+M_cH_c\}$ es el vector de masa y

$\{U(t)\}^T = \{\ddot{U}_o, \ddot{U}_c, \ddot{\theta}_c\}$ es el vector de grados de libertad

en donde \ddot{U}_o es la deformación de la estructura, \ddot{U}_c es el desplazamiento de la base de la cimentación y $\ddot{\theta}_c$ es la rotación de la cimentación.

Las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez tienen respectivamente la siguiente forma

$$[M] = \begin{bmatrix} M_o & M_o & M_oH_o \\ M_o & M_o+M_c & M_oH_o+M_cH_c \\ M_oH_o & M_oH_o+M_cH_c & M_oH_o^2+M_cH_c^2+I_o \end{bmatrix} \quad 4-3$$

$$[C] = \begin{bmatrix} C_o & 0 & 0 \\ 0 & C_h & 0 \\ 0 & 0 & C_r \end{bmatrix} \quad 4-4$$

$$[K] = \begin{bmatrix} K_o & 0 & 0 \\ 0 & K_h & 0 \\ 0 & 0 & K_r \end{bmatrix} \quad 4-5$$

La ecuación 4.1 se puede resolver en el dominio de la frecuencia empleando la técnica de la respuesta compleja en la frecuencia, suponiendo un movimiento armónico $\ddot{U}_g(t) = A g e^{i\omega t}$ en

donde A_g es la amplitud de la aceleración del basamento, en el estado estacionario $\{U(t)\} = \{\ddot{U}(\omega)\} e^{i\omega t}$ y por tanto la ecuación 4.2 se reduce a

$$\{[K(\omega) + i\omega[C(\omega)] - \omega^2[M]\} \{\ddot{U}(\omega)\} = -A_g \{\ddot{M}\} \quad 4.6$$

La cual representa un sistema complejo de ecuaciones algebraicas que se puede resolver con cualquiera de los procedimientos de eliminación Gaussiana.

Respuesta debida a excitación arbitraria.

En el caso de sollicitación transitoria se puede tratar como una combinación lineal de movimientos armónicos con diferentes periodos y amplitudes.

El sistema DYS ofrece la opción de analizar la respuesta del modelo descrito para el caso de excitación horizontal arbitraria del terreno de cimentación. Para ello, la excitación del terreno se especifica en la forma de un acelerograma. Existen dos alternativas para solucionar el problema: a) el análisis en el dominio de la frecuencia, el cual implica transformar la excitación mediante transformada de Fourier; b) el análisis paso a paso mediante la integración directa de las ecuaciones de equilibrio mediante alguno de los métodos conocidos (método de Newmark o método de Wilson).

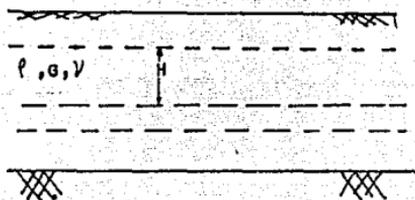


FIG. 4.1 REPRESENTACION DE UNA ESTRATIGRAFIA.

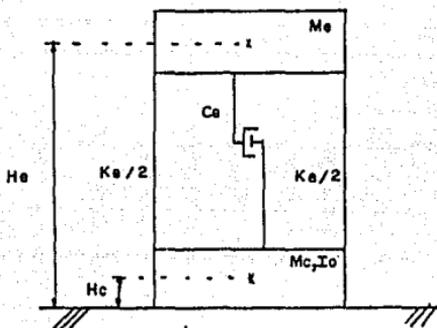


FIG. 4.2 MODELO DE INTERACCION SUELO-ESTRUCTURA.

CAPITULO V

ESTRUCTURA DEL PROGRAMA DE MICROCOMPUTADORA

En este capítulo se muestra la estructura del sistema DYS en forma esquemática.

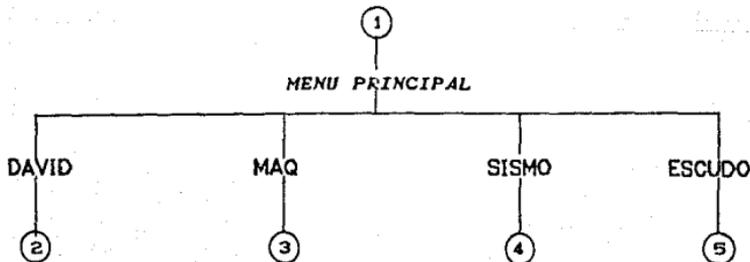
En el Capítulo 6 se presentan reproducciones de las pantallas que aparecen durante el empleo del sistema.

El sistema inicia llamando al subprograma DYS dentro del cual el usuario puede seleccionar alguna de las alternativas mostradas en la pantalla correspondiente al menú principal y en base a esto, se cambia internamente a otro programa de modo que el usuario no tenga que llevar a cabo ninguna interrupción durante su empleo.

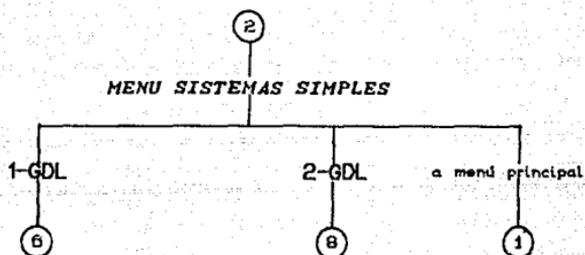
En los diagramas mostrados a continuación se hace uso de la siguiente tipografía:

Tipo de letra:	Se refiere a:
MAQ	nombre del subprograma o subrutina
<i>Opciones</i>	lo que aparece en la pantalla
PT-1	pantalla # 1 incluida en el Capítulo 6
1	conector
<i>menú anterior</i>	la opción seleccionada

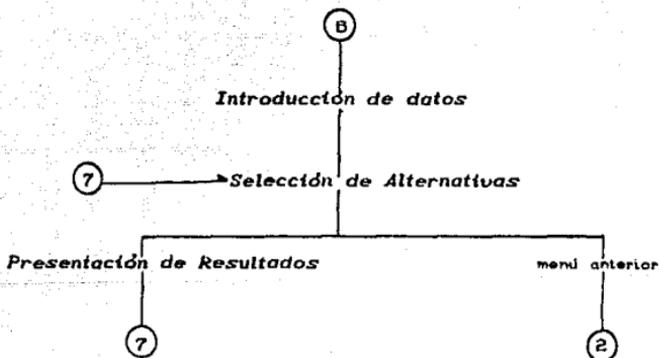
Estructura del Subprograma DYS.



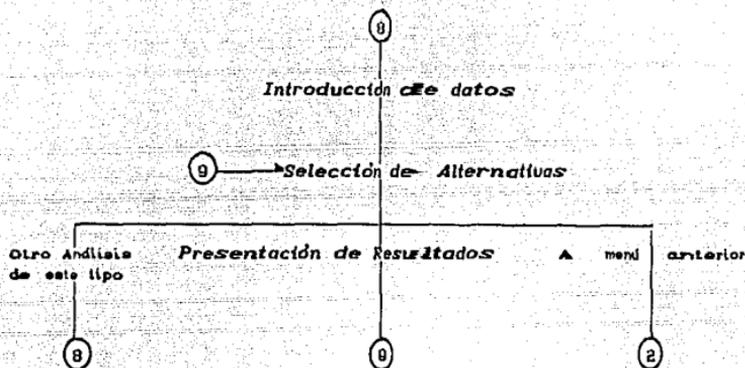
Estructura del Subprograma DAVID.



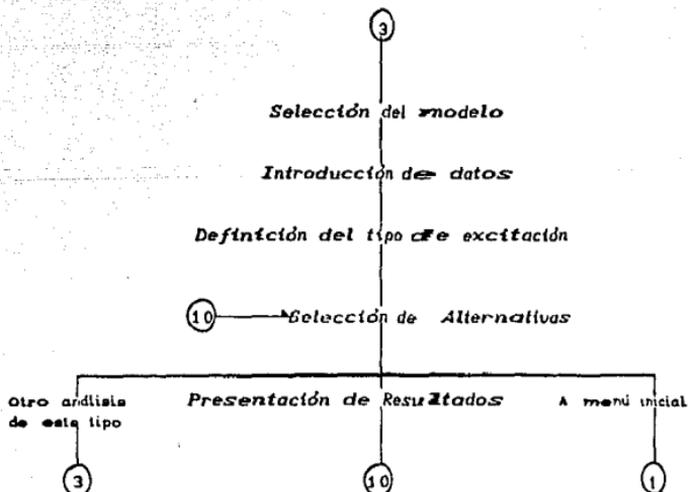
Estructura de la subrutina 1-GDL



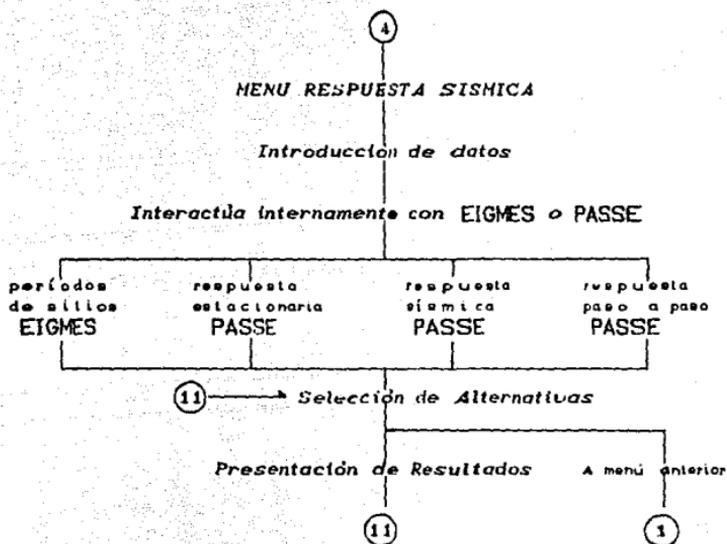
Estructura del Subprograma ZGD.



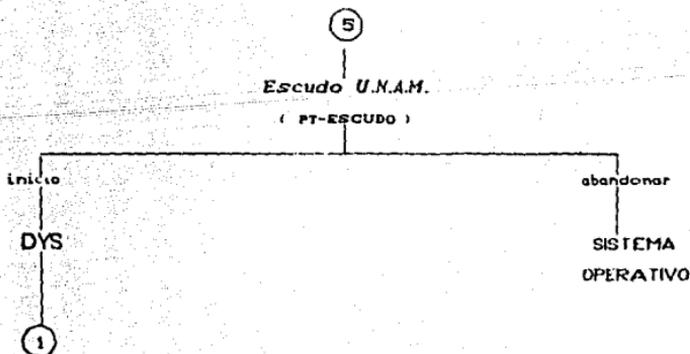
Estructura del Subprograma MAQ.



Estructura del Subprograma SISMO.



Estructura del Programa ESCUDO.



CAPITULO VI

MANUAL DEL USUARIO

Se describe a continuación la forma en que se debe usar el sistema DYS para el análisis de sistemas dinámicos como los discutidos anteriormente en los Capítulos 2 a 4.

Previamente a las instrucciones de uso, se mencionan algunos de los requerimientos del sistema, así como las características y limitaciones del sistema.

Requerimientos del sistema.

Se necesita una microcomputadora con 256 Kb de memoria RAM como mínimo y monitor de alta resolución para visualizar gráficos. Es deseable que el sistema de microcomputadora cuente con disco duro para hacer uso de manera rápida y eficiente del sistema DYS.

Características generales.

El sistema está compuesto por varios programas o subprogramas. La selección de opciones se hace con base en menús de alternativas.

Se ofrece como opción la creación de archivos de resultados (no gráficos) para uso externo al sistema DYS.

En el sistema DYS, no se hace uso de ningún sistema de unidades en particular, por lo que el usuario deberá emplear un sistema de unidades consistente para el problema en cuestión.

Limitaciones.

Si se desea analizar la respuesta de un sistema dentro de un intervalo grande de tiempo, o de frecuencia, es aconsejable llevar a cabo el análisis en varias etapas con el fin de no pasar por alto las características de la respuesta dentro de intervalos de tiempo menores.

La aparición de gráficos en la pantalla puede no ser instantánea y esto dependerá de la rapidez del microprocesador del sistema de microcomputadora que se utilice.

En algunos casos y debido a las limitaciones del conjunto de caracteres que maneja el lenguaje QuickBASIC se recurre a abreviaturas que fácilmente se relacionan con la notación empleada en los capítulos anteriores.

INSTRUCCIONES DE USO.

Se presupone que el usuario tiene nociones básicas de manejo de microcomputadoras por lo cual este manual emplea el lenguaje común en éstas y se entiende que el interesado sabrá iniciar una sesión en el equipo que empleará para este estudio.

Para el empleo del sistema, se sugiere tener identificados los casos de problemas por analizar, así como los parámetros involucrados para ser introducidos como datos, de modo que se tiene que visualizar todo esto con ayuda de los capítulos anteriores de esta tesis.

A continuación se utiliza [RET] para indicar que se debe oprimir la tecla retorno y RT-# hace referencia a la pantalla número # que se presenta en este Capítulo.

El usuario debe iniciar la sesión, (una vez que en la microcomputadora se encuentra el disco con los programas del sistema DYS) tecleando *DYS* [RET]. Al pronto aparecerá un

escudo de la UNAM, (PT-ESCUDO), y cuando termine de formarse en pantalla teclear [RET]. Con lo cual aparecerá el MENU PRINCIPAL, con las opciones de análisis que se muestran en la pantalla PT-1.

De este punto en adelante, el sistema mediante menús y en forma interactiva, solicitará del usuario la información necesaria para definir el problema que desea analizar, así como el tipo de resultados que requiere obtener.

En el caso de que se desee abandonar por completo la sesión, se debe ir hacia niveles superiores de menús hasta llegar al MENU PRINCIPAL, dentro de éste, alternativa 4 hace que se muestre en pantalla el escudo con el cual inició la sesión y al finalizar [RET].

A continuación se presentan ejemplos para los casos más comunes de los temas expuestos anteriormente.

EJEMPLO # 1. *Vibración libre con un grado de libertad.*

Sea un sistema de un grado de libertad como el mostrado en la figura 2.3 con $m=1$, $k=1$ y $u_0=1$.

En la pantalla:

PT-1
PT-2
PT-3
PT-4
PT-5
PT-6

Teclear

1
4
TAL COMO APARECE
8
AL FINALIZAR [RET]
9

Con la anterior selección se retorna a PT-2 y se puede continuar con el ejemplo # 2.

EJEMPLO # 2. *Vibración forzada con un grado de libertad.*

Para un sistema como el mostrado en la figura 2.5 con $m=5$, $k=10$, $c=1$, $P_0=1$, $\omega_p=3$, $u_0=1$ y $v_0=0$; se quiere obtener la gráfica de desplazamientos durante los primeros 20 segundos de movimiento.

En la pantalla:

PT-2
 PT-6
 PT-4
 PT-7
 PT-4

Teclar

2
 TAL Y COMO APARECE
 2
 AL FINALIZAR [RET]
 9

Con la anterior selección se retorna a PT-2 y se puede continuar con el ejemplo # 3.

EJEMPLO # 3, Vibración forzada, carga arbitraria.

Se desea repetir el problema del ejemplo # 2 definiendo la carga como si fuese arbitraria, para ello se define un archivo externo con la función $P(t)=\text{sen}3t$ valuada a cada 0.1 s.

En la pantalla:

PT-2
 PT-8
 PT-9
 PT-10
 PT-11
 PT-10

Teclar

3
 TAL Y COMO APARECE
 TAL Y COMO APARECE
 5
 AL FINALIZAR [RET]
 6

Con la anterior selección se retorna a PT-2 y se puede continuar con el ejemplo # 4.

EJEMPLO # 4, Vibración libre, dos grados de libertad.

Sea un sistema de 2-GDL como el mostrado en la figura 2.7, con los siguientes datos: $m_1=4$, $m_2=4$, $k_1=5$, $k_2=5$, $u_{10}=2$, $u_{20}=1$, $v_{10}=1$ y $v_{20}=0$.

Se desea conocer las condiciones del movimiento para 5 segundos después de iniciado el movimiento.

En la pantalla:

PT-2
 PT-12
 PT-13
 PT-14
 PT-13
 PT-2

Teclar

4
 TAL Y COMO APARECE
 0
 AL FINALIZAR [RET]
 10
 6

Con la anterior selección se retorna a PT-1 y se puede continuar con el ejemplo # 5.

EJEMPLO # 5, Cimentación para maquinaria vibratoria desplantada sobre un semiespacio.

Sea un sistema como el mostrado en la figura 3.2, con los siguientes datos: $m=58$, $I_0=130$, $R=2$, $H_c=2.2$, $G=1000$, $\rho_0=0.18$, $\zeta=0.05$, $\nu=.33$, con una excitación dada según $d_{1m}=0.01$, $d_{2m}=0.02$, $\omega=2$ y $k=0$.

Se desea obtener el espectro de respuesta para el modo de vibración horizontal-cabeceo.

En la pantalla:	Teclear
PT-1	2
PT-19	1
PT-20	TAL Y COMO APARECE
PT-21	TAL Y COMO APARECE
PT-22	2
PT-23	AL FINALIZAR [RET]
PT-22	6

Con la anterior selección se retorna a PT-1 y se puede continuar con el ejemplo # 6.

EJEMPLO # 6, Periodo fundamental de depósitos estratificados.

Sea una estratificación como la mostrada en la figura 4.2, con los siguientes datos:

Estrato	Espesor	Subdivisiones	ρ	G
1	4	1	0.1223	599
2	27	5	0.1223	688
3	3	1	0.1223	1480
4	4	1	0.1223	1480

Se desea visualizar los periodos fundamentales de vibración de la estratigrafía.

En la pantalla:	Teclear
PT-1	3
PT-20	1
PT-21	TAL Y COMO APARECE
PT-22	AL FINALIZAR [RET]
PT-20	5
PT-1	4

Con la última secuencia se abandonaría la sesión y la microcomputadora queda con el sistema operativo listo para uso.

PANTALLAS



PT-ESCUDO

POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU ■

FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM

DYS

David Yáñez Santillán

PT-1

MENU PRINCIPAL

Analisis de:	Seleccionar:
Sistemas simples	1
Cimentaciones para maquinaria vibratoria	2
Respuesta sísmica de cimentaciones	3
Abandonar el programa	4

TECLEA TU OPCION ? ■

FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM. DINDYS David Yáñez Santillan

MENU SISTEMAS SIMPLES

Respuesta de:	Seleccionar:
SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD	
Vibración libre	1
Vibración forzada (carga armónica)	2
Vibración forzada (carga arbitraria)	3
SISTEMAS DE DOS GRADOS DE LIBERTAD	
Vibración libre	4
Vibración armónica establecida	5
Regresar al menú principal	6

TECLEA TU OPCION ? █

PT-2

FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM. DINDYS David Yáñez Santillan

INTRODUCCION DE DATOS

Masa del cuerpo	m	(F _s /L).....=?	1
Constante del resorte	k	(F/L).....=?	1
Constante de amortiguamiento	c	(F/L).....=?	1
Posición inicial	U ₀	(L).....=?	1
Velocidad inicial	U ₀	(L/s).....=?	1

Tiempo inicial de estudio	t ₁	(s).....=?	15
Tiempo final de estudio	t ₂	(s).....=?	15

Continuar si/no (B/L)? █

PT-3

FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM. DINDYS David Yáñez Santillan

ALTERNATIVAS DE ESTUDIO

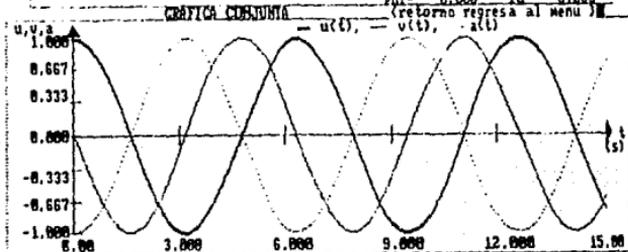
Crear archivo de resultados tabulados	0
Condiciones particulares para un tiempo	1
Resultados tabulados de los desplazamientos	2
" " de la velocidad	3
" " de la aceleración	4
Gráfica de desplazamientos	5
" de velocidad	6
" de aceleración	7
Conjunta	8
Regresar al menú anterior	9

TECLEA TU OPCION ? █

PT-4

FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM. DINDYS David Vañez Santillan

$m=1.000$ $k=1.000$ $c=0.000$ $U_0=1.000$ $U_0=0.000$
 $U_{max}=1.000$ $v=1.000$ $C_0=2.000$ $z=0.000$ $w_d=1.000$
 $\phi_0=0.000$ $T_d=6.283$



PT-5

FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM. DINDYS David Vañez Santillan

INTRODUCCION DE DATOS

Masa del cuerpo m (Kg/L).....? 5
 Constante del resorte k (F/L).....? 10
 Constante de amortiguamiento c (Fs/L).....? 1
 Posicion inicial U_0 (L).....? 0
 Velocidad inicial V_0 (L/s).....? 0
 Magnitud de la fuerza aplicada P (F).....? 1
 Frecuencia de aplicacion ω_p (rad/s).....? 3
 Tiempo inicial de estudio t_1 (s).....? 0
 Tiempo final de estudio t_2 (s).....? 4

Continuar si/no (0/1)?

PT-6

FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM. DINDYS David Vañez Santillan

$m=5.000$ $k=10.000$ $c=1.000$ $P=1.000$ $\omega_p=3.000$
 $U_{est}=-0.828$ $v=1.414$ $C_0=14.142$ $z=0.871$ $w_d=1.414$
 $U_{max}=0.873$ $\beta=2.121$ $\phi_0=3.056$ $T_d=4.454$

t	u(t)	v(t)	a(t)	u(t)	v(t)	a(t)	u(t)	v(t)	a(t)
0.00	0.0000	0.00	0.0000	1.62	0.0651	2.47	-0.0407	3.24	-0.0127
0.05	0.0000	0.00	0.0400	1.68	0.0687	2.49	-0.0458	3.30	-0.0206
0.10	0.0001	0.32	0.0453	1.73	0.0754	2.54	-0.0499	3.35	-0.0246
0.15	0.0004	0.37	0.0503	1.78	0.0843	2.59	-0.0532	3.41	-0.0286
0.22	0.0018	1.03	0.0552	1.84	0.0925	2.65	-0.0556	3.46	-0.0314
0.27	0.0019	1.08	0.0596	1.89	0.0952	2.70	-0.0578	3.51	-0.0343
0.32	0.0032	1.14	0.0637	1.95	0.0974	2.76	-0.0575	3.57	-0.0318
0.38	0.0049	1.19	0.0671	2.00	0.0993	2.81	-0.0572	3.62	-0.0298
0.43	0.0071	1.24	0.0699	2.05	0.0998	2.86	-0.0560	3.68	-0.0283
0.49	0.0098	1.30	0.0719	2.11	0.0992	2.92	-0.0541	3.73	-0.0273
0.54	0.0130	1.35	0.0731	2.16	0.0966	2.97	-0.0515	3.78	-0.0269
0.59	0.0157	1.41	0.0734	2.22	0.0916	3.03	-0.0484	3.84	-0.0270
0.65	0.0200	1.46	0.0728	2.27	0.0813	3.08	-0.0449	3.89	-0.0275
0.70	0.0253	1.51	0.0712	2.32	0.0684	3.14	-0.0410	3.95	-0.0285
0.76	0.0301	1.57	0.0690	2.38	0.0543	3.19	-0.0369	4.00	-0.0290

tecla retorno para regresar al menu anterior

PT-7

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM. DIMDYS David Vazex Santillan

INTRODUCCION DE DATOS

Masa del cuerpo m (Fs/L)....? 5
Constante del resorte k (F/L)....? 10
Constante de amortiguamiento c (Fs/L)....? 1

Tiempo inicial de estudio t1 (s).....? 0
Tiempo final de estudio t2 (s).....? 4
Incremento de tiempo Δt (s).....? .1

Continuar si/no (0/1)?

PT-8

FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM. DIMDYS David Vazex Santillan

Quieres introducir historia de carga en forma interactiva o en
lectura de archivo externo (0/1)?
Como se llama el archivo de datos? KEL.PRN
Numero de puntos para definir historia de carga? 41

Se pueden emplear
Metodo 1, integral simple
Metodo 2, integral trapezoidal
Metodo 3, Metodo de Simpson

Cual se desea? 3

Esta correcto (0) o reiniciar esta introduccion (1)?

PT-9

FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM. DIMDYS David Vazex Santillan

ALTERNATIVAS DE ESTUDIO

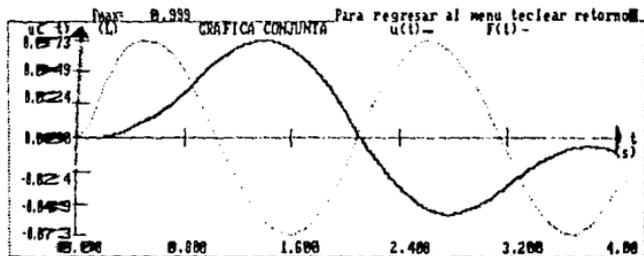
Crear archivo de resultados tabulados 0
Condiciones particulares para un tiempo 1
Resultados tabulados de los desplazamientos 2
Grafica de desplazamientos 3
Visualizar historia de carga 4
Visualizar grafica conjunta (u, P vs t) 5
Regresar al menu anterior 6

TECLEA TU OPCION ?

PT-10

FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM. DINDYS David Yáñez Santillan

m= 5.000 k= 18.000 c= 1.000
 $\omega_n = 1.914$ $\zeta = 14.142$ $\gamma = 0.071$ $\omega_d = 1.411$

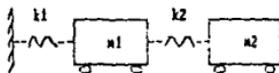


PT-11

FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM. 2GDL David Yáñez Santillan

2 Grado de libertad; Vibracion libre

Tipo II

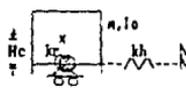


datos del sistema

m1 (Kg)? 4
 m2 (Kg)? 4
 k1 (N/m)? 5
 k2 (N/m)? 5
 Condiciones iniciales
 u1(0) (L)? 2
 u2(0) (L)? 1
 v1(0) (L/s)? 0
 v2(0) (L/s)? 0

PT-12

Tipo II



Que sistema se desea analizar (1/2)? 1

FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM. 2GDL David Yáñez Santillan

ALTERNATIVAS DE ESTUDIO

Respuesta para un instante t 0
 Frecuencias naturales y formas modales 1
 Resultados tabulados de los desplazamientos 2
 " " de la velocidad 3
 " " de la aceleracion 4
 Grafica de desplazamientos 5
 " de velocidad 6
 " de aceleracion 7
 Guardar resultados tabulados en archivo 8
 Realizar otro analisis de 2gdl 9
 Regresar al menu anterior 10

Selección? 1

PT-13

FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM.		2GDL	David Yáñez Santillan	
w1= 4.000	k1= 5.000	Uo1= 2.000	Uo1= 0.000	
w2= 4.000	k2= 5.000	Uo2= 1.000	Uo2= 0.000	
w1= 0.691	w11= 1.889			

PT-14

Condiciones particulares del tiempo t= 5.000		
desplazamientos	u1= -1.8881	u2= -0.9652
velocidades	v1= -0.4575	v2= 0.7530
aceleraciones	a1= 3.4937	a2= -1.1436

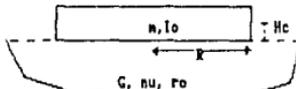
Para regresar al menu teclear retorno

FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM.		MAQDYS	David Yáñez Santillan
-------------------------------	--	--------	-----------------------

Se puede estudiar alguno de los dos casos mostrados

Para una cimentación desplantada superficialmente sobre un SEMIESPACIO

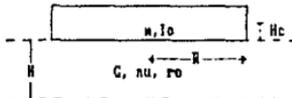
MODELO 1



PT-15

Para una cimentación desplantada superficialmente sobre un ESTRATO de espesor H

MODELO 2

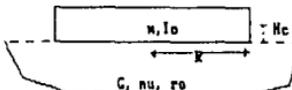
Que tipo de estudio se desea?

FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM.		MAQDYS	David Yáñez Santillan
-------------------------------	--	--------	-----------------------

PT-16

Para una cimentación desplantada superficialmente sobre un SEMIESPACIO

MODELO 1



masa de la cimentación	w	($\rho_s 2/L$)...? 58
momento de inercia	lo	($\rho_s 2$)...? 138
radio de la cimentación	R	(L).....? 2
altura al centro de masa	Hc	(L).....? 2.2
Tipo de excitación (1=VERTICAL; 2=HORIZONTAL-CABECED)?	2	2
modulo de rigidez al cortante	G	($F/L2$)...? 1000
masa especifica del suelo	ro	($\rho_s 2/LA$)...? .18
amortiguamiento interno	zs	(1).....? .05
modulo de Poisson	nu	0.0,0.33,0.45,0.5? .33

FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM.

MADYS

David Valdez Santillan

Sistema de cargas
 Las fuerzas excitadoras son funcion de la frecuencia $\omega = \Omega / \omega_1 = 1$
 $P = d_1 \omega \exp i(\omega t)$; $M = d_2 \omega \exp i(\omega t)$
 $d_1 \omega$ es el producto del brazo de palanca por la masa excentrica
 $d_2 \omega$ es el producto del brazo de palanca por la masa excentrica
 ϕ es el angulo de fase)
 $d_1 \omega$ (FL).....? 81
 $d_2 \omega$ (FL).....? 82
 ω (rad/s).....? 2
 ϕ (rad).....? 9

PT-17

Intervalo de tiempo (s).....? 5

continuar, reiniciar datos (B/I)? █

FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM.

MADYS

David Valdez Santillan

Modo de vibracion del tipo horizontal-cabeceo

Para la alternativa indicada

Teclar

Resultados tabulados de desplazamientos	8
Grafica de desplazamientos	1
Espectro de respuesta y funciones de impedancia	2
Frecuencias naturales y formas modales	3
Grabar archivo de desplazamientos	4
Realizar otro analisis de este tipo	5
Retornar al menu principal	6

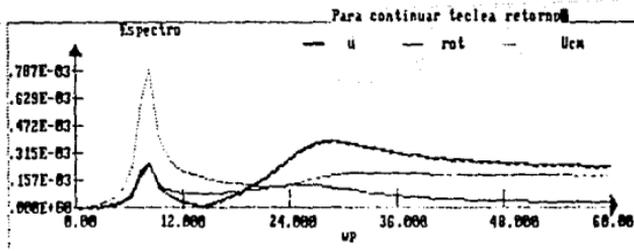
Cual es la opcion deseada ? █

PT-18

FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM.

MADYS

David Valdez Santillan



PT-19

FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM. SISDYS David Vañez Santillan

MEMO RESPUESTA SISMICA DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES

Para la opcion: Seleccionar:

Periodo fundamental de depositos estratificados 1
 Respuesta debida a excitacion armonica del terreno 2
 Respuesta debida a sismo
 a) integracion directa 3
 b) analisis en el dominio de la frecuencia 4
 Regresar al menu principal 5

TECLEA TU OPCION ? █

PT-20

FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM. SISDYS David Vañez Santillan

Periodo fundamental de depositos estratificados

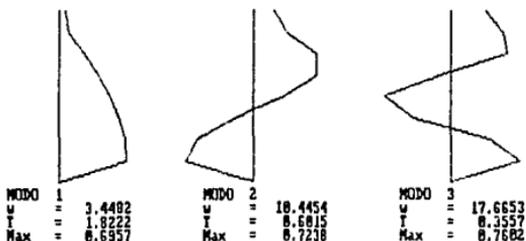
i	Estrato i	H (L)	Numero de estratos MS	(n)? 4	
				RHO Fs2/L4	G F/L2
2	1	9.4	9.1	9.1223	9.599
	2	9.27	9.5	9.1223	9.688
	3	9.3	9.1	9.1223	9.1488
	4	9.4	9.1	9.1223	9.1488
i					
n					

PT-21

R: espesor del estrato MS: numero de subdivisiones del mismo
 RHO: densidad especifica G: modulo de rigidez al cortante
 Continuar si/no B/1? █

FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM. SISDYS David Vañez Santillan

Periodos fundamentales de los depositos estratificados



PT-22

Para continuar teclear retorno█

CAPITULO VII

CONCLUSIONES

Se presenta el sistema interactivo de microcomputadora DYS para el análisis de la respuesta dinámica de sistemas simples de 1 y 2 grados de libertad y de cimentaciones superficiales.

Las características más importantes del sistema DYS son:

- Entabla un diálogo interactivo con el usuario.
- Cuenta con capacidad para resolver una variedad importante de problemas.
- Posee capacidad de graficación automática.
- Ofrece opciones para crear archivos con reporte de resultados.

La variedad de problemas que pueden resolverse son:

Análisis de Sistemas de 1GDL.

- ‡ Vibración libre
- ‡ Respuesta ante cargas armónicas
- ‡ Respuesta a cargas arbitrarias, resolución de la Integral de Duhamel con los métodos Simple, Trapezoidal y de Simpson.

Análisis de Sistemas de 2GDL.

- ‡ Valores y vectores característicos
- ‡ Vibración libre sin amortiguamiento
- ‡ Respuesta armónica establecida
- ‡ Cálculo de espectros de respuesta.

Análisis de cimentaciones para maquinaria vibratoria.

- * Sobre un semiespacio
- † Sobre un estrato
- ‡ Modo horizontal-cabeceo o vertical.
- ‡ Cálculo de espectros de respuesta.

Análisis de los modos cortante, (vectores y valores característicos), de suelos estratificados.**Análisis de sistemas suelo-cimentación-estructura.**

- † Respuesta estacionaria
- ‡ Respuesta a cargas arbitrarias, (sismos) con los métodos del análisis en el dominio de la frecuencia o de Fourier y método de integración directa.

Por lo cual el sistema DYS es útil para los alumnos de las asignaturas de Mecánica II o Cinemática y Dinámica así como para Dinámica de Suelos de la Facultad de Ingeniería de la UNAM así como para los cursos básicos de Dinámica de estudios de posgrado.

Finalmente este trabajo puede retomarse para incluir o adaptar rutinas de graficación especial para presentar la respuesta del sistema con animación o servir de base para la creación de un Sistema Experto por ejemplo para el análisis dinámico de maquinaria vibratoria.

REFERENCIAS

- 1 Ottensmann, John R. (1990), "QuickBASIC", Manual de bolsillo. 1ª edición, Addison-Wesley Iberoamericana, México, D.F.
- 2 Veletsos and Verbic, (1973), "Vibration of Viscoelastic Foundations", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 2, 87-102, U.S.A.
- 3 Maison and Neuss, (1983), "SUPER-ETABS", Report to the National Science Foundation, Berkeley, California, USA.
- 4 García Ranz F y Avilés J., (1990), "EIGMES". Programa para el cálculo de cortante de medios elásticos estratificados, Instituto de Investigaciones Eléctricas. Reporte interno, Cuernavaca, Mor., México.
- 5 García Ranz F, Avilés J. y Reséndiz N., (1989), "Respuesta Sísmica de Cimentaciones", Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Acapulco, Gro., México.
- 6 García Ranz, Avilés, (1989), "Programa para el análisis de sistemas Suelo-Estructura", Instituto de Investigaciones Eléctricas. Reporte interno, Cuernavaca, Mor., México.

BIBLIOGRAFIA

- 1 Bowles, Joseph E. (1977), "Foundation Analysis and Design", 1st edition, McGraw-Hill, New York.
- 2 Memorias de la X Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, (1980), Dinámica de Suelos, Morelia, Mich., México.
- 3 "Soil Dynamics, Deep Stabilization, and Special Geotechnical Construction", (1983), Department of the Navy, Alexandria, Virginia, USA.
- 4 Beer y Johnston, "Mecánica vectorial para ingenieros", (1988), cuarta edición, McGraw-Hill, México, D.F.