

**ESTUDIO PARAMÉTRICO DE ESTRUCTURAS AISLADAS
EN LA BASE CON AMORTIGUAMIENTO DE MASA
SOMETIDAS A SOLICITACIONES SÍSMICAS**

Ing. Jorge Ricaurte Cárcamo

Trabajo de Grado presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela para
optar al título de Magíster Scientiarum en
Ingeniería Sismorresistente

Caracas, Febrero de 2006

RESÚMEN

En este trabajo se estudia la eficiencia, en término de las derivas, para el control de las vibraciones de modelos con sistema híbrido sometidos a excitaciones sísmicas. El sistema híbrido combina aislamiento en la base y amortiguamiento de masa y los parámetros más importantes seleccionados para este estudio son: el factor de aislamiento, el amortiguamiento de masa y el tipo de suelo.

Los distintos modelos a considerar en este trabajo, se someten a las solicitaciones de los espectros de la norma venezolana para edificaciones sismorresistentes Covenín Mindur 2001. Los modelos se estudian para cuatro tipos de suelos (S1, S2, S3 y S4) y para cuatro configuraciones estructurales como sigue:

Aislamiento en la base

Amortiguamiento de masa en el tope de los modelos

Sistema híbrido 1: Aislamiento en la base más amortiguamiento de masa en el tope de los modelos.

Sistema híbrido 2: Aislamiento en la base más amortiguamiento de masa en la base de los modelos.

Para este estudio se desarrollaron algoritmos por medio del software MATLAB y se realizaron verificaciones con el software SAP2000. Los desplazamientos y las derivas máximas de la respuesta estructural se normalizaron en relación a la estructura básica (sistema que no cuenta con ningún control de vibraciones) y se generaron gráficos en tres dimensiones que permiten detectar las zonas en que se producen mayores reducciones en la respuesta de la estructura.

Entre las conclusiones más importantes tenemos:

- 1. El sistema de control de vibraciones híbrido para estructuras rígidas o flexibles cimentadas en suelo S4 no funciona tan eficientemente como en estructuras rígidas o flexibles cimentadas en suelo S1.**
- 2. El sistema híbrido para el control de vibraciones en las estructuras muy rígidas no funciona eficientemente.**
- 3. El sistema de control de vibraciones híbrido para las estructuras estudiadas de varios pisos (desde 1 piso a 20 pisos) permite mayores reducciones en la respuesta de las estructuras que aquellas que utilicen sistemas de reducción de vibraciones por separado.**
- 4. El número de grados de libertad incide en los resultados cuando se usa un sistema de control de vibraciones híbrido, es decir, son diferentes los resultados para un sistema estructural básico de un GDL, que para un sistema estructural de NGDL para igual periodo.**



DEDICATORIA

A DIOS POR SER EL CREADOR DE TODO EL UNIVERSO

Y POR HABER CREADO AL SER HUMANO A SU IMAGEN

Y SEMEJANZA

**A MI ESPOSA ROMY POR HABERME ESTIMULADO Y APOYADO
A REALIZAR ESTE TRABAJO**

A MIS HIJOS

**A LA MEMORIA DE MIS PADRES, MIS HERMANOS Y A MI
FAMILIA**



AGRADECIMIENTOS

**Al Profesor Ricardo Bonilla por su constante ayuda,
dedicación y estímulo para la culminación de este trabajo.**

**Al Profesor Oscar López quien me orientó en todo
momento y siempre estuvo dispuesto a ayudarme.**

**A los Profesores y alumnos del Instituto Universitario de
Tecnología, especialmente a los Profesores del
Departamento de Construcciones Civiles y a todas aquellas
personas que directa o indirectamente me han apoyado a
realizar este trabajo.**

Jorge Ricaurte Cárcamo

INDICE

Pág.

CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1	Identificación del trabajo.....	1
1.2	Antecedentes.....	2
1.3	Objetivos.....	4
1.3.1	Objetivo general.....	4
1.3.2	Objetivos específicos.....	5
1.4	Hipótesis.....	5

CAPITULO 2 METODOLOGÍA

2.1	Selección de los modelos matemáticos.....	6
2.2	Formas espectrales elásticas tipificadas de los terrenos de fundación.....	9
2.3	Análisis dinámico de los modelos.....	10
2.4	Parámetros considerados en esta investigación.....	11
2.5	Definición de una estrategia de representación gráfica de los resultados del análisis.....	13

CAPITULO 3 TEORÍA SOBRE LAS ESTRUCTURAS AISLADAS

3.1	Introducción.....	15
3.2	Definiciones.....	16
3.2.1	Control Activo.....	16
3.2.2	Control Pasivo.....	16
3.2.3	Control híbrido.....	16
3.2.4	Concepto de aislamiento sísmico de las estructuras.....	16
3.2.5	Modelado de la estructura aislada.....	18
3.3	Estabilidad del aislador.....	22
3.4	Algunas particularidades de los aisladores.....	27
3.5	Factibilidad de rehabilitación de estructuras.....	29

CAPITULO 4 ESTRUCTURAS CON AMORTIGUAMIENTO DE MASA

4.1	Introducción.....	30
4.2	Estudio paramétrico analítico.....	32

CAPITULO 5 DESARROLLO DE UN PROGRAMA EN MATLAB PARA EL CÁLCULO DE LOS PARAMETROS

5.1	Introducción.....	40
5.2	Ecuaciones del movimiento dinámico usadas en el programa hibps.....	40
5.3	Esquema y descripción de los bloques del programa hibps.....	43

CAPITULO 6 ANÁLISIS DINÁMICO DE SISTEMAS HÍBRIDOS CON ESTRUCTURA BÁSICA DE UN PISO

6.1	Introducción.....	49
6.2	Características geométricas y físicas del modelo.....	49
6.2.1	Análisis del Modelo 1.....	53
6.2.2	Análisis del Modelo 2.....	53
6.2.3	Análisis del Modelo 3.....	54
6.2.4	Análisis del Modelo 4.....	54
6.3	Comentarios de los resultados.....	66
6.3.1	Efecto del suelo en la respuesta del sistema híbrido.....	66
6.3.2	Efecto de la rigidez de la estructura en la respuesta del sistema híbrido...	67
6.3.3	Sistemas con amortiguamiento de masa en el tope.....	67
6.3.4	Sistemas con amortiguamiento de masa en la base.....	67
6.3.5	Reducción de las derivas del modelo híbrido respecto a las derivas del modelo Básico de un piso.....	67

CAPITULO 7 ANÁLISIS DINÁMICO DE SISTEMAS HÍBRIDOS CON ESTRUCTURA BÁSICA DE VARIOS PISOS

7.1	Introducción.....	70
-----	-------------------	----

7.2	Características geométricas y físicas de los modelos.....	70
7.2.1	Resultados de los Modelos híbridos.....	71
7.2.2	Relación del promedio de resultados del modelo híbrido de 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 grados de libertad con periodo fundamental del modelo básico de 1 segundo con respecto al promedio de resultados de los modelos híbridos de 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 grados de libertad con periodo fundamental del modelo básico de 0.5 segundos...	77
7.2.3	Relación del promedio de resultados del modelo híbrido de 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 grados de libertad con periodo fundamental del modelo básico de 1 segundo con respecto al promedio de resultados de los modelos híbridos de 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 grados de libertad con periodo fundamental del modelo básico de 1.5 segundos.....	77
7.3	Sistemas híbridos para estructuras básicas con periodos $T \geq 0.5$ seg.	82

CAPITULO 8 EJEMPLOS DE APLICACIÓN

8.1	Introducción.....	86
8.2	Características geométricas y físicas del modelo.....	86
8.3	Características de la excitación sísmica usada en el programa hibps.....	88
8.3.1	Análisis de la respuesta elástica para el modelo básico de 4 pisos.....	89
8.3.2	Análisis de la respuesta elástica para el modelo de base aislada con masa auxiliar en el tope con espectro para suelo S1.....	91
8.3.3	Análisis de la respuesta elástica para el modelo de base aislada con masa auxiliar en la base con espectro para suelo S1.....	93
8.3.4	Análisis de la respuesta elástica para el modelo de base aislada con masa auxiliar en el tope con espectro para suelo S4.....	96
8.3.5	Análisis de la respuesta elástica para el modelo de base aislada con masa auxiliar en la base con espectro para suelo S4.....	96

8.3.6	Tablas de resultados de las derivas máximas de los modelos híbridos.....	97
8.3.7	Combinación ideal de los resultados de los modelos híbridos con péndulo superior para el caso de suelos S1 y S4.....	100
8.3.8	Combinación ideal de los resultados de los modelos híbridos con péndulo superior para el caso de suelos S1 y S4.....	100

CAPITULO 9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1	Conclusiones generales.....	102
9.2	Conclusiones y recomendaciones sobre sistemas de varios pisos.....	103
9.3	Conclusiones sobre el ejemplo numérico realizado.....	104

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....	105
--	------------

ANEXOS.....	107
--------------------	------------

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO

Una gran parte de la población mundial vive en regiones de peligro sísmico de variada intensidad y variada frecuencia de ocurrencia. Los terremotos causan pérdidas significativas de vidas y daños a la propiedad cada año.

Venezuela es un país que presenta muchas fallas tectónicas activas, entre las cuales destacan las del sistema Boconó-San Sebastián-El Pilar, con velocidades de desplazamientos del orden de 1cm/año⁷. La placa tectónica del Caribe y la placa tectónica de Suramérica generan movimientos relativos entre ellas, que dan origen a muchos sismos de intensidad moderada y alta, encontrándose regiones venezolanas densamente pobladas cercanas a la zona de contacto entre esas dos placas. Es por esta razón que se debe tomar en cuenta un buen diseño sismorresistente de las obras de Ingeniería Civil y controlar las vibraciones sísmicas en las estructuras.

Muchas construcciones sismorresistentes se han desarrollado durante años con el fin de mitigar el efecto de sismos sobre las edificaciones y obras civiles potencialmente vulnerables. Recientemente se han estudiado y desarrollado tecnologías para el aislamiento sísmico.

En los últimos años se han desarrollado dispositivos y sistemas para controlar las vibraciones sísmicas en las estructuras, con el objetivo de reducir los daños y dificultades operativas en ellas, como consecuencia de la ocurrencia de terremotos. Estos dispositivos, llamados aisladores sísmicos, desacoplan la estructura, y/o sus contenidos, de daños potenciales inducidos por terremotos. Este desacople se debe

al incremento de la flexibilidad del sistema por la incorporación de elastómeros en la base y en algunos casos se incrementa el amortiguamiento del sistema¹.

El presente trabajo pretende estudiar la efectividad de los sistemas con amortiguamiento de masa en las estructuras sujetas a vibraciones sísmicas y estudiar también un sistema reductor de vibraciones híbrido que combina aislamiento en la base y amortiguadores de masa en las estructuras aisladas.

1.2 ANTECEDENTES

En la primera mitad del siglo XX tuvo un mayor desarrollo la teoría de sistemas lineales y su aplicación en el campo de vibración, particularmente en la dinámica estructural. Fue durante la segunda guerra mundial que tuvo un mayor desarrollo y aplicación de tecnologías tales como aislamiento, absorción y amortiguamiento de vibraciones a estructuras de aeronaves. La comunidad de ingeniería estructural adoptó primero esta tecnología en la década de 1960 y desde entonces se han buscado diferentes vías como por ejemplo el aislamiento de base para estructuras y puentes de baja y mediana altura. El objetivo es montar la estructura sobre una base lo suficientemente flexible que filtre las altas frecuencias de los movimientos del suelo y alargue el período de vibración natural ¹².

En los últimos quince años, los investigadores y los proyectistas han mejorado substancialmente el estado del arte y los códigos han cambiado en áreas tales como filosofía de diseño, criterios de desempeño, caracterización de sismos, efectos de sitio, análisis inelástico, procedimientos de diseño y sistemas protectores⁹.

Las muchas estructuras que han respondido satisfactoriamente a temblores severos atestiguan los logros de la Ingeniería Sísmica en la elevación de la seguridad y el control de los daños. Sin embargo, seguimos diseñando para un temblor único, y aceptamos daños significativos a cambio de reducciones en los costos iniciales y de mantenimiento. El consenso es que debemos y podemos hacerlo mejor.

Los criterios de diseño sísmico basados en índices de desempeño pronto reemplazarán a los basados en requisitos de rigidez y resistencia. Los métodos rutinarios de diseño en la práctica considerarán explícitamente el control de daños en

elementos estructurales y no estructurales, la protección de contenidos y la reducción de pérdidas económicas directas e indirectas. En vez de verificar el cumplimiento de los requisitos de seguridad y desempeño para un temblor único, tomaremos decisiones de diseño basados en un análisis de optimación que tome en cuenta la inversión inicial, así como los costos de mantenimiento y los montos de los riesgos durante el ciclo esperado de vida de cada sistema. Estos criterios proporcionarán un marco de referencia para el desarrollo, evaluación y aplicación de soluciones innovadoras, tales como aisladores de base, disipadores de energía y otros dispositivos de control activo y pasivo de la respuesta dinámica⁸.

En San Francisco después del terremoto de Loma Prieta se pusieron en práctica muy diversas ideas para salvar y reforzar edificios que habían quedado dañados en distintos grados por el sismo. El edificio de la Corte de Apelaciones de California, con estructura de acero revestida con mampostería, sufrió daños y fue desalojado después del terremoto. Se repararon los daños y luego, se construyó un sistema de aisladores de caucho y acero bajo las columnas del edificio para que un posible sismo futuro aisle la edificación⁸.

Las vertientes de investigación pueden conducir a la minimización del daño en las estructuras usando: a) la incorporación de dispositivos disipadores hidráulicos o bien por fricción; b) usando dispositivos de aislamiento entre la estructura y la fundación; c) usando medios de control activo computarizado; d) usando tal vez nuevos materiales^{8,9}.

Los sistemas de control de vibraciones con amortiguamiento de masa son efectivos en las estructuras sujetas a cargas de viento que tienen un contenido frecuencial bien determinado. Recientemente, se han llevado a cabo estudios numéricos y experimentales sobre la efectividad de los sistemas de amortiguamiento de masas para reducir las respuestas sísmicas de las estructuras¹⁶. Si el sistema con amortiguamiento de masas se sintoniza con la frecuencia fundamental de una estructura a controlar, su respuesta a este modo fundamental puede ser reducida significativamente, sin embargo, las frecuencias superiores serán ligeramente reducidas o inclusive pueden ser ampliadas; por esta razón, en el caso de estructuras

sujetas a vibraciones sísmicas, muchos investigadores han planteado un conjunto de masas oscilantes dirigidas cada una de estas masas a controlar distintos modos de vibración de la estructura. El concepto de usar múltiples masas oscilantes junto con un procedimiento de optimización fue propuesto por Clark, A.J.¹⁷

Si la estructura está aislada en la base, ella responderá con mayor participación del modo fundamental con la ventaja adicional de que la frecuencia de este modo está bien determinada. Una estructura con estas características es ideal para el control de la respuesta usando el sistema de amortiguamiento de masas. Palazzo y Petti¹⁸, propusieron una nueva idea de combinar ambos sistemas. Resultados analíticos muestran que el uso de amortiguamiento de masas en un sistema de base aislada tiene la ventaja de absorber la energía sísmica sin contaminar el efecto del aislamiento, y el desplazamiento relativo de la base del sistema se puede reducir significativamente.

Los aisladores, cuyo propósito es filtrar altas frecuencias en los movimientos del suelo, se han usado para proteger los contenidos frágiles de hospitales, los servicios de computadores, y otros. Esta tecnología se ha usado de manera creciente en los últimos años y cientos de estructuras aisladas en la base, nuevas o rehabilitadas, están actualmente en uso o en construcción en Estados Unidos y Japón.

Los edificios y puentes que han sido contruidos usando un control de vibraciones muestran que es una herramienta de ingeniería valiosa y, en adición, combinaciones posibles de métodos más sofisticados prometen extender su uso. De hecho, el control estructural en ingeniería civil parece ser que se está desarrollando hacia una forma especial del problema de vibración que involucra grandes masas cuyos movimientos son controlados por modificación de propiedades vibracionales en una variedad de formas o por aplicación de fuerzas contrarias¹².

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general: Evaluar la eficiencia del sistema híbrido para el control de vibraciones mediante análisis comparativo de las capacidades para reducir vibraciones de los modelos básicos de uno y de varios pisos.

1.3.2 Objetivos específicos:

- 1.3.2.1 Evaluar la eficiencia del sistema híbrido para el control de vibraciones de los modelos sujetos a excitaciones espectrales para los tipos de suelos S1, S2, S3, S4.
- 1.3.2.2 Estudiar la eficiencia de los modelos con sistema de aislamiento en la base.
- 1.3.2.3 Estudiar la eficiencia de los modelos con sistema de amortiguamiento de masa en el tope.
- 1.3.2.4 Evaluar la eficiencia de los modelos con sistema híbrido de reducción de vibraciones.
- 1.3.2.5 Realizar un estudio comparativo de la respuesta de modelos de un grado de libertad y varios grados de libertad con sistemas híbridos de reducción de vibraciones.

1.4 HIPÓTESIS:

Se determinará la combinación óptima del sistema de aislamiento y del sistema de amortiguamiento de masas (eficiencia del sistema híbrido) de tal manera de reducir las vibraciones bajo excitaciones sísmicas y esta eficiencia se espera que sea mayor a la de los sistemas separados de aislamiento de base y de amortiguamiento de masas.

Fundamento: A medida que el factor de aislamiento (cociente del periodo del sistema aislado entre el periodo del sistema empotrado) se incrementa, la respuesta del sistema aislado se aproxima a la de un sistema equivalente de un grado de libertad con masa igual a la de todo el conjunto y la rigidez es la del sistema de aislamiento. Considerando que la literatura reporta que el control de vibraciones con amortiguamiento de masas es más eficiente para controlar vibraciones de sistemas de un grado de libertad, de largo periodo, entonces se supone que también será eficiente para el control de vibraciones de estructuras aisladas¹².

CAPITULO 2

METODOLOGÍA

Para lograr los objetivos propuestos se seguirá el siguiente esquema metodológico:

- Selección de los modelos matemáticos
- Formas espectrales elásticas tipificadas de los terrenos de fundación.
- Análisis dinámico de los modelos
- Parámetros considerados en esta investigación
- Definición de una estrategia de representación gráfica de los resultados del análisis.
- Evaluación de la representatividad de los modelos matemáticos seleccionados.

2.1 Selección de los modelos matemáticos

Se seleccionaron dos modelos matemáticos básicos que permiten representar adecuadamente los dispositivos que intervienen en el sistema y las configuraciones estructurales siguientes:

- a) Sistema con aislamiento en la base
- b) Sistema con amortiguamiento de masa en el tope
- c) Sistema con amortiguamiento de masa en la base.
- d) Sistema híbrido: Aislamiento en la base más Amortiguamiento de masa en el tope.
- e) Sistema híbrido: Aislamiento en la base más Amortiguamiento de masa en la base.

Los modelos básicos que incluyen los dos sistemas de control de vibraciones, aislamiento en la base y amortiguamiento de masa, se estudiaron para periodos fundamentales de 0.5, 0.24, 0.13 y 0.05 segundos.

El primer modelo básico tiene aislamiento en la base y el sistema de amortiguamiento de masa ubicado en el tope por lo que es capaz de representar las configuraciones estructurales a), b) y d)

El segundo modelo básico tiene aislamiento en la base y el sistema de amortiguamiento de masa ubicado en la base por lo que es capaz de representar las configuraciones estructurales a), c) y e). A continuación se presentan estos modelos:

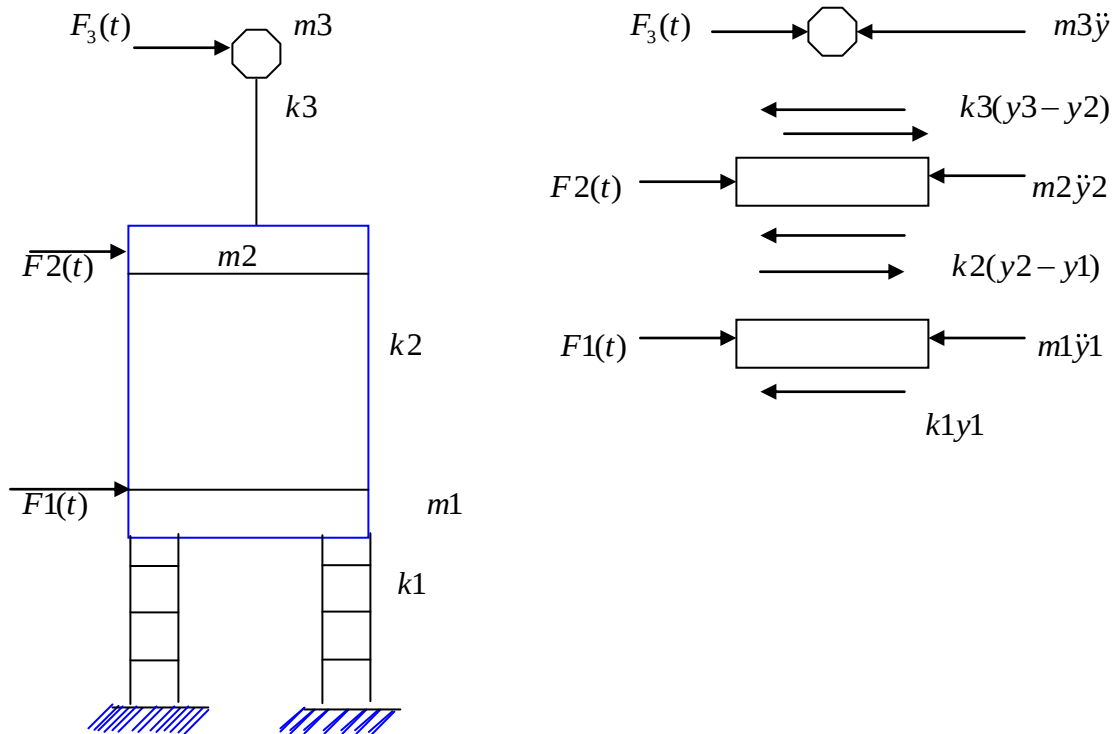


Fig. 2.1 Modelo híbrido No. 1: modelo con aislamiento en la base y péndulo superior

Equilibrio:

$$m_1 \ddot{y}_1 + k_1 y_1 - k_2 (y_2 - y_1) = F_1(t) \quad (1) \quad m_1 \ddot{y}_1 + (k_1 + k_2)y_1 - k_2 y_2 = F_1(t)$$

$$m_2 \ddot{y}_2 + k_2 (y_2 - y_1) - k_3 (y_3 - y_2) = F_2(t) \quad (2) \quad m_2 \ddot{y}_2 - k_2 y_1 + (k_2 + k_3)y_2 - k_3 y_3 = F_2(t)$$

$$m_3 \ddot{y}_3 + k_3 (y_3 - y_2) = 0 \quad (3) \quad m_3 \ddot{y}_3 - k_3 y_2 + k_3 y_3 = 0$$

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \\ \ddot{y}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ F_3(t) \end{bmatrix}$$

entonces la matriz de rigidez de este modelo será:

$$[K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix}$$

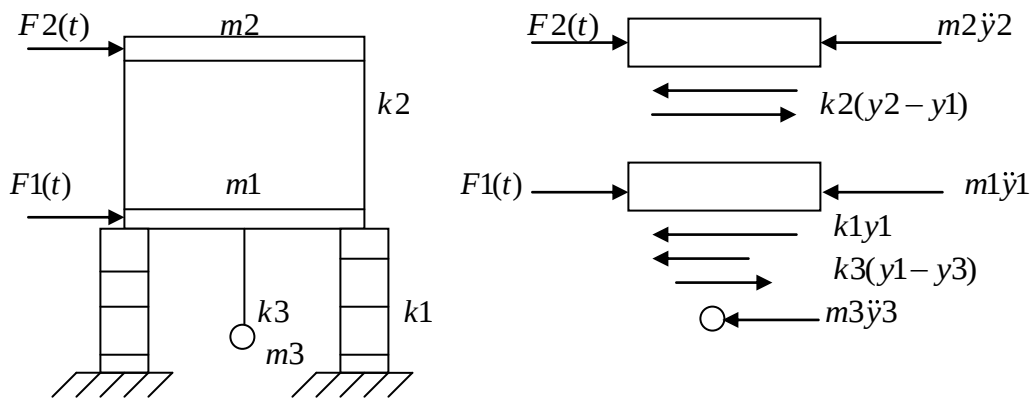


Fig.2.2 Modelo híbrido No. 2: modelo con aislamiento en la base y péndulo inferior

Equilibrio:

$$m_1 \ddot{y}_1 + k_1 y_1 + k_3 (y_1 - y_3) - k_2 (y_2 - y_1) = F_1(t) \quad (1) \quad m_1 \ddot{y}_1 + (k_1 + k_2 + k_3) y_1 - k_2 y_2 - k_3 y_3 = F_1(t)$$

$$m_2 \ddot{y}_2 + k_2 (y_2 - y_1) = F_2(t) \quad (2) \quad m_2 \ddot{y}_2 - k_2 y_1 + k_2 y_2 = F_2(t)$$

$$m_3 \ddot{y}_3 - k_3 (y_1 - y_3) = 0 \quad (3) \quad m_3 \ddot{y}_3 - k_3 y_1 + k_3 y_3 = 0$$

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \\ \ddot{y}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 + k_3 & -k_2 & -k_3 \\ -k_2 & k_2 & 0 \\ -k_3 & 0 & k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ 0 \end{bmatrix}$$

entonces la matriz de rigidez de este modelo será:

$$[K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 + k_3 & -k_2 & -k_3 \\ -k_2 & k_2 & 0 \\ -k_3 & 0 & k_3 \end{bmatrix}$$

2.2 Formas espectrales elásticas tipificadas de los terrenos de fundación.

Los distintos modelos a considerar en este trabajo, se someterán a las solicitaciones de los espectros de la norma venezolana para edificaciones sismorresistentes COVENIN MINDUR 2001³. Se consideraran los espectros elásticos para los cuatro tipos de suelos S1, S2, S3, S4 como puede verse en la figura siguiente:

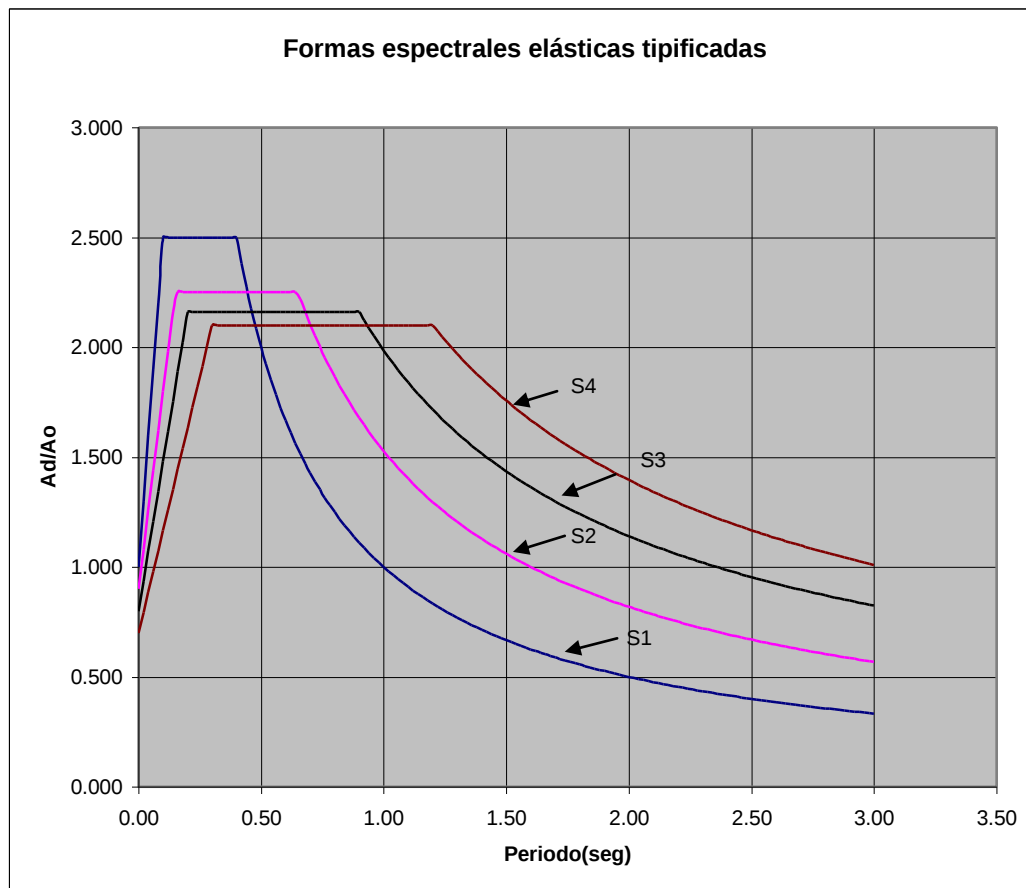


Fig.2.3 Formas espectrales elásticas tipificadas

2.3 Análisis dinámico de los modelos

Los distintos modelos matemáticos seleccionados intentan representar estructuras de distintas frecuencias y condiciones de suelo, si añadimos que también deben considerarse variaciones de propiedades de los sistemas de control de vibraciones tenemos una gran cantidad de casos de análisis. Todos estos casos de análisis se resolverán mediante algoritmos desarrollados en MATLAB¹¹, y se realizarán verificaciones con el programa SAP2000¹⁰.

Todos los análisis se basan en la ecuación del movimiento en la dinámica de una estructura de N grados de libertad, sujeta a movimientos sísmicos^{13,14}:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = F(t)$$

Donde:

u : Vector de desplazamiento

$\dot{u}$: Vector de velocidad

$\ddot{u}$: Vector de aceleración

M : Matriz de masa

C : Matriz de amortiguamiento

K : Matriz de rigidez

$F(t)$: Vector de fuerzas actuantes en las coordenadas del sistema.

Como el movimiento sísmico se describe en términos de sus espectros de respuesta, se puede utilizar el método de superposición modal para estimar la máxima respuesta estructural (desplazamientos y rotaciones). Se pueden obtener los desplazamientos máximos y con esta información se calculan las derivas máximas de cada uno de los modelos.

2.4 Parámetros considerados en esta investigación

Los parámetros considerados en esta investigación son los siguientes:

Derivas máximas de piso: En el cálculo de estas derivas se excluye la deriva de la base, es decir, la que se presenta en el sistema de aislamiento. Se consideró la deriva de piso como un parámetro indicativo de los beneficios de los sistemas de control de vibraciones, dado que las derivas de piso se relacionan directamente con las fuerzas cortantes de piso.

Deriva máxima de la base: Este parámetro se obtiene calculando la máxima deriva que se presenta a nivel del sistema de aislamiento; el estudio de este parámetro permite evaluar los efectos del sistema de amortiguamiento de masa sobre el control de los desplazamientos en la base. De esta manera podría determinarse cual ubicación del amortiguamiento de masa es más eficiente.

Factor de aislamiento: Este parámetro se define como la relación entre el periodo del sistema aislado y el periodo del sistema no aislado. En las estructuras aisladas las normas UBC⁵ recomiendan que sea mayor de 3.

$$F.A = \frac{T_{sa}}{T_{sna}}$$

T_{sa} : Periodo máx. del sistema aislado y sin amortiguamiento de masa

T_{sna} : Periodo máx. del sistema no aislado y sin amortiguamiento de masa

Porcentaje de masa de amortiguamiento: Este parámetro se refiere al porcentaje de la masa de piso que se aplica en el tope o en la base de la estructura. Esta masa auxiliar o péndulo fue variando desde un 5% hasta un 50% de la masa de piso del modelo básico de 1 grado de libertad.

Periodo natural de la estructura básica: Este parámetro se refiere al periodo fundamental de la estructura sin aislamiento y sin amortiguamiento de masa. Se considerarán distintos modelos para cubrir las distintas zonas del espectro.

Tipo de suelo: Todos los modelos fueron sometidos a una forma espectral según el tipo de suelo S1, S2, S3 y S4.

2.5 Definición de una estrategia de representación gráfica de los resultados del análisis.

Con el fin de presentar de manera sintética una gran cantidad de resultados se planea una estrategia de representación de los resultados obtenidos.

Los resultados de los casos analizados se presentaran mediante gráficos en los cuales el eje vertical nos indica las derivas máximas normalizadas.

El segundo eje del gráfico representa el factor de aislamiento (F.A)

El tercer eje del gráfico representa la variación de la masa auxiliar (la masa del péndulo), que va desde un 5% de la masa de piso hasta un 50% de la masa de piso.

Normalización de los gráficos:

Los gráficos se normalizan dividiendo la respuesta máxima del sistema aislado y con amortiguamiento de masa entre la respuesta máxima del sistema no aislado y sin amortiguamiento de masa.

El objetivo de la normalización es ver que toda respuesta que esté por encima de uno (1) muestra una amplificación de la respuesta de la estructura original y toda respuesta que esté por debajo de uno (1) muestra una reducción de la respuesta de la estructura original.

Las derivas máximas del modelo con sistema de aislamiento y amortiguamiento de masa se normalizan con las derivas máximas del modelo básico de la fig.2.4, el cual representa la estructura original, sin la intervención de ningún tipo de sistema para el control de vibraciones.

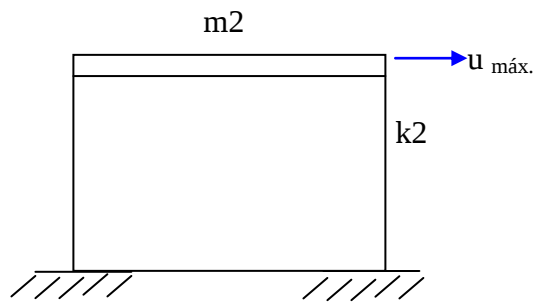


Fig.2.4 Modelo básico de 1 grado de libertad.

CAPITULO 3**TEORÍA SOBRE LAS ESTRUCTURAS AISLADAS****3.1 Introducción**

El enfoque convencional al diseño por sismo, es decir, confiar en el comportamiento dúctil de los miembros estructurales para la disipación de la energía, tiene la desventaja obvia de que la estructura se daña durante un sismo importante y que es necesario repararla. El daño puede ser tan serio que se necesite demoler la estructura. Otro enfoque es separar la función de transmisión de carga de la estructura de la función de disipación de energía, lo que se puede lograr incorporando, en la estructura, dispositivos especiales para disipar la energía generada en la estructura por los movimientos del sismo. Estos dispositivos protegen a las estructuras contra el daño⁴.

Los aisladores sísmicos son una de las alternativas de protección contra movimientos sísmicos. Generalmente los dispositivos de protección sísmica se clasifican en dos grandes categorías: a) de protección pasiva y b) de protección activa. Los de protección pasiva reducen la respuesta sísmica en una estructura concentrando en ellos la mayor parte de la disipación de energía. Los de protección activa reducen la respuesta sísmica por medio de la aplicación de fuerzas cuya magnitud se define con ayuda de sensores previamente instalados en la estructura. Estos sensores se conectan a un computador que envía señales a unos dispositivos, generalmente hidráulicos que aplican las fuerzas a la estructura con el fin de contrarrestar el movimiento sísmico¹⁵.

En este trabajo se pretende desarrollar un modelo de un (1) grado de libertad con aislamiento en la base por lo que es conveniente conocer la terminología utilizada en el área y tomar como soporte los avances logrados más recientemente respecto al estudio de modelos aislados en la base.

3.2 Definiciones¹²

3.2.1 Control Activo

Un sistema de control activo es aquel en el cual una fuente externa controla el sistema de reducción de vibraciones que actúa sobre la estructura. Estas fuerzas pueden ser usadas para disipar energía en la estructura. En un sistema de control activo, las señales enviadas al sistema de control de vibraciones están en función de la respuesta del sistema medido con sensores (ópticos, mecánicos, eléctricos, químicos, etc.).

3.2.2 Control Pasivo

Un sistema de control pasivo no requiere de una fuente de energía externa. El dispositivo de control pasivo imparte las fuerzas que se desarrollan en respuesta al movimiento de la estructura. La energía en un sistema estructural pasivo controlado, incluyendo los dispositivos pasivos, no puede ser incrementada por el dispositivo de control pasivo.

3.2.3 Control híbrido

El uso común del término "control híbrido" implica el uso combinado de los sistemas de control activo y pasivo.

3.2.4 Concepto de aislamiento sísmico de las estructuras

Muchas tecnologías y diseños de la construcción han sido desarrolladas durante años para mitigar los efectos de los terremotos en edificaciones, puentes, etc. El aislamiento sísmico es relativamente reciente y se están desarrollando tecnologías sobre este tópico.

El aislamiento sísmico consiste esencialmente de la instalación de mecanismos los cuales desacoplan la estructura y/o sus contenidos, de daños potenciales debido a

movimientos sísmicos del suelo. Este desacople se debe al incremento de la flexibilidad del sistema junto con un apropiado amortiguamiento. Muchos sistemas de aislamiento sísmico se montan debajo de la estructura y por esto se definen como sistemas de base aislada¹.

El uso de sistemas aislados limita las deformaciones estructurales y conllevan a valores bajos de demanda de ductilidad. La aceptación creciente de instalación de aisladores sísmicos se muestra como una tecnología para rehabilitar sistemas estructurales contra los sismos. En Nueva Zelandia existen ejemplos de puentes acondicionados con aisladores sísmicos.

Los aisladores sísmicos pueden usarse para proveer soluciones efectivas para un amplio rango de diseño de problemas sísmicos.

Los Ingenieros, Arquitectos o clientes deseosos de incorporar un sistema de aislamiento sísmico necesitan considerar varios factores. El primero de ellos es el peligro sísmico, el cual depende de la geología local (proximidades a la falla, tipo de suelo), registro de la historia de sismos en la región y algunos factores conocidos acerca de las características probables de sismos como magnitud, periodo, etc. Para resolver el problema se proponen varias soluciones, con una variedad de posibles formas estructurales y materiales, y con algunos diseños incorporados de aisladores sísmicos. El probable nivel sísmico de daño puede ser evaluado para cada diseño, donde el grado de daño sísmico puede ser generalmente clasificado como: (1) menor; (2) reparable (acerca del 30% del costo de la construcción); (3) no reparable, resultando edificios existentes condenados a la demolición.

Los costos de mantenimiento pueden ser bajos para sistemas pasivos y alto para sistemas activos. Una discusión acerca de los costos de construcción para sistemas que incluyen aislamiento varía más o menos de un 5% a un 10% del costo del sistema no aislado¹. Pero este costo adicional en primer lugar previene de pérdidas de muchas vidas humanas y en segundo lugar previene de daños en las estructuras sobre todo en el caso de Hospitales, Escuelas, etc., en donde se concentran muchas personas.

3.2.5 Modelado de la estructura aislada¹⁵

El comportamiento de una estructura sobre un sistema de aislamiento puede ser obtenido en forma muy aproximada mediante el modelado de la edificación como un sistema de dos grados de libertad, siendo los parámetros k_s , m y c_s los correspondientes a rigidez, masa y amortiguamiento del edificio considerado como un conjunto; k_b , m_b y c_b son la rigidez, masa y amortiguamiento correspondientes al nivel de base plantado sobre un sistema aislador y los parámetros u_s y $\ddot{u}_s$ los desplazamientos y aceleraciones instantáneas de la masa al ser sometida a la aceleración $\ddot{u}_g$ del suelo (ver fig.3.1), la ecuación de movimiento del sistema de dos grados de libertad queda expresada como:

$$m\ddot{u}_s = -c_s(\dot{u}_s - \dot{u}_b) - k_s(u_s - u_b) \quad (3.1)$$

$$m_b\ddot{u}_b = -c_b(\dot{u}_b - \dot{u}_g) - k_b(u_b - u_g) \quad (3.2)$$

Estas ecuaciones pueden ser convenientemente expresadas en función de los desplazamientos relativos, por lo que haciendo

$v_s = u_s - u_b$; $v_b = u_b - u_g$ se tienen las ecuaciones expresadas como:

$$m\ddot{v}_b + m\ddot{v}_s + c_s\dot{v}_s + k_s v_s = -m\ddot{u}_g \quad (3.3)$$

$$y \quad (m + m_b)\ddot{v}_b + m\ddot{v}_s + c_b\dot{v}_b + k_b v_b = -(m_b + m)\ddot{u}_g \quad (3.4)$$

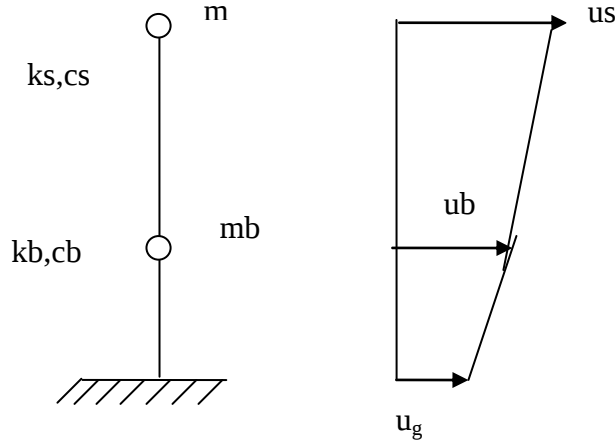


Fig. 3.1 Parámetros de un sistema de 2 gld

Este sistema de ecuaciones de dos grados de libertad puede ser resuelto por medio de la descomposición modal. Expresando las ecuaciones en su forma matricial, el sistema queda:

$$M\ddot{v} + C\dot{v} + Kv = -Mr\ddot{u}_g \quad (3.5)$$

donde:

$$M = \begin{bmatrix} M & m \\ m & m \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} cb & 0 \\ 0 & c \end{bmatrix}; \quad K = \begin{bmatrix} kb & 0 \\ 0 & k \end{bmatrix}; \quad V = \begin{Bmatrix} vb \\ vs \end{Bmatrix}; \quad r = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{m} \\ \mathbf{m} & \mathbf{m} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_b \\ \dot{\mathbf{v}}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{c}_b & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{c} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_b \\ \dot{\mathbf{v}}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{k}_b & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{k} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{v}_b \\ \mathbf{v}_s \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{m} \\ \mathbf{m} & \mathbf{m} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_g \quad (2.6)$$

donde $M = m + m_b$

definiendo la razón de masa como γ tenemos: $\gamma = \frac{m}{m + m_b} = \frac{m}{M}$ (3.7)

y la frecuencia nominal w_b y w_s están dadas por:

$$w_b^2 = \frac{k_b}{m + m_b} \quad w_s^2 = \frac{k_s}{m} \quad (3.8)$$

y asumiendo que $\varepsilon = \frac{\omega_b^2}{\omega_s^2}$ y considerando además que ε es del orden de 10^{-2} .

Los factores de amortiguamiento β_b y β_s , están dados por:

$$2\omega_b\beta_b = \frac{c_b}{m + m_b} \quad 2\omega_s\beta_s = \frac{c_s}{m} \quad (3.9)$$

En la ecuación (3.3) dividiendo por m , reordenando y combinando con ecuaciones

(3.9) tenemos:

$$\ddot{\mathbf{v}}_s + \ddot{\mathbf{v}}_b + 2w_s\beta_s\dot{\mathbf{v}}_s + w_s^2\mathbf{v}_s = -\ddot{\mathbf{u}}_g \quad (3.10)$$

En la ecuación (3.4) sustituyendo $m = \gamma M$ tenemos:

$$M\ddot{\mathbf{v}}_b + \gamma M\ddot{\mathbf{v}}_s + c_b\dot{\mathbf{v}}_b + k_b\mathbf{v}_b = -M\ddot{\mathbf{u}}_g \quad (3.11)$$

dividiendo por M , reordenando y combinando con ecuaciones (3.9) tenemos:

$$\gamma \ddot{\mathbf{v}}_s + \ddot{\mathbf{v}}_b + 2w_b\beta_b\dot{\mathbf{v}}_b + w_b^2\mathbf{v}_b = -\ddot{\mathbf{u}}_g \quad (3.12)$$

Las ecuaciones quedan:

$$\gamma \ddot{\mathbf{v}}_s + \ddot{\mathbf{v}}_b + 2w_b\beta_b\dot{\mathbf{v}}_b + w_b^2\mathbf{v}_b = -\ddot{\mathbf{u}}_g \quad (3.13)$$

$$\ddot{v}_s + \ddot{v}_b + 2w_s \beta_s \dot{v}_s + w_s^2 v_s = -\ddot{u}_g \quad (3.14)$$

en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \gamma & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{v}_s \\ \dot{v}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 2w_b \beta_b \\ 2w_s \beta_s & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{v}_s \\ \dot{v}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & w_b^2 \\ w_s^2 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_s \\ v_b \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\ddot{u}_g \\ -\ddot{u}_g \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

La ecuación característica para las frecuencias es:

$$(\gamma - 1)w^4 + (w_s^2 + w_b^2)w^2 - w_b^2 w_s^2 = 0 \quad (3.16)$$

La más baja de las dos raíces (w_1 y w_2) de esta ecuación será llamada w_b^* , la cual representa la frecuencia cambiada de aislamiento y la raíz más alta, llamada w_s^* representa la frecuencia de la estructura modificada por la presencia del sistema de aislamiento.

Las raíces de la ecuación (3.16) son:

$$w_1^2 = \frac{1}{2(1-\gamma)} \left\{ w_b^2 + w_s^2 - \left[(w_b^2 - w_s^2)^2 + 4\gamma w_b^2 w_s^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (3.17)$$

$$w_2^2 = \frac{1}{2(1-\gamma)} \left\{ w_b^2 + w_s^2 + \left[(w_b^2 - w_s^2)^2 + 4\gamma w_b^2 w_s^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (3.18)$$

Si se considera que $w_b \ll w_s$, y si se expande esto por series binomiales y teniendo en cuenta el primer orden de ε , se obtienen los resultados siguientes:

$$w_1^2 = w_b^{*2} = w_b^2 (1 - \gamma\varepsilon); \quad w_2^2 = w_s^{*2} = \frac{w_s^2}{1-\gamma} [1 + \gamma\varepsilon] \quad (3.19)$$

En muchos casos se toma como una aproximación para w_b^* y w_s^* el primer término

de las ecuaciones (3.19), es decir $w_b^* = w_b$ y $w_s^* = \frac{w_s}{(1-\gamma)^{1/2}}$

Esto indica que la frecuencia del aislamiento (w_b) es cambiada solo ligeramente debido a la flexibilidad de la estructura, mientras que la frecuencia de la estructura (w_s) es incrementada significativamente por la adición de la masa de la base.

3.3 Estabilidad del aislador¹⁵

Cada sistema estructural se diseña de manera que tenga una capacidad sísmica que exceda a la anticipada demanda sísmica. La capacidad es una función compleja de resistencia, rigidez, y deformación dependiendo de la configuración del sistema y de las propiedades de los materiales del sistema de aislamiento sísmico y de la superestructura.

El desempeño sísmico de una estructura aislada en gran modo depende de las características dinámicas de los aisladores. Los sistemas aislados fueron diseñados para tener periodos horizontales cercanos a los 2 segundos con un factor de amortiguamiento del 10 %, separando significativamente el periodo del aislador del periodo fundamental de la superestructura.

Roll-out (volcamiento del aislador): es una condición inestable asociada a desplazamientos laterales grandes tal que limita el máximo desplazamiento lateral que el aislador puede soportar.

Al diseñar un sistema de aislamiento con elastómero que utilice el tipo de conexiones por corte se debe tener en cuenta la estabilidad contra el volcamiento del aislador. Una ventaja de usar el tipo conexión de corte es que ocurre la vuelta del aislador a su posición inicial después de que el aislador experimenta grandes deformaciones; además, el aislador no pierde su capacidad de carga vertical y horizontal, con la condición de que la distorsión no sea excesiva.

En la figura 3.2 se muestra un modelo simplificado de un aislador deformado con un diámetro Φ y una altura h , sujeto a una carga vertical P y a una fuerza horizontal F_H , la cual produce un desplazamiento horizontal Δ . Asumiendo que no existe cambio en la altura h del aislador, esta configuración deformada conducirá a una inminente

inestabilidad por volcamiento. En este estado, la suma de momentos alrededor del punto O, es igual a cero como vemos en la ecuación 3.3.1.

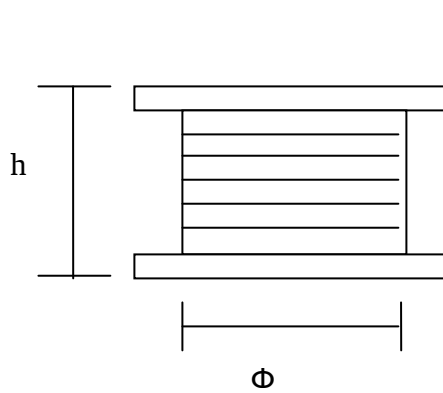


Fig. 3.1(a): al inicio

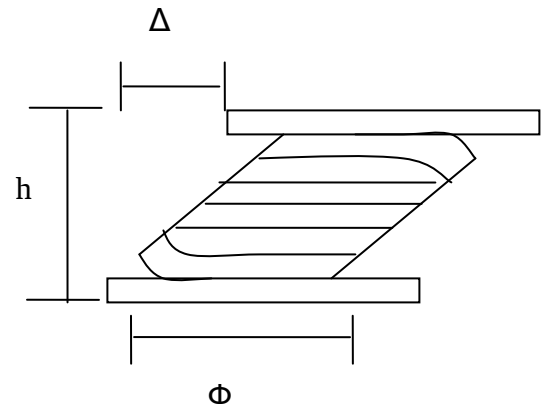


Fig. 3.1(b): deformada

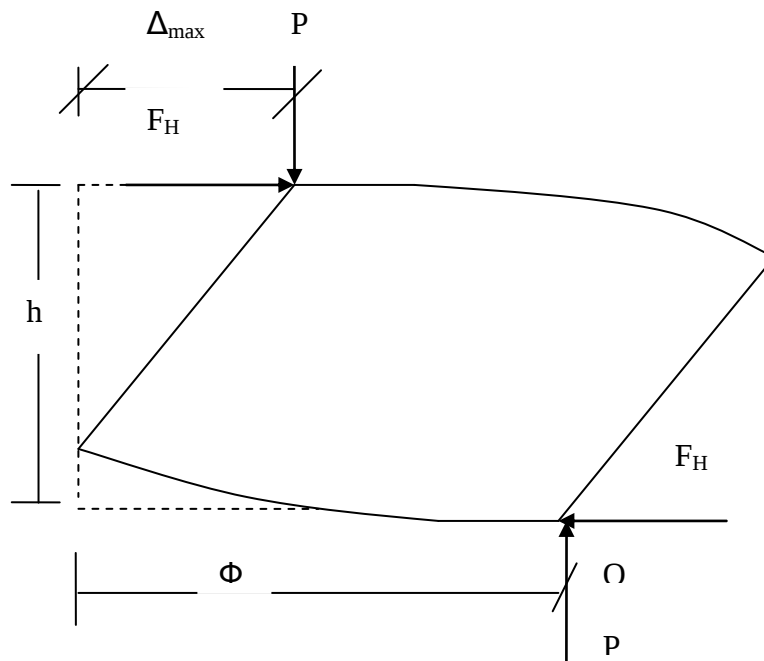


Fig. 3.2 Fuerzas actuantes sobre el aislador en el momento de suceder la inestabilidad roll-out.

$$(\Phi - \Delta_{\max})P - h F_H = 0 \quad (3.3.1)$$

Tomando $F_H = K_H \Delta_{\max}$, donde K_H es la rigidez horizontal efectiva y sustituyendo F_H en la ecuación 3.3.1, tenemos:

$$\frac{\Delta_{\max}}{\phi} = \frac{P}{P + hK_H} \quad (3.3.2)$$

Tomando $K_H = G A / t_r$, donde G y t_r son el módulo de corte y el espesor total de la capa del caucho respectivamente; A es el área confinada del caucho y el esfuerzo axial se define como $p = P/A$. Sustituyendo en la ecuación 3.3.2, tenemos:

$$\frac{\Delta_{\max}}{\phi} = \frac{1}{1 + \frac{Gh}{pt_r}} \quad (3.3.3)$$

La ecuación (3.3.3) nos dice que el máximo desplazamiento lateral $\Delta_{\max}$ se incrementa con el incremento de esfuerzo axial p y con el diámetro Φ del aislador, y decrece con el incremento del módulo de corte del caucho. Valores típicos del módulo de corte del caucho están cerca de 0.828 MPa (120 psi), y el esfuerzo axial está cerca de 6.90 MPa (1000 psi). La altura total del aislador, h , generalmente es mayor en un 20% del espesor total t_f del caucho, resultando $\Delta_{\max} / \Phi = 88\%$. Esto nos indica que el desplazamiento típico de la inestabilidad roll-out está cercano al 88 % del valor del diámetro Φ . Por lo tanto, en aisladores típicos, para evitar este tipo de inestabilidad, el $\Delta_{\max}$ debe ser menor del 88% del valor del diámetro Φ .

Pandeo: Un aislador de elastómero puede ser susceptible a pandeo que es un tipo de inestabilidad similar al de una columna ordinaria pero dominada por la baja rigidez del aislador. La teoría para el pandeo del aislador se basa en un trabajo realizado por Haringx²⁰ en 1947 sobre las características mecánicas de los resortes de acero helicoidales y barras de goma usadas para montajes de vibraciones.

La fórmula de pandeo hallada por Euler llamada carga de Euler (P_E) para una columna sin deformación por corte y de longitud h es:

$$P_E = \pi^2 \frac{EI_s}{h^2}$$

La figura 3.3 muestra las condiciones de borde para un sistema aislador bajo la carga vertical P . El aislador está restringido contra la rotación en ambos extremos, pero libre de movimiento lateral en el tope.

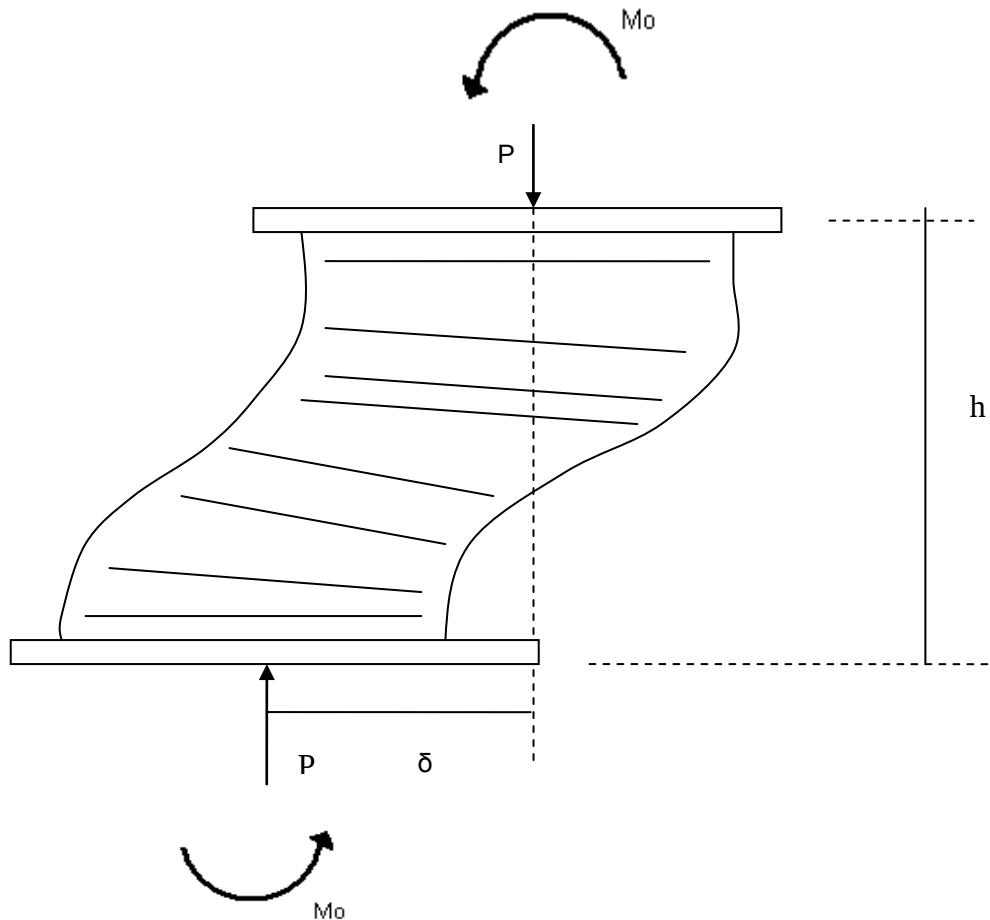


Fig. 3.3 Aislador sujeto a pandeo bajo la carga vertical P .

La carga crítica de pandeo aproximada es: $P_{crit} = (P_S P_E)^{\frac{1}{2}}$ siendo

$$P_S = GA \frac{h}{t_r} \quad P_E = \frac{1}{3} \frac{\pi^2}{h^2} E_c I \frac{h}{t_r} \quad \text{de donde tenemos:}$$

Donde el radio de giro $r = \sqrt{\frac{I}{A}} = \frac{a}{2} \sqrt{3}$ para un aislador cuadrado de lado a y $\frac{\phi}{4}$ para un aislador circular de diámetro ϕ

La presión crítica $p_{crit} = \frac{P_{crit}}{A}$ se puede expresar en términos de S y de la cantidad S_2 ,

referida a la razón de aspecto del segundo factor de forma, definido por $S_2 = \frac{\phi}{t_r}$ o $\frac{a}{t_r}$

Entonces:

$$\frac{P_{crit}}{G} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} S S_2 \quad \text{para un aislador circular}$$

$$\frac{P_{crit}}{G} = \frac{\pi}{\sqrt{6}} S S_2 \quad \text{para un aislador cuadrado}$$

En el diseño actual la carga soportada por el aislador (es decir W) será menor que la carga crítica, y despreciando el efecto de la carga vertical sobre la rigidez horizontal K_H del aislador, que está dada por $K_H = GA/t_r$, la cual se relaciona con la frecuencia horizontal w_H por medio de la expresión:

$$w_H^2 = \frac{K_H}{W} g$$

Entonces el factor de seguridad contra el pandeo es $FS = P_{crit}/W$, de donde:

$$FS = \frac{\sqrt{2}}{g} \pi S w_H^2 r \quad \text{lo cual nos indica que el factor de seguridad se incrementa con el}$$

factor de forma S , con la frecuencia w_H , o con la dimensión a o ϕ del aislador.

Para tener una sensibilidad de la magnitud de las cantidades involucradas, se supone que el factor de seguridad debe ser por lo mínimo 3, el factor de forma S es 10, y la

frecuencia es π radianes por segundo (periodo de 2 segundos), todos los cuales son valores típicos. En este caso el radio de giro r debe ser por lo menos:

$$r = \frac{3 \times 9810}{\sqrt{2} \pi \times 10 \times \pi^2} = 67 \text{ mm}$$

Si el aislador es circular, entonces $r = \frac{\phi}{4} \therefore \phi = 4 * 6.7 = 26.8 \text{ cm}$

Para muchos edificios los aisladores tendrán diámetros más grandes que este diámetro mínimo y soportarán cargas de cientos de toneladas, de modo que el pandeo no será probablemente un problema para el diseño.

3.4 Algunas particularidades de los aisladores⁶

En la Revista Técnica de la Construcción de Junio 2001 nos dice lo siguiente:

“En estructuras relativamente rígidas de periodos del orden de 0.5 segundos, los aisladores tienen la misión de aumentar el periodo hacia los 2 y 3 segundos. Mediante este artificio se reducen las aceleraciones sísmicas del conjunto a solo una fracción de la que corresponde a la estructura rígida, sin aisladores El Ingeniero Agostino Marioni, Presidente del Comité Europeo de Normalización de Apoyos y Dispositivos Antisísmicos destaca las particularidades de los aisladores, que se resumen en el siguiente listado:

- El concepto del aislador es colocarlo en una superestructura rígida, apoyada en aisladores relativamente “blandos”.
- La superestructura debe tener un periodo propio del orden de los 0.6 segundos.
- Los aisladores deben inducir a un periodo propio del conjunto del orden de 2 a 3 segundos.
- La relación entre el periodo final del conjunto y de la superestructura debe ser mayor de 3.
- El diseño debe asegurar que en un sismo máximo, la superestructura no se plastifique y responda siempre en régimen elástico. Debe ser $R=1$.

- Los aisladores se deben colocar en todos los apoyos de la estructura.
- En estructuras con rellenos de mampostería u otros materiales es conveniente el empleo de aisladores, ya que todo aumento de rigidez de la superestructura es beneficiosa.
- En estructuras convencionales, sin aisladores, los rellenos de mampostería u otros materiales pueden ser perjudiciales, al alterar el modelo de rigidez y frecuentemente introducir torsiones. Además, en un terremoto destructivo la rotura progresiva de estos rellenos puede afectar negativamente la respuesta de la estructura resistente.
- Los aisladores, en general, aumentan en forma considerable el amortiguamiento, posiblemente en un 10%, lo que representa disipaciones energéticas muy convenientes.
- Las especificaciones de los aisladores es sencilla, ya que solo se trata de definir el periodo deseado, y determinar el correspondiente corte basal.
- El problema principal de los aisladores corresponde al fabricante, el que en función de la estructura y periodo especificado debe suministrar un artefacto que cumpla con estas condiciones, además de las de calidad, durabilidad, resistencia al calor, etc., que debe cumplir para garantizar larga vida e inalterable en el tiempo.

Los grandes pilares de autopistas que colapsaron en Kobe han sido reconstruidos con aisladores sísmicos.”

3.5 Factibilidad de rehabilitación de estructuras¹

La factibilidad de rehabilitar una estructura con aisladores sísmicos dependerá de:

- Que la estructura tenga un periodo corto ya que resultan altas fuerzas sísmicas.
- Que la estructura tenga una relación muy baja de resistencia horizontal al peso.
- Que la estructura tenga una baja ductilidad.
- Que el riesgo del colapso sísmico o el costo de reparación debido al sismo sea inaceptable.
- Que la preservación de la estructura tenga un alto valor cultural.
- Que la necesidad de preservar los exteriores e interiores de la estructura limite el alcance para incrementar la resistencia y ductilidad.
- Que sea práctica la modificación de la estructura por inclusión de los aisladores.
- Que haya un adecuado despacho de aisladores.
- Que exista un sistema práctico de aisladores para reducir las cargas sísmicas y deformaciones.

CAPITULO 4

ESTRUCTURAS CON AMORTIGUAMIENTO DE MASA

4.1 Introducción

Los conceptos modernos de amortiguadores de masa resonante aplicados a las estructuras tiene sus raíces en los absorbedores dinámicos de vibración estudiados cerca de 1909 por Frahm (Den Hartog, 1956)¹⁹.

A lo largo de los años, los absorbedores de vibración de Frahm que consisten en una masa m relativamente pequeña y un resorte con una rigidez k unida a la masa M con una rigidez K , han sido implementados con el fin de reducir las vibraciones producidas por el viento en los edificios, para reducir las vibraciones inducidas por las actividades de los ocupantes y para reducir la respuesta de edificaciones sometidas a excitaciones sísmicas.

Un buen número de amortiguadores de masa resonante se han instalados en edificios altos, puentes, torres para el control de la respuesta contra cargas externas inducidas por el viento. La primera estructura en la cual un sistema de amortiguador de masa resonante fue instalado parece ser el edificio Centerpoint Tower en Sydney, Australia. En los Estados Unidos existen dos edificios equipados con el sistema de amortiguador de masa resonante: uno es el edificio Citicorp Center en la ciudad de New York y el otro es el John Hancock Tower en Boston.

A continuación se muestra una representación esquemática del modelo de Frahm, sujeto a una excitación armónica:

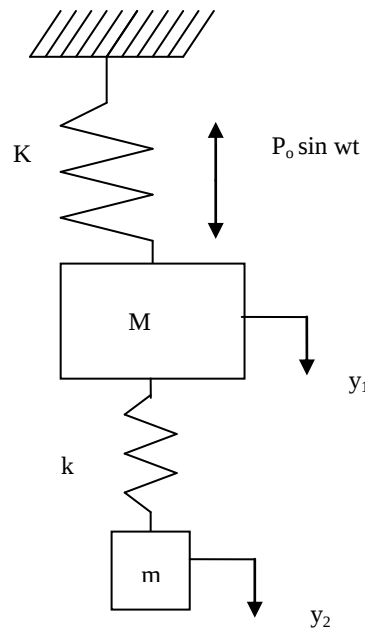


Fig. 4.1 Representación esquemática del modelo de Frahm.

Se puede observar que bajo una excitación armónica, la masa principal M puede ser estacionaria cuando la frecuencia natural $\left(\sqrt{k/m}\right)$ del amortiguador se escoge de tal modo que sea igual a la frecuencia de excitación.

Muchos de los primeros estudios descritos arriba han sido limitados para el uso de absorbedores de vibración dinámicos en sistemas de ingeniería mecánica en los cuales una frecuencia de operación se encuentra en resonancia con la frecuencia fundamental de la máquina. Los edificios, sin embargo, están sujetos a cargas ambientales tales como cargas de viento y cargas sísmicas, las cuales contienen muchas componentes frecuenciales.

4.2 Estudio paramétrico analítico

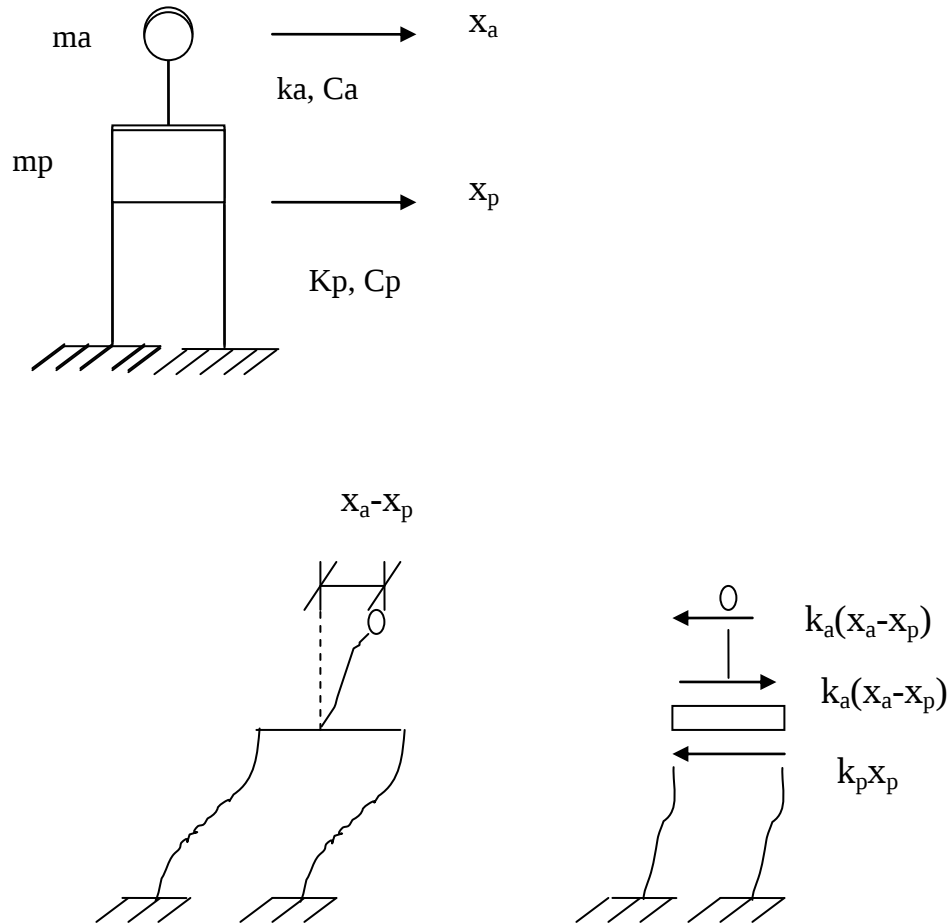


Fig. 4.2 Modelo con amortiguamiento de masa para el estudio analítico.

Equilibrio dinámico:

$$m_p \ddot{x}_p + c_p \dot{x}_p + k_p x_p - c_a (\dot{x}_a - \dot{x}_p) - k_a (x_a - x_p) = f(t)$$

$$m_a \ddot{x}_a + k_a (x_a - x_p) + c_a (\dot{x}_a - \dot{x}_p) = 0$$

$$\begin{bmatrix} m_p & \\ & m_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_p \\ \ddot{x}_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_p + c_a & -c_a \\ -c_a & c_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{x}_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_p + k_a & -k_a \\ -k_a & k_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ x_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$\bar{M}\dot{X} + \bar{C}\dot{X} + \bar{K}X = P(t)$$

Excitación: $f(t) = \bar{f}e^{irt}$ se propone la solución: $x = \begin{bmatrix} \bar{x}_p \\ \bar{x}_a \end{bmatrix} e^{irt} = \bar{x}e^{irt}$

Siendo $i = \sqrt{-1}$; $e^{irt} = \cos(rt) + i\sin(rt)$

$$\dot{X} = ir \begin{bmatrix} \bar{x} \\ p \end{bmatrix} e^{irt} \quad \ddot{X} = -r^2 \begin{bmatrix} \bar{x} \\ p \end{bmatrix} e^{irt} \quad \text{sustituyendo } X \quad \dot{X} \quad \ddot{X} \quad \text{en ecuación} \quad (4.1)$$

$$\{-r^2 M \bar{x} + ir \bar{C} \bar{x} + \bar{K} \bar{x} = P(t)\} e^{irt}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} -r^2 m_p \bar{x}_p + ir(c_p + c_a) \bar{x}_p + ir(-c_a \bar{x}_a) + (k_p + k_a) \bar{x}_p - k_a \bar{x}_a = \bar{f} \\ -r^2 m_a \bar{x}_a + irc_a \bar{x}_a - irc_a \bar{x}_p + k_a \bar{x}_a - k_a \bar{x}_p = 0 \end{array} \right\}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{x}_p [ir(c_p + c_a) + k_p + k_a - r^2 m_p] + \bar{x}_a (-irc_a - k_a) = -\bar{f} \quad (4.2) \\ \bar{x}_p [-irc_a - k_a] + \bar{x}_a (irc_a + k_a - r^2 m_a) = 0 \quad (4.3) \end{array} \right\}$$

$$\text{de (4.3)} \quad \bar{x}_a = \frac{\bar{x}_p (irc_a + k_a)}{(irc_a + k_a - r^2 m_a)} \quad \text{sustituyendo}$$

$$\bar{x}_p \left[ir(c_p + c_a) + k_p + k_a - r^2 m_p - \frac{(irc_a + k_a)^2}{(irc_a + k_a - r^2 m_a)} \right] = \bar{f} \quad (4.4)$$

$$\bar{x}_p = \frac{\bar{f}(irc_a + k_a - m_a r^2)}{[ir(c_p + c_a) + k_p + k_a - r^2 m_p](irc_a + k_a - r^2 m_a) - (irc_a + k_a)^2} \quad (4.5)$$

Numerador de (4.5):

$$\bar{f}(irc_a + k_a - m_a r^2) \quad \text{por definición } c_a = 2\zeta_a m_a \omega_a ; x_e = \frac{\bar{f}}{k_p} \text{ y } \beta = \frac{r}{\omega_a}$$

$$\frac{\bar{f}}{k_p} k_p (k_a - m_a r^2 + 2ir\zeta_a m_a \omega_a) \frac{k_a}{k_a} = x_e \left(1 - \frac{m_a}{k_a} r^2 + \frac{2ir\zeta_a m_a \omega_a}{m_a \omega_a^2} \right) k_a k_p$$

$$= x_e \left(1 - \frac{r^2}{w_a^2} + 2i\zeta_a \frac{r}{w_a}\right) k_a k_p = x_e (1 - \beta^2 + 2i\zeta_a \beta) k_a k_p$$

Denominador de (4.5), parte real, $C_p=0$

$$-r^2 c_a^2 + k_a k_p + k_a^2 - r^2 m_p k_a - (k_p k_a) r^2 m_a + r^4 m_p m_a + r^2 c_a - k_a^2$$

$$\left[k_a k_p - r^2 m_p k_a - (k_p + k_a) r^2 m_a + m_p m_a r^4 \right] \quad \text{dividiendo cada término por } k_a k_p \text{ tenemos:}$$

$$\left[1 - r^2 \frac{m_p}{k_p} - r^2 \frac{m_a}{k_a} - r^2 \frac{m_a}{k_p} + \frac{m_p m_a}{k_p k_a} r^4 \right] k_a k_p \quad \text{siendo}$$

$$k_p = w_p^2 m_p; \quad k_a = w_a^2 m_a; \quad \gamma = \frac{w_a}{w_p}; \quad \mu = \frac{m_a}{m_p}; \quad \beta = \frac{r}{w_a} \quad \text{tenemos:}$$

$$\left[1 - \beta^2 \gamma^2 - \beta^2 - \beta^2 \mu \gamma^2 + \gamma^2 \beta^4 \right] k_a k_p$$

$$\left[(1 - \beta^2)(1 - \beta^2 \gamma^2) - \mu \beta^2 \gamma^2 \right] k_a k_p$$

Denominador de (4.5), parte imaginaria, $C_p=0$

$$r c_a k_a - r^3 c_a m_a + r c_a k_p + r c_a k_a - r^3 c_a m_p - 2 r c_a k_a$$

$$r c_a (-r^2 m_a + k_p - r^2 m_p) \frac{k_a k_p}{k_a k_p}$$

$$\frac{2 r \zeta_a m_a w_a}{k_a} \left(-r^2 \frac{m_a}{k_p} \frac{w_a^2}{w_a^2} + 1 - r^2 \frac{m_p}{k_p} \frac{w_a^2}{w_a^2} \right) k_a k_p$$

$$\frac{2 r \zeta_a m_a w_a}{m_a w_a^2} \left(1 - \frac{r^2}{w_a^2} \frac{m_a}{m_p} \frac{w_a^2}{w_p^2} - \frac{r^2}{w_a^2} \frac{w_a^2}{w_p^2} \right) k_a k_p$$

$$2 \zeta_a \beta (1 - \beta^2 \mu \gamma^2 - \beta^2 \gamma^2) k_a k_p$$

$$2 \zeta_a \beta (1 - \beta^2 \gamma^2 (1 + \mu)) k_a k_p$$

$$x_p = x_e \frac{(1 - \beta^2 + i 2 \zeta_a \beta)}{(1 - \beta^2)(1 - \beta^2 \gamma^2) - \mu \beta^2 \gamma^2 + i 2 \zeta_a \beta (1 - \gamma^2 \beta^2 (1 + \mu))} \quad (4.6)$$

La parte real de x_p / x_e es:

$$|(x_p / x_e)| = \sqrt{\frac{[(1-\beta^2)^2 + (2\zeta_a\beta)^2]}{\left\{[(1-\beta^2)(1-\beta^2\gamma^2) - \beta^2\gamma^2\mu]^2 + (2\zeta_a\beta)^2[1-\beta^2\gamma^2(1+\mu)]^2\right\}}} \quad (4.7)$$

Dibujamos la curva $\left|\frac{X_p}{X_e}\right|$ vs β para el siguiente caso:

$$k_p = 6000 \text{ kg/cm}; k_a = 1200 \text{ kg/cm}; m_p = 10 \text{ kg} \cdot \text{seg}^2 / \text{cm}; m_a = 2 \text{ kg} \cdot \text{seg}^2 / \text{cm}$$

$$\omega_p = 24.5 \text{ rad/seg}; \omega_a = 24.5 \text{ rad/seg}; T_p = \frac{2\pi}{\omega_p} = 0.26 \text{ seg}$$

$$\zeta_a = 0.05; \gamma = 1; \mu = 0.2$$

Siendo r : frecuencia de la excitación y $\gamma = \frac{\omega_a}{\omega_p}$; $\mu = \frac{m_a}{m_p}$; $\beta = \frac{r}{\omega_a}$

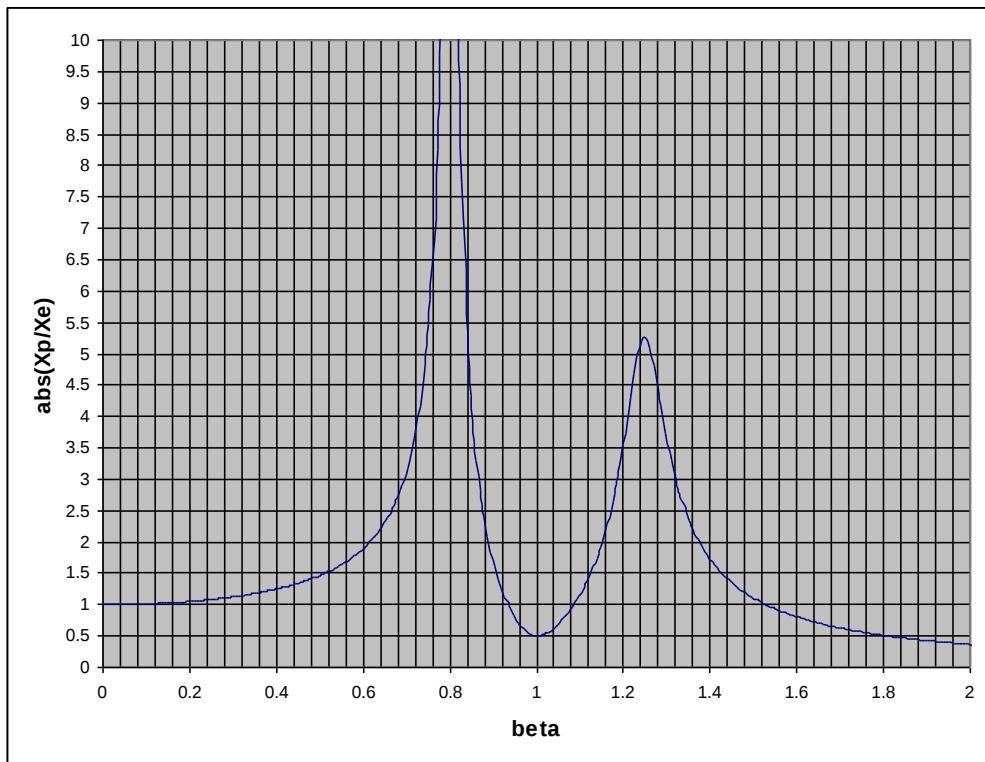


Fig. 4.3 Amplitud máxima del modelo de 1gl ($T_p=0.26\text{seg}$) con amortiguamiento de masa y con variación de la frecuencia de excitación.

Dibujamos la curva $\left| \frac{X_p}{X_e} \right|$ vs β para el siguiente caso:

$$k_p = 115473 \text{ kg/cm}; k_a = 5800 \text{ kg/cm}; m_p = 10 \text{ kg} \cdot \text{seg}^2 / \text{cm}; m_a = 2 \text{ kg} \cdot \text{seg}^2 / \text{cm}$$

$$\omega_p = 107.5 \text{ rad/seg}; \omega_a = 53.8 \text{ rad/seg}; T_p = \frac{2\pi}{\omega_p} = 0.06 \text{ seg}$$

$$\zeta_a = 0.05; \gamma = 0.5; \mu = 0.2$$

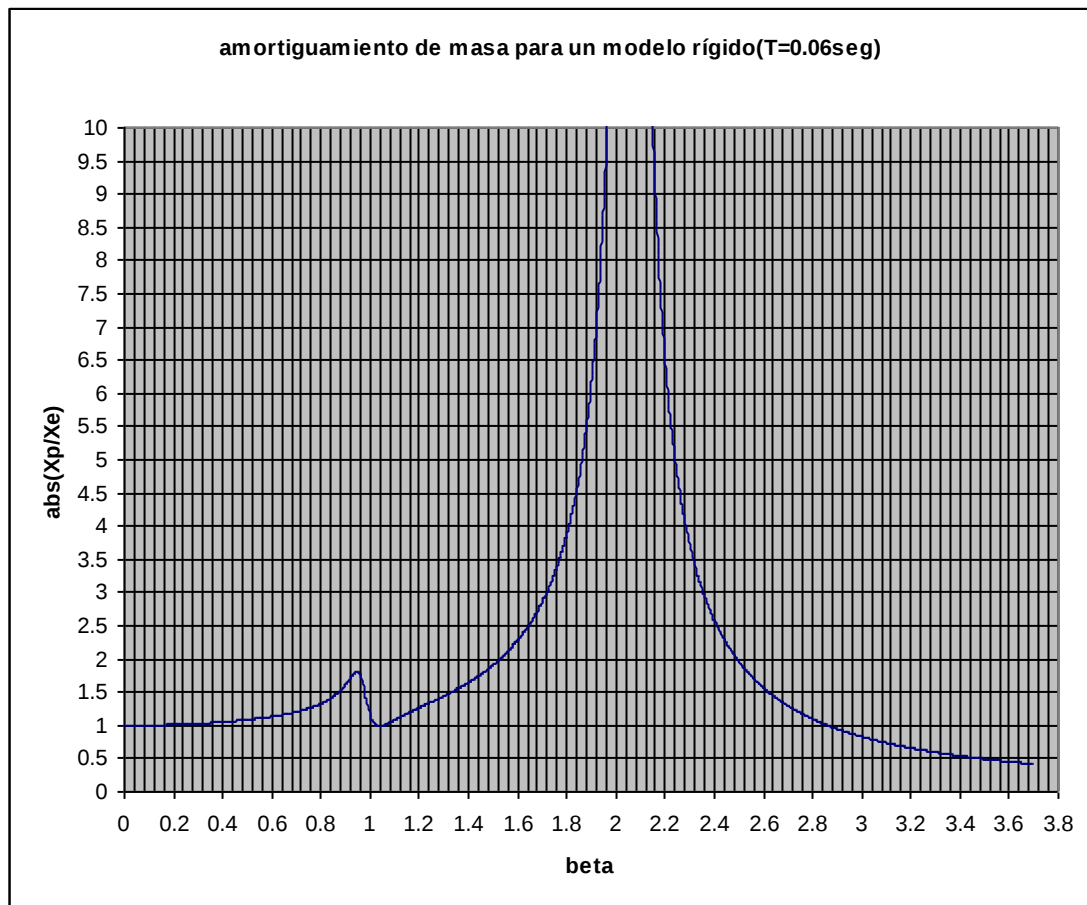


Fig. 4.4 Amplitud máxima del modelo de 1gl ($T_p=0.06\text{seg}$) con amortiguamiento de masa y con variación de la frecuencia de excitación.

Se observa en el gráfico de la figura 4.3 que para el modelo con un periodo de 0.26 segundos, cuando el parámetro beta es menor que 0.2, la amplitud máxima es aproximadamente igual al valor $|X_p/X_e|$, que corresponde a una respuesta estática. Cuando el parámetro beta, que es la relación de la frecuencia de excitación (r) a la frecuencia del sistema auxiliar (ω_a) alcance el valor cercano a 0.8, es decir que la frecuencia de excitación sea aproximadamente $0.8 \cdot 24.5 = 19.6$, entonces la amplitud del piso 1 alcanzará la máxima amplitud. Cuando el parámetro beta tenga un valor de 1, entonces la amplitud máxima tendrá un valor aproximado a 0.50, esto nos dice que la vibración del sistema auxiliar disminuye el efecto de la carga aplicada. Con valores de beta mayores a 2, los valores de la amplitud van decreciendo con una tendencia a cero.

Se observa en el gráfico de la figura 4.4 que para el modelo rígido con un periodo de 0.06 segundos, cuando el parámetro beta es menor que 0.2, la amplitud máxima es aproximadamente igual al valor $|X_p/X_e|$, que corresponde a una respuesta estática. Cuando el parámetro beta, que es la relación de la frecuencia de excitación (r) a la frecuencia del sistema auxiliar (ω_a) alcance el valor cercano a 2.06, es decir que la frecuencia de excitación sea aproximadamente $2.06 \cdot 53.8 = 110.8$, entonces la amplitud del piso 1 alcanzará la máxima amplitud. Cuando el parámetro beta tenga un valor de 1, entonces la amplitud máxima tendrá un valor mayor que 1, esto nos indica que la vibración del sistema auxiliar no disminuye el efecto de la carga aplicada, para el caso de estructuras muy rígidas. Con valores de beta mayores a 3.6, los valores de la amplitud van decreciendo con una tendencia a cero.

Vamos a estudiar la influencia de la rigidez del sistema auxiliar (k_a) con respecto a la rigidez del sistema principal (k_p). En la fórmula (4.7), con masa auxiliar (m_a) del 20% de la masa principal (m_p), y para el parámetro $\beta = 1$ (donde la frecuencia de excitación y la frecuencia del sistema auxiliar coinciden), vamos variando el

parámetro $\gamma = \frac{T_p}{T_a}$ y vamos calculando el resultado de $|X_p/X_e|$, obteniendo la tabla

4.1 como sigue a continuación:

(Tp/Ta)	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10
Xp/Xe	1.000	1.012	1.047	1.099	1.151	1.163	1.090	0.941	0.769	0.617	0.498	0.406
(Tp/Ta)	1.20	1.30	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00	2.20	2.40	2.60
Xp/Xe	0.337	0.283	0.241	0.208	0.181	0.159	0.141	0.126	0.113	0.093	0.077	0.065

Tabla 4.1 Valores de (Tp/Ta) vs |Xp/Xe|

Con los valores anteriores graficamos la figura 4.5 como sigue:

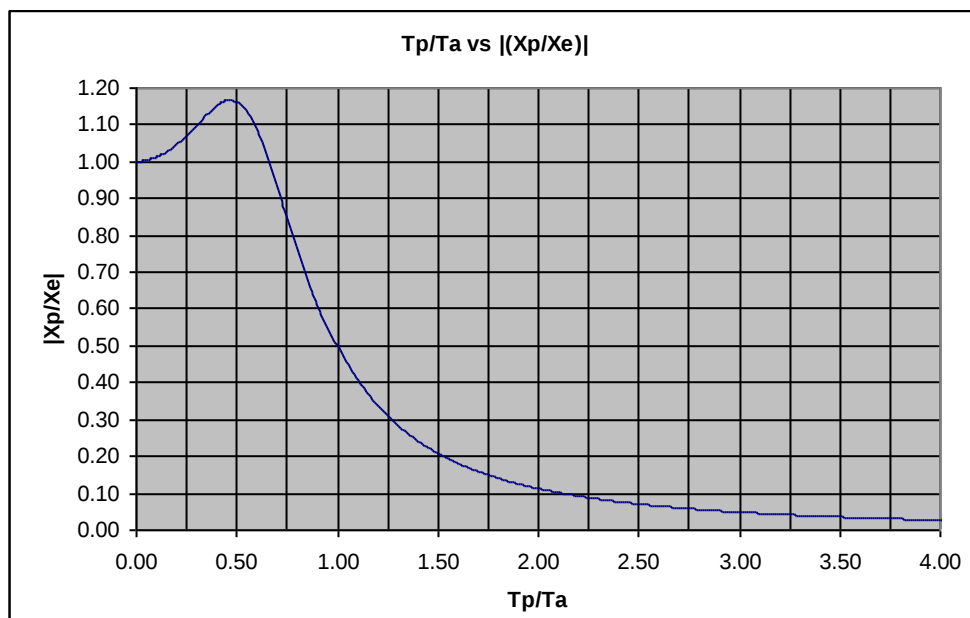


Fig. 4.5 Valores de T_p/T_a vs $|X_p/X_e|$ para el caso $m_a=20\%$ de m_p y $\beta=1$.

En la figura anterior se observa que para valores de (T_p/T_a) iguales o mayores que 0.70 la amplitud $|X_p/X_e|$ es menor que 1. Esto nos dice que debemos buscar valores de k_a de modo que la relación (T_p/T_a) sea mayor de 0.70 para que la amplitud sea menor que 1.

Para el caso de la estructura con $T_p=0.26$ segundos del ejemplo anterior tenemos:

$k_p= 6000 \text{ kg/cm}$; $m_p=10 \text{ kg*seg}^2/\text{cm}$; $k_a=1200 \text{ kg/cm}$; $m_a=2 \text{ kg*seg}^2/\text{cm}$

$$\therefore \omega_p = \sqrt{\frac{6000}{10}} = 24.49 \text{ rad / seg} ; T_p = \frac{2\pi}{24.49} = 0.26 \text{ seg.}$$

$$\omega_a = \sqrt{\frac{1200}{2}} = 24.49 \text{ rad / seg} ; T_a = \frac{2\pi}{24.49} = 0.26 \text{ seg.}$$

$$(T_p/T_a) = 0.26/0.26 = 1$$

Con este valor de $T_p/T_a = 1$ y con $\beta = 1$ obtenemos en la figura 4.5 el valor de $(|X_p/X_a|) = 0.50$.

Para el caso de la estructura rígida del ejemplo anterior tenemos:

$$k_p = 115473 \text{ kg/cm; } m_p = 10 \text{ kg*seg}^2/\text{cm; } k_a = 5800 \text{ kg/cm; } m_a = 2 \text{ kg*seg}^2/\text{cm}$$

$$\therefore \omega_p = \sqrt{\frac{115473}{10}} = 107.46 \text{ rad / seg} ; T_p = \frac{2\pi}{107.46} = 0.06 \text{ seg.}$$

$$\omega_a = \sqrt{\frac{5800}{2}} = 53.85 \text{ rad / seg} ; T_a = \frac{2\pi}{53.85} = 0.12 \text{ seg}$$

$$(T_p/T_a) = 0.06/0.12 = 0.50$$

Con este valor de $T_p/T_a = 0.50$ y con $\beta = 1$ obtenemos en la figura 4.5 el valor de $(|X_p/X_a|) = 1.16$.

Entonces en estructuras donde (T_p/T_a) sea mayor que 0.70, con masa auxiliar del 20% de m_p y β igual a 1, la amplitud $|X_p/X_e|$ resulta menor que 1 y por lo tanto el sistema con amortiguamiento de masa para estos casos es beneficioso.

CAPITULO 5

DESARROLLO DE UN PROGRAMA EN MATLAB PARA EL CÁLCULO DE LOS PARAMETROS

5.1 Introducción

En el presente capítulo se describe el contenido del programa hibps (híbrido péndulo superior) desarrollado en forma preliminar en lenguaje de programación Matlab, usado para calcular las derivas, factor de aislamiento y porcentaje de amortiguamiento de masa en estructuras aporticadas básicas de un piso y de varios pisos. Este programa permite calcular los parámetros señalados en el capítulo 2 para configuraciones estructurales planas.

El programa evalúa dinámicamente la estructura tantas veces como se incremente la masa auxiliar y también tantas veces como se degrade la rigidez del piso 1 para calcular en cada caso el factor de aislamiento de la estructura.(Ver la página de Anexos).

5.2 Ecuaciones del movimiento dinámico usadas en el programa hibps^{13,14}

Los cálculos se basan en el método de superposición modal con espectro de respuesta. La ecuación dinámica es la siguiente:

$$\bar{M}\ddot{u}(t) + \bar{C}\dot{u}(t) + \bar{K}u(t) = F(t) \quad (5.2.1)$$

$$\text{Cuando existe movimiento en la base } F(t) = -\bar{M}\hat{1}\ddot{u}_g(t) \quad (5.2.2)$$

donde $\hat{1}$ es un vector que representa una columna de “unos” en los lugares correspondientes a los grados de libertad de la estructura.

La solución de la ecuación (5.2.1) es de la forma

$$u = \bar{A}f(t) \text{ o } u_i = \sum_{j=1}^n A_{ij} f_j(t) \quad (5.2.3)$$

Sustituyendo la ecuación (5.2.3) en la (5.2.1) tenemos $\bar{M}\ddot{A}\ddot{f}(t) + \bar{C}A\dot{f}(t) + \bar{K}A\bar{f}(t) = F(t)$ (5.2.4)

Premultiplicando por una forma modal A_i^t

$$A_i^t \bar{M} \ddot{A} \ddot{f}(t) + A_i^t \bar{C} A \dot{f}(t) + A_i^t \bar{K} A \bar{f}(t) = A_i^t F(t) \quad (5.2.5)$$

Sabemos que:

$$(A_i^t \bar{M} A) \ddot{f}(t) = \mu_i \ddot{f}_i(t) \quad (5.2.6)$$

$$(A_i^t \bar{K} A) f(t) = \lambda_i f_i(t) \quad (5.2.7)$$

$$\text{y asumiendo que } (A_i^t \bar{C} A) \dot{f}(t) = 2\zeta_i w_i \mu_i \dot{f}_i(t) \quad (5.2.8)$$

Siendo $\lambda_i = w_i^2$

sustituyendo las ecuaciones (5.2.6), (5.2.7), (5.2.8) en la ecuación (5.2.5) obtenemos:

$$\mu_i \ddot{f}_i(t) + 2\zeta_i w_i \mu_i \dot{f}_i(t) + \mu_i \lambda_i f_i(t) = A_i^t F(t) \quad (5.2.9)$$

$$\ddot{f}_i(t) + 2\zeta_i w_i \dot{f}_i(t) + w_i^2 f_i(t) = \frac{1}{\mu_i} A_i^t F(t) \quad (5.2.10)$$

En el caso de movimiento en la base tenemos:

$$\ddot{f}_i(t) + 2\zeta_i w_i \dot{f}_i(t) + w_i^2 f_i(t) = -\frac{\ddot{u}_g(t)}{\mu_i} A_i^t \bar{M} \hat{1} \quad (5.2.11)$$

Si se define el coeficiente de participación como:

$$\Gamma_i = \frac{A_i^t \bar{M} \hat{1}}{\mu_i} = \frac{A_i^t \bar{M} \hat{1}}{A_i^t \bar{M} A_i}$$

$$\ddot{f}_i(t) + 2\zeta_i w_i \dot{f}_i(t) + w_i^2 f_i(t) = -\Gamma_i \ddot{u}_g \quad (5.2.12)$$

Si se repiten los pasos de 5.2.1 a 5.2.12 para cada modo obtenemos:

$$\begin{aligned} \ddot{f}_1(t) + 2\zeta_1 w_1 \dot{f}_1(t) + w_1^2 f_1(t) &= -\Gamma_1 \ddot{u}_g \\ \ddot{f}_2(t) + 2\zeta_2 w_2 \dot{f}_2(t) + w_2^2 f_2(t) &= -\Gamma_2 \ddot{u}_g \end{aligned} \quad (5.2.13)$$

$\vdots$

$$\ddot{f}_n(t) + 2\zeta_n w_n \dot{f}_n(t) + w_n^2 f_n(t) = -\Gamma_n \ddot{u}_g$$

Se puede solucionar cada una de estas ecuaciones desacopladas, como un sistema de 1 grado de libertad dinámico, cuya incógnita es la coordenada $f_i(t)$.

Con cada una de las $f_i(t)$ y con la matriz $\bar{A}$ se obtiene la solución

$$\hat{u} = \bar{A}\hat{f}(t)$$

La solución usada en este estudio es la solución aproximada describiendo el movimiento sísmico en términos de sus espectros de respuesta y empleando el método de superposición modal para estimar la máxima respuesta estructural.

Para amortiguamiento pequeño tenemos:

$$\ddot{f}_i(t) + w_i^2 f_i(t) = -\Gamma_i \ddot{u}_g \quad (5.2.14)$$

$$\begin{aligned} \text{Haciendo cambio de variable: } f_i &= \Gamma_i z_i \\ \ddot{f}_i &= \Gamma_i \ddot{z}_i \end{aligned} \quad (5.2.15)$$

$$\Gamma_i \ddot{z}_i + w_i^2 \Gamma_i z_i = -\Gamma_i \ddot{u}_g(t) \quad (5.2.16)$$

$$\ddot{z}_i + w_i^2 z_i = -\ddot{u}_g(t) \quad (5.2.17)$$

Esta ecuación es semejante a $m\ddot{u} + ku = -m\ddot{u}_g$

$$|\ddot{z}_i + \ddot{u}_g| = -w_i^2 z_i \quad (5.2.18)$$

$$|\ddot{z}_i + \ddot{u}_g|_{\max} = S_{ai} ; \quad |z_i|_{\max} = S_{di} \quad (5.2.19)$$

$$S_{ai} = w_i^2 S_{di} \rightarrow S_{di} = \frac{S_{ai}}{w_i^2} \quad (5.2.20)$$

$$|f_i|_{\max} = \Gamma_i |z_i|_{\max} = \Gamma_i S_{di} = \Gamma_i \frac{S_{ai}}{w_i^2} \quad (5.2.21)$$

Cálculo del máximo u_i

$$u_i = A_{i1} f_1 + A_{i2} f_2 + \dots + A_{in} f_n \quad (5.2.22)$$

Los máximos $|f_n|_{\max}$ no necesariamente coinciden en tiempo

$$|u_i|_{\max, \text{ posible}} = A_{i1} |f_1|_{\max} + A_{i2} |f_2|_{\max} + \dots + A_{in} |f_n|_{\max} \quad (5.2.23)$$

Este valor siempre es conservador ya que las respuestas máximas de todos los modos no son simultáneas. Con base en estudios probabilísticas es más realista estimar la respuesta total con la expresión:

$$|u_i|_{\max, \text{ probable}} = \sqrt{((A_{i1}|f_1|_{\max})^2 + (A_{i2}|f_2|_{\max})^2 + \dots + (A_{in}|f_n|_{\max})^2)} \quad (5.2.24)$$

$$|u_i|_{\max, \text{ probable}} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (A_{ij} \frac{S_{qj}}{w_j^2} \Gamma_j)^2} \quad (5.2.25)$$

La anterior expresión es el llamado método SRSS (raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las contribuciones modales). Este método SRSS se usa cuando los períodos tienen valores que no son muy cercanos entre sí.

5.3 Esquema y descripción de los bloques del programa hibps

- Lectura de datos (**Bloque 1**)
- Cálculos preliminares (**Bloque 2**).
 - ❖ Definición del incremento
 - Ciclo que incrementa la masa auxiliar (**Bloque 3**)
 - ❖ Incremento de la masa auxiliar
 - Ciclo que realiza la degradación de la rigidez de la base (**Bloque 4**)
 - ❖ Cálculo del factor de aislamiento
 - Cálculo de la respuesta dinámica en término de la deriva del modelo híbrido (**Bloque 5**)
 - Fin del ciclo
 - Fin del ciclo
 - Normalización (**Bloque 6**)
 - Generación de gráficos (**Bloque 7**)

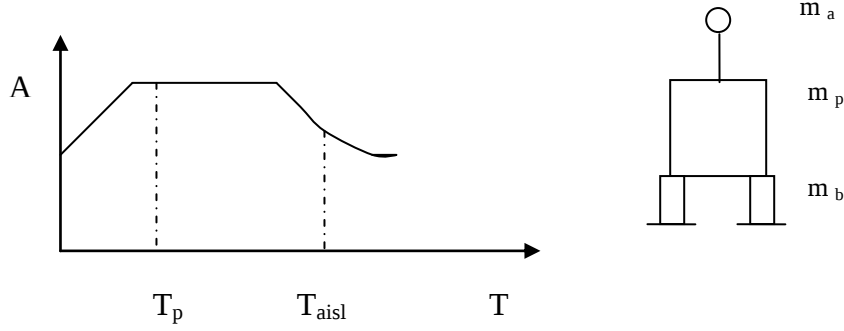
Los bloques que forman parte del programa hibps son los siguientes:

- **Bloque 1:** En este bloque se ingresan los datos como la matriz de rigidez (K) y la matriz de masa de la estructura (Mo), el coeficiente de amortiguamiento (chi) y la aceleración de la gravedad (g).
- **Bloque 2:** Se realizan los cálculos preliminares como el cálculo de la frecuencia y el periodo fundamental Tp del modelo básico con el fin de

calcular la rigidez del sistema auxiliar (k_a) y también se realiza el cálculo del incremento de la masa auxiliar (m_a).

El cálculo de la rigidez del sistema auxiliar (k_a) se realiza como sigue:

Por la norma UBC⁵ el periodo de la estructura aislada (T_{aisl}) se tomó como 3 veces el periodo natural del modelo básico (T_p) $\therefore T_{aisl} = 3T_p$



$$w_{aisl} = \sqrt{\left(\frac{k_{aisl}}{M_{total}} \right)} ; M_{total} = m_p + m_b + m_a \quad (5.3.1)$$

$\bar{w}$: frecuencia de excitación; w_a : frecuencia del sistema auxiliar.

m_p : masa del modelo básico; m_b : masa del aislador.

m_a : masa del sistema auxiliar.

$$T_{aisl} = \frac{2\pi}{w_{aisl}} \text{ con rango de } 2T_p \leq T_{aisl} \leq 3T_p \quad (5.3.2)$$

El sistema aislado sometido a una excitación sísmica vibrará predominantemente con la frecuencia natural del sistema aislado, por lo tanto

$$\bar{w} = w_{aisl} \therefore \bar{w} = \frac{2\pi}{T_{aisl}} \quad (5.3.3)$$

La frecuencia $\bar{w}$ es resonante con $w_a \therefore w_a = \bar{w}$ (5.3.4)

$$\frac{k_a}{m_a} = \bar{w}^2 \rightarrow k_a = \bar{w}^2 m_a ; \text{ Para } T_{aisl} = 2T_p \rightarrow T_{aisl} = \frac{4\pi}{w_p} \quad (5.3.5)$$

Llamamos $\bar{w}_1$ al menor valor de la frecuencia y $\bar{w}_2$ al valor mayor.

$$\bar{w}_1 = \frac{2\pi}{3T_p}; \bar{w}_2 = \frac{2\pi}{2T_p} = \frac{\pi}{T_p}$$

$$[k_a] = [\bar{w}^2][m_a] \text{ pero } \bar{w}^2 \text{ varía de}$$

$$\bar{w}_1^2 \text{ a } \bar{w}_2^2 \text{ y } m_a \text{ varía del 5\% mp al 40\% mp}$$

$$[k_a] = [\bar{w}_1^2 \dots \bar{w}_2^2][5\%mp \dots 40\%mp] \quad \therefore$$

$$k_{a1} = \frac{4\pi^2}{9T_p^2} 0.05mp \text{ este es el valor menor de } k_a; k_{a2} = \frac{\pi^2}{T_p^2} 0.40mp \text{ este es el}$$

$$\text{valor mayor de } k_a; k_a = \frac{(k_{a1} + k_{a2})}{2} \text{ esta será la rigidez del sistema auxiliar.}$$

Para calcular el incremento de la masa auxiliar tenemos:

1. se suman los elementos de la diagonal principal de la matriz de masa del modelo híbrido, se le resta la masa auxiliar y se divide este resultado por 2, es decir $M_r = (m_1 + m_2)/2$.
 2. el incremento es $\text{increMr} = M_r / \text{contad1}$, siendo contad1 el contador del ciclo usado para incrementar la masa auxiliar.
- **Bloque 3:** Este bloque realiza el ciclo que controla la masa auxiliar en función de la masa de piso del modelo básico. El ciclo comienza con una masa auxiliar con un valor del 5% de la masa de piso del modelo básico, con incrementos del 2.5% o 5% hasta llegar a un 50% del valor de la masa de piso.
 - **Bloque 4:** Este bloque realiza el ciclo que controla la degradación de la rigidez de la base (k_1) del modelo híbrido y calcula también las propiedades modales de la estructura (frecuencias circulares, periodos naturales y modos de vibración).

La rigidez k_1 comienza con el 100% de k_1 y se va degradando en un 10% tantas veces como indique el control contad2 . El factor de aislamiento T_{coc1} se calcula como la relación del periodo fundamental del modelo aislado sin

amortiguamiento de masa y el periodo fundamental del modelo básico sin amortiguamiento de masa.

El ciclo del bloque 3 es externo y el del bloque 4 es interno. Por cada incremento de la masa auxiliar, la rigidez k_1 se va degradando hasta que nos indique el control contad2 , después vuelve a incrementarse nuevamente la masa auxiliar hasta que nos indique el control contad1 . A continuación se presenta un esquema de lo que realiza el bloque 3 y el 4.

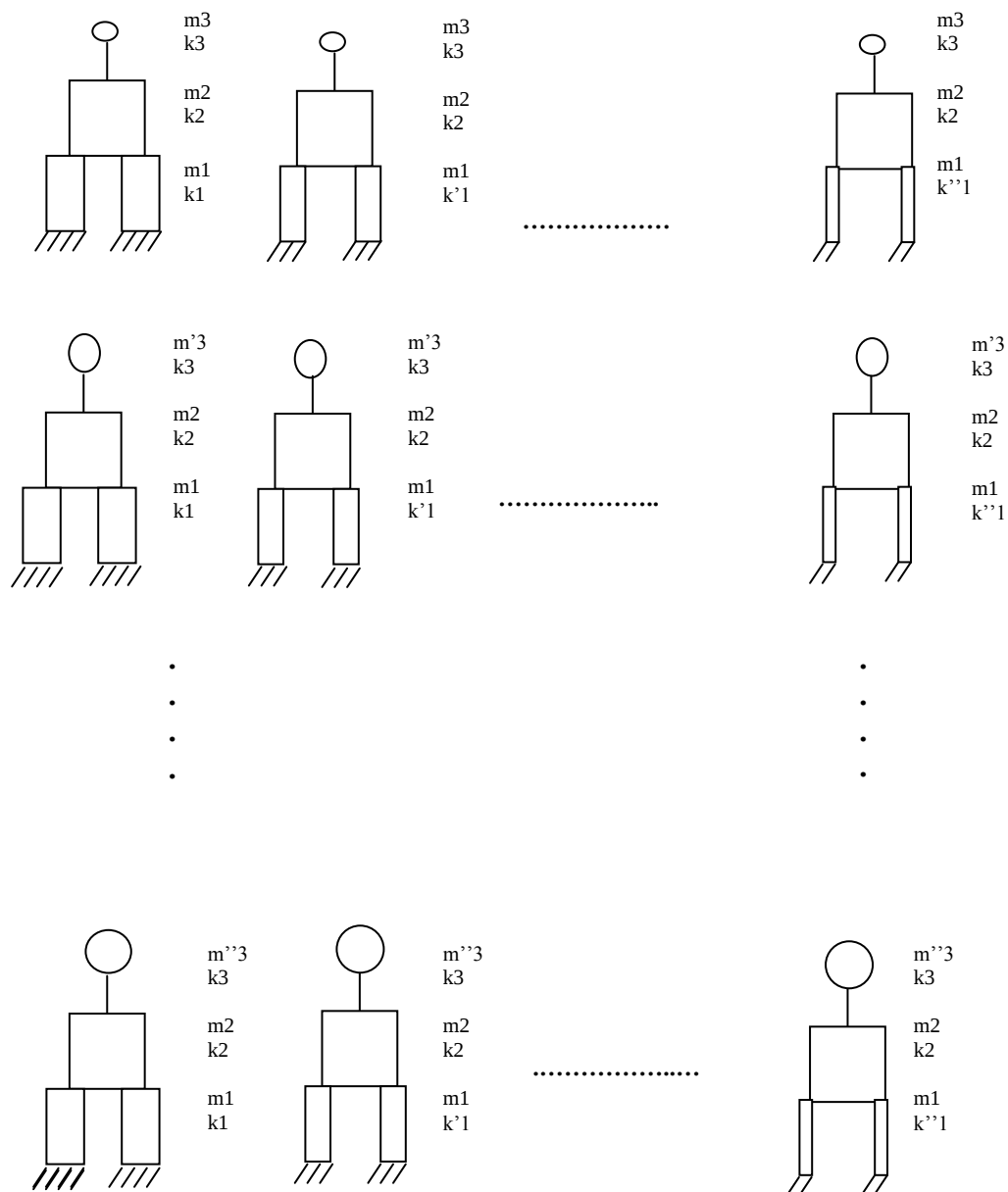


Fig. 5.1 Esquema de lo realizado por los ciclos de los bloques 3 y 4

Primero se comienza el primer ciclo con una masa auxiliar m_3 muy pequeña digamos del 5% de la masa de piso del modelo básico, se entra en el segundo ciclo interno al anterior y se va degradando k_1 siendo $k_1 > k'_1 > k''_1$. Luego se pasa nuevamente al ciclo externo y se va aumentando la masa auxiliar, siendo entonces $m_3 < m'_3 < m''_3$ se entra nuevamente al ciclo interno con el fin de seguir degradando la rigidez k_1 , y se continúa así sucesivamente.

- **Bloque 5:** Cálculo de los factores de participación, cálculo de los desplazamientos y las derivas máximas.

Una vez calculados los modos de vibración (A_i), se calculan los factores de

participación $\Gamma_i = \frac{\bar{A}_i^t \bar{M} \hat{1}}{\bar{A}_i^t \bar{M} \bar{A}_i}$ siendo $\bar{M}$ la matriz de masa del modelo de 3

grados de libertad y $\hat{1}$ es el vector de una columna de ‘unos’.

En este bloque se realiza el cálculo de las ordenadas espectrales, según la

ecuación: $|f_i|_{\max} = \Gamma_i \frac{S_{ai}}{w_i^2}$. Después se calculan los desplazamientos con la

expresión $|u_i|_{\max, probable} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (A_{ij} \frac{S_{aj}}{w_j^2} \Gamma_j)^2}$. Las derivas máximas se obtuvieron

con la siguiente expresión: $derm_i = \left| u_{i+1(\max)} - u_{i(\max)} \right|$

- **Bloque 6:** Se calcula la deriva del modelo básico con el fin de normalizar las derivas del modelo híbrido, es decir, se dividen las derivas del modelo híbrido por la deriva del modelo básico.
- **Bloque 7:** Se grafican los resultados en tres dimensiones: en el eje 1 van los factores de aislamientos (Tcoc1); en el eje 2 van los porcentajes de masa de piso que corresponden a la masa auxiliar y el eje 3 van las derivas normalizadas. En este gráfico los valores de las derivas normalizadas que estén por debajo de 1 representan que existe beneficio para el sistema híbrido estudiado.

El programa desarrollado anteriormente (hibps) se usa para sistemas híbridos con amortiguamiento de masa superior o en el tope de la estructura. De manera similar se desarrolló el programa hibpi que se usa para sistemas híbridos con amortiguamiento de masa inferior o en la base de la estructura.

CAPITULO 6**ANÁLISIS DINÁMICO DE SISTEMAS HÍBRIDOS CON ESTRUCTURA
BÁSICA DE UN PISO****6.1 Introducción**

En este capítulo se analiza el modelo básico de un piso al cual se le adiciona el sistema de aislamiento en la base y el sistema de amortiguamiento de masa ubicado en el primer caso en el tope de la estructura y en el segundo caso se ubica en la base de la estructura.

6.2 Características geométricas y físicas del modelo

Se presenta a continuación las características geométricas y físicas de un pórtico plano de 1 piso y que será sometido a una excitación sísmica definida por el espectro de la norma venezolana para edificaciones sismorresistentes COVENIN MINDUR 2001. Se consideró para este ejemplo el espectro elástico para el tipo de suelo S1, S2, S3, S4. Se utilizaron 4 modelos básicos de un piso de periodos fundamentales como se indica en la tabla 6.1

Modelo	Período Fundamental (seg)
Modelo 1	0.50
Modelo 2	0.24
Modelo 3	0.13
Modelo 4	0.05

Tabla 6.1 Modelos básicos de un piso con sus respectivos periodos fundamentales.

Las vigas usadas en cada uno de los 4 modelos tienen una sección transversal de 30x60 cm.

La respuesta estructural máxima probable se analizó mediante el programa realizado en Matlab¹¹ y verificado mediante el programa SAP2000¹⁰.

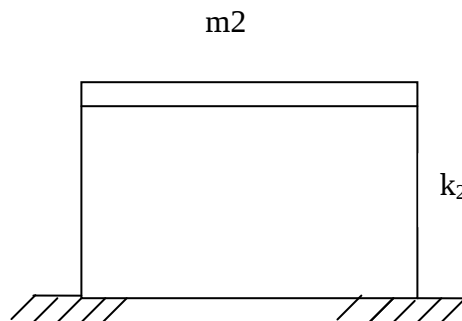
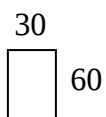


Fig. 6.1 Modelo básico de 1gl.

Vigas: 30x60 cm



Col.: según el modelo 1, 2, 3, 4

Para vigas y columnas tenemos material: concreto

Módulo de elasticidad	$E = 253105 \text{ kg/cm}^2$
Resistencia a compresión del concreto	$f'_c = 281 \text{ kg/cm}^2$
esfuerzo cedente del acero de refuerzo	$F_y = 4218 \text{ kg/cm}^2$

Tabla 6.1 Propiedades físicas de vigas y columnas

Vigas	Area(cm ²)	Inercia(cm ⁴)
	1800	540000

Tabla 6.2 Características físicas de las vigas**Modelo 1:**

Columnas	Area(cm ²)	Inercia(cm ⁴)
todas	324	8748

Tabla 6.3 Características físicas de las columnas del modelo 1.

Masa en cada piso: 12.5 kg-seg²/cm; k₂ = 1968 kg/cm

Frecuencia natural (w):

$$w = \sqrt{k_2 / m_2} = \sqrt{1968 / 12.5} = 12.55 \text{ rad / seg} \rightarrow T_p = \frac{2\pi}{w} = 0.50 \text{ seg}$$

Añadiendo a este modelo la base aislada y la masa de amortiguamiento en el tope y por medio del SAP2000 encontramos la matriz de rigidez (K) para este modelo híbrido de 3 grados de libertad, resultando:

$$K = \begin{bmatrix} 3936 & -1968 & 0 \\ -1968 & 3936 & -1968 \\ 0 & -1968 & 1968 \end{bmatrix}; \quad M = \begin{bmatrix} 12.5 & 0 & 0 \\ 0 & 12.5 & 0 \\ 0 & 0 & 12.5 \end{bmatrix}$$

Modelo 2:

Columnas	Area(cm ²)	Inercia(cm ⁴)
todas	625	32552.08

Tabla 6.4 Características físicas de las columnas del modelo 2.

Masa en cada piso: 10 kg-seg²/cm; k₂ = 6766 kg/cm

Frecuencia natural (w):

$$w = \sqrt{k_2 / m_2} = \sqrt{6766 / 10} = 26.01 \text{ rad / seg} \rightarrow T_p = \frac{2\pi}{w} = 0.24 \text{ seg}$$

Añadiendo a este modelo la base aislada y la masa de amortiguamiento en el tope y por medio del SAP2000 encontramos la matriz de rigidez (K) para este modelo híbrido de 3 grados de libertad, resultando:

$$K = \begin{bmatrix} 13546 & -6773 & 0 \\ -6773 & 13539 & -6766 \\ 0 & -6766 & 6766 \end{bmatrix}; \quad M = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}$$

Modelo 3:

Columnas	Area(cm ²)	Inercia(cm ⁴)
todas	1225	125052.08

Tabla 6.5 Características físicas de las columnas del modelo 3.

Masa en cada piso: 10 kg-seg²/cm; k2 = 22503 kg/cm

Frecuencia natural (w):

$$w = \sqrt{k2/m2} = \sqrt{22503/10} = 47.44 \text{ rad / seg} \rightarrow T_p = \frac{2\pi}{w} = 0.13 \text{ seg}$$

Añadiendo a este modelo la base aislada y la masa de amortiguamiento en el tope y por medio del SAP2000 encontramos la matriz de rigidez (K) para este modelo híbrido de 3 grados de libertad, resultando:

$$K = \begin{bmatrix} 45006 & -22503 & 0 \\ -22503 & 44779 & -22277 \\ 0 & -22277 & 22277 \end{bmatrix}; \quad M = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}$$

Modelo 4:

Columnas	Area(cm ²)	Inercia(cm ⁴)
todas	3600	1080000

Tabla 6.6 Características físicas de las columnas del modelo 4.

Masa en cada piso: 10 kg-seg²/cm; k2 = 115473 kg/cm

Frecuencia natural (w):

$$w = \sqrt{k2/m2} = \sqrt{115473/10} = 107.458 \text{ rad / seg} \rightarrow T_p = \frac{2\pi}{w} = 0.06 \text{ seg}$$

Añadiendo a este modelo la base aislada y la masa de amortiguamiento en el tope y por medio del SAP2000 encontramos la matriz de rigidez (K) para este modelo híbrido, resultando:

$$K = \begin{bmatrix} 232296 & -115473 & 0 \\ -115473 & 219316 & -103842 \\ 0 & -103842 & 103842 \end{bmatrix}; \quad M = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}$$

6.2.1 Análisis del Modelo 1

Utilizando el programa hibps y usando espectro para suelo S1,S2,S3,S4 obtenemos los siguientes resultados:

Para el modelo básico de 1 grado de libertad con periodo fundamental de 0.50 segundos tenemos:

Tipo de suelo	Deriva (cm)
S1	3.73
S2	4.21
S3	4.04
S4	1.96

Tabla 6.7 Modelo básico de 1 gld con T1=0.50 s

6.2.2 Análisis del Modelo 2

Utilizando el programa hibps y usando espectro para suelo S1,S2,S3,S4 obtenemos los siguientes resultados:

Para el modelo básico de 1 grado de libertad con periodo fundamental de 0.24 segundos tenemos:

Tipo de suelo	Deriva (cm)
S1	1.09
S2	0.98
S3	0.94
S4	0.40

Tabla 6.8 Modelo básico de 1 gld con T1=0.24 s

6.2.3 Análisis del Modelo 3

Utilizando el programa hibps y usando espectro para suelo S1,S2,S3,S4 obtenemos los siguientes resultados:

Para el modelo básico de 1 grado de libertad con periodo fundamental de 0.13 segundos tenemos:

Tipo de suelo	Deriva (cm)
S1	0.33
S2	0.27
S3	0.22
S4	0.09

Tabla 6.9 Modelo básico de 1 gld con $T_1=0.13$ s

6.2.4 Análisis del Modelo 4

Utilizando el programa hibps y usando espectro para suelo S1,S2,S3,S4 obtenemos los siguientes resultados:

Para el modelo básico de 1 grado de libertad con periodo fundamental de 0.06 segundos tenemos:

Tipo de suelo	Deriva (cm)
S1	0.05
S2	0.04
S3	0.03
S4	0.01

Tabla 6.10 Modelo básico de 1 gld con $T_1=0.06$ s

A continuación se presentan los gráficos correspondientes a cada uno de los 4 modelos híbridos sometidos a excitaciones definidas por los espectros de cada uno de los 4 tipos de suelos, con péndulo superior.

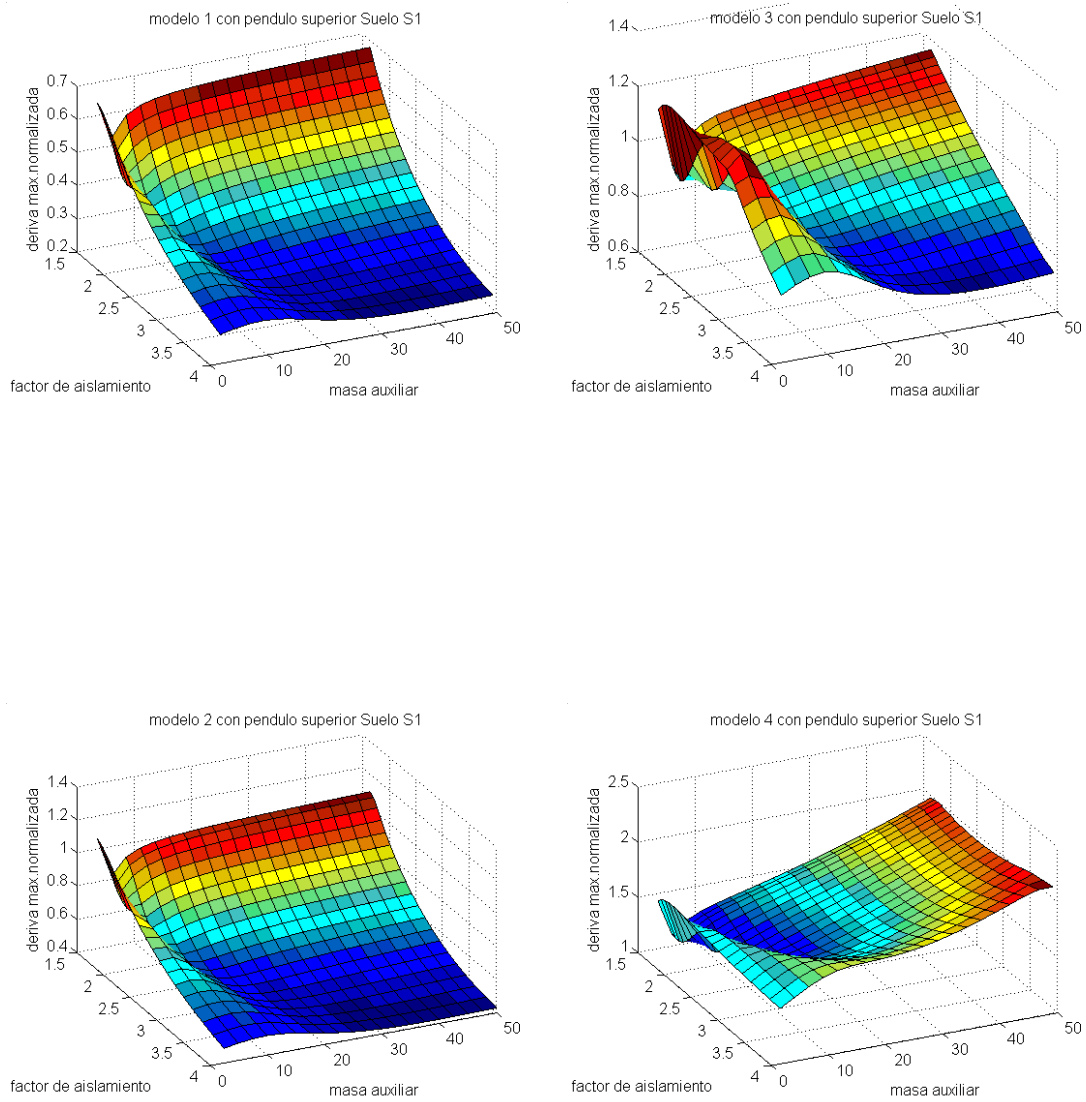


Fig. 6.1 Gráficos de modelos 1, 2, 3, 4 con suelo S1 y péndulo superior.

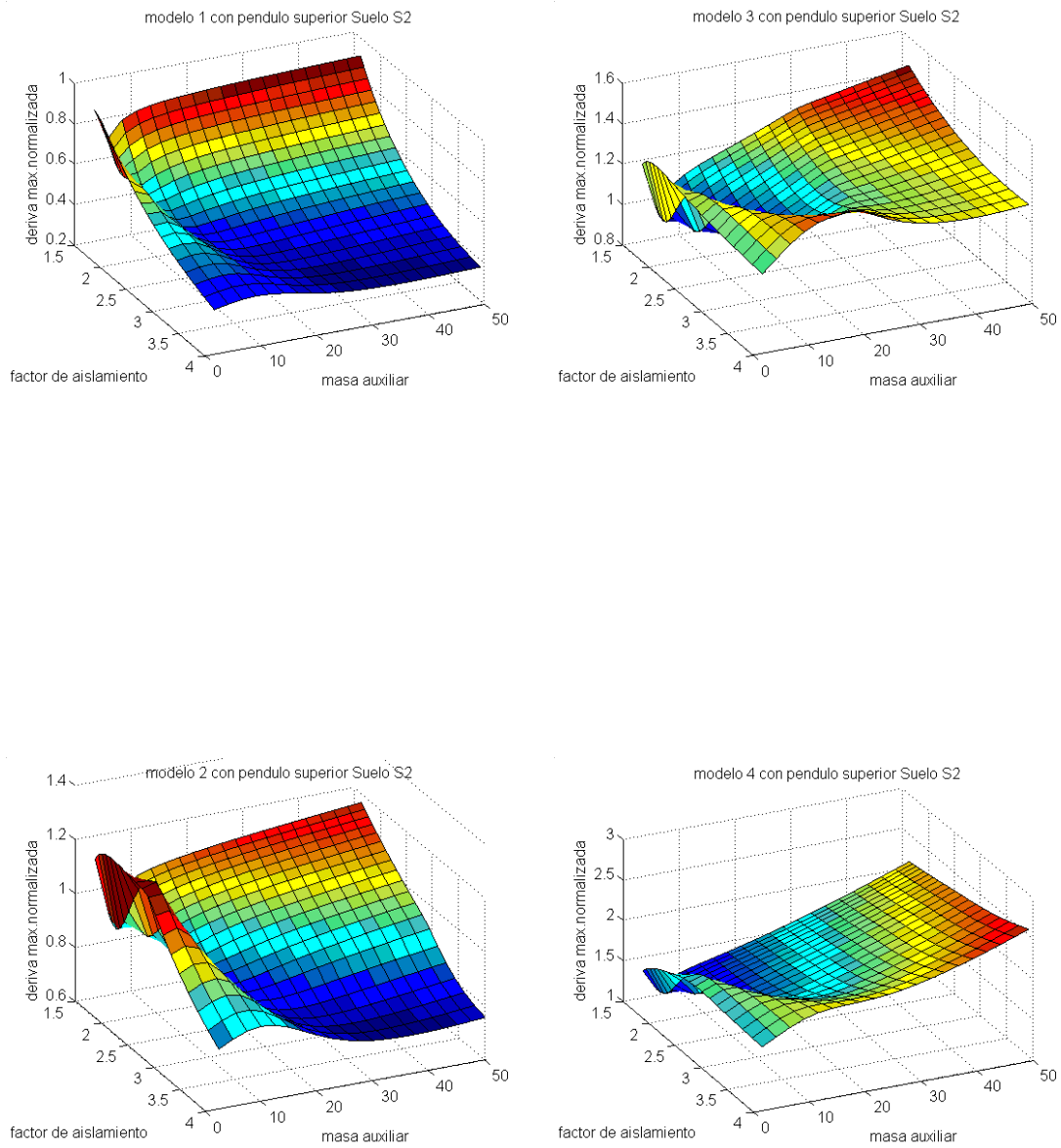


Fig.6.2 Gráficos de modelos 1, 2, 3, 4 con suelo S2 y péndulo superior.

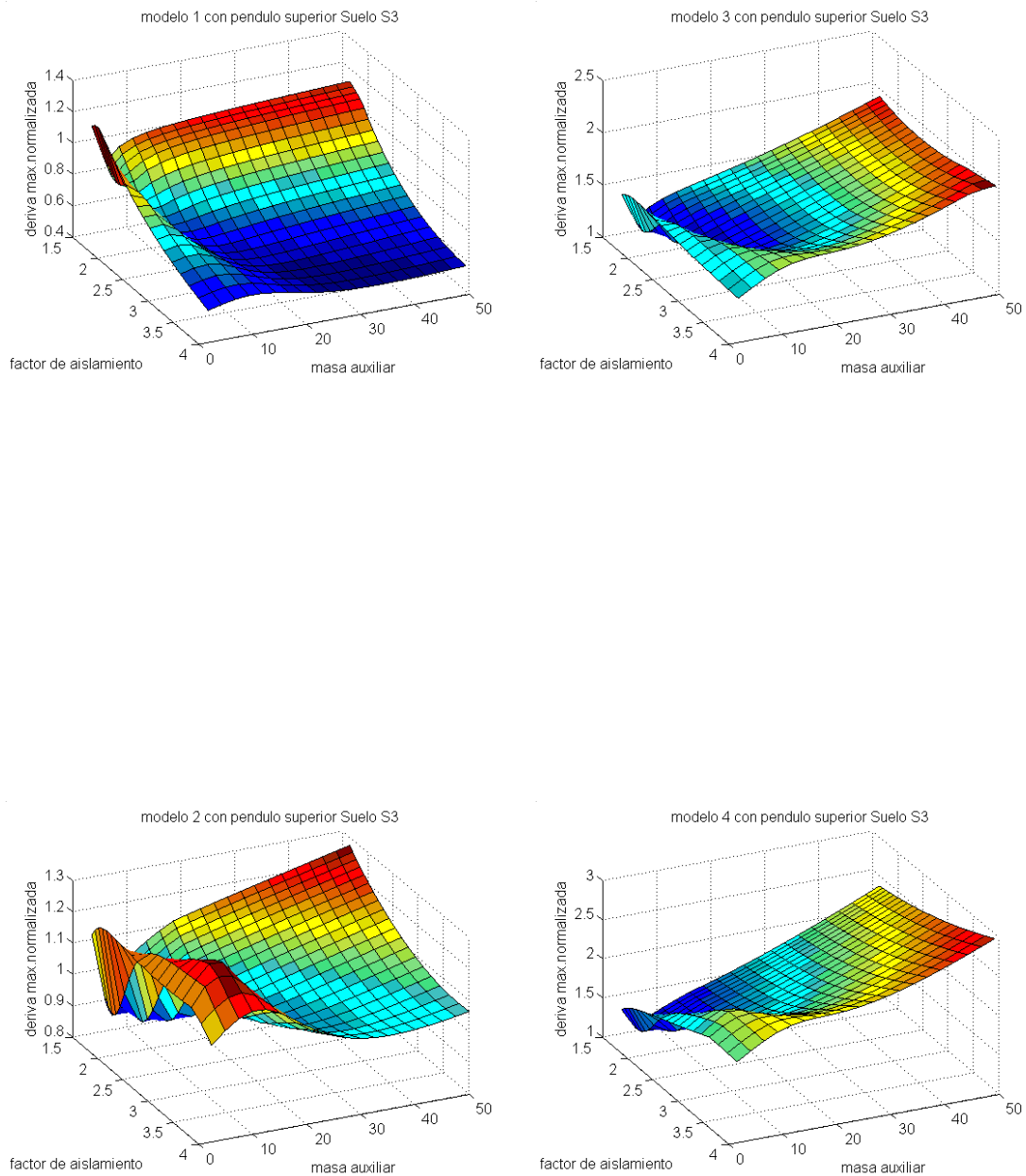


Fig. 6.3 Gráficos de modelos 1, 2, 3, 4 con suelo S3 y péndulo superior.

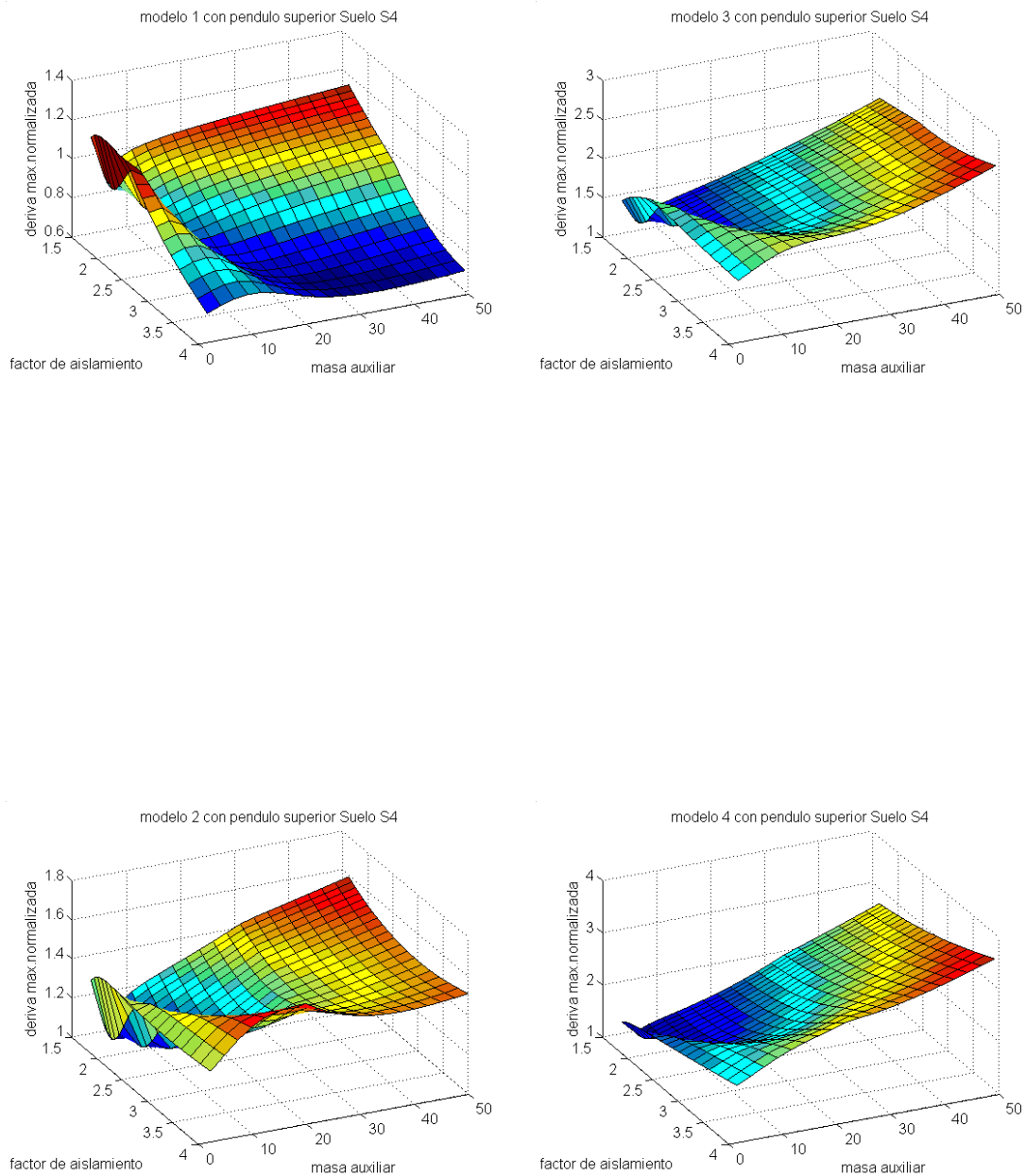


Fig. 6.4 Gráficos de modelos 1, 2, 3, 4 con suelo S4 y péndulo superior.

Las figuras siguientes corresponden a los mismos modelos 1, 2, 3, 4 pero con péndulo en la base, sometidos a excitaciones definidas por los espectros para cada uno de los 4 tipos de suelos.

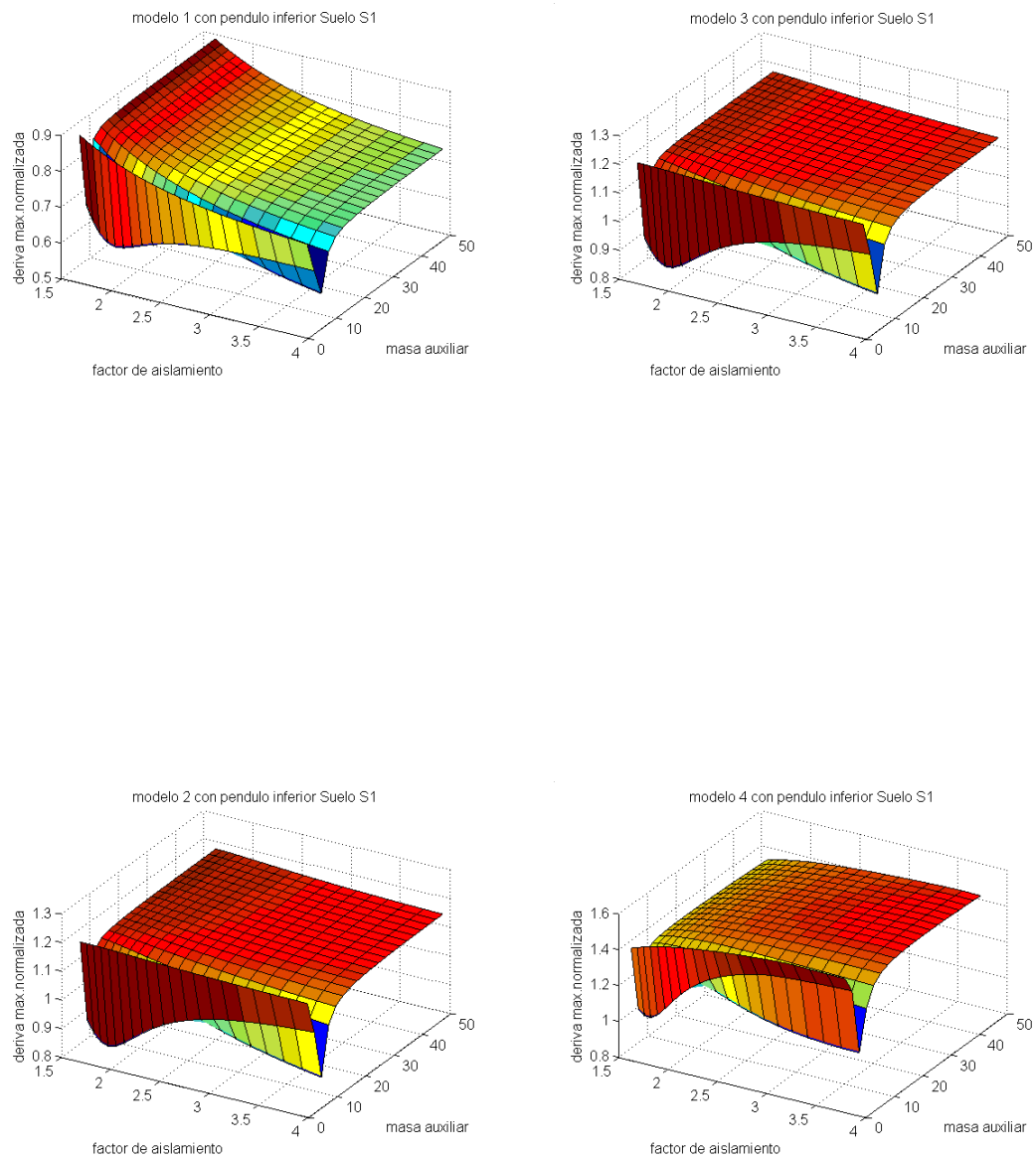


Fig.6.5 Gráficos de modelos 1, 2, 3, 4 con suelo S1 y péndulo inferior.

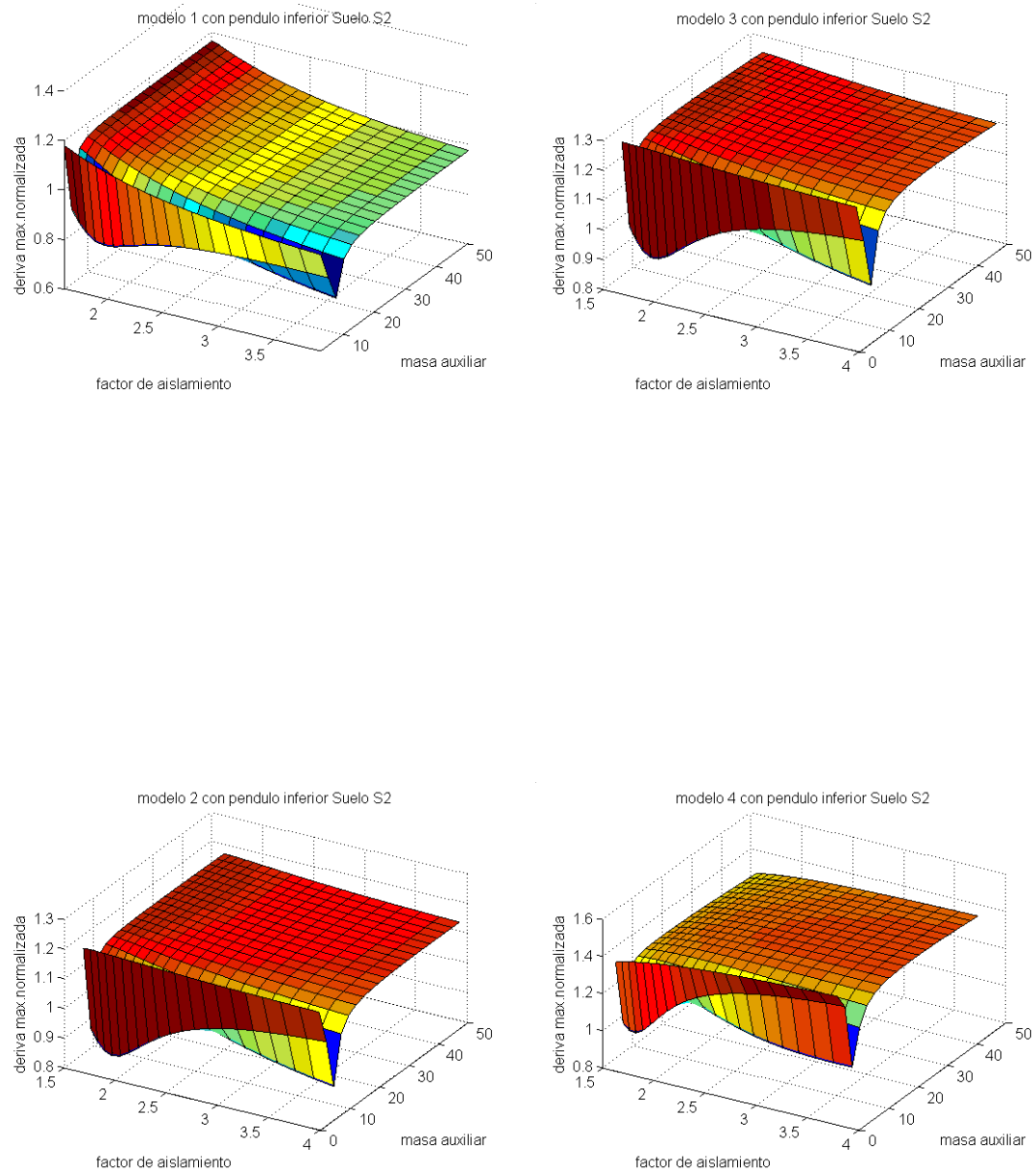


Fig. 6.6 Gráficos de modelos 1, 2, 3, 4 con suelo S2 y péndulo inferior.

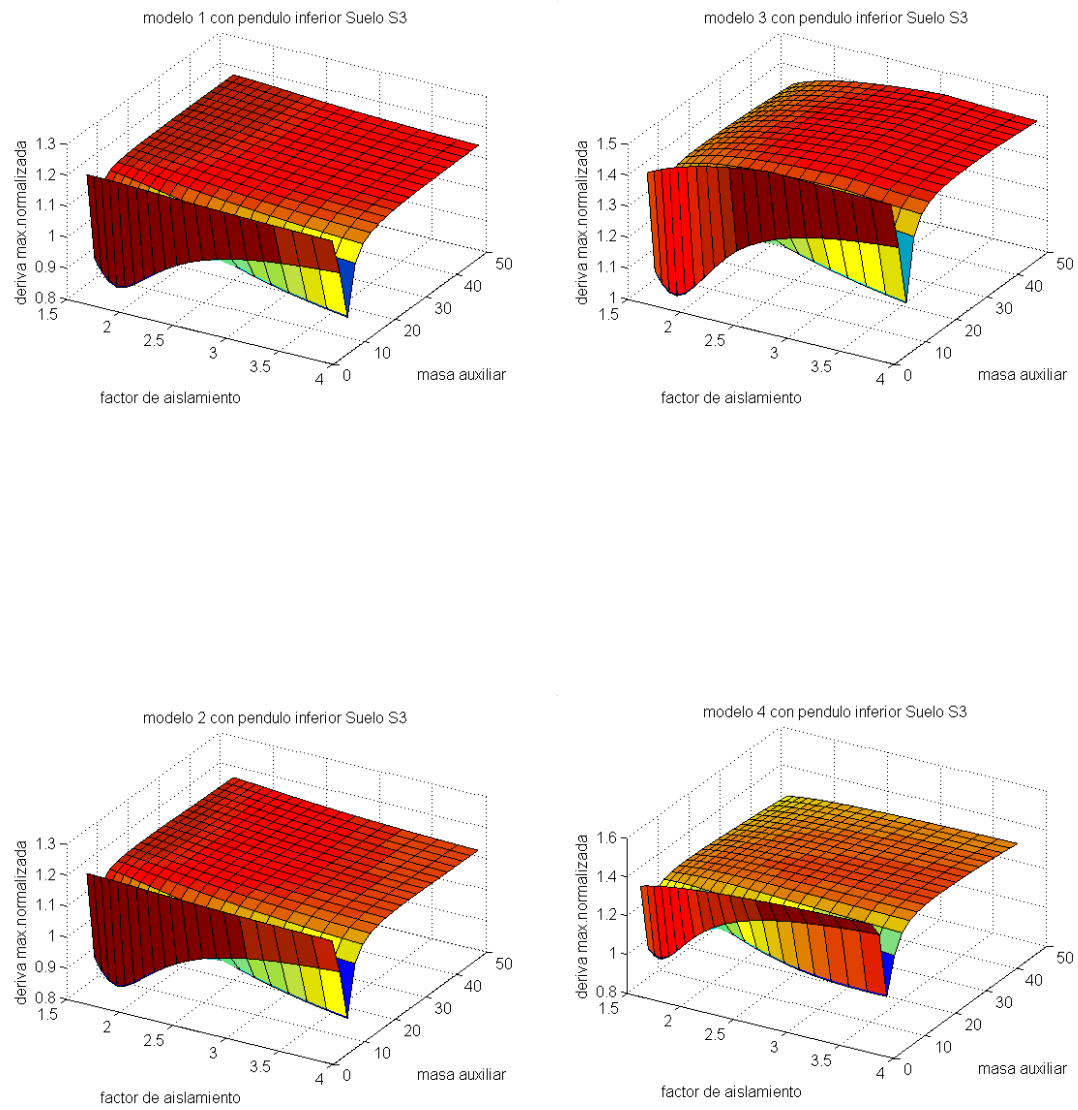


Fig. 6.7 Gráficos de modelos 1, 2, 3, 4 con suelo S3 y péndulo inferior.

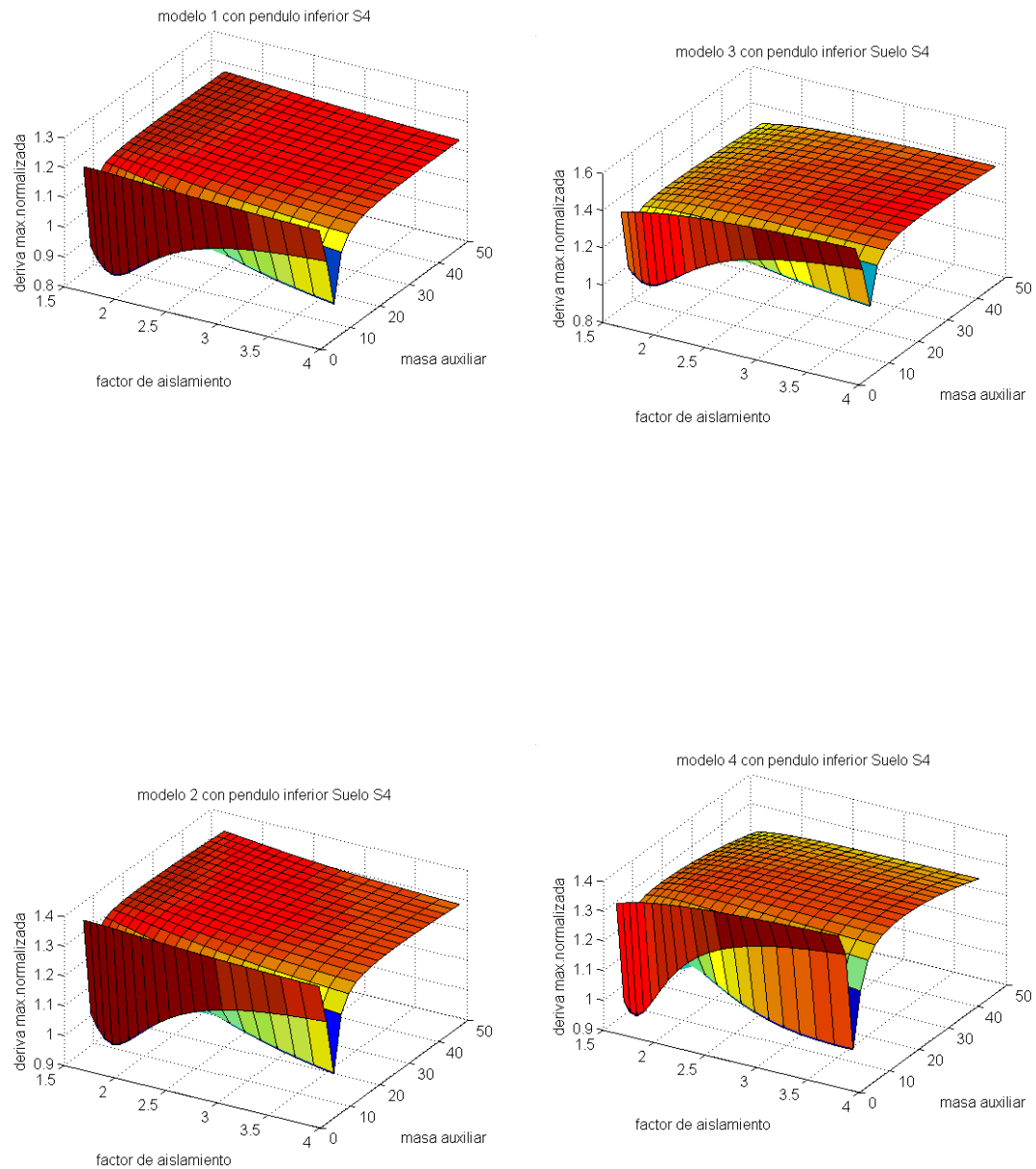


Fig. 6.8 Gráficos de modelos 1, 2, 3, 4 con suelo S4 y péndulo inferior.

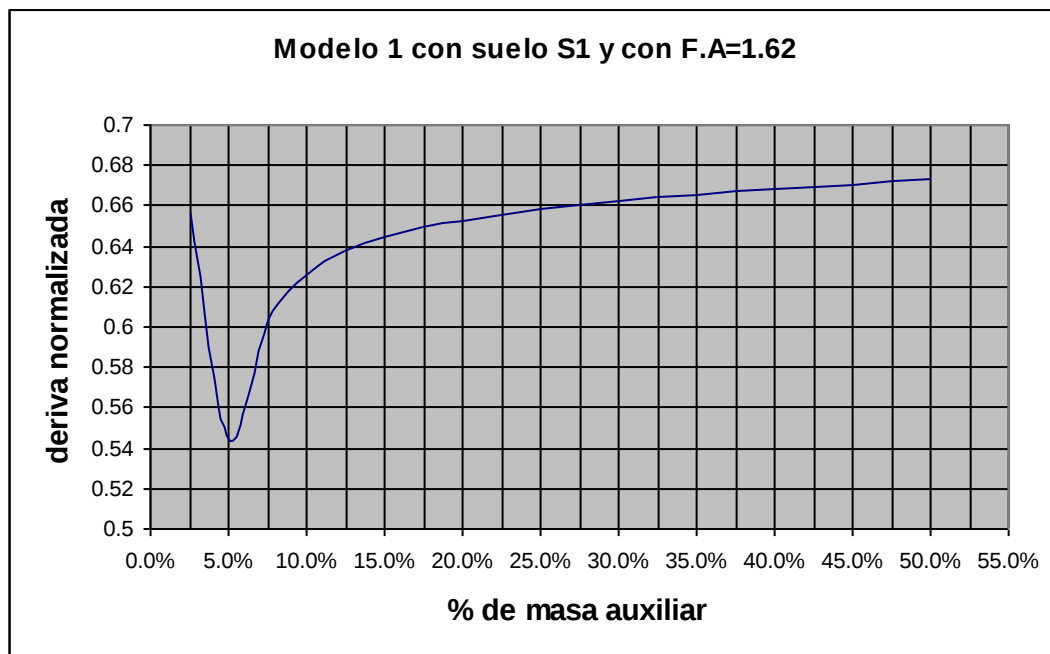


Fig. 6.9 Derivas normalizadas de modelo 1($T=0.50\text{seg}$) con suelo S1 y factor de aislamiento de 1.62.

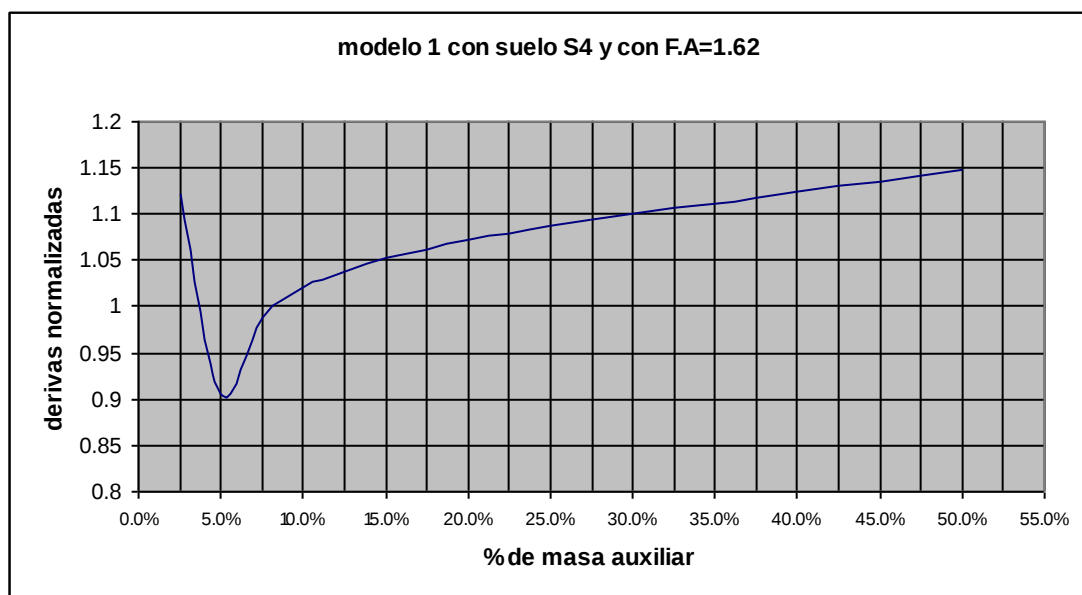


Fig. 6.10 Derivas normalizadas de modelo 1($T=0.50\text{seg}$) con suelo S4 y factor de aislamiento de 1.62.

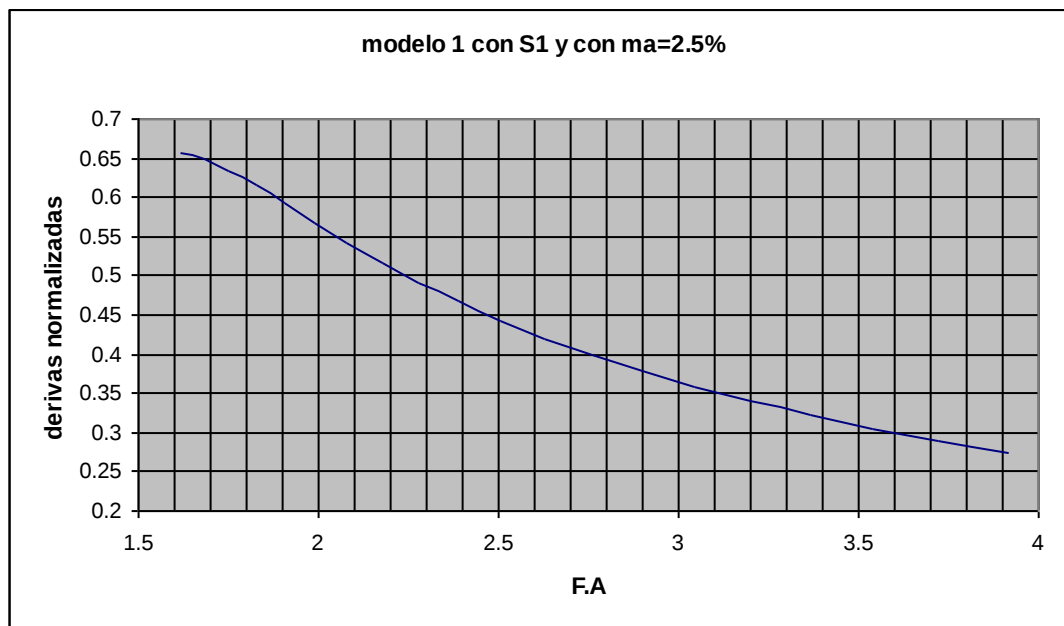


Fig. 6.11 Derivas normalizadas de modelo 1($T=0.50\text{seg}$) con suelo S1 y masa auxiliar de 2.5% del valor de la masa de piso.

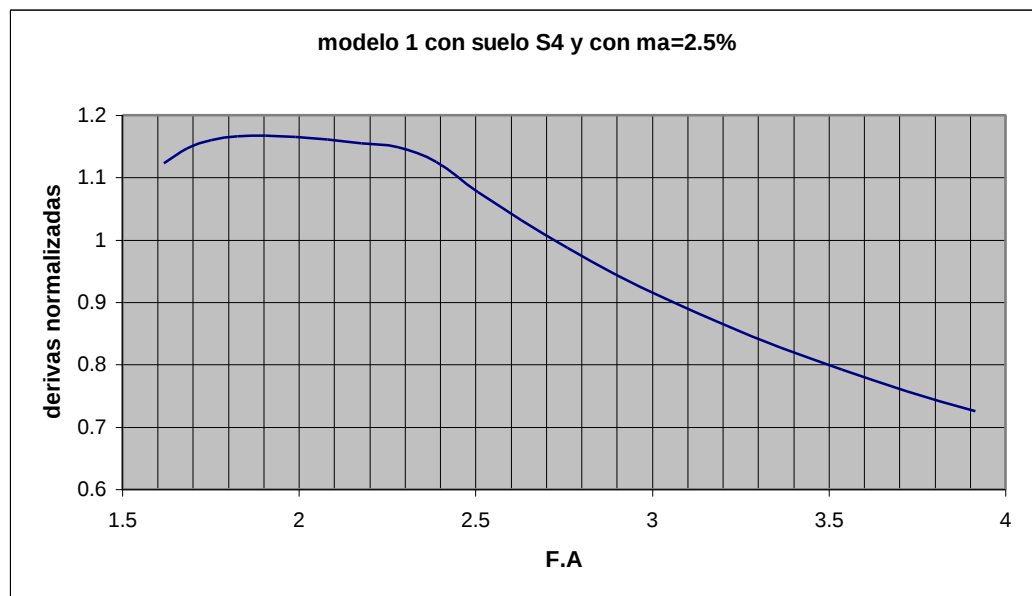


Fig. 6.12 Derivas normalizadas de modelo 1($T=0.50\text{seg}$) con suelo S4 y masa auxiliar de 2.5% del valor de la masa de piso.

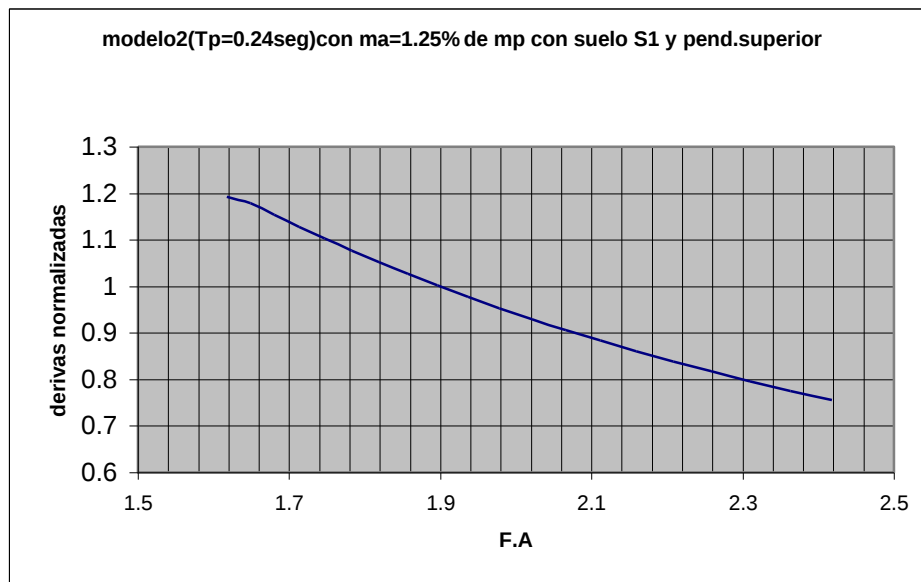


Fig. 6.13 Derivas normalizadas de modelo 2($T=0.24\text{seg}$) con suelo S1 y masa auxiliar de 1.25% del valor de la masa de piso.

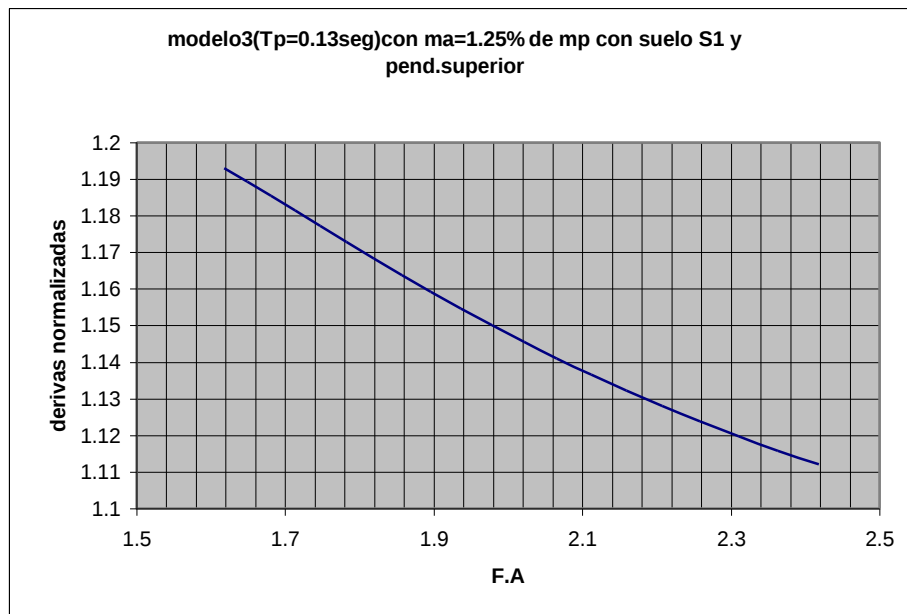


Fig. 6.14 Derivas normalizadas de modelo 3($T=0.13\text{seg}$) con suelo S1 y masa auxiliar de 1.25% del valor de la masa de piso.

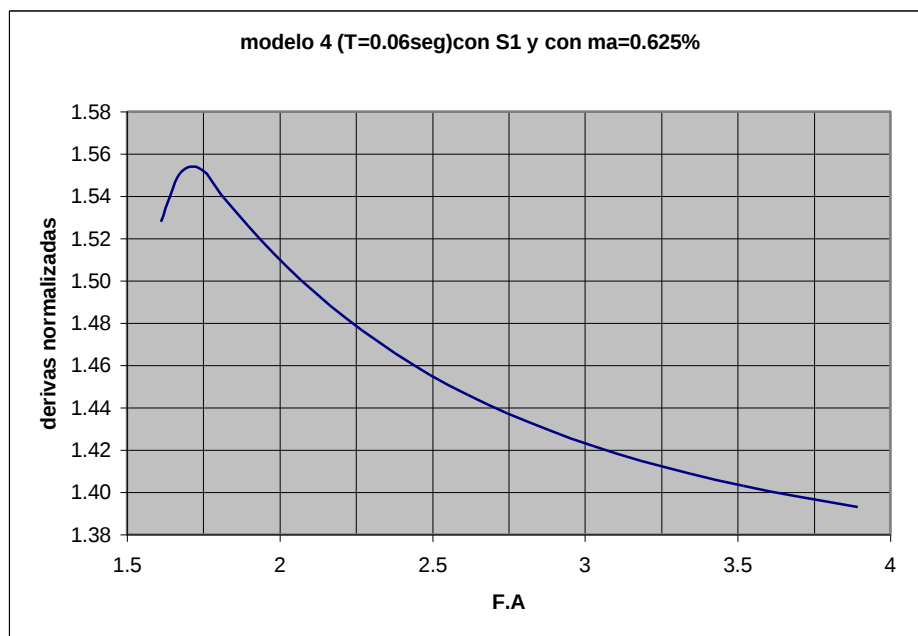


Fig. 6.15 Derivas normalizadas de modelo 4($T=0.06\text{seg}$) con suelo S1 y masa auxiliar de 1.25% del valor de la masa de piso.

6.3 Comentarios de los resultados:

6.3.1 Efecto del suelo en la respuesta del sistema híbrido:

En los gráficos anteriores se puede observar que el sistema híbrido no funciona eficientemente si la estructura está cimentada en suelos flexibles (S4). Esto se debe principalmente a la influencia que tiene la forma espectral de este tipo de suelo para sistemas aislados. En la figuras 6.11 y 6.12 se observa el efecto del suelo sobre una estructura que solamente tiene aislamiento. En estas figuras, la respuesta en la estructura sobre suelo S4 tiene mayor magnitud que en la estructura sobre suelo S1. Por otro lado, en las figuras 6.9 y 6.10 se presenta el efecto del suelo sobre una estructura que solamente tiene amortiguamiento de masa. En estas figuras, se observa una menor respuesta de la estructura sobre suelo S1 que en la estructura sobre suelo S4. En conclusión la respuesta de la estructura con sistema híbrido es más desfavorable sobre suelo S4 que sobre suelo S1.

6.3.2 Efecto de la rigidez de la estructura en la respuesta del sistema híbrido:

En los gráficos presentados también se observa que el sistema híbrido no funciona eficientemente cuando la estructura básica es extremadamente rígida ($T < 0.06$ segundos). Por la teoría de los sistemas con amortiguamiento de masas (Capítulo 4), sabemos que los mayores beneficios de este sistema de control de vibraciones se presenta cuando la frecuencia de excitación y la frecuencia del sistema principal coinciden. Si la estructura básica es muy rígida (frecuencia alta), entonces se hace difícil esta coincidencia y por lo tanto el amortiguamiento de masa no es eficiente en estos casos. Ver figura 4.4.

6.3.3 Sistemas con amortiguamiento de masa en el tope:

Las mayores reducciones en las vibraciones de las estructuras con sistemas híbridos, se logra por lo general para porcentajes de masa resonante del 20% de la masa de piso de la estructura básica. En la mayoría de los casos, la respuesta del sistema híbrido se reduce en la medida en que el factor de aislamiento se incrementa, salvo en las estructuras muy rígidas en las cuales este factor no tiene incidencia. También se observa que el incremento del factor de aislamiento no reduce la respuesta en aquellas zonas en que el porcentaje de la masa auxiliar es menor del 20%. Ver figuras 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4.

6.3.4 Sistemas con amortiguamiento de masa en la base:

En estos sistemas la zona de mayor reducción de la respuesta del sistema híbrido esta bien definida y ubicada entre el 10% y el 30% de la masa de piso de la estructura básica. Para estos sistemas el factor de aislamiento no incide sobre la respuesta, salvo en la zona antes mencionada, en donde la respuesta se reduce ligeramente con el incremento del factor de aislamiento. Ver figuras 6.5, 6.6, 6.7 y 6.8.

6.3.5 Reducción de las derivas del modelo híbrido respecto a las derivas del modelo básico de un piso.

normalizderm de modelo de 3gl con pendulo superior,suelo S1 y T1=0.5segundos deriva modelo básico= 3.732 cms

degradación de rigidez de piso1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0.657	0.649	0.634	0.615	0.592	0.568	0.543	0.517	0.492	0.467	0.443	0.421	0.399	0.378	0.358	0.339	0.322	0.305	0.289	0.273
2	0.544	0.505	0.471	0.449	0.441	0.444	0.450	0.454	0.453	0.445	0.433	0.418	0.401	0.383	0.366	0.348	0.331	0.314	0.298	0.283
3	0.604	0.564	0.524	0.485	0.448	0.415	0.388	0.371	0.365	0.366	0.371	0.374	0.373	0.367	0.358	0.346	0.332	0.318	0.304	0.289
4	0.626	0.589	0.552	0.514	0.478	0.442	0.408	0.378	0.353	0.335	0.326	0.324	0.326	0.329	0.331	0.328	0.322	0.314	0.303	0.291
5	0.638	0.602	0.566	0.530	0.494	0.460	0.426	0.395	0.366	0.340	0.320	0.306	0.299	0.298	0.300	0.303	0.303	0.301	0.296	0.288
6	0.644	0.609	0.574	0.539	0.504	0.471	0.438	0.407	0.377	0.350	0.326	0.307	0.292	0.284	0.281	0.281	0.284	0.285	0.284	0.281
7	0.649	0.615	0.580	0.545	0.511	0.478	0.446	0.415	0.386	0.359	0.334	0.312	0.294	0.280	0.272	0.269	0.269	0.270	0.272	0.271
8	0.653	0.619	0.584	0.550	0.517	0.484	0.452	0.422	0.393	0.365	0.340	0.317	0.297	0.281	0.270	0.262	0.259	0.259	0.261	0.262
9	0.656	0.622	0.588	0.554	0.521	0.488	0.457	0.427	0.398	0.371	0.345	0.322	0.302	0.284	0.270	0.260	0.255	0.252	0.252	0.254
10	0.658	0.624	0.590	0.557	0.524	0.492	0.461	0.431	0.402	0.375	0.350	0.327	0.306	0.287	0.272	0.260	0.253	0.248	0.247	0.247
11	0.660	0.627	0.593	0.559	0.527	0.495	0.464	0.434	0.406	0.379	0.354	0.331	0.309	0.291	0.275	0.262	0.252	0.246	0.243	0.243
12	0.662	0.629	0.595	0.562	0.529	0.497	0.467	0.437	0.409	0.383	0.358	0.334	0.313	0.294	0.277	0.264	0.253	0.246	0.241	0.240
13	0.664	0.630	0.597	0.564	0.531	0.500	0.469	0.440	0.412	0.386	0.361	0.338	0.316	0.297	0.280	0.266	0.254	0.246	0.241	0.238
14	0.665	0.632	0.599	0.566	0.533	0.502	0.472	0.443	0.415	0.388	0.364	0.340	0.319	0.300	0.283	0.268	0.256	0.247	0.240	0.237
15	0.667	0.633	0.600	0.567	0.535	0.504	0.474	0.445	0.417	0.391	0.366	0.343	0.322	0.302	0.285	0.270	0.258	0.248	0.241	0.237
16	0.668	0.635	0.602	0.569	0.537	0.506	0.476	0.447	0.419	0.393	0.369	0.346	0.324	0.305	0.288	0.272	0.260	0.249	0.242	0.237
17	0.670	0.636	0.603	0.571	0.539	0.507	0.478	0.449	0.421	0.395	0.371	0.348	0.327	0.307	0.290	0.275	0.262	0.251	0.243	0.237
18	0.671	0.638	0.605	0.572	0.540	0.509	0.479	0.451	0.423	0.398	0.373	0.350	0.329	0.310	0.292	0.277	0.264	0.253	0.244	0.238
19	0.672	0.639	0.606	0.573	0.542	0.511	0.481	0.452	0.425	0.399	0.375	0.352	0.331	0.312	0.294	0.279	0.266	0.254	0.246	0.239
20	0.673	0.640	0.607	0.575	0.543	0.512	0.483	0.454	0.427	0.401	0.377	0.354	0.333	0.314	0.297	0.281	0.268	0.256	0.247	0.240
F.A=	1.618	1.6821	1.7512	1.8253	1.9048	1.9898	2.0805	2.1773	2.2802	2.3896	2.5058	2.6291	2.7598	2.8983	3.0448	3.1999	3.364	3.5374	3.7207	3.9144

Tabla 6.11 Derivas normalizadas de modelo básico de 1 gl con T1=0.5 seg.

Reducción en zona de interés = $(1-0.28)*100= 72\%$

normalizderm (3gl) con periodo de T1=1segundo péndulo superior y suelo S1 deriva modelo básico= 7.456 cms

degradación de rigidez de piso1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0.652	0.646	0.632	0.614	0.591	0.567	0.542	0.517	0.492	0.467	0.443	0.421	0.399	0.378	0.358	0.339	0.322	0.305	0.289	0.273
2	0.540	0.501	0.469	0.448	0.440	0.443	0.450	0.454	0.452	0.445	0.433	0.418	0.401	0.383	0.366	0.348	0.331	0.314	0.298	0.283
3	0.599	0.561	0.522	0.483	0.447	0.414	0.388	0.371	0.365	0.366	0.371	0.374	0.373	0.367	0.358	0.346	0.332	0.318	0.304	0.289
4	0.622	0.586	0.550	0.513	0.477	0.441	0.408	0.378	0.353	0.335	0.326	0.324	0.326	0.329	0.331	0.328	0.322	0.314	0.303	0.291
5	0.634	0.599	0.564	0.528	0.493	0.459	0.426	0.394	0.365	0.340	0.320	0.306	0.299	0.298	0.300	0.303	0.303	0.301	0.296	0.288
6	0.641	0.607	0.572	0.538	0.503	0.470	0.438	0.406	0.377	0.350	0.326	0.307	0.292	0.284	0.281	0.281	0.284	0.285	0.284	0.281
7	0.645	0.612	0.578	0.544	0.510	0.478	0.446	0.415	0.386	0.358	0.333	0.312	0.294	0.280	0.272	0.269	0.269	0.270	0.272	0.271
8	0.649	0.616	0.582	0.549	0.516	0.483	0.452	0.421	0.392	0.365	0.340	0.317	0.297	0.281	0.270	0.262	0.259	0.259	0.261	0.262
9	0.652	0.619	0.586	0.552	0.520	0.488	0.456	0.426	0.398	0.371	0.345	0.322	0.302	0.284	0.270	0.260	0.255	0.252	0.252	0.254
10	0.654	0.622	0.588	0.555	0.523	0.491	0.460	0.431	0.402	0.375	0.350	0.327	0.306	0.287	0.272	0.260	0.253	0.248	0.247	0.247
11	0.656	0.624	0.591	0.558	0.526	0.494	0.464	0.434	0.406	0.379	0.354	0.331	0.309	0.291	0.275	0.262	0.252	0.246	0.243	0.243
12	0.658	0.626	0.593	0.560	0.528	0.497	0.466	0.437	0.409	0.383	0.358	0.334	0.313	0.294	0.277	0.264	0.253	0.246	0.241	0.240
13	0.660	0.628	0.595	0.562	0.530	0.499	0.469	0.440	0.412	0.386	0.361	0.337	0.316	0.297	0.280	0.266	0.254	0.246	0.241	0.238
14	0.662	0.629	0.597	0.564	0.532	0.501	0.471	0.442	0.415	0.388	0.364	0.340	0.319	0.300	0.283	0.268	0.256	0.247	0.240	0.237
15	0.663	0.631	0.598	0.566	0.534	0.503	0.473	0.445	0.417	0.391	0.366	0.343	0.322	0.302	0.285	0.270	0.258	0.248	0.241	0.237
16	0.664	0.632	0.600	0.568	0.536	0.505	0.475	0.447	0.419	0.393	0.369	0.346	0.324	0.305	0.288	0.272	0.260	0.249	0.242	0.237
17	0.666	0.634	0.601	0.569	0.538	0.507	0.477	0.449	0.421	0.395	0.371	0.348	0.327	0.307	0.290	0.275	0.262	0.251	0.243	0.237
18	0.667	0.635	0.603	0.571	0.539	0.508	0.479	0.450	0.423	0.397	0.373	0.350	0.329	0.310	0.292	0.277	0.264	0.253	0.244	0.238
19	0.668	0.636	0.604	0.572	0.541	0.510	0.480	0.452	0.425	0.399	0.375	0.352	0.331	0.312	0.294	0.279	0.266	0.254	0.246	0.239
20	0.669	0.637	0.605	0.573	0.542	0.512	0.482	0.454	0.427	0.401	0.377	0.354	0.333	0.314	0.297	0.281	0.268	0.256	0.247	0.240
F.A=	1.618	1.682	1.751	1.825	1.905	1.99	2.081	2.177	2.28	2.39	2.506	2.629	2.76	2.898	3.045	3.2	3.364	3.537	3.721	3.914

Tabla 6.12 Derivas normalizadas de modelo básico de 1 gl con T1=1.0 seg.

Reducción en zona de interés = $(1-0.28)*100= 72\%$

normalizderm (3gl) con periodo de T1=2segundo péndulo superior y suelo S1 deriva modelo básico= 14.91 cms

degradación de rigidez de piso1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0.652	0.646	0.632	0.614	0.591	0.567	0.542	0.517	0.492	0.467	0.443	0.421	0.399	0.378	0.358	0.339	0.322	0.305	0.289	0.273
2	0.54	0.501	0.469	0.448	0.44	0.443	0.45	0.454	0.452	0.445	0.433	0.418	0.401	0.383	0.366	0.348	0.331	0.314	0.298	0.006
3	0.599	0.561	0.522	0.483	0.447	0.414	0.388	0.371	0.365	0.366	0.371	0.374	0.373	0.367	0.358	0.346	0.332	0.318	0.304	0.008
4	0.622	0.586	0.55	0.513	0.477	0.441	0.408	0.378	0.353	0.335	0.326	0.324	0.326	0.329	0.331	0.328	0.322	0.314	0.002	0.006
5	0.634	0.599	0.564	0.528	0.493	0.459	0.426	0.394	0.365	0.34	0.32	0.306	0.299	0.298	0.3	0.303	0.303	0.019	0.008	0.001
6	0.640	0.606	0.572	0.538	0.503	0.47	0.438	0.406	0.377	0.35	0.326	0.307	0.292	0.284	0.281	0.086	0.06	0.04	0.024	0.012
7	0.645	0.612	0.578	0.544	0.51	0.478	0.446	0.415	0.386	0.358	0.333	0.312	0.208	0.174	0.142	0.112	0.084	0.06	0.04	0.025
8	0.635	0.601	0.566	0.531	0.495	0.46	0.426	0.391	0.357	0.324	0.29	0.257	0.225	0.193	0.161	0.131	0.104	0.078	0.056	0.038
9	0.638	0.604	0.569	0.534	0.499	0.465	0.431	0.397	0.364	0.332	0.299	0.268	0.236	0.206	0.176	0.147	0.119	0.093	0.07	0.05
10	0.640	0.606	0.571	0.537	0.502	0.468	0.435	0.402	0.369	0.337	0.306	0.275	0.245	0.216	0.186	0.158	0.131	0.106	0.082	0.061
11	0.641	0.607	0.573	0.539	0.505	0.471	0.438	0.405	0.373	0.342	0.311	0.281	0.252	0.223	0.195	0.167	0.141	0.116	0.092	0.071
12	0.642	0.609	0.575	0.54	0.506	0.473	0.44	0.408	0.376	0.346	0.315	0.286	0.257	0.229	0.201	0.175	0.149	0.124	0.101	0.079
13	0.643	0.61	0.576	0.542	0.508	0.475	0.442	0.41	0.379	0.348	0.319	0.29	0.261	0.234	0.207	0.181	0.155	0.131	0.108	0.086
14	0.644	0.611	0.577	0.543	0.509	0.476	0.444	0.412	0.381	0.351	0.321	0.293	0.265	0.238	0.211	0.186	0.161	0.137	0.114	0.092
15	0.645	0.611	0.578	0.544	0.51	0.477	0.445	0.413	0.383	0.353	0.324	0.295	0.268	0.241	0.215	0.19	0.165	0.141	0.119	0.098
16	0.645	0.612	0.578	0.545	0.511	0.478	0.446	0.415	0.384	0.355	0.326	0.298	0.27	0.244	0.218	0.193	0.169	0.146	0.123	0.102
17	0.646	0.613	0.579	0.545	0.512	0.479	0.447	0.416	0.386	0.356	0.327	0.3	0.272	0.246	0.221	0.196	0.172	0.149	0.127	0.106
18	0.646	0.613	0.58	0.546	0.513	0.48	0.448	0.417	0.387	0.357	0.329	0.301	0.274	0.248	0.223	0.199	0.175	0.152	0.13	0.11
19	0.647	0.614	0.58	0.547	0.513	0.481	0.449	0.418	0.388	0.358	0.33	0.303	0.276	0.25	0.225	0.201	0.178	0.155	0.133	0.113
20	0.647	0.614	0.581	0.547	0.514	0.481	0.45	0.419	0.389	0.359	0.331	0.304	0.277	0.252	0.227	0.203	0.18	0.157	0.136	0.116
F.A=	1.618	1.682	1.751	1.825	1.905	1.99	2.081	2.177	2.28	2.39	2.506	2.629	2.76	2.898	3.045	3.2	3.364	3.537	3.721	3.914

% de masa

Tabla 6.13 Derivas normalizadas de modelo básico de 1 gl con T1=2 seg.

Reducción en zona de interés = $(1-0.174)*100= 82.6\%$

Los resultados observados en las tablas 6.11, 6.12 y 6.13 nos indican que para el modelo básico de un piso con control de vibraciones híbrido sujeto al espectro para suelo S1, en la zona de interés, existe una buena reducción de las derivas normalizadas (un 72%) para los modelos con periodo de 0.5 seg. y de 1 seg. y aumenta más su reducción (a un 83%) cuando este modelo tiene un periodo de 2 seg.

CAPITULO 7

ANÁLISIS DINÁMICO DE SISTEMAS HÍBRIDOS CON ESTRUCTURA BÁSICA DE VARIOS PISOS

7.1 Introducción

En este capítulo se analizan cada uno de los modelos básicos de 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 pisos a los cuales se les adiciona el sistema de aislamiento en la base y el sistema de amortiguamiento de masa ubicado en el tope de la estructura.

Esto se realiza con el fin de reportar resultados de utilidad para estructuras con características diversas. De este modo se obtiene un gráfico promedio que sea útil para un conjunto de estructuras básicas en un rango de 2 a 8 pisos.

7.2 Características geométricas y físicas de los modelos

Los modelos básicos de 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 pisos tienen columnas de 40 x 40 cms y vigas de 40 x 60 cm y se sometieron a una excitación sísmica definida por el espectro de la norma venezolana para edificaciones sismorresistentes COVENIN MINDUR 2001. Se consideró para estos modelos el espectro elástico para el tipo de suelo S1. Para obtener como resultado el periodo fundamental de 1 segundo a cada uno de los modelos se le asignó una masa de piso según la siguiente tabla:

Modelo básico (No.de gld)	Masa de piso (kg-seg ² /cm)
2	464
3	241
4	147
5	98.5
6	71
7	53
8	41.4

Tabla 7.1 Masa de piso de cada modelo para un periodo fundamental de 1seg.

Para vigas y columnas tenemos material: concreto

Módulo de elasticidad	$E = 253105 \text{ kg/cm}^2$
Resistencia a compresión del concreto	$f'_c = 281 \text{ kg/cm}^2$
esfuerzo cedente del acero de refuerzo	$F_y = 4218 \text{ kg/cm}^2$

Tabla 7.2 Propiedades físicas de vigas y columnas

Se le adicionó a este modelo básico la base aislada y la masa de amortiguamiento en el tope para obtener los resultados de cada uno de los siguientes sistemas híbridos:

7.2.1 Resultados de los Modelos híbridos

normalizderm 4gl con periodo de $T_1=1\text{s}$ péndulo superior y suelo S1
degradación de rigidez de piso1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	1.29	1.25	1.20	1.15	1.09	1.02	0.96	0.90	0.83	0.77	0.72	0.66	0.61	0.57	0.52	0.48	0.45	0.41	0.38	0.35
2	0.95	0.97	1.00	1.01	1.00	0.98	0.94	0.89	0.83	0.78	0.72	0.67	0.62	0.57	0.53	0.49	0.45	0.42	0.39	0.36
3	1.02	0.94	0.87	0.82	0.81	0.82	0.83	0.82	0.80	0.76	0.72	0.67	0.62	0.58	0.54	0.50	0.46	0.42	0.39	0.36
4	1.11	1.03	0.95	0.87	0.79	0.74	0.72	0.72	0.72	0.72	0.69	0.66	0.62	0.58	0.54	0.50	0.46	0.43	0.40	0.37
5	1.15	1.08	1.00	0.92	0.84	0.76	0.69	0.66	0.65	0.65	0.63	0.63	0.61	0.58	0.54	0.50	0.47	0.43	0.40	0.37
6	1.17	1.11	1.03	0.96	0.87	0.79	0.71	0.65	0.61	0.60	0.60	0.60	0.59	0.56	0.54	0.50	0.47	0.44	0.40	0.37
7	1.19	1.12	1.05	0.98	0.90	0.82	0.74	0.66	0.61	0.58	0.57	0.57	0.56	0.55	0.53	0.50	0.47	0.44	0.41	0.38
8	1.20	1.14	1.07	0.99	0.91	0.83	0.76	0.68	0.62	0.57	0.55	0.54	0.54	0.53	0.52	0.49	0.47	0.44	0.41	0.38
9	1.21	1.14	1.08	1.00	0.93	0.85	0.77	0.70	0.63	0.57	0.54	0.52	0.52	0.51	0.50	0.49	0.47	0.44	0.41	0.38
10	1.21	1.15	1.08	1.01	0.94	0.86	0.78	0.71	0.64	0.58	0.54	0.51	0.50	0.50	0.49	0.48	0.46	0.44	0.41	0.39
11	1.22	1.16	1.09	1.02	0.94	0.87	0.79	0.72	0.65	0.59	0.54	0.51	0.49	0.48	0.48	0.47	0.46	0.44	0.41	0.39
12	1.22	1.16	1.09	1.02	0.95	0.88	0.80	0.73	0.66	0.60	0.54	0.51	0.48	0.47	0.47	0.46	0.45	0.43	0.41	0.39
13	1.22	1.16	1.10	1.03	0.96	0.88	0.81	0.73	0.67	0.60	0.55	0.51	0.48	0.47	0.46	0.46	0.45	0.43	0.41	0.39
14	1.23	1.17	1.10	1.03	0.96	0.89	0.81	0.74	0.67	0.61	0.55	0.51	0.48	0.46	0.45	0.45	0.44	0.43	0.41	0.39
15	1.23	1.17	1.11	1.04	0.96	0.89	0.82	0.75	0.68	0.61	0.56	0.51	0.48	0.46	0.45	0.44	0.44	0.42	0.41	0.39
16	1.23	1.17	1.11	1.04	0.97	0.89	0.82	0.75	0.68	0.62	0.56	0.51	0.48	0.46	0.44	0.44	0.43	0.42	0.41	0.39
17	1.23	1.17	1.11	1.04	0.97	0.90	0.83	0.75	0.69	0.62	0.57	0.52	0.48	0.45	0.44	0.43	0.43	0.42	0.41	0.39
18	1.24	1.18	1.11	1.04	0.97	0.90	0.83	0.76	0.69	0.63	0.57	0.52	0.48	0.45	0.44	0.43	0.42	0.42	0.40	0.39
19	1.24	1.18	1.11	1.05	0.98	0.90	0.83	0.76	0.69	0.63	0.57	0.52	0.48	0.45	0.44	0.43	0.42	0.41	0.40	0.39
20	1.24	1.18	1.12	1.05	0.98	0.91	0.84	0.77	0.70	0.64	0.58	0.53	0.49	0.46	0.44	0.42	0.42	0.41	0.40	0.39
F.A	1.39	1.45	1.53	1.61	1.71	1.82	1.93	2.07	2.21	2.37	2.55	2.74	2.95	3.18	3.44	3.71	4.01	4.34	4.69	5.08

Tabla 7.3 Resultados del Modelo híbrido de 4gld

normalizderm 5gl con periodo de T1=1s péndulo superior y suelo S1
degradación de rigidez de piso1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	1.07	1.05	1.02	0.99	0.95	0.91	0.86	0.81	0.76	0.72	0.67	0.62	0.58	0.54	0.50	0.46	0.43	0.39	0.36	0.34
2	0.80	0.76	0.74	0.76	0.78	0.80	0.79	0.77	0.74	0.70	0.66	0.62	0.58	0.54	0.50	0.46	0.43	0.40	0.37	0.34
3	0.96	0.90	0.84	0.77	0.70	0.65	0.63	0.64	0.65	0.65	0.63	0.60	0.57	0.54	0.50	0.46	0.43	0.40	0.37	0.34
4	1.01	0.96	0.91	0.85	0.78	0.71	0.64	0.58	0.55	0.55	0.56	0.56	0.55	0.52	0.49	0.46	0.43	0.40	0.37	0.34
5	1.03	0.98	0.94	0.88	0.83	0.76	0.69	0.62	0.56	0.51	0.50	0.50	0.51	0.50	0.48	0.46	0.43	0.40	0.37	0.34
6	1.04	1.00	0.95	0.90	0.85	0.79	0.72	0.66	0.59	0.53	0.48	0.46	0.46	0.46	0.46	0.44	0.42	0.40	0.37	0.35
7	1.05	1.01	0.96	0.91	0.86	0.80	0.74	0.68	0.61	0.55	0.49	0.45	0.43	0.43	0.43	0.43	0.41	0.39	0.37	0.35
8	1.05	1.01	0.97	0.92	0.87	0.81	0.76	0.69	0.63	0.57	0.51	0.46	0.42	0.41	0.41	0.41	0.40	0.39	0.37	0.34
9	1.05	1.01	0.97	0.93	0.88	0.82	0.76	0.70	0.64	0.58	0.52	0.47	0.42	0.40	0.39	0.39	0.39	0.38	0.36	0.34
10	1.06	1.02	0.98	0.93	0.88	0.83	0.77	0.71	0.65	0.59	0.53	0.48	0.43	0.40	0.38	0.37	0.37	0.37	0.36	0.34
11	1.06	1.02	0.98	0.93	0.88	0.83	0.78	0.72	0.66	0.60	0.54	0.49	0.44	0.40	0.37	0.36	0.36	0.36	0.35	0.34
12	1.06	1.02	0.98	0.94	0.89	0.83	0.78	0.72	0.66	0.61	0.55	0.49	0.44	0.40	0.37	0.36	0.35	0.35	0.34	0.33
13	1.06	1.02	0.98	0.94	0.89	0.84	0.78	0.73	0.67	0.61	0.56	0.50	0.45	0.41	0.37	0.35	0.34	0.34	0.33	0.33
14	1.06	1.03	0.98	0.94	0.89	0.84	0.78	0.73	0.67	0.62	0.56	0.51	0.46	0.41	0.37	0.35	0.34	0.33	0.33	0.32
15	1.06	1.03	0.99	0.94	0.89	0.84	0.79	0.73	0.68	0.62	0.57	0.51	0.46	0.42	0.38	0.35	0.33	0.33	0.32	0.32
16	1.06	1.03	0.99	0.94	0.89	0.84	0.79	0.73	0.68	0.62	0.57	0.52	0.47	0.42	0.38	0.35	0.33	0.32	0.32	0.31
17	1.07	1.03	0.99	0.94	0.90	0.84	0.79	0.74	0.68	0.63	0.57	0.52	0.47	0.42	0.38	0.35	0.33	0.32	0.31	0.31
18	1.07	1.03	0.99	0.94	0.90	0.85	0.79	0.74	0.68	0.63	0.57	0.52	0.47	0.43	0.39	0.35	0.33	0.31	0.31	0.30
19	1.07	1.03	0.99	0.95	0.90	0.85	0.79	0.74	0.69	0.63	0.58	0.53	0.48	0.43	0.39	0.35	0.33	0.31	0.30	0.30
20	1.07	1.03	0.99	0.95	0.90	0.85	0.80	0.74	0.69	0.63	0.58	0.53	0.48	0.43	0.39	0.36	0.33	0.31	0.30	0.30
F.A	1.28	1.33	1.39	1.45	1.52	1.60	1.70	1.80	1.91	2.04	2.18	2.34	2.51	2.70	2.90	3.13	3.37	3.64	3.93	4.25

Tabla 7.4 Resultados del Modelo híbrido de 5gld

normalizderm 6gl con periodo de T1=1s péndulo superior y suelo S1
degradación de rigidez de piso1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	1.00	0.99	0.97	0.95	0.92	0.89	0.85	0.81	0.77	0.72	0.68	0.64	0.60	0.56	0.52	0.48	0.44	0.41	0.38	0.35
2	0.83	0.78	0.72	0.68	0.68	0.70	0.73	0.73	0.72	0.70	0.67	0.63	0.59	0.55	0.52	0.48	0.45	0.41	0.38	0.35
3	0.96	0.92	0.87	0.82	0.76	0.69	0.62	0.58	0.57	0.59	0.60	0.59	0.57	0.54	0.51	0.48	0.45	0.41	0.38	0.36
4	0.99	0.96	0.92	0.88	0.83	0.77	0.71	0.64	0.57	0.52	0.50	0.51	0.52	0.51	0.49	0.47	0.44	0.41	0.38	0.36
5	1.00	0.97	0.94	0.90	0.85	0.80	0.75	0.69	0.63	0.56	0.50	0.46	0.45	0.46	0.46	0.45	0.43	0.41	0.38	0.36
6	1.01	0.98	0.95	0.91	0.87	0.82	0.77	0.72	0.66	0.59	0.53	0.47	0.43	0.42	0.42	0.42	0.41	0.40	0.38	0.35
7	1.01	0.98	0.95	0.91	0.87	0.83	0.78	0.73	0.67	0.62	0.56	0.49	0.44	0.40	0.39	0.39	0.39	0.38	0.37	0.35
8	1.02	0.99	0.95	0.92	0.88	0.84	0.79	0.74	0.69	0.63	0.57	0.51	0.46	0.41	0.38	0.37	0.37	0.37	0.36	0.34
9	1.02	0.99	0.96	0.92	0.88	0.84	0.79	0.74	0.69	0.64	0.58	0.53	0.47	0.42	0.38	0.35	0.35	0.35	0.35	0.34
10	1.02	0.99	0.96	0.92	0.88	0.84	0.80	0.75	0.70	0.65	0.59	0.54	0.48	0.43	0.38	0.35	0.34	0.33	0.33	0.33
11	1.02	0.99	0.96	0.93	0.89	0.84	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60	0.55	0.49	0.44	0.39	0.35	0.33	0.32	0.32	0.32
12	1.02	0.99	0.96	0.93	0.89	0.85	0.80	0.75	0.71	0.66	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40	0.36	0.33	0.31	0.31	0.31
13	1.02	1.00	0.96	0.93	0.89	0.85	0.80	0.76	0.71	0.66	0.61	0.56	0.50	0.45	0.41	0.36	0.33	0.31	0.30	0.30
14	1.03	1.00	0.96	0.93	0.89	0.85	0.81	0.76	0.71	0.66	0.61	0.56	0.51	0.46	0.41	0.37	0.33	0.31	0.30	0.29
15	1.03	1.00	0.97	0.93	0.89	0.85	0.81	0.76	0.71	0.66	0.61	0.56	0.51	0.46	0.42	0.37	0.34	0.31	0.29	0.29
16	1.03	1.00	0.97	0.93	0.89	0.85	0.81	0.76	0.71	0.66	0.62	0.57	0.52	0.47	0.42	0.38	0.34	0.31	0.29	0.28
17	1.03	1.00	0.97	0.93	0.89	0.85	0.81	0.76	0.72	0.67	0.62	0.57	0.52	0.47	0.43	0.38	0.34	0.31	0.29	0.28
18	1.03	1.00	0.97	0.93	0.89	0.85	0.81	0.76	0.72	0.67	0.62	0.57	0.52	0.47	0.43	0.39	0.35	0.31	0.29	0.27
19	1.03	1.00	0.97	0.93	0.90	0.85	0.81	0.77	0.72	0.67	0.62	0.57	0.52	0.48	0.43	0.39	0.35	0.31	0.29	0.27
20	1.03	1.00	0.97	0.93	0.90	0.86	0.81	0.77	0.72	0.67	0.62	0.57	0.53	0.48	0.43	0.39	0.35	0.32	0.29	0.27
F.A	1.22	1.26	1.30	1.35	1.41	1.48	1.55	1.64	1.73	1.84	1.96	2.09	2.24	2.40	2.57	2.77	2.98	3.21	3.46	3.74

Tabla 7.5 Resultados del Modelo híbrido de 6gld

normalizderm 7gl con periodo de T1=1s péndulo superior y suelo S1
degradación de rigidez de piso1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0.97	0.96	0.95	0.93	0.91	0.89	0.86	0.82	0.78	0.74	0.70	0.66	0.62	0.58	0.54	0.51	0.47	0.44	0.40	0.37
2	0.87	0.82	0.77	0.71	0.66	0.65	0.67	0.70	0.71	0.70	0.68	0.65	0.61	0.58	0.54	0.50	0.47	0.44	0.41	0.38
3	0.97	0.94	0.90	0.86	0.81	0.76	0.69	0.62	0.56	0.54	0.56	0.57	0.57	0.55	0.53	0.50	0.47	0.44	0.41	0.38
4	0.99	0.96	0.93	0.90	0.86	0.82	0.77	0.71	0.64	0.57	0.51	0.48	0.48	0.49	0.49	0.48	0.46	0.43	0.40	0.38
5	1.00	0.97	0.94	0.91	0.88	0.84	0.79	0.74	0.69	0.63	0.56	0.50	0.45	0.43	0.44	0.44	0.44	0.42	0.40	0.37
6	1.00	0.98	0.95	0.92	0.88	0.85	0.80	0.76	0.71	0.66	0.60	0.54	0.47	0.42	0.39	0.40	0.40	0.40	0.39	0.37
7	1.00	0.98	0.95	0.92	0.89	0.85	0.81	0.77	0.72	0.67	0.62	0.56	0.50	0.44	0.39	0.37	0.37	0.37	0.37	0.36
8	1.01	0.98	0.96	0.93	0.89	0.86	0.82	0.77	0.73	0.68	0.63	0.58	0.52	0.46	0.41	0.37	0.35	0.35	0.35	0.35
9	1.01	0.98	0.96	0.93	0.90	0.86	0.82	0.78	0.73	0.69	0.64	0.58	0.53	0.48	0.42	0.37	0.34	0.33	0.33	0.33
10	1.01	0.99	0.96	0.93	0.90	0.86	0.82	0.78	0.74	0.69	0.64	0.59	0.54	0.49	0.44	0.39	0.34	0.32	0.31	0.31
11	1.01	0.99	0.96	0.93	0.90	0.86	0.82	0.78	0.74	0.69	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35	0.32	0.30	0.30
12	1.01	0.99	0.96	0.93	0.90	0.86	0.83	0.78	0.74	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40	0.36	0.32	0.30	0.29
13	1.01	0.99	0.96	0.93	0.90	0.87	0.83	0.79	0.74	0.70	0.65	0.60	0.56	0.51	0.46	0.41	0.37	0.33	0.30	0.28
14	1.01	0.99	0.96	0.93	0.90	0.87	0.83	0.79	0.74	0.70	0.65	0.61	0.56	0.51	0.46	0.42	0.37	0.33	0.30	0.28
15	1.01	0.99	0.96	0.93	0.90	0.87	0.83	0.79	0.75	0.70	0.66	0.61	0.56	0.51	0.47	0.42	0.38	0.34	0.30	0.28
16	1.01	0.99	0.96	0.93	0.90	0.87	0.83	0.79	0.75	0.70	0.66	0.61	0.56	0.52	0.47	0.43	0.38	0.34	0.30	0.28
17	1.01	0.99	0.96	0.93	0.90	0.87	0.83	0.79	0.75	0.70	0.66	0.61	0.57	0.52	0.47	0.43	0.39	0.34	0.31	0.28
18	1.01	0.99	0.96	0.94	0.90	0.87	0.83	0.79	0.75	0.70	0.66	0.61	0.57	0.52	0.48	0.43	0.39	0.35	0.31	0.28
19	1.01	0.99	0.96	0.94	0.90	0.87	0.83	0.79	0.75	0.71	0.66	0.61	0.57	0.52	0.48	0.43	0.39	0.35	0.31	0.28
20	1.01	0.99	0.97	0.94	0.90	0.87	0.83	0.79	0.75	0.71	0.66	0.62	0.57	0.53	0.48	0.44	0.39	0.35	0.32	0.28
F.A	1.18	1.21	1.25	1.29	1.34	1.40	1.46	1.53	1.61	1.71	1.81	1.92	2.05	2.19	2.35	2.52	2.70	2.91	3.13	3.38

Tabla 7.6 Resultados del Modelo híbrido de 7gld

normalizderm 8gl con periodo de T1=1s péndulo superior y suelo S1
degradación de rigidez de piso1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0.95	0.95	0.94	0.93	0.91	0.89	0.86	0.83	0.80	0.76	0.73	0.69	0.65	0.61	0.57	0.53	0.50	0.46	0.43	0.40
2	0.90	0.86	0.82	0.76	0.70	0.65	0.63	0.65	0.68	0.69	0.68	0.66	0.63	0.60	0.57	0.53	0.49	0.46	0.43	0.40
3	0.97	0.95	0.92	0.89	0.85	0.80	0.75	0.69	0.62	0.55	0.52	0.54	0.56	0.56	0.54	0.52	0.49	0.46	0.43	0.40
4	0.99	0.97	0.94	0.91	0.88	0.85	0.80	0.76	0.70	0.64	0.57	0.50	0.46	0.47	0.48	0.48	0.47	0.45	0.42	0.39
5	0.99	0.97	0.95	0.92	0.89	0.86	0.82	0.78	0.74	0.68	0.63	0.56	0.50	0.44	0.41	0.42	0.43	0.43	0.41	0.39
6	1.00	0.98	0.96	0.93	0.90	0.87	0.83	0.79	0.75	0.70	0.65	0.60	0.54	0.47	0.41	0.38	0.38	0.39	0.39	0.38
7	1.00	0.98	0.96	0.93	0.90	0.87	0.84	0.80	0.76	0.71	0.66	0.61	0.56	0.50	0.44	0.39	0.36	0.36	0.36	0.36
8	1.00	0.98	0.96	0.93	0.91	0.87	0.84	0.80	0.76	0.72	0.67	0.62	0.57	0.52	0.46	0.41	0.36	0.34	0.34	0.34
9	1.00	0.98	0.96	0.94	0.91	0.88	0.84	0.81	0.77	0.72	0.68	0.63	0.58	0.53	0.48	0.42	0.37	0.33	0.32	0.32
10	1.00	0.99	0.96	0.94	0.91	0.88	0.84	0.81	0.77	0.73	0.68	0.64	0.59	0.54	0.49	0.44	0.39	0.34	0.31	0.30
11	1.01	0.99	0.96	0.94	0.91	0.88	0.85	0.81	0.77	0.73	0.68	0.64	0.59	0.54	0.50	0.45	0.40	0.35	0.31	0.29
12	1.01	0.99	0.96	0.94	0.91	0.88	0.85	0.81	0.77	0.73	0.69	0.64	0.60	0.55	0.50	0.45	0.41	0.36	0.32	0.29
13	1.01	0.99	0.96	0.94	0.91	0.88	0.85	0.81	0.77	0.73	0.69	0.64	0.60	0.55	0.51	0.46	0.41	0.37	0.32	0.29
14	1.01	0.99	0.97	0.94	0.91	0.88	0.85	0.81	0.77	0.73	0.69	0.65	0.60	0.56	0.51	0.46	0.42	0.37	0.33	0.29
15	1.01	0.99	0.97	0.94	0.91	0.88	0.85	0.81	0.77	0.73	0.69	0.65	0.60	0.56	0.51	0.47	0.42	0.38	0.34	0.30
16	1.01	0.99	0.97	0.94	0.91	0.88	0.85	0.81	0.77	0.73	0.69	0.65	0.60	0.56	0.51	0.47	0.43	0.38	0.34	0.30
17	1.01	0.99	0.97	0.94	0.91	0.88	0.85	0.81	0.78	0.73	0.69	0.65	0.61	0.56	0.52	0.47	0.43	0.39	0.34	0.31
18	1.01	0.99	0.97	0.94	0.91	0.88	0.85	0.81	0.78	0.74	0.69	0.65	0.61	0.56	0.52	0.48	0.43	0.39	0.35	0.31
19	1.01	0.99	0.97	0.94	0.91	0.88	0.85	0.81	0.78	0.74	0.69	0.65	0.61	0.56	0.52	0.48	0.43	0.39	0.35	0.31
20	1.01	0.99	0.97	0.94	0.91	0.88	0.85	0.82	0.78	0.74	0.69	0.65	0.61	0.56	0.52	0.48	0.44	0.40	0.35	0.32
F.A	1.15	1.18	1.21	1.25	1.29	1.34	1.39	1.46	1.53	1.61	1.70	1.80	1.92	2.04	2.18	2.33	2.50	2.69	2.89	3.11

Tabla 7.7 Resultados del Modelo híbrido de 8gld

normalizderm		9gl con periodo de T1=1s péndulo superior y suelo S1																			
		degradación de rigidez de piso1																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
% de masa	1	0.94	0.94	0.94	0.93	0.91	0.90	0.87	0.85	0.82	0.78	0.75	0.71	0.67	0.63	0.59	0.56	0.52	0.48	0.45	0.42
	2	0.92	0.89	0.85	0.81	0.75	0.69	0.63	0.62	0.65	0.68	0.69	0.67	0.65	0.62	0.59	0.55	0.52	0.48	0.45	0.42
	3	0.98	0.96	0.93	0.91	0.88	0.84	0.80	0.74	0.68	0.61	0.54	0.52	0.54	0.56	0.55	0.53	0.51	0.48	0.45	0.42
	4	0.99	0.97	0.95	0.93	0.90	0.87	0.83	0.79	0.75	0.70	0.63	0.56	0.49	0.45	0.46	0.48	0.48	0.46	0.44	0.41
	5	0.99	0.98	0.96	0.94	0.91	0.88	0.85	0.81	0.77	0.72	0.68	0.62	0.56	0.49	0.43	0.41	0.42	0.43	0.42	0.40
	6	1.00	0.98	0.96	0.94	0.91	0.89	0.85	0.82	0.78	0.74	0.69	0.64	0.59	0.53	0.47	0.41	0.37	0.38	0.39	0.38
	7	1.00	0.98	0.96	0.94	0.92	0.89	0.86	0.82	0.79	0.75	0.70	0.66	0.61	0.55	0.50	0.44	0.38	0.35	0.35	0.36
	8	1.00	0.98	0.97	0.94	0.92	0.89	0.86	0.83	0.79	0.75	0.71	0.66	0.62	0.57	0.51	0.46	0.40	0.35	0.33	0.33
	9	1.00	0.99	0.97	0.94	0.92	0.89	0.86	0.83	0.79	0.75	0.71	0.67	0.62	0.57	0.52	0.47	0.42	0.37	0.33	0.31
	10	1.00	0.99	0.97	0.95	0.92	0.89	0.86	0.83	0.79	0.75	0.71	0.67	0.63	0.58	0.53	0.48	0.43	0.38	0.33	0.30
	11	1.00	0.99	0.97	0.95	0.92	0.89	0.86	0.83	0.79	0.76	0.72	0.67	0.63	0.58	0.54	0.49	0.44	0.39	0.34	0.30
	12	1.00	0.99	0.97	0.95	0.92	0.89	0.86	0.83	0.80	0.76	0.72	0.68	0.63	0.59	0.54	0.50	0.45	0.40	0.35	0.31
	13	1.00	0.99	0.97	0.95	0.92	0.90	0.87	0.83	0.80	0.76	0.72	0.68	0.63	0.59	0.55	0.50	0.45	0.41	0.36	0.32
	14	1.00	0.99	0.97	0.95	0.92	0.90	0.87	0.83	0.80	0.76	0.72	0.68	0.64	0.59	0.55	0.50	0.46	0.41	0.37	0.33
	15	1.00	0.99	0.97	0.95	0.92	0.90	0.87	0.83	0.80	0.76	0.72	0.68	0.64	0.59	0.55	0.51	0.46	0.42	0.37	0.33
	16	1.00	0.99	0.97	0.95	0.92	0.90	0.87	0.83	0.80	0.76	0.72	0.68	0.64	0.59	0.55	0.51	0.47	0.42	0.38	0.34
	17	1.00	0.99	0.97	0.95	0.92	0.90	0.87	0.83	0.80	0.76	0.72	0.68	0.64	0.60	0.55	0.51	0.47	0.43	0.38	0.34
	18	1.00	0.99	0.97	0.95	0.92	0.90	0.87	0.83	0.80	0.76	0.72	0.68	0.64	0.60	0.55	0.51	0.47	0.43	0.39	0.35
	19	1.00	0.99	0.97	0.95	0.92	0.90	0.87	0.84	0.80	0.76	0.72	0.68	0.64	0.60	0.56	0.51	0.47	0.43	0.39	0.35
	20	1.00	0.99	0.97	0.95	0.92	0.90	0.87	0.84	0.80	0.76	0.72	0.68	0.64	0.60	0.56	0.51	0.47	0.43	0.39	0.35
F.A	1.13	1.16	1.18	1.21	1.25	1.29	1.34	1.40	1.46	1.54	1.62	1.71	1.81	1.93	2.05	2.19	2.35	2.52	2.70	2.91	

Tabla 7.8 Resultados del Modelo híbrido de 9gld

normalizderm 10gl con periodo de T1=1s péndulo superior y suelo S1																					
degradación de rigidez de piso1																					
↓ % de masa		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	1	0.93	0.94	0.93	0.93	0.92	0.90	0.88	0.86	0.83	0.80	0.77	0.73	0.69	0.66	0.62	0.58	0.54	0.51	0.47	0.44
	2	0.93	0.91	0.88	0.84	0.80	0.74	0.67	0.62	0.62	0.65	0.68	0.68	0.67	0.64	0.61	0.57	0.54	0.51	0.47	0.44
	3	0.98	0.96	0.95	0.92	0.90	0.86	0.83	0.78	0.73	0.66	0.59	0.52	0.51	0.54	0.55	0.55	0.52	0.50	0.47	0.44
	4	0.99	0.98	0.96	0.94	0.91	0.89	0.86	0.82	0.78	0.74	0.68	0.62	0.55	0.48	0.44	0.46	0.48	0.47	0.45	0.43
	5	0.99	0.98	0.96	0.94	0.92	0.90	0.87	0.83	0.80	0.76	0.71	0.66	0.61	0.54	0.47	0.42	0.40	0.42	0.42	0.41
	6	1.00	0.98	0.97	0.95	0.93	0.90	0.87	0.84	0.80	0.77	0.73	0.68	0.63	0.58	0.52	0.45	0.39	0.37	0.38	0.38
	7	1.00	0.98	0.97	0.95	0.93	0.90	0.87	0.84	0.81	0.77	0.73	0.69	0.64	0.59	0.54	0.48	0.42	0.37	0.34	0.35
	8	1.00	0.99	0.97	0.95	0.93	0.90	0.88	0.85	0.81	0.78	0.74	0.69	0.65	0.60	0.56	0.50	0.45	0.39	0.34	0.32
	9	1.00	0.99	0.97	0.95	0.93	0.90	0.88	0.85	0.81	0.78	0.74	0.70	0.66	0.61	0.56	0.51	0.46	0.41	0.36	0.32
	10	1.00	0.99	0.97	0.95	0.93	0.91	0.88	0.85	0.81	0.78	0.74	0.70	0.66	0.61	0.57	0.52	0.47	0.42	0.37	0.32
	11	1.00	0.99	0.97	0.95	0.93	0.91	0.88	0.85	0.82	0.78	0.74	0.70	0.66	0.62	0.57	0.53	0.48	0.43	0.38	0.34
	12	1.00	0.99	0.97	0.95	0.93	0.91	0.88	0.85	0.82	0.78	0.74	0.70	0.66	0.62	0.58	0.53	0.49	0.44	0.39	0.35
	13	1.00	0.99	0.97	0.95	0.93	0.91	0.88	0.85	0.82	0.78	0.74	0.71	0.66	0.62	0.58	0.54	0.49	0.45	0.40	0.35
	14	1.00	0.99	0.97	0.95	0.93	0.91	0.88	0.85	0.82	0.78	0.75	0.71	0.67	0.62	0.58	0.54	0.49	0.45	0.41	0.36
	15	1.00	0.99	0.97	0.95	0.93	0.91	0.88	0.85	0.82	0.78	0.75	0.71	0.67	0.62	0.58	0.54	0.50	0.45	0.41	0.37
	16	1.00	0.99	0.97	0.95	0.93	0.91	0.88	0.85	0.82	0.78	0.75	0.71	0.67	0.63	0.58	0.54	0.50	0.46	0.41	0.37
	17	1.00	0.99	0.97	0.96	0.93	0.91	0.88	0.85	0.82	0.78	0.75	0.71	0.67	0.63	0.58	0.54	0.50	0.46	0.42	0.38
	18	1.00	0.99	0.97	0.96	0.93	0.91	0.88	0.85	0.82	0.78	0.75	0.71	0.67	0.63	0.59	0.54	0.50	0.46	0.42	0.38
	19	1.00	0.99	0.97	0.96	0.93	0.91	0.88	0.85	0.82	0.78	0.75	0.71	0.67	0.63	0.59	0.54	0.50	0.46	0.42	0.38
	20	1.00	0.99	0.97	0.96	0.93	0.91	0.88	0.85	0.82	0.79	0.75	0.71	0.67	0.63	0.59	0.55	0.50	0.46	0.42	0.38
F.A	1.12	1.14	1.16	1.19	1.22	1.26	1.30	1.35	1.41	1.48	1.55	1.63	1.73	1.83	1.95	2.08	2.22	2.38	2.55	2.74	

Tabla 7.9 Resultados del Modelo híbrido de 10gld

promedio de modelos de 4gl,5gl,6gl,7gl,8gl,9gl,10gl

periodo de 1 segundo

suelo s1 y péndulo superior

degradación de rigidez de piso1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	1.02	1.01	0.99	0.97	0.94	0.91	0.88	0.84	0.80	0.76	0.72	0.67	0.63	0.59	0.55	0.51	0.48	0.44	0.41	0.38
2	0.89	0.86	0.83	0.80	0.77	0.74	0.72	0.71	0.71	0.70	0.68	0.66	0.62	0.59	0.55	0.51	0.48	0.45	0.41	0.38
3	0.98	0.94	0.90	0.86	0.81	0.77	0.74	0.70	0.66	0.62	0.59	0.57	0.56	0.55	0.53	0.51	0.47	0.44	0.41	0.38
4	1.01	0.97	0.94	0.90	0.85	0.81	0.76	0.72	0.68	0.63	0.59	0.56	0.52	0.50	0.49	0.48	0.46	0.44	0.41	0.38
5	1.02	0.99	0.96	0.92	0.87	0.83	0.78	0.73	0.69	0.65	0.60	0.56	0.52	0.49	0.46	0.44	0.43	0.42	0.40	0.38
6	1.03	1.00	0.97	0.93	0.89	0.84	0.80	0.75	0.70	0.66	0.61	0.57	0.53	0.49	0.46	0.43	0.41	0.40	0.38	0.37
7	1.04	1.01	0.97	0.94	0.90	0.85	0.81	0.76	0.71	0.66	0.62	0.58	0.53	0.50	0.46	0.43	0.40	0.38	0.37	0.36
8	1.04	1.01	0.98	0.94	0.90	0.86	0.81	0.77	0.72	0.67	0.62	0.58	0.54	0.50	0.46	0.43	0.40	0.37	0.36	0.34
9	1.04	1.01	0.98	0.94	0.91	0.86	0.82	0.77	0.72	0.68	0.63	0.59	0.54	0.50	0.47	0.43	0.40	0.37	0.35	0.33
10	1.04	1.01	0.98	0.95	0.91	0.87	0.82	0.78	0.73	0.68	0.63	0.59	0.55	0.51	0.47	0.43	0.40	0.37	0.35	0.33
11	1.05	1.02	0.98	0.95	0.91	0.87	0.83	0.78	0.73	0.69	0.64	0.59	0.55	0.51	0.47	0.44	0.40	0.37	0.35	0.32
12	1.05	1.02	0.99	0.95	0.91	0.87	0.83	0.78	0.74	0.69	0.64	0.60	0.55	0.51	0.47	0.44	0.40	0.37	0.35	0.32
13	1.05	1.02	0.99	0.95	0.91	0.87	0.83	0.79	0.74	0.69	0.64	0.60	0.56	0.51	0.48	0.44	0.41	0.37	0.35	0.32
14	1.05	1.02	0.99	0.95	0.92	0.88	0.83	0.79	0.74	0.69	0.65	0.60	0.56	0.52	0.48	0.44	0.41	0.38	0.35	0.32
15	1.05	1.02	0.99	0.95	0.92	0.88	0.83	0.79	0.74	0.70	0.65	0.60	0.56	0.52	0.48	0.44	0.41	0.38	0.35	0.32
16	1.05	1.02	0.99	0.96	0.92	0.88	0.84	0.79	0.74	0.70	0.65	0.61	0.56	0.52	0.48	0.44	0.41	0.38	0.35	0.32
17	1.05	1.02	0.99	0.96	0.92	0.88	0.84	0.79	0.75	0.70	0.65	0.61	0.56	0.52	0.48	0.45	0.41	0.38	0.35	0.33
18	1.05	1.02	0.99	0.96	0.92	0.88	0.84	0.79	0.75	0.70	0.66	0.61	0.57	0.52	0.48	0.45	0.41	0.38	0.35	0.33
19	1.05	1.02	0.99	0.96	0.92	0.88	0.84	0.79	0.75	0.70	0.66	0.61	0.57	0.52	0.49	0.45	0.41	0.38	0.35	0.33
20	1.05	1.02	0.99	0.96	0.92	0.88	0.84	0.80	0.75	0.70	0.66	0.61	0.57	0.53	0.49	0.45	0.42	0.38	0.35	0.33

Tabla 7.10 Promedio de resultados de modelos híbridos de 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 gld

degradación de rigidez de piso1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	1.00	1.01	1.01	1.02	1.02	1.03	1.03	1.03	1.04	1.04	1.04	1.04
1.01	1.01	0.99	0.96	0.91	0.87	0.87	0.92	0.96	0.99	1.00	1.01	1.02	1.02	1.03	1.03	1.03	1.04	1.04	1.04
1.00	1.01	1.03	1.04	1.04	1.04	1.02	0.99	0.94	0.88	0.88	0.94	1.00	1.01	1.02	1.03	1.03	1.03	1.03	1.04
0.98	0.99	1.01	1.02	1.04	1.05	1.06	1.06	1.04	1.01	0.96	0.91	0.88	0.93	0.99	1.02	1.02	1.03	1.03	1.03
0.97	0.98	0.99	1.01	1.02	1.04	1.05	1.06	1.07	1.06	1.04	1.00	0.94	0.89	0.90	0.96	1.00	1.02	1.02	1.03
0.97	0.98	0.99	1.00	1.01	1.03	1.05	1.06	1.07	1.07	1.06	1.05	1.01	0.96	0.91	0.89	0.94	0.99	1.02	1.02
0.97	0.98	0.99	1.00	1.01	1.02	1.04	1.05	1.07	1.07	1.07	1.07	1.04	1.01	0.96	0.91	0.89	0.94	0.99	1.01
0.96	0.97	0.98	0.99	1.01	1.02	1.03	1.05	1.06	1.07	1.08	1.07	1.06	1.04	1.00	0.95	0.90	0.90	0.94	0.99
0.96	0.97	0.98	0.99	1.00	1.02	1.03	1.04	1.06	1.07	1.08	1.08	1.07	1.05	1.03	0.98	0.93	0.90	0.91	0.95
0.96	0.97	0.98	0.99	1.00	1.01	1.03	1.04	1.05	1.07	1.07	1.08	1.08	1.06	1.04	1.01	0.96	0.91	0.89	0.92
0.96	0.97	0.98	0.99	1.00	1.01	1.02	1.04	1.05	1.06	1.07	1.08	1.08	1.07	1.05	1.02	0.99	0.94	0.90	0.90
0.96	0.97	0.98	0.99	1.00	1.01	1.02	1.03	1.05	1.06	1.07	1.08	1.08	1.07	1.06	1.04	1.00	0.96	0.91	0.89
0.96	0.97	0.98	0.99	1.00	1.01	1.02	1.03	1.05	1.06	1.07	1.07	1.08	1.07	1.06	1.05	1.02	0.98	0.93	0.90
0.96	0.97	0.98	0.99	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.06	1.07	1.07	1.08	1.07	1.05	1.03	0.99	0.95	0.91
0.96	0.97	0.98	0.99	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.06	1.07	1.08	1.08	1.07	1.06	1.03	1.00	0.96	0.92
0.96	0.97	0.98	0.99	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.06	1.07	1.07	1.08	1.07	1.06	1.04	1.01	0.97	0.93
0.96	0.97	0.97	0.98	0.99	1.00	1.02	1.03	1.04	1.05	1.06	1.07	1.07	1.08	1.07	1.06	1.04	1.02	0.98	0.94
0.96	0.97	0.97	0.98	0.99	1.00	1.02	1.03	1.04	1.05	1.06	1.07	1.07	1.07	1.07	1.06	1.05	1.02	0.99	0.95
0.96	0.97	0.97	0.98	0.99	1.00	1.01	1.03	1.04	1.05	1.06	1.07	1.07	1.07	1.07	1.06	1.05	1.03	1.00	0.96
0.96	0.97	0.97	0.98	0.99	1.00	1.01	1.02	1.04	1.05	1.06	1.06	1.07	1.07	1.07	1.06	1.05	1.03	1.00	0.97
1.15	1.18	1.21	1.25	1.29	1.34	1.39	1.46	1.53	1.61	1.70	1.80	1.92	2.04	2.18	2.33	2.50	2.69	2.89	3.11

Tabla 7.11 Relación de resultados del modelo híbrido de 8gld con respecto al promedio de resultados de modelos híbridos de 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 gld

DNM= deriva normalizada del modelo; DNP= deriva normalizada del promedio

$$\text{Error en \%} = 100 * |DNM - DNP| / DNP \quad (7.1)$$

Para el modelo híbrido de 8 gdl tenemos:

$$\text{Error en \%} = 100 * |0.55 - 0.51| / 0.51 = 7.8\% \sim 8\%$$

Observamos en la tabla anterior que en la zona de interés comprendida entre un 10% y un 30% de la masa de piso (Nos. de hileras de 6 a 12 en color amarillo) y con una degradación de rigidez de piso 1 comprendida entre los Nos 1 y 14, no difieren en más de un 8% de los resultados del modelo de 8gld, por lo tanto podemos tomar un factor de aislamiento del modelo de 8gld hasta 2.04.

Haciendo las relaciones entre los resultados de cada uno de los demás modelos con respecto al promedio, en la zona de interés, vemos en resumen la siguiente tabla:

No. de gld del modelo híbrido	Factor de aislamiento en el límite de la zona de interés	Error menor o igual a
4	3.18	17%
5	2.70	22%
6	2.40	19%
7	2.19	15%
9	1.93	15%
10	1.83	21%

Tabla 7.12 Errores obtenidos del estudio de los modelos híbridos de 4, 5, 6, 7, 9 y 10 gld con respecto a los resultados del promedio.

Entonces podemos tomar los valores del promedio en una zona de interés comprendida entre un 10% a un 30% de la masa de piso con un factor de aislamiento comprendido entre 1 y 2 para encontrar los resultados de los modelos híbridos desde 4gld hasta 10gld, de manera de aceptar un error como sigue:

Para el modelo híbrido de 4gl, que el error sea menor o igual al 17% respecto a los valores del promedio.

Para el modelo híbrido de 5gl, que el error sea menor o igual al 22% respecto a los valores del promedio.

Para el modelo híbrido de 6gl, que el error sea menor o igual al 19% respecto a los valores del promedio.

Para el modelo híbrido de 7gl, que el error sea menor o igual al 15% respecto a los valores del promedio.

Para el modelo híbrido de 8gl, que el error sea menor o igual al 8% respecto a los valores del promedio.

Para el modelo híbrido de 9gl, que el error sea menor o igual al 15% respecto a los valores del promedio.

Para el modelo híbrido de 10gl, que el error sea menor o igual al 21% respecto a los valores del promedio.

7.2.2 Relación del promedio de resultados del modelo híbrido de 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 grados de libertad con periodo fundamental del modelo básico de 1 segundo con respecto al promedio de resultados de los modelos híbridos de 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 grados de libertad con periodo fundamental del modelo básico de 0.5 segundos

En este estudio se observó que esta relación es igual a la unidad. Los resultados de los modelos con período de 1 seg. son casi iguales a los resultados de los modelos con periodo de 0.5 seg. con un error que no supera el 0.5%.

7.2.3 Relación del promedio de resultados del modelo híbrido de 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 grados de libertad con periodo fundamental del modelo básico de 1 segundo con respecto al promedio de resultados de los modelos híbridos de 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 grados de libertad con periodo fundamental del modelo básico de 1.5 segundos

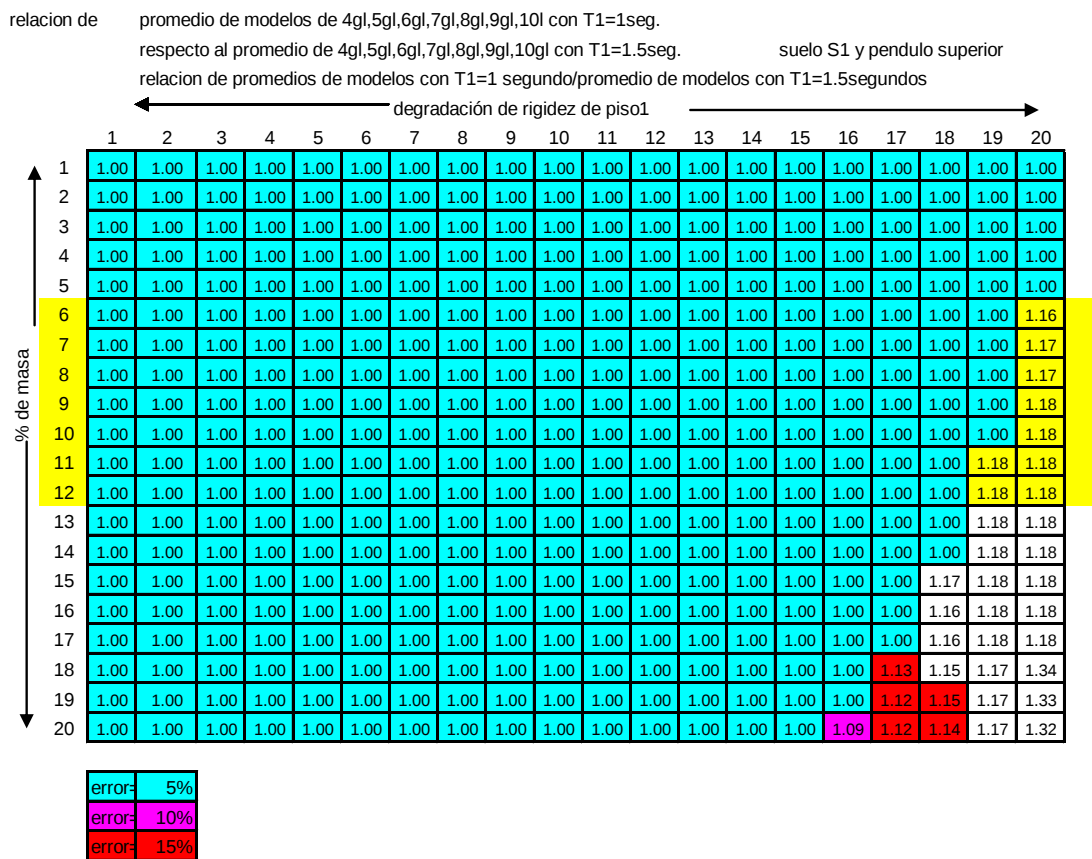


Tabla 7.13 Relación del promedio de resultados de modelos híbridos con periodo fundamental de 1seg. para el modelo básico con respecto al promedio de los resultados de los mismos modelos pero con periodo fundamental de 1.5 seg para el modelo básico.

Como se puede observar en la tabla anterior los resultados del promedio de los modelos híbridos de 4gl, 5gl, 6gl, 7gl, 8gl, 9gl, 10gl con periodo fundamental de 1 segundo para el modelo básico y los resultados del promedio de los modelos híbridos de 4gl, 5gl, 6gl, 7gl, 8gl, 9gl, 10gl con periodo fundamental de 1.5 segundos existe un mayor error en la zona donde el factor de aislamiento es cercano a 3, pero en todo caso no difieren en más del 0.5% de error en la zona de interés que corresponde entre un 10% y un 30% del valor de la masa de piso típica y un factor de aislamiento menor o igual a 2.

A continuación se presenta una tabla de la zona de interés que corresponde a los resultados de los modelos híbridos desde 4gl hasta 10 gld.

derivas normalizadas de modelos híbridos de 4gl,5gl,6gl,7gl,8gl,9gl,10gl Suelo S1, T=1seg., pénd.superior

modelo híbrido de 4gl														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
4	1.11	1.03	0.95	0.87	0.79	0.74	0.72	0.72	0.72	0.72	0.69	0.66	0.62	0.58
5	1.15	1.08	1.00	0.92	0.84	0.76	0.69	0.66	0.65	0.65	0.65	0.63	0.61	0.58
6	1.17	1.11	1.03	0.96	0.87	0.79	0.71	0.65	0.61	0.60	0.60	0.60	0.59	0.56
7	1.19	1.12	1.05	0.98	0.90	0.82	0.74	0.66	0.61	0.58	0.57	0.57	0.56	0.55
8	1.20	1.14	1.07	0.99	0.91	0.83	0.76	0.68	0.62	0.57	0.55	0.54	0.54	0.53
9	1.21	1.14	1.08	1.00	0.93	0.85	0.77	0.70	0.63	0.57	0.54	0.52	0.52	0.51
10	1.21	1.15	1.08	1.01	0.94	0.86	0.78	0.71	0.64	0.58	0.54	0.51	0.50	0.50
11	1.22	1.16	1.09	1.02	0.94	0.87	0.79	0.72	0.65	0.59	0.54	0.51	0.49	0.48
12	1.22	1.16	1.09	1.02	0.95	0.88	0.80	0.73	0.66	0.60	0.54	0.51	0.48	0.47

modelo híbrido de 5gl

4	1.01	0.96	0.91	0.85	0.78	0.71	0.64	0.58	0.55	0.55	0.56	0.56	0.55	0.52
5	1.03	0.98	0.94	0.88	0.83	0.76	0.69	0.62	0.56	0.51	0.50	0.50	0.51	0.50
6	1.04	1.00	0.95	0.90	0.85	0.79	0.72	0.66	0.59	0.53	0.48	0.46	0.46	0.46
7	1.05	1.01	0.96	0.91	0.86	0.80	0.74	0.68	0.61	0.55	0.49	0.45	0.43	0.43
8	1.05	1.01	0.97	0.92	0.87	0.81	0.76	0.69	0.63	0.57	0.51	0.46	0.42	0.41
9	1.05	1.01	0.97	0.93	0.88	0.82	0.76	0.70	0.64	0.58	0.52	0.47	0.42	0.40
10	1.06	1.02	0.98	0.93	0.88	0.83	0.77	0.71	0.65	0.59	0.53	0.48	0.43	0.40
11	1.06	1.02	0.98	0.93	0.88	0.83	0.78	0.72	0.66	0.60	0.54	0.49	0.44	0.40
12	1.06	1.02	0.98	0.94	0.89	0.83	0.78	0.72	0.66	0.61	0.55	0.49	0.44	0.40

modelo híbrido de 6gl

4	0.99	0.96	0.92	0.88	0.83	0.77	0.71	0.64	0.57	0.52	0.50	0.51	0.52	0.51
5	1.00	0.97	0.94	0.90	0.85	0.80	0.75	0.69	0.63	0.56	0.50	0.46	0.45	0.46
6	1.01	0.98	0.95	0.91	0.87	0.82	0.77	0.72	0.66	0.59	0.53	0.47	0.43	0.42
7	1.01	0.98	0.95	0.91	0.87	0.83	0.78	0.73	0.67	0.62	0.56	0.49	0.44	0.40
8	1.02	0.99	0.95	0.92	0.88	0.84	0.79	0.74	0.69	0.63	0.57	0.51	0.46	0.41
9	1.02	0.99	0.96	0.92	0.88	0.84	0.79	0.74	0.69	0.64	0.58	0.53	0.47	0.42
10	1.02	0.99	0.96	0.92	0.88	0.84	0.80	0.75	0.70	0.65	0.59	0.54	0.48	0.43
11	1.02	0.99	0.96	0.93	0.89	0.84	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60	0.55	0.49	0.44
12	1.02	0.99	0.96	0.93	0.89	0.85	0.80	0.75	0.71	0.66	0.60	0.55	0.50	0.45

modelo híbrido de 7gl

4	0.99	0.96	0.93	0.90	0.86	0.82	0.77	0.71	0.64	0.57	0.51	0.48	0.48	0.49
5	1.00	0.97	0.94	0.91	0.88	0.84	0.79	0.74	0.69	0.63	0.56	0.50	0.45	0.43
6	1.00	0.98	0.95	0.92	0.88	0.85	0.80	0.76	0.71	0.66	0.60	0.54	0.47	0.42
7	1.00	0.98	0.95	0.92	0.89	0.85	0.81	0.77	0.72	0.67	0.62	0.56	0.50	0.44
8	1.01	0.98	0.96	0.93	0.89	0.86	0.82	0.77	0.73	0.68	0.63	0.58	0.52	0.46
9	1.01	0.98	0.96	0.93	0.90	0.86	0.82	0.78	0.73	0.69	0.64	0.58	0.53	0.48
10	1.01	0.99	0.96	0.93	0.90	0.86	0.82	0.78	0.74	0.69	0.64	0.59	0.54	0.49
11	1.01	0.99	0.96	0.93	0.90	0.86	0.82	0.78	0.74	0.69	0.65	0.60	0.55	0.50
12	1.01	0.99	0.96	0.93	0.90	0.86	0.83	0.78	0.74	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50

modelo híbrido de 8gl													
4	0.99	0.97	0.94	0.91	0.88	0.85	0.80	0.76	0.70	0.64	0.57	0.50	0.47
5	0.99	0.97	0.95	0.92	0.89	0.86	0.82	0.78	0.74	0.68	0.63	0.56	0.44
6	1.00	0.98	0.96	0.93	0.90	0.87	0.83	0.79	0.75	0.70	0.65	0.60	0.54
7	1.00	0.98	0.96	0.93	0.90	0.87	0.84	0.80	0.76	0.71	0.66	0.61	0.56
8	1.00	0.98	0.96	0.93	0.91	0.87	0.84	0.80	0.76	0.72	0.67	0.62	0.57
9	1.00	0.98	0.96	0.94	0.91	0.88	0.84	0.81	0.77	0.72	0.68	0.63	0.58
10	1.00	0.99	0.96	0.94	0.91	0.88	0.84	0.81	0.77	0.73	0.68	0.64	0.59
11	1.01	0.99	0.96	0.94	0.91	0.88	0.85	0.81	0.77	0.73	0.68	0.64	0.59
12	1.01	0.99	0.96	0.94	0.91	0.88	0.85	0.81	0.77	0.73	0.69	0.64	0.60

modelo híbrido de 9gl													
4	0.99	0.97	0.95	0.93	0.90	0.87	0.83	0.79	0.75	0.70	0.63	0.56	0.49
5	0.99	0.98	0.96	0.94	0.91	0.88	0.85	0.81	0.77	0.72	0.68	0.62	0.56
6	1.00	0.98	0.96	0.94	0.91	0.89	0.85	0.82	0.78	0.74	0.69	0.64	0.59
7	1.00	0.98	0.96	0.94	0.92	0.89	0.86	0.82	0.79	0.75	0.70	0.66	0.61
8	1.00	0.98	0.97	0.94	0.92	0.89	0.86	0.83	0.79	0.75	0.71	0.66	0.62
9	1.00	0.99	0.97	0.94	0.92	0.89	0.86	0.83	0.79	0.75	0.71	0.67	0.62
10	1.00	0.99	0.97	0.95	0.92	0.89	0.86	0.83	0.79	0.75	0.71	0.67	0.63
11	1.00	0.99	0.97	0.95	0.92	0.89	0.86	0.83	0.79	0.76	0.72	0.67	0.63
12	1.00	0.99	0.97	0.95	0.92	0.89	0.86	0.83	0.80	0.76	0.72	0.68	0.63

modelo híbrido de 10gl													
4	0.99	0.98	0.96	0.94	0.91	0.89	0.86	0.82	0.78	0.74	0.68	0.62	0.55
5	0.99	0.98	0.96	0.94	0.92	0.90	0.87	0.83	0.80	0.76	0.71	0.66	0.61
6	1.00	0.98	0.97	0.95	0.93	0.90	0.87	0.84	0.80	0.77	0.73	0.68	0.63
7	1.00	0.98	0.97	0.95	0.93	0.90	0.87	0.84	0.81	0.77	0.73	0.69	0.64
8	1.00	0.99	0.97	0.95	0.93	0.90	0.88	0.85	0.81	0.78	0.74	0.69	0.65
9	1.00	0.99	0.97	0.95	0.93	0.90	0.88	0.85	0.81	0.78	0.74	0.70	0.66
10	1.00	0.99	0.97	0.95	0.93	0.91	0.88	0.85	0.81	0.78	0.74	0.70	0.66
11	1.00	0.99	0.97	0.95	0.93	0.91	0.88	0.85	0.82	0.78	0.74	0.70	0.66
12	1.00	0.99	0.97	0.95	0.93	0.91	0.88	0.85	0.82	0.78	0.74	0.70	0.66

Tabla 7.14 Derivas normalizadas de los modelos híbridos desde 4gl hasta 10gl.

A continuación se presenta una tabla de las derivas normalizadas pertenecientes al modelo híbrido de 22 gl, cuyo periodo del modelo básico de 20 gl es $T=1.95\text{seg}$.

normalizderm de 22gl con periodo de $T_1=1.9454\text{seg}$ péndulo superior y suelo S1 deriva de modelo básico de 20g 1.49 cms																				
degradación de rigidez de piso1																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0.90	0.91	0.91	0.92	0.92	0.92	0.92	0.91	0.90	0.89	0.87	0.85	0.83	0.80	0.77	0.74	0.71	0.67	0.64	0.60
2	0.98	0.97	0.96	0.95	0.94	0.93	0.91	0.89	0.86	0.83	0.78	0.71	0.63	0.58	0.62	0.67	0.67	0.66	0.63	0.60
3	0.99	0.98	0.98	0.97	0.96	0.95	0.93	0.92	0.90	0.88	0.86	0.83	0.80	0.76	0.71	0.65	0.55	0.48	0.51	0.55
4	0.99	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95	0.94	0.92	0.91	0.89	0.87	0.84	0.81	0.78	0.75	0.71	0.66	0.60	0.53	0.44
5	0.99	0.99	0.98	0.97	0.97	0.95	0.94	0.93	0.91	0.89	0.87	0.84	0.82	0.79	0.76	0.72	0.68	0.64	0.59	0.53
6	1.00	0.99	0.98	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.89	0.87	0.85	0.82	0.79	0.76	0.73	0.69	0.65	0.61	0.56
7	1.00	0.99	0.98	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.89	0.87	0.85	0.82	0.79	0.76	0.73	0.69	0.65	0.61	0.57
8	1.00	0.99	0.98	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.89	0.87	0.85	0.82	0.79	0.76	0.73	0.69	0.66	0.62	0.58
9	1.00	0.99	0.98	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.89	0.87	0.85	0.82	0.79	0.76	0.73	0.70	0.66	0.62	0.58
10	1.00	0.99	0.98	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.89	0.87	0.85	0.82	0.80	0.76	0.73	0.70	0.66	0.62	0.58
11	1.00	0.99	0.98	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.89	0.87	0.85	0.82	0.80	0.77	0.73	0.70	0.66	0.62	0.59
12	1.00	0.99	0.98	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.89	0.87	0.85	0.82	0.80	0.77	0.73	0.70	0.66	0.63	0.59
13	1.00	0.99	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.89	0.87	0.85	0.82	0.80	0.77	0.73	0.70	0.66	0.63	0.59
14	1.00	0.99	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.89	0.87	0.85	0.82	0.80	0.77	0.73	0.70	0.66	0.63	0.59
15	1.00	0.99	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.89	0.87	0.85	0.82	0.80	0.77	0.73	0.70	0.66	0.63	0.59
16	1.00	0.99	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.89	0.87	0.85	0.82	0.80	0.77	0.73	0.70	0.66	0.63	0.59
17	1.00	0.99	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.89	0.87	0.85	0.82	0.80	0.77	0.73	0.70	0.66	0.63	0.59
18	1.00	0.99	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.89	0.87	0.85	0.82	0.80	0.77	0.73	0.70	0.66	0.63	0.59
19	1.00	0.99	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.89	0.87	0.85	0.83	0.80	0.77	0.73	0.70	0.66	0.63	0.59
20	1.00	0.99	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.89	0.87	0.85	0.83	0.80	0.77	0.73	0.70	0.66	0.63	0.59
F.A=	1.05	1.06	1.07	1.08	1.09	1.11	1.13	1.15	1.18	1.21	1.24	1.28	1.33	1.38	1.44	1.51	1.59	1.68	1.77	1.88

Tabla 7.15 Derivas normalizadas del modelo híbrido de 22gl ($T=1.95\text{ seg}$).

deriva de modelo básico de 20gl= 1.49 cms

Deriva más baja del modelo híbrido = $0.782 \times 1.493 = 1.17$ cms

Reducción = $(1.49 - 1.17)/1.49 \times 100 = 21.5\%$

Lo cual nos indica que este modelo híbrido de 22gl presenta una reducción muy baja. En el modelo básico de un piso para un periodo de 2 seg. presentó una reducción del 82.6% como se observa en la tabla 6.13, lo cual nos indica que aunque los dos modelos el de 20 pisos y el de 1 piso tengan un periodo muy similar de 2 seg., el modelo básico de 1 piso presenta una reducción mucho mayor, lo cual nos indica que el sistema de control de vibración híbrido es mucho más eficiente en estructuras de pocos pisos.

De manera similar se calcula la reducción para cada uno de los modelos híbridos desde 4gl hasta 10gl con periodo de los modelos básicos respectivos de 1 seg. En resumen tenemos la siguiente tabla:

No. de gl del modelo híbrido	Deriva del modelo básico (cms)	Deriva mín. del modelo híbrido en zona de interés(cms)	Reducción en porcentaje
4	3.29	1.56	52.6
5	3.17	1.26	60.4
6	2.79	1.12	59.9
7	2.43	1.02	58.0
8	2.14	0.94	56.2
9	1.90	0.86	54.8
10	1.71	0.82	52.2

Tabla 7.16 Reducciones para cada uno de los modelos híbridos desde 4gl hasta 10gl con T1=1seg.

Como se observa en la tabla anterior, vemos que las mayores reducciones se obtienen para los modelos híbridos de 5gl, 6gl y 7gl.

7.3 Sistemas híbridos para estructuras básicas con periodos $T \geq 0.5$ seg.

Se modelaron estructuras básicas de 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 20 pisos y se sometieron a una excitación sísmica definida por el espectro para suelo S1 de la norma venezolana de edificaciones sismorresistentes COVENIN MINDUR 2001 y se analizaron a través del programa hibps (desarrollado en el capítulo 5). Los periodos utilizados para cada modelo fueron de 0.5, 1 y 2 segundos.

Estos modelos se diseñaron con columnas de concreto de 40x40cm y vigas de 40x60 cm. Las masas de piso se fueron variando de tal manera de obtener los períodos deseados de 0.5, 1 y 2 segundos.

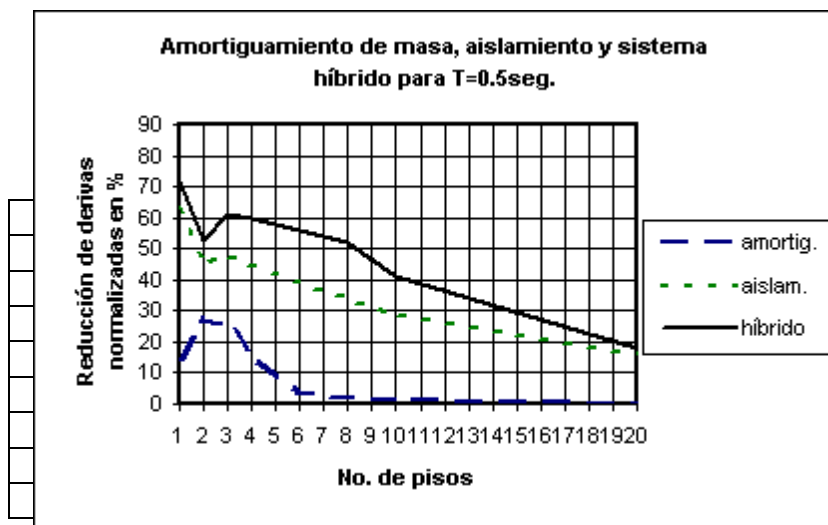
Los análisis realizados en este capítulo para estructuras de varios pisos consideraron modelos con período de un segundo, por otro lado, las estructuras de un piso estudiadas en el capítulo 6, tienen como límite superior un período de 0.5seg. Dadas estas limitaciones se procedió en esta sección al estudio de estructuras con otros rangos de períodos y sistemas de uno y varios pisos, sin embargo, por la amplitud de esta intención y el carácter exploratorio con que fue realizado, los resultados obtenidos solo servirán como orientación para investigaciones futuras.

Este estudio se realizó para sistemas estructurales con control de vibración híbrido, con la limitación de usar un amortiguamiento de masa de hasta el 30% del valor de la masa de piso y con un factor de aislamiento cercano a 2.

A continuación se presenta una tabla con los modelos descritos arriba y con sus respectivos porcentajes de reducción para los periodos de 0.5, 1 y 2 segundos.

Modelo básico No. GLD	Periodo (seg.)	Reducción en % de derivas normalizadas: solo amortiguamiento	Reducción en % de derivas normalizadas: solo aislamiento	Reducción en % de derivas normalizadas: sistema Híbrido
1	0.5	15	63	72
1	1	15	63	72
1	2	15	63	83
2	0.5	27	45	53
2	1	27	44	53
2	2	27	44	85
3	0.5	26	48	61
3	1	27	47	60
3	2	28	47	60
4	0.5	16	45	60
4	1	16	45	60
4	2	17	44	60
6	0.5	4	39	56
6	1	4	39	56
6	2	4	39	56
8	0.5	2	34	52
8	1	2	34	52
8	2	2	35	52
10	0.5	1	29	41
10	1	2	30	42
10	2	2	31	43
20	0.5	0	16	18
20	1	0	18	20
20	2	1	20	22

Tabla 7.17 Reducciones en porcentaje para cada uno de los modelos híbridos con $T=0.5, 1, 2$ seg. Suelo S1 y péndulo superior.



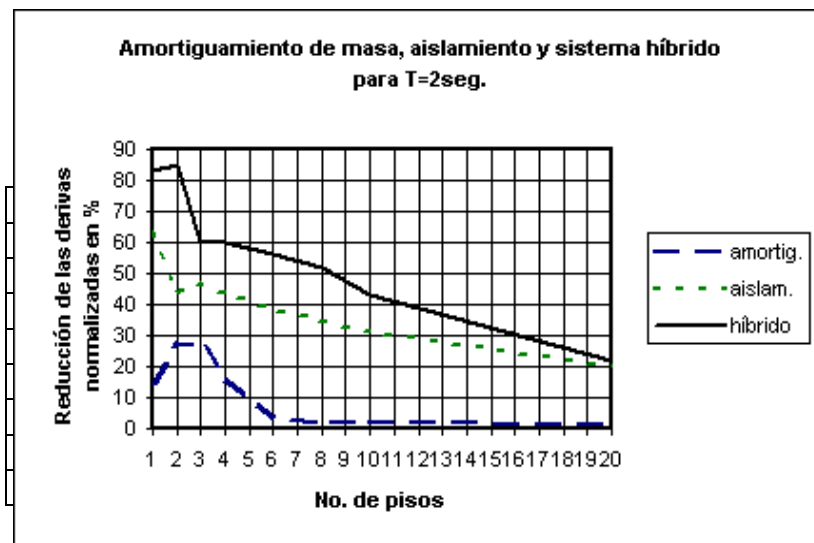
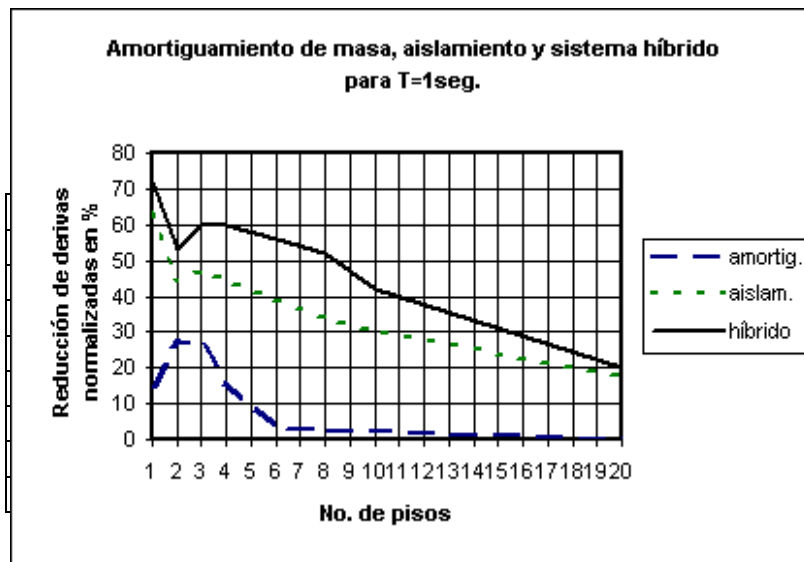


Fig. 7.1 Reducción en porcentaje de derivas normalizadas, en la zona de interés, de modelos de varios pisos con solo amortiguamiento de masa, con solo aislamiento de la base y con sistema híbrido para T=0.5, 1 y 2seg.

Comentario de los resultados:

- 1) Las estructuras que tienen un control de vibración híbrido presentan una mayor reducción de las derivas normalizadas que aquellas que tienen aplicados los sistemas de control de vibración por separado de amortiguamiento de masa o aislamiento en la base.
- 2) Para estructuras que tienen un periodo de 2 segundos, el sistema híbrido conduce a una mayor reducción de las derivas normalizadas que para el caso de estructuras con periodos de 0.5 y de 1 segundo.

CAPITULO 8

EJEMPLOS DE APLICACIÓN

8.1 Introducción

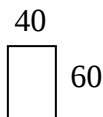
En este capítulo se presenta un ejemplo de un modelo básico de 4 pisos al cual se le adiciona el sistema de aislamiento en la base y el sistema de amortiguamiento de masa ubicado en el primer caso en el tope de la estructura y en el segundo caso se ubica en la base de la estructura.

8.2 Características geométricas y físicas del modelo

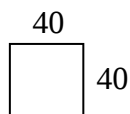
Como ejemplo se presenta a continuación las características geométricas y físicas de un pórtico plano de 4 pisos y que será sometido a una excitación sísmica definida por el espectro de la norma venezolana para edificaciones sismorresistentes COVENIN MINDUR 2001³. Se consideró para este ejemplo el espectro elástico para el tipo de suelo S1.

La respuesta estructural máxima probable se analizó mediante el programa realizado en Matlab¹¹ y verificado mediante el programa SAP2000¹⁰.

Vigas: 40x60 cm



Col.: 40x40 cm



Para vigas y columnas tenemos:

Material: concreto

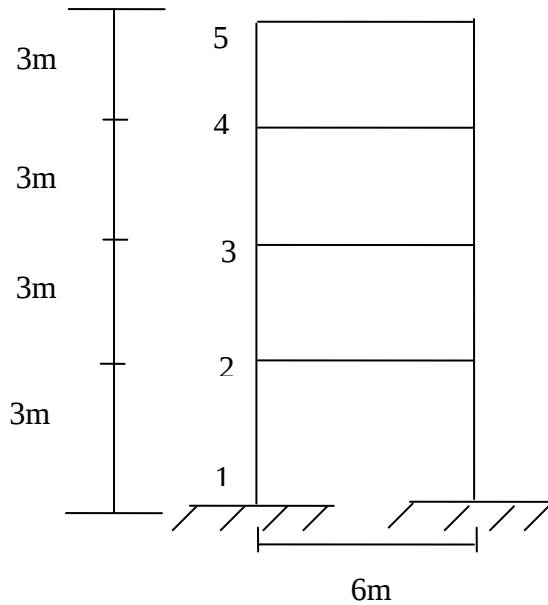


Fig. 8.1 Pórtico plano de 4 pisos

Módulo de elasticidad	$E = 253105 \text{ kg/cm}^2$
Resistencia a compresión del concreto	$f'_c = 281 \text{ kg/cm}^2$
esfuerzo cedente del acero de refuerzo	$F_y = 4218 \text{ kg/cm}^2$

Tabla 8.1 Propiedades físicas de vigas y columnas

Vigas	Area(cm^2)	Inercia(cm^4)
Todas	2400	720000

Tabla 8.2 Características físicas de las vigas

Columnas	Area(cm ²)	Inercia(cm ⁴)
Todas	1600	213333

Tabla 8.3 Características físicas de las columnas

Masa en cada piso: 25 kg-seg²/cm

La matriz de rigidez hallada por medio del programa SAP2000 es:

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} 95992 & -47996 & 0 & 0 \\ -47996 & 95992 & -47996 & 0 \\ 0 & -47996 & 95992 & -47996 \\ 0 & 0 & -47996 & 47996 \end{bmatrix} ; \bar{M} = \begin{bmatrix} 25 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 25 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 25 \end{bmatrix}$$

8.3 Características de la excitación sísmica usada en el programa hibps

Los distintos modelos a considerar en este trabajo, se someterán a las solicitaciones de los espectros de la norma venezolana para edificaciones sismorresistentes COVENIN MINDUR 2001. Se consideraran los espectros elásticos para los cuatro tipos de suelo S1, S2, S3, S4 como puede verse en la figura siguiente:

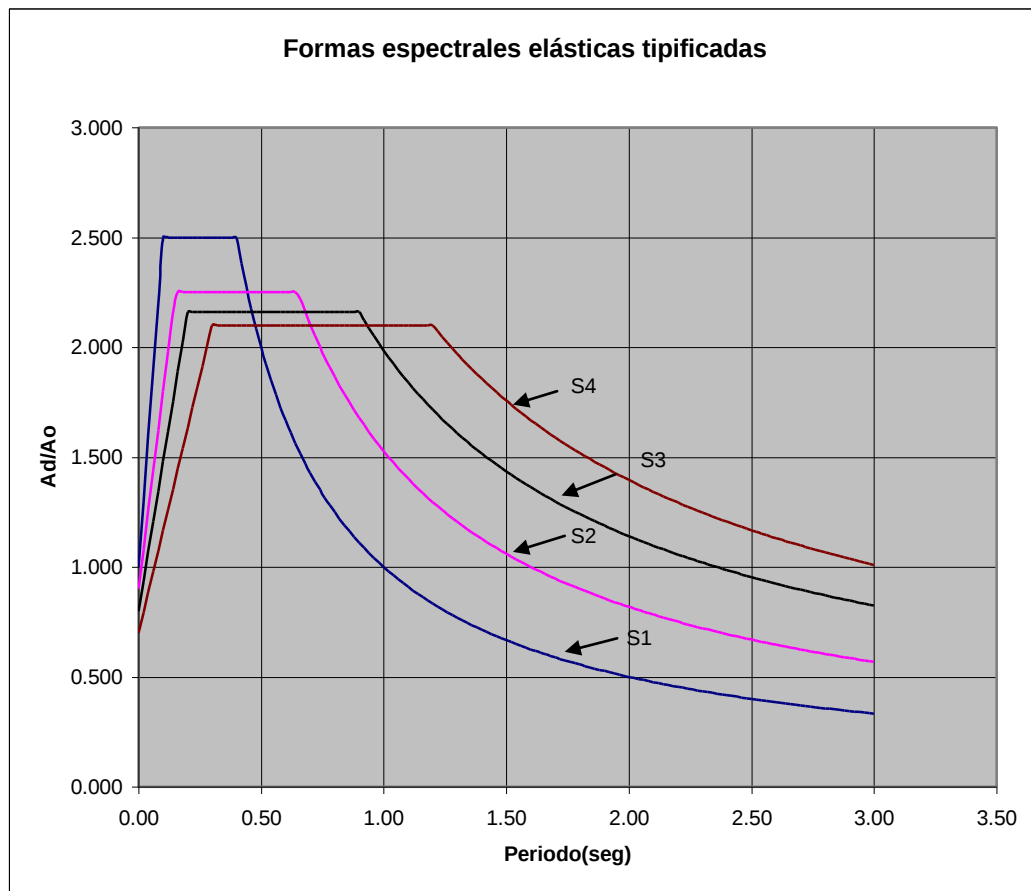


Fig. 8.2 Espectros de diseño de la Norma Covenín 1756-2001

8.3.1 Análisis de la respuesta elástica para el modelo básico de 4 pisos

El pórtico plano de la figura 8.1 se corrió con el programa hibps para el caso del espectro de suelo S1 y el gráfico obtenido es el siguiente:

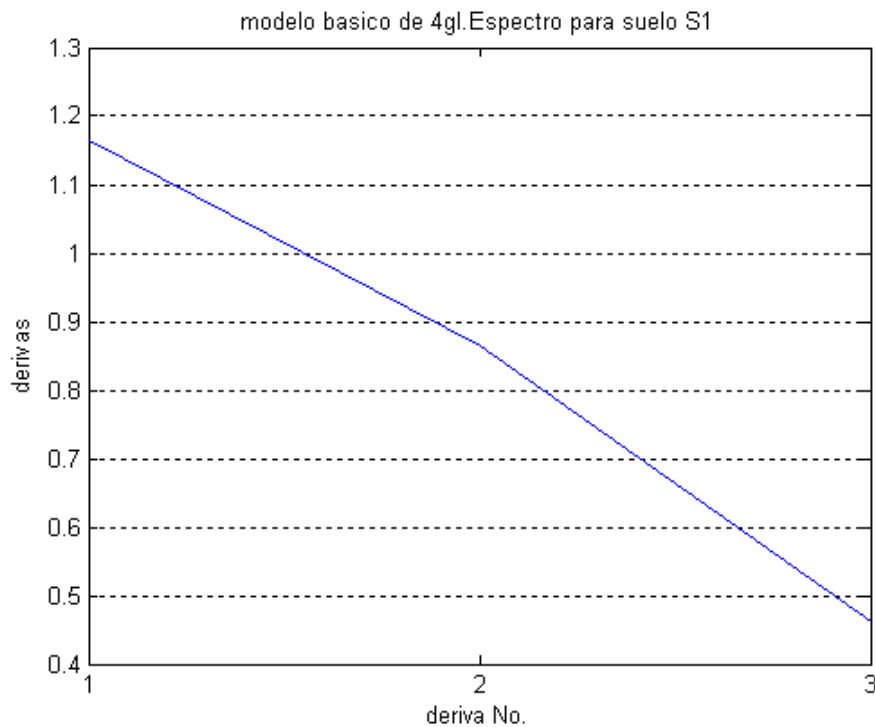


Fig. 8.3 Derivas del modelo básico de 4pisos.

Como se observa la máxima deriva del pórtico básico de 4gl es 1.16 cm. Los periodos son: Modo1 ($T_1=0.41$ seg); Modo2 ($T_2=0.14$ seg); Modo3 ($T_3=0.09$ seg); Modo4 ($T_4=0.08$ seg).

Utilizando el programa SAP2000 para el pórtico plano de la figura 8.1 y usando el espectro elástico para suelos S1 tenemos los siguientes resultados:

Modo No.	Período(seg)
1	0.58
2	0.19
3	0.11
4	0.08

Tabla 8.4 Periodos obtenidos para cada modo del pórtico de la fig.8.1

Junta No.	Desplazamientos(cm)
2	1.45
3	3.24
4	4.65
5	5.49

Tabla 8.5 Desplazamientos de las juntas del pórtico de la fig.8.1

Las derivas de piso se calculan como:

$$\text{Deriva 1} = 3.24 - 1.45 = 1.79 \text{ cm}$$

$$\text{Deriva 2} = 4.65 - 3.24 = 1.41 \text{ cm}$$

$$\text{Deriva 3} = 5.49 - 4.65 = 0.84 \text{ cm}$$

Entonces la máxima deriva es 1.79 cm en el piso2

8.3.2 Análisis de la respuesta elástica para el modelo de base aislada con masa auxiliar en el tope con espectro para suelo S1

Al pórtico de 4 pisos se le agregó una base aislada y una masa auxiliar en el tope, resultando un modelo híbrido de 6 grados de libertad. La base comienza con una rigidez k_1 y se va degradando en un 10% en cada ciclo del programa hibps y la masa auxiliar empieza con un valor del 5% de la masa típica del pórtico de 4 niveles y se va incrementando hasta llegar a un 50% de la masa típica del pórtico de 4 niveles como se trató en el capítulo 5.

De esta manera se introduce al programa hibps la matriz de rigidez K y la matriz de masa M como sigue y el programa realiza los cálculos preliminares de acuerdo con lo presentado en el capítulo 5:

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} 95992 & -47996 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -47996 & 95992 & -47996 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -47996 & 95992 & -47996 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -47996 & 95992 & -47996 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -47996 & 95992 & -47996 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -47996 & 47996 \end{bmatrix};$$

$$\bar{M} = \begin{bmatrix} 25 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 25 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 25 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 25 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 25 \end{bmatrix}$$

Aplicando los criterios para calcular la rigidez del sistema auxiliar (k_a), expuestos en el capítulo 5, la matriz de rigidez K modificada por el programa hibps queda:

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} 95992 & -47996 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -47996 & 95992 & -47996 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -47996 & 95992 & -47996 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -47996 & 95992 & -47996 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -47996 & 95992 & -305.53 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -305.53 & 305.53 \end{bmatrix}$$

El gráfico obtenido es el siguiente:

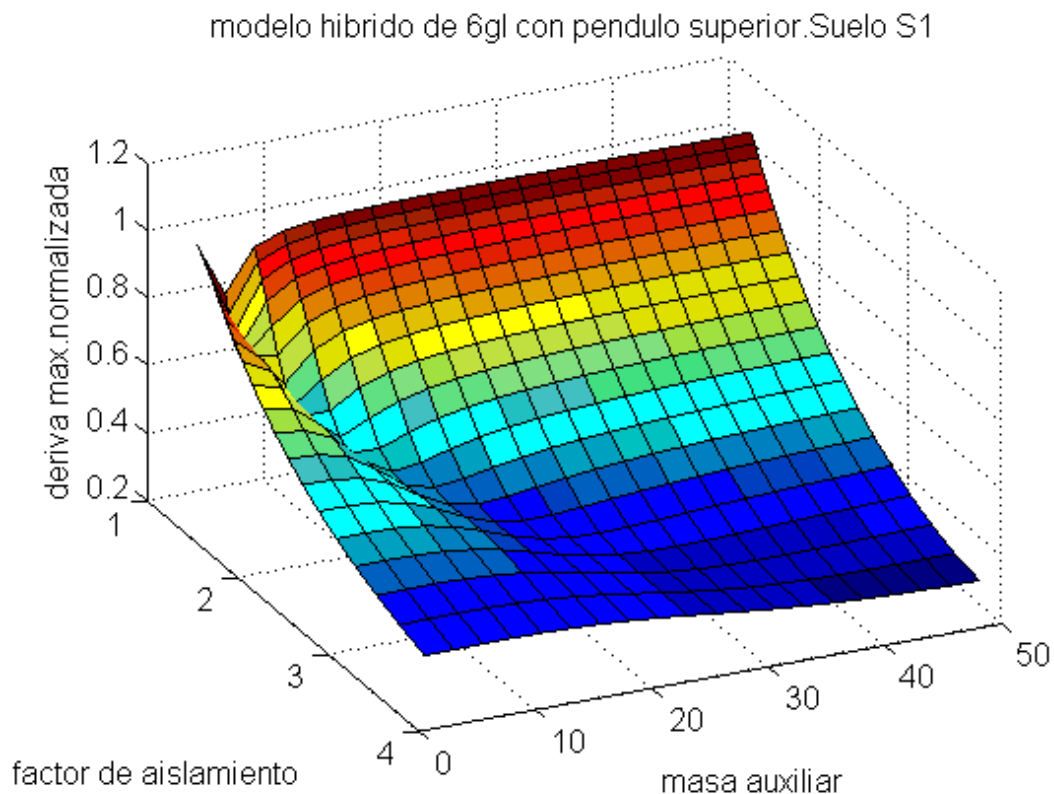


Fig. 8.4 Modelo básico de 4gld con aislamiento en la base y amortiguamiento de masa en el tope con espectro para suelo S1.

Como se observa en el gráfico, existe beneficio en gran parte de la zona del dibujo y los valores más bajos de la respuesta los obtenemos para el caso en que el factor de aislamiento se encuentra cercano al valor de 3 y la masa auxiliar está alrededor del 20% del valor de la masa de piso típica del modelo básico.

8.3.3 Análisis de la respuesta elástica para el modelo de base aislada con masa auxiliar en la base con espectro para suelo S1

Al pórtico de 4 pisos se le agregó una base aislada y una masa auxiliar en la base, resultando un modelo híbrido de 6 grados de libertad.

De esta manera se introduce al programa hibpi la matriz de rigidez K y la matriz de masa M como sigue y el programa realiza los cálculos preliminares de acuerdo a lo presentado en el capítulo 5:

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} 143988 & -47996 & 0 & 0 & 0 & -47996 \\ -47996 & 95992 & -47996 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -47996 & 95992 & -47996 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -47996 & 95992 & -47996 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -47996 & 47996 & 0 \\ -47996 & 0 & 0 & 0 & 0 & 47996 \end{bmatrix}$$

$$\bar{M} = \begin{bmatrix} 25 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 25 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 25 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 25 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 25 \end{bmatrix}$$

Aplicando los criterios para calcular la rigidez del sistema auxiliar (k_a), expuestos en el capítulo 5, la matriz de rigidez K modificada por el programa hibpi queda:

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} 96298 & -47996 & 0 & 0 & 0 & -305.53 \\ -47996 & 95992 & -47996 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -47996 & 95992 & -47996 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -47996 & 95992 & -47996 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -47996 & 47996 & -305.53 \\ -305.53 & 0 & 0 & 0 & -305.53 & 305.53 \end{bmatrix}$$

El gráfico obtenido es el siguiente:

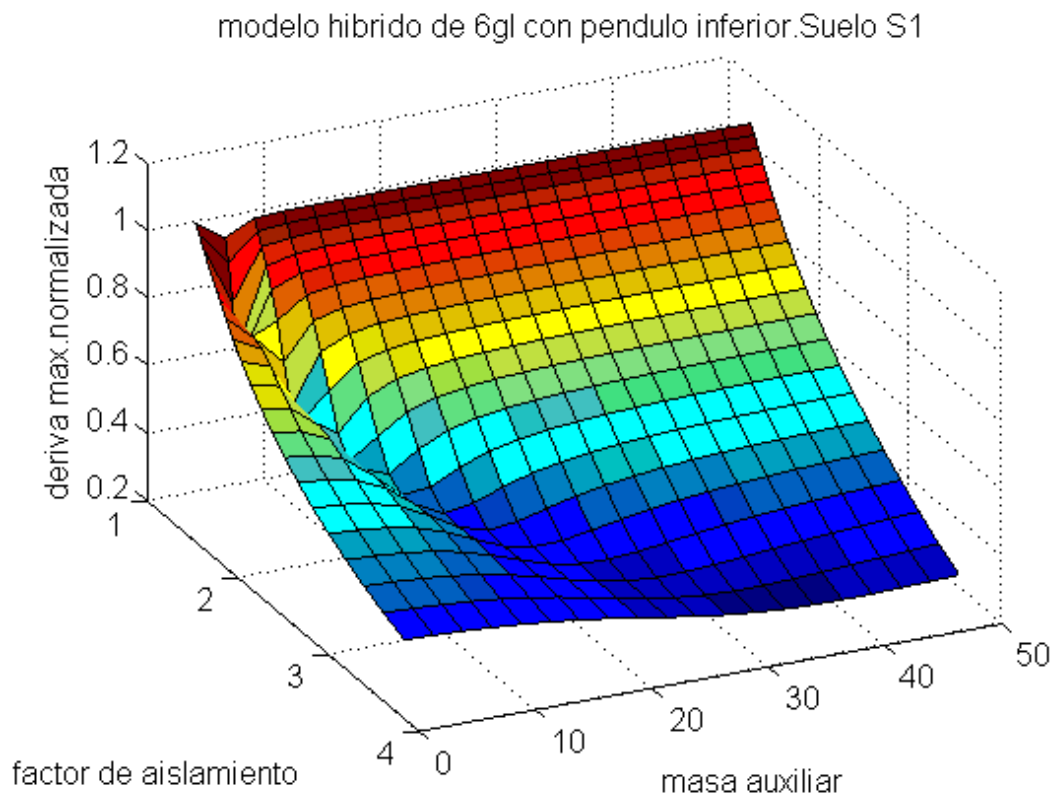


Fig. 8.5 Modelo básico de 4gld con aislamiento en la base y amortiguamiento de masa en la base con espectro para suelo S1.

Como se observa en el gráfico, existe beneficio en gran parte de la zona del dibujo y los valores más bajos de la respuesta los obtenemos para el caso en que el factor de aislamiento se encuentra cercano al valor de 3 y la masa auxiliar está alrededor del 20% del valor de la masa de piso típica del modelo básico.

8.3.4 Análisis de la respuesta elástica para el modelo de base aislada con masa auxiliar en el tope con espectro para suelo S4

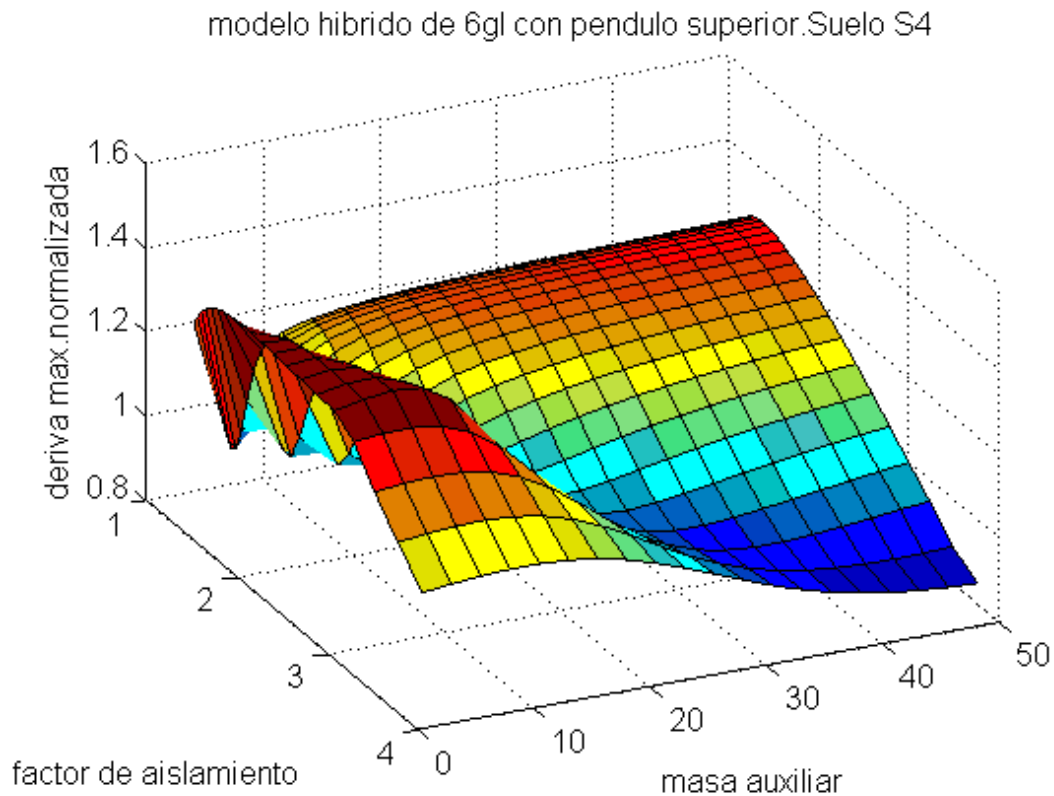


Fig. 8.6 Modelo básico de 4gld con aislamiento en la base y amortiguamiento de masa en el tope con espectro para suelo S4.

Como se observa en el gráfico, existe beneficio en una parte de la zona del dibujo y los valores más bajos de la respuesta los obtenemos para el caso en que el factor de aislamiento se encuentra cercano al valor de 3 y la masa auxiliar está alrededor del 35% del valor de la masa de piso típica del modelo básico.

8.3.5 Análisis de la respuesta elástica para el modelo de base aislada con masa auxiliar en la base con espectro para suelo S4

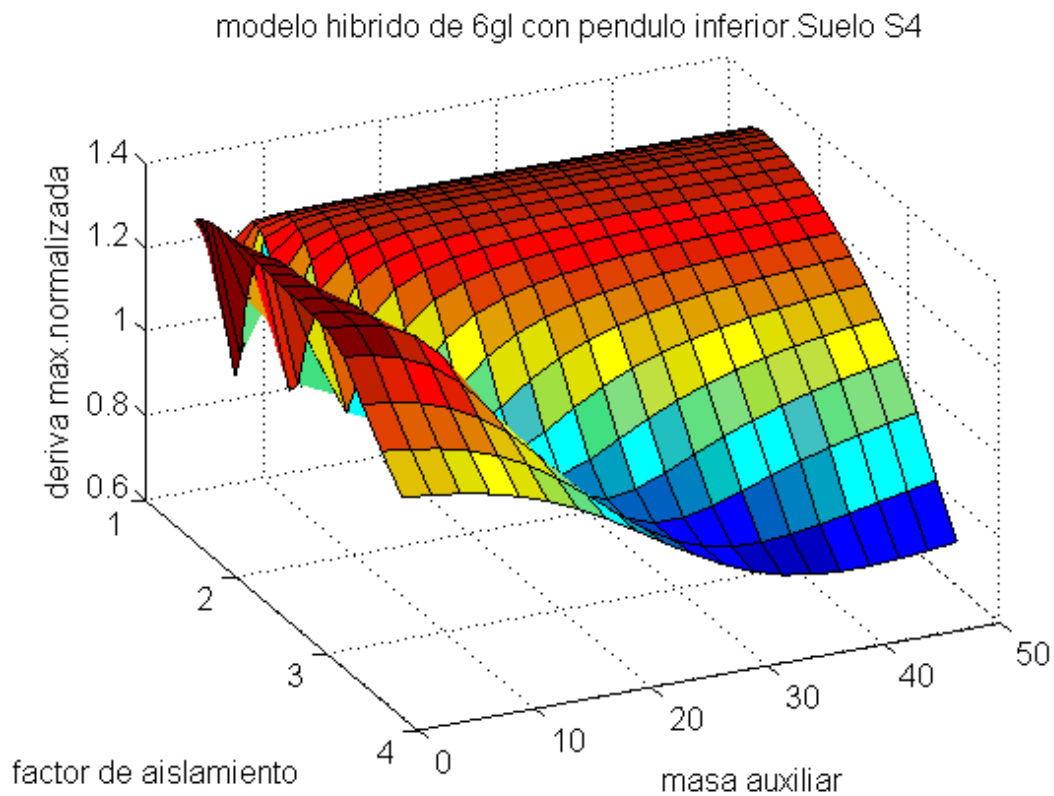


Fig. 8.7 Modelo básico de 4gld con aislamiento en la base y amortiguamiento de masa en la base con espectro para suelo S4.

Como se observa en el gráfico, existe beneficio en una parte de la zona del dibujo y los valores más bajos de la respuesta los obtenemos para el caso en que el factor de aislamiento se encuentra cercano al valor de 3 y la masa auxiliar está alrededor del 35% del valor de la masa de piso típica del modelo básico.

8.3.6 Tablas de resultados de las derivas máximas de los modelos híbridos.

derm1(deriva máxima) 6gl con periodo de modelo básico T1=0.41segundos péndulo superior y suelo S1

degradación de rigidez de piso1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	1.16	1.15	1.13	1.10	1.07	1.03	0.98	0.94	0.89	0.84	0.78	0.73	0.69	0.64	0.59	0.55	0.51	0.47	0.44	0.40
2	0.97	0.91	0.84	0.80	0.80	0.82	0.84	0.85	0.84	0.81	0.77	0.73	0.68	0.64	0.59	0.55	0.51	0.48	0.44	0.41
3	1.11	1.07	1.02	0.96	0.89	0.81	0.73	0.67	0.66	0.68	0.69	0.68	0.66	0.62	0.59	0.55	0.51	0.48	0.44	0.41
4	1.15	1.11	1.07	1.02	0.96	0.90	0.82	0.74	0.66	0.60	0.58	0.59	0.59	0.59	0.57	0.54	0.51	0.47	0.44	0.41
5	1.16	1.13	1.09	1.04	0.99	0.93	0.87	0.80	0.72	0.65	0.57	0.53	0.52	0.53	0.53	0.52	0.50	0.47	0.44	0.41
6	1.17	1.14	1.10	1.06	1.01	0.95	0.89	0.83	0.76	0.69	0.61	0.54	0.49	0.48	0.48	0.48	0.48	0.46	0.43	0.41
7	1.17	1.14	1.10	1.06	1.02	0.96	0.91	0.84	0.78	0.71	0.64	0.57	0.51	0.46	0.45	0.45	0.45	0.44	0.42	0.40
8	1.18	1.15	1.11	1.07	1.02	0.97	0.91	0.85	0.79	0.73	0.66	0.59	0.53	0.47	0.43	0.42	0.42	0.42	0.41	0.40
9	1.18	1.15	1.11	1.07	1.03	0.97	0.92	0.86	0.80	0.74	0.67	0.61	0.54	0.48	0.43	0.41	0.40	0.40	0.40	0.39
10	1.18	1.15	1.11	1.07	1.03	0.98	0.92	0.87	0.81	0.75	0.68	0.62	0.56	0.50	0.44	0.40	0.39	0.38	0.38	0.38
11	1.18	1.15	1.12	1.08	1.03	0.98	0.93	0.87	0.81	0.75	0.69	0.63	0.57	0.51	0.45	0.41	0.38	0.37	0.37	0.37
12	1.18	1.15	1.12	1.08	1.03	0.98	0.93	0.87	0.82	0.76	0.70	0.64	0.57	0.52	0.46	0.41	0.38	0.36	0.36	0.35
13	1.18	1.15	1.12	1.08	1.03	0.98	0.93	0.88	0.82	0.76	0.70	0.64	0.58	0.52	0.47	0.42	0.38	0.36	0.35	0.34
14	1.19	1.16	1.12	1.08	1.04	0.99	0.93	0.88	0.82	0.76	0.70	0.65	0.59	0.53	0.47	0.42	0.38	0.35	0.34	0.34
15	1.19	1.16	1.12	1.08	1.04	0.99	0.94	0.88	0.82	0.77	0.71	0.65	0.59	0.53	0.48	0.43	0.39	0.35	0.33	0.33
16	1.19	1.16	1.12	1.08	1.04	0.99	0.94	0.88	0.83	0.77	0.71	0.65	0.59	0.54	0.49	0.43	0.39	0.35	0.33	0.32
17	1.19	1.16	1.12	1.08	1.04	0.99	0.94	0.88	0.83	0.77	0.71	0.65	0.60	0.54	0.49	0.44	0.39	0.36	0.33	0.32
18	1.19	1.16	1.12	1.08	1.04	0.99	0.94	0.88	0.83	0.77	0.71	0.66	0.60	0.55	0.49	0.44	0.40	0.36	0.33	0.31
19	1.19	1.16	1.12	1.08	1.04	0.99	0.94	0.89	0.83	0.77	0.72	0.66	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40	0.36	0.33	0.31
20	1.19	1.16	1.12	1.08	1.04	0.99	0.94	0.89	0.83	0.77	0.72	0.66	0.61	0.55	0.50	0.45	0.40	0.36	0.33	0.31
F.A	1.22	1.26	1.30	1.35	1.41	1.48	1.55	1.64	1.73	1.84	1.96	2.09	2.24	2.40	2.57	2.77	2.98	3.21	3.46	3.74

Tabla 8.6 Resultados de derivas máximas del modelo híbrido de 6 grados de libertad con péndulo superior y suelo S1.

derm1(deriva máxima) 6gl con periodo de modelo básico T1=0.41segundos péndulo superior y suelo S4

degradación de rigidez de piso1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	1.79	1.82	1.85	1.88	1.90	1.91	1.92	1.92	1.93	1.93	1.92	1.92	1.92	1.91	1.91	1.90	1.85	1.74	1.63	1.53
2	1.44	1.40	1.37	1.38	1.45	1.57	1.70	1.79	1.86	1.89	1.91	1.92	1.93	1.93	1.92	1.92	1.86	1.75	1.65	1.55
3	1.65	1.64	1.61	1.58	1.53	1.46	1.41	1.41	1.50	1.64	1.76	1.84	1.89	1.92	1.93	1.93	1.86	1.76	1.65	1.55
4	1.71	1.71	1.70	1.68	1.66	1.62	1.57	1.50	1.44	1.42	1.49	1.62	1.75	1.84	1.90	1.92	1.85	1.75	1.65	1.56
5	1.74	1.74	1.74	1.73	1.71	1.69	1.65	1.60	1.54	1.48	1.43	1.45	1.55	1.69	1.81	1.87	1.81	1.73	1.65	1.56
6	1.75	1.76	1.76	1.75	1.74	1.73	1.70	1.66	1.62	1.56	1.49	1.44	1.45	1.54	1.67	1.75	1.74	1.70	1.63	1.55
7	1.76	1.77	1.77	1.77	1.76	1.75	1.73	1.70	1.66	1.61	1.55	1.49	1.45	1.47	1.54	1.61	1.65	1.64	1.60	1.54
8	1.77	1.78	1.78	1.78	1.78	1.77	1.75	1.72	1.69	1.65	1.60	1.54	1.48	1.44	1.44	1.49	1.55	1.57	1.56	1.52
9	1.78	1.78	1.79	1.79	1.79	1.78	1.76	1.74	1.71	1.67	1.63	1.57	1.51	1.45	1.41	1.42	1.46	1.50	1.51	1.49
10	1.78	1.79	1.79	1.80	1.79	1.78	1.77	1.75	1.72	1.69	1.65	1.59	1.53	1.47	1.41	1.38	1.39	1.43	1.46	1.45
11	1.79	1.79	1.80	1.80	1.80	1.79	1.78	1.76	1.73	1.70	1.66	1.61	1.56	1.49	1.43	1.38	1.36	1.38	1.40	1.41
12	1.79	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80	1.78	1.77	1.74	1.71	1.68	1.63	1.58	1.51	1.45	1.38	1.34	1.34	1.36	1.37
13	1.79	1.80	1.81	1.81	1.81	1.80	1.79	1.77	1.75	1.72	1.69	1.64	1.59	1.53	1.46	1.40	1.34	1.32	1.32	1.34
14	1.79	1.80	1.81	1.81	1.81	1.80	1.79	1.78	1.76	1.73	1.70	1.66	1.61	1.55	1.48	1.41	1.35	1.31	1.30	1.31
15	1.80	1.81	1.81	1.82	1.81	1.81	1.80	1.78	1.76	1.74	1.70	1.67	1.62	1.56	1.50	1.43	1.36	1.31	1.28	1.28
16	1.80	1.81	1.82	1.82	1.82	1.81	1.80	1.79	1.77	1.74	1.71	1.67	1.63	1.58	1.51	1.45	1.38	1.32	1.27	1.26
17	1.80	1.81	1.82	1.82	1.82	1.82	1.81	1.79	1.77	1.75	1.72	1.68	1.64	1.59	1.53	1.46	1.39	1.33	1.27	1.24
18	1.81	1.81	1.82	1.82	1.82	1.82	1.81	1.80	1.78	1.75	1.72	1.69	1.65	1.60	1.54	1.47	1.40	1.34	1.26	1.23
19	1.81	1.82	1.82	1.83	1.83	1.82	1.81	1.80	1.78	1.76	1.73	1.70	1.65	1.61	1.55	1.49	1.42	1.35	1.27	1.22
20	1.81	1.82	1.83	1.83	1.83	1.82	1.82	1.80	1.78	1.76	1.73	1.70	1.66	1.61	1.56	1.50	1.43	1.36	1.27	1.22
F.A	1.22	1.26	1.30	1.35	1.41	1.48	1.55	1.64	1.73	1.84	1.96	2.09	2.24	2.40	2.57	2.77	2.98	3.21	3.46	3.74

Tabla 8.7 Resultados de derivas máximas del modelo híbrido de 6 grados de libertad con péndulo superior y suelo S4.

derm1(deriva máxima)		6gl con periodo de modelo básico T1=0.41segundos												péndulo inferior y suelo S1							
		degradación de rigidez de piso1																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1		1.23	1.20	1.16	1.13	1.08	1.04	0.99	0.94	0.88	0.83	0.78	0.73	0.68	0.63	0.59	0.55	0.51	0.47	0.43	0.40
2		1.16	1.08	0.96	0.80	0.80	0.88	0.90	0.88	0.85	0.81	0.76	0.72	0.67	0.62	0.58	0.54	0.50	0.46	0.43	0.40
3		1.21	1.17	1.13	1.08	1.01	0.92	0.80	0.67	0.63	0.67	0.68	0.67	0.64	0.60	0.57	0.53	0.49	0.46	0.42	0.39
4		1.21	1.18	1.14	1.10	1.05	0.99	0.92	0.84	0.73	0.61	0.54	0.55	0.56	0.56	0.54	0.51	0.48	0.45	0.42	0.39
5		1.22	1.19	1.15	1.11	1.06	1.01	0.95	0.88	0.81	0.71	0.61	0.51	0.48	0.48	0.49	0.48	0.46	0.43	0.41	0.38
6		1.22	1.19	1.15	1.11	1.06	1.01	0.96	0.90	0.83	0.76	0.67	0.58	0.49	0.43	0.43	0.43	0.43	0.41	0.39	0.37
7		1.22	1.19	1.15	1.11	1.07	1.02	0.96	0.91	0.84	0.78	0.71	0.62	0.54	0.45	0.40	0.39	0.39	0.39	0.38	0.36
8		1.22	1.19	1.15	1.11	1.07	1.02	0.97	0.91	0.85	0.79	0.72	0.65	0.57	0.49	0.41	0.37	0.36	0.36	0.36	0.34
9		1.22	1.19	1.15	1.11	1.07	1.02	0.97	0.91	0.86	0.79	0.73	0.67	0.59	0.52	0.44	0.37	0.34	0.34	0.33	0.33
10		1.22	1.19	1.15	1.11	1.07	1.02	0.97	0.92	0.86	0.80	0.74	0.67	0.61	0.54	0.46	0.39	0.34	0.32	0.32	0.31
11		1.22	1.19	1.15	1.11	1.07	1.02	0.97	0.92	0.86	0.80	0.74	0.68	0.62	0.55	0.48	0.41	0.35	0.31	0.30	0.30
12		1.22	1.19	1.15	1.12	1.07	1.02	0.97	0.92	0.86	0.80	0.75	0.69	0.62	0.56	0.49	0.43	0.36	0.31	0.29	0.28
13		1.22	1.19	1.15	1.12	1.07	1.02	0.97	0.92	0.86	0.81	0.75	0.69	0.63	0.57	0.50	0.44	0.37	0.32	0.29	0.27
14		1.22	1.19	1.15	1.12	1.07	1.02	0.97	0.92	0.86	0.81	0.75	0.69	0.63	0.57	0.51	0.45	0.39	0.33	0.29	0.27
15		1.22	1.19	1.15	1.12	1.07	1.02	0.97	0.92	0.86	0.81	0.75	0.69	0.64	0.58	0.52	0.46	0.40	0.34	0.29	0.26
16		1.22	1.19	1.15	1.12	1.07	1.02	0.97	0.92	0.86	0.81	0.75	0.70	0.64	0.58	0.52	0.46	0.40	0.35	0.29	0.26
17		1.22	1.19	1.15	1.12	1.07	1.02	0.97	0.92	0.87	0.81	0.75	0.70	0.64	0.58	0.53	0.47	0.41	0.35	0.30	0.26
18		1.22	1.19	1.16	1.12	1.07	1.02	0.97	0.92	0.87	0.81	0.75	0.70	0.64	0.59	0.53	0.48	0.42	0.36	0.31	0.26
19		1.22	1.19	1.16	1.12	1.07	1.02	0.97	0.92	0.87	0.81	0.75	0.70	0.64	0.59	0.53	0.48	0.42	0.37	0.31	0.27
20		1.22	1.19	1.16	1.12	1.07	1.02	0.97	0.92	0.87	0.81	0.76	0.70	0.64	0.59	0.54	0.48	0.43	0.37	0.32	0.27
F.A		1.22	1.26	1.30	1.35	1.41	1.47	1.55	1.63	1.72	1.82	1.94	2.06	2.20	2.35	2.51	2.68	2.87	3.07	3.29	3.51

Tabla 8.8 Resultados de derivas máximas del modelo híbrido de 6 grados de libertad con péndulo inferior y suelo S1.

derm1(deriva máxima)		6gl con periodo de modelo básico T1=0.41segundos														péndulo inferior y suelo S4					
		degradación de rigidez de piso1																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1		1.29	1.30	1.31	1.31	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.31	1.31	1.31	1.30	1.30	1.27	1.19	1.12	1.05
2		1.21	1.16	1.06	0.93	0.99	1.14	1.22	1.26	1.28	1.29	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.29	1.26	1.18	1.11	1.04
3		1.26	1.26	1.26	1.25	1.22	1.16	1.05	0.93	0.97	1.09	1.18	1.23	1.25	1.27	1.28	1.28	1.24	1.17	1.10	1.03
4		1.27	1.27	1.28	1.27	1.27	1.25	1.22	1.16	1.06	0.95	0.93	1.03	1.13	1.19	1.22	1.24	1.21	1.14	1.08	1.02
5		1.27	1.28	1.28	1.28	1.28	1.27	1.25	1.22	1.18	1.10	1.00	0.91	0.94	1.04	1.13	1.18	1.15	1.11	1.06	1.00
6		1.27	1.28	1.28	1.29	1.28	1.28	1.27	1.25	1.22	1.17	1.10	1.01	0.92	0.91	0.99	1.07	1.08	1.06	1.02	0.98
7		1.27	1.28	1.28	1.29	1.29	1.28	1.27	1.26	1.24	1.20	1.16	1.08	0.99	0.91	0.90	0.95	0.99	1.00	0.98	0.95
8		1.27	1.28	1.28	1.29	1.29	1.28	1.28	1.27	1.25	1.22	1.18	1.13	1.05	0.96	0.89	0.87	0.90	0.92	0.93	0.91
9		1.27	1.28	1.28	1.29	1.29	1.29	1.28	1.27	1.25	1.23	1.20	1.16	1.10	1.01	0.92	0.85	0.84	0.86	0.87	0.87
10		1.27	1.28	1.28	1.29	1.29	1.29	1.28	1.27	1.26	1.24	1.21	1.18	1.12	1.05	0.96	0.87	0.82	0.81	0.82	0.83
11		1.27	1.28	1.28	1.29	1.29	1.29	1.28	1.27	1.26	1.24	1.22	1.19	1.14	1.08	1.00	0.91	0.83	0.78	0.78	0.79
12		1.27	1.28	1.28	1.29	1.29	1.29	1.28	1.27	1.26	1.25	1.23	1.20	1.16	1.10	1.03	0.95	0.85	0.78	0.75	0.75
13		1.27	1.28	1.28	1.29	1.29	1.29	1.28	1.28	1.26	1.25	1.23	1.20	1.17	1.12	1.06	0.98	0.88	0.80	0.74	0.72
14		1.27	1.28	1.28	1.29	1.29	1.29	1.28	1.28	1.27	1.25	1.23	1.21	1.18	1.13	1.08	1.00	0.91	0.82	0.74	0.70
15		1.27	1.28	1.28	1.29	1.29	1.29	1.28	1.28	1.27	1.25	1.24	1.21	1.18	1.14	1.09	1.02	0.94	0.84	0.74	0.69
16		1.27	1.28	1.28	1.29	1.29	1.29	1.28	1.28	1.27	1.25	1.24	1.21	1.19	1.15	1.10	1.04	0.96	0.87	0.75	0.68
17		1.27	1.28	1.28	1.29	1.29	1.29	1.28	1.28	1.27	1.25	1.24	1.22	1.19	1.16	1.11	1.05	0.98	0.88	0.77	0.68
18		1.27	1.28	1.28	1.29	1.29	1.29	1.28	1.28	1.27	1.26	1.24	1.22	1.19	1.16	1.12	1.06	1.00	0.90	0.78	0.69
19		1.27	1.28	1.28	1.29	1.29	1.29	1.28	1.28	1.27	1.26	1.24	1.22	1.20	1.17	1.13	1.07	1.01	0.92	0.79	0.70
20		1.27	1.28	1.28	1.28	1.29	1.29	1.28	1.28	1.27	1.26	1.24	1.22	1.20	1.17	1.13	1.08	1.02	0.93	0.81	0.70
F.A		1.22	1.26	1.30	1.35	1.41	1.47	1.55	1.63	1.72	1.82	1.94	2.06	2.20	2.35	2.51	2.68	2.87	3.07	3.29	3.51

Tabla 8.9 Resultados de derivas máximas del modelo híbrido de 6 grados de libertad con péndulo inferior y suelo S4.

8.3.7 Combinación ideal de los resultados de los modelos híbridos con péndulo superior para el caso de suelos S1 y S4.

Suelo S1		Suelo S4	
	Modelo híbrido F.A=2		Modelo híbrido F.A=2
Modelo básico	%masa=17.5%	Modelo básico	%masa=20%
1.16	0.46	0.505	0.504

Tabla 8.10 Derivas máximas del modelo híbrido de 6 grados de libertad con péndulo superior para el caso de suelos S1 y S4.

DMB= deriva máx. del modelo básico

DMH= deriva máx. del modelo híbrido

Reducción en % = $100 \cdot (DMB - DMH) / DMB$

Beneficio = $1 / (1 - \text{Reducción})$

$$\text{Reducción}(\%) = \frac{(1.16 - 0.46)}{1.16} 100 = 60.3\%$$

$$\text{Reducción}(\%) = \frac{(0.505 - 0.504)}{0.505} 100 = 0.2\%$$

$$\text{Beneficio} = 1 / (1 - 0.603) = 2.52$$

$$\text{Beneficio} = 1 / (1 - 0.002) = 1.0$$

8.3.8 Combinación ideal de los resultados del modelo híbrido de 6 grados de libertad con péndulo inferior para el caso de suelos S1 y S4.

Suelo S1		Suelo S4	
	Modelo híbrido F.A=2		Modelo híbrido F.A=2
Modelo básico	%masa=15%	Modelo básico	%masa=15%
1.16	0.43	0.51	0.46

Tabla 8.11 Derivas máximas del modelo híbrido de 6 grados de libertad con péndulo inferior para el caso de suelos S1 y S4.

$$\text{Reducción(\%)} = \frac{(1.16 - 0.43)}{1.16} 100 = 62.9\% \quad \text{Reducción(\%)} = \frac{(0.51 - 0.46)}{0.51} 100 = 9.8\%$$

$$\text{Beneficio} = 1/(1 - 0.629) = 2.69$$

$$\text{Beneficio} = 1/(1 - 0.098) = 1.11$$

Nota:

Un beneficio mayor que 1 nos indica que hay ganancia

Un beneficio igual a 1 nos indica que no hay ganancia

Un beneficio menor que 1 nos indica que hay pérdida.

CAPITULO 9

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1 Conclusiones generales.

Del estudio paramétrico desarrollado en este trabajo se puede concluir lo siguiente:

1. En estructuras rígidas o flexibles cimentadas en suelo S4 el sistema de control de vibraciones de amortiguamiento de masa no funciona tan eficientemente como en suelo S1 (ver Fig.6.9 y 6.10).
2. En estructuras rígidas o flexibles cimentadas en suelo S4 el sistema de control de vibraciones de aislamiento en la base no funciona tan eficientemente como en suelo S1. (ver Fig.6.11 y 6.12).
3. De los puntos 1, 2 y de los resultados obtenidos para los sistemas híbridos se concluye que las estructuras con este sistema de control de vibraciones no es eficiente en estructuras cimentadas en suelos S4.
4. El sistema de control de vibraciones basado en amortiguamiento de masa no funciona eficientemente en estructuras muy rígidas (ver Fig. 4.4 y Anexo A).
5. El sistema de control de vibraciones basado en aislamiento de base funciona mejor para estructuras con períodos dentro de un rango que tiene como limite inferior $T_p \geq 0.23$ segundos. (ver Fig. 6.13, 6.14 y 6.15).
6. De los puntos 4, 5 y de los resultados obtenidos para los sistemas híbridos se concluye que el sistema híbrido para el control de vibraciones en las estructuras muy rígidas no funciona eficientemente.
7. El sistema híbrido con amortiguamiento de masa en la base funciona mejor para los sistemas estructurales más rígidos ($T \leq 0.06$ seg.) que para el caso de

esos mismos sistemas estructurales pero con amortiguamiento de masa en el tope. (ver Fig. 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 6.5, 6.6, 6.7 y 6.8).

9.2 Conclusiones y recomendaciones sobre sistemas de varios pisos.

A) De los resultados generados para sistemas híbridos sobre estructuras de 2 a 8 pisos con períodos de 0.5, 1 y 1.5 seg., se puede concluir lo siguiente:

8. Las derivas normalizadas para sistemas de un piso difieren significativamente de las derivas normalizadas para los sistemas de 2 a 8 pisos.
9. El error relativo máximo (ecuación 7.1) alcanza valores de hasta un 22% por lo que no resulta conveniente generar un gráfico envolvente de estos sistemas.
10. El período de los sistemas básicos de 2 a 8 pisos no incide significativamente en los promedios de las derivas normalizadas.

B) De los resultados generados para sistemas híbridos sobre estructuras de 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10 y 20 pisos con períodos de 0.5, 1 y 2 seg., se puede concluir lo siguiente:

11. El sistema de control de vibraciones híbrido en los modelos estudiados permite mayores reducciones en la respuesta de las estructuras que aquellas que utilicen sistemas de reducción de vibraciones por separado. Este resultado es más claro en la medida en que la estructura básica se flexibiliza. (Ver figura 7.1).
12. El número de grados de libertad incide en los resultados cuando se usa un sistema de control de vibraciones híbrido, es decir, son diferentes los resultados para un sistema estructural básico de 1 GLD, que para un sistema estructural de NGLD para igual periodo.
13. Dado que el NGLD incide en los resultados, se recomienda realizar un estudio paramétrico que incorpore el NGLD.

9.3 Conclusiones sobre el ejemplo numérico realizado.

En el capítulo 8 se realizó un ejemplo numérico para un modelo básico de 4 pisos con un período de 0.41 seg. y que al agregarle el sistema híbrido se modificó en un sistema de 6 grados de libertad. Las conclusiones más importantes sobre este ejemplo numérico son las siguientes:

14. Las superficies de respuesta son similares independientemente de la ubicación del amortiguamiento de masa en la base o el tope del modelo.
15. El porcentaje de amortiguamiento de masa necesario para una mayor reducción en las respuestas cambia según la estructura esté cimentada en suelo S1 o S4. (ver figura 8.4, 8.5, 8.6 y 8.7)

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

1. R. Ivan Skinner, William H. Robinson, Graeme H. McVerry. An Introduction to seismic Isolation. Editorial John Wiley & Sons, 1993.
2. Ministerio del Desarrollo Urbano. Norma Covenín Mindur 1753-81, Estructuras de concreto armado para edificios, análisis y diseño. 1981.
3. Ministerio del Desarrollo Urbano. Norma Covenín Mindur 1756-2001, Edificaciones Sismorresistentes. 2001.
4. Park, R.; Paulay, T. Estructuras de concreto reforzado. México. Editorial Limusa, 1979.
5. Uniform Building Code. Division IV-Earthquake Regulations for Seismic-Isolated Structures, 1997.
6. La revista técnica de la Construcción. Artículos No. 22 Junio 2001.
Disponible: www.revistabit.cl/body_articulo.asp?ID_Articulo=757.
7. Grases, J Venezuela Amenazas naturales terremotos, maremotos, huracanes Ed. Prensas Venezolanas de gráficas Monfort, 1994.
8. J.Grases (Coordinador).Diseño Sismorresistente Especificaciones y criterios empleados en Venezuela. Caracas, Julio 1997.
9. M. Lafuente, Genatios, Castilla y otros (ed.). Desastres sísmicos en desarrollo, Caracas, 2000.
10. SAP 2000 Manuals.
Disponible: www.comp-engineering.com/SapMan.htm
11. Manual del Matlab
Disponible: <http://www.utexas.edu/math/Matlab/Manual>
12. G.W. Housner y otros. Structural Control: Past, Present and Future. Journal of Engineering mechanics/September 1997.
13. Mario Paz. Structural Dynamics. Editorial Van Nostrand Reinhold
14. Anil K.Chopra Dynamics of Structures. Prentice Hall,2001.
15. F. Naeim & J. Kelly. Design of Seismic Isolated Structures. Editorial John Wiley & Sons.

16. Villaverde, R. Seismic control of structures with damped resonant appendages. Proceedings First World Conference on Structural Control, International Assn. for Structural Control, Los Angeles, Vol 1, 1994.
Disponibile: eerclib@nisee.berkeley.edu
17. Clark, A.J (1988) Multiple passive tuned mass dampers for reducing earthquake induced building motion.
Disponibile: www.ce.utexas.edu/em2000/papers/JingWu1.pdf
18. Palazzo, B. and Petti, L., Response of base isolated systems equipped with hybrid mass dampers to random excitation, Proc. Eleventh World Conf. on Earthquake Engineering (11WCEE), Acapulco, Mexico, 1996.
Disponibile: www.pitagoragroup.it/pited/strutcon1997.html
19. Tuned-mass damper demonstration on ucist shake table.
Disponibile: <http://cive.seas.wustl.edu/wusceel/ucist/Projects/Investigation%20of%20supplemental%20damping%20mechanisms/Student%20Manual.pdf>
20. Buckling behavior of elastomeric bearings.
<http://www.ce.berkeley.edu/~tra/CE290D/EBCh.8.pdf>

A N E X O S

ANEXO A

ANEXO B

A N E X O A

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE 1GDL CON AMORTIGUAMIENTO DE MASA SUJETO A EXCITACIÓN SÍSMICA ESPECTRAL

Estudio del comportamiento del sistema de un gdl con amortiguamiento de masa sujeto a excitación sísmica espectral.

Con la finalidad de evaluar los distintos parámetros que inciden en la respuesta de un sistema de 1 gdl con amortiguamiento de masa, se realizaron análisis variando las relaciones de porcentaje de masa y las relaciones de periodos de los sistemas básicos o principales con respecto a los periodos del sistema auxiliar (T_p / T_a).

$$\mu = \text{Porcentaje de masa} = \frac{\text{masa auxiliar}}{\text{masa de la estructura principal}} \times 100$$

$$\gamma = \text{Relación de periodos} = \frac{\text{Periodo del sistema principal}}{\text{Periodo del sistema auxiliar}}$$

El estudio se realizó con espectro para suelo S1.

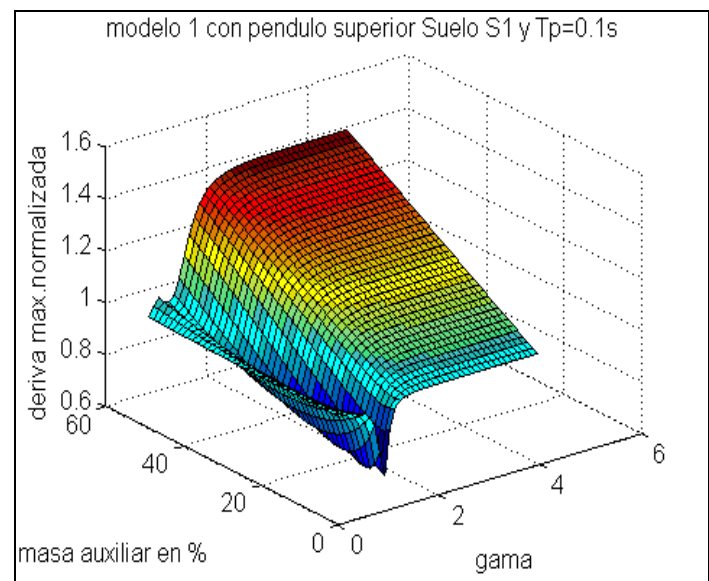
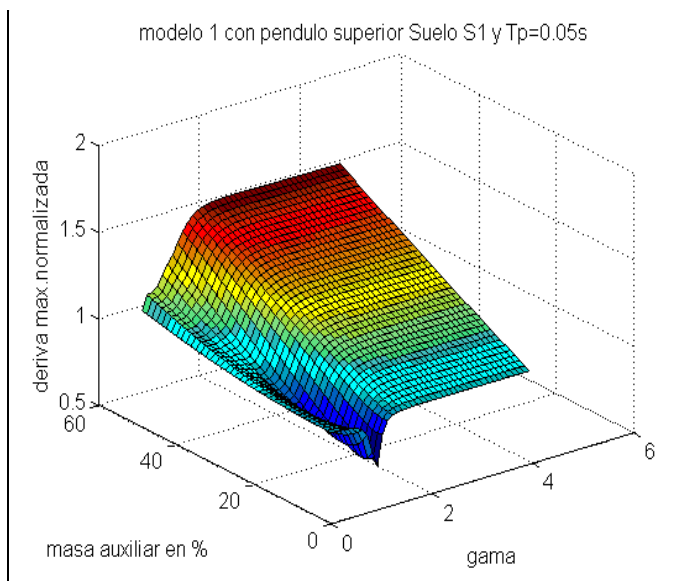
Se programó en Matlab un algoritmo con tres ciclos variando en cada uno de estos el periodo de la estructura básica (T_p), el porcentaje de masa (μ) y la relación de periodos (γ). Los rangos escogidos para estos ciclos fueron los siguientes:

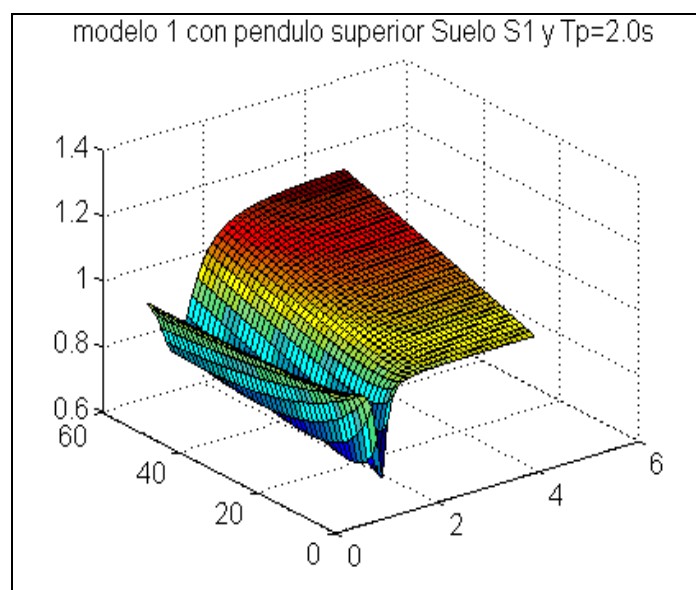
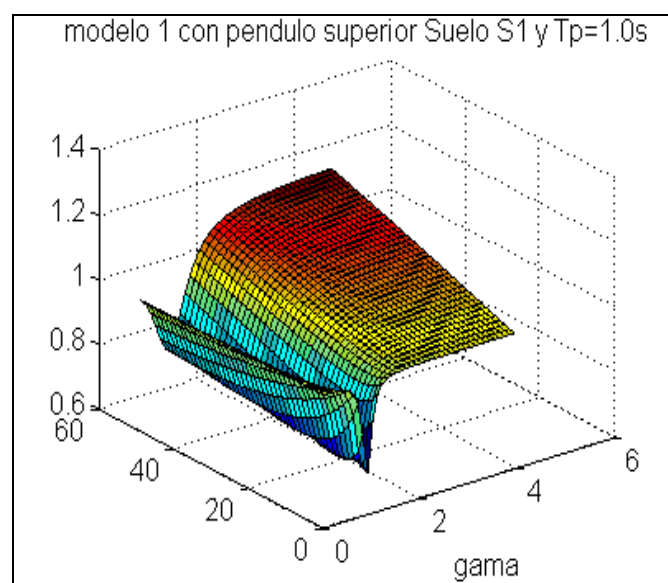
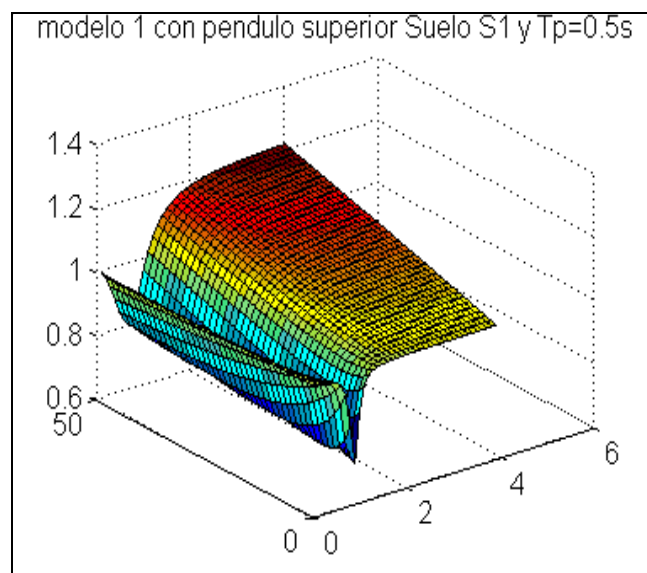
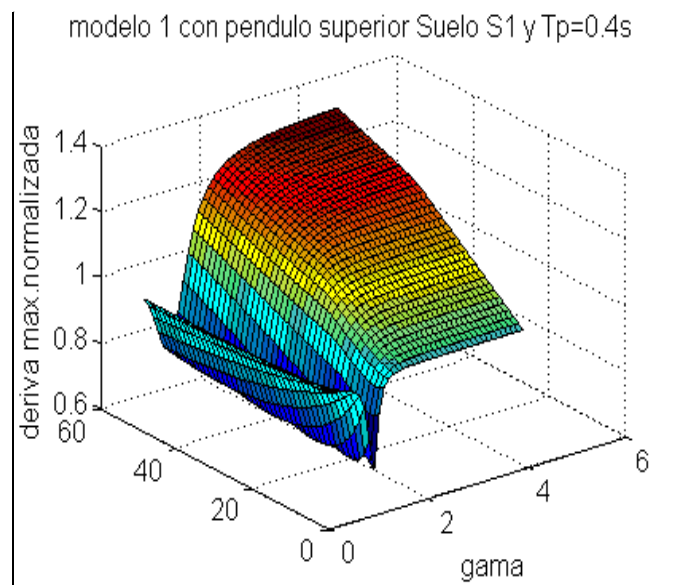
$$T_p = [0.05\text{seg} \dots\dots\dots 2\text{seg.}]$$

$$\mu = [1.25\% \dots\dots\dots 50\%]$$

$$\gamma = [0.1 \dots\dots\dots 4]$$

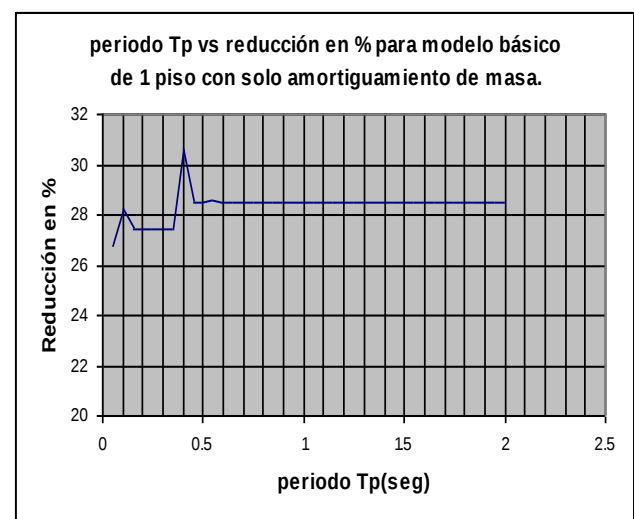
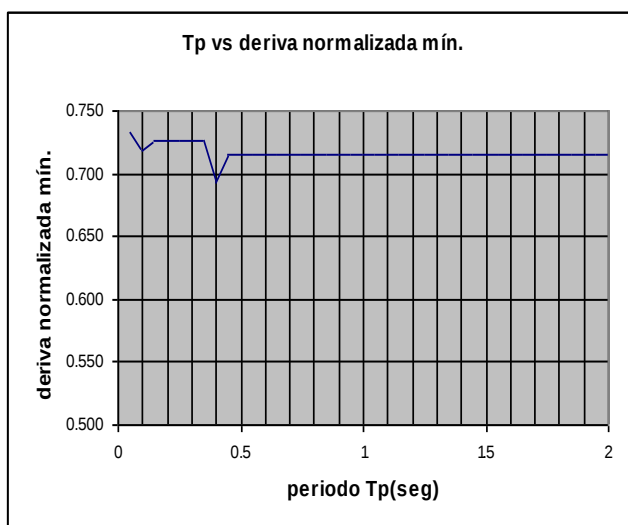
Como resultado de este programa se obtuvieron los siguientes gráficos:





De estos gráficos se observa que el comportamiento para sistemas estructurales flexibles es mejor que para el caso de estructuras rígidas ($T_p < 0.4$ seg.).

Como resumen se realizó un gráfico que toma en cuenta la deriva mínima normalizada de todos los casos analizados contra el periodo de la estructura básica (T_p), el cual presentamos a continuación:



En estos gráficos se observa que aunque con muy pequeño margen existe un beneficio más estable para estructuras con T_p mayor a 0.5 segundos.

A N E X O B

PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE LOS MODELOS HÍBRIDOS

PROGRAMA PARA EL CALCULO DE LOS PARAMETROS DE LOS MODELOS HÍBRIDOS

Este programa calcula las derivas normalizadas de los modelos híbridos utilizando como información de entrada la matriz de masa, la matriz de rigidez, la rigidez del péndulo, el cociente de amortiguamiento y la aceleración de la gravedad.

```
function hibps(Mo,K,Kpend,chi,g)
```

```
% Sistema pendular superior
```

```
fac1=es el factor que degrada la rigidez k1 del sistema(esto se hace para aislar la base del sistema).
```

```
k1=es la rigidez de la base del sistema híbrido.
```

```
kp= rigidez del modelo básico (sin amortiguamiento de masa y sin aislamiento en la base).
```

```
wp,Tp= son la frecuencia y el periodo del modelo básico.
```

```
ka=rigidez del péndulo.
```

```
fac1=0.9;
```

```
Korig=K;
```

```
Morig=Mo;
```

```
k1=K(1,1)-abs(K(1,2));k1inic=k1
```

```
kp=abs(K(1,2));
```

```
wp=sqrt(kp/Mo(2,2));wp1=wp;
```

```
Tp=2*pi/wp;Tp0=Tp;
```

```
ka1=4*pi^2/(9*Tp^2)*0.05*Mo(1,1);
```

```
ka2=pi^2/(Tp^2)*0.4*Mo(1,1);
```

```
ka=(ka1+ka2)/4;
```

```
K(2,2)=kp+ka;K(2,3)=-ka;K(3,2)=-ka;K(3,3)=ka;
```

```
K2=K;
```

```
dim=max(size(Mo));
```

```
dim2=dim;
```

```
wp=sqrt(abs(K(1,2))/Mo(2,2));
```

```
m2=Mo(2,2);
```

```
k2=abs(K(2,1));
```

```
M=Mo;
```

```
m1=Mo(1,1);
```

```
m2=Mo(2,2);
```

```
m3=Mo(3,3);
```

```
%Mr es la masa promedio de las masas de piso
```

```
Mr=(sum(diag(Mo))-Mo(dim,dim))/(dim-1);
```

contad1=contador para el ciclo 1
contad2=contador para el ciclo 2
Msa= matriz de masa del sistema aislado
Ksa= matriz de rigidez del sistema aislado
Msna= matriz de masa del sistema no aislado
Ksna=matriz de rigidez del sistema no aislado
increMr=es el incremento de la masa de piso

```
contad1=20;
contad2=20;
increMr=Mr/contad1;
Msa=Morig(1:dim-1,1:dim-1);
Ksa=K(1:dim-1,1:dim-1);Ksa(2,2)=kp;
Ksna=abs(K(1,2));
Msna=Morig(2:dim-1,2:dim-1);
Morig(dim,dim)=0;
%'ciclo que incrementa la masa auxiliar debido al %de masa de piso'
for i1=1:contad1
K=K2;
k1=k1inic;
m3=i1*increMr;
M(3,3)=m3;
m4(i1)=m3*50/Mr;
Morig(dim,dim)=Morig(dim,dim)+increMr;
%ciclo que degrada la rigidez de piso 1(k1)
for j1=1:contad2
%Calculo del periodo del sistema aislado
Ksa(1,1)=K(1,1);
[Modalsa,Espectralsa]=eig(Ksa,Msa);
NGDLD=size(Modalsa,1);
b=ones(NGDLD,1);
Landasa=min(Espectralsa*b);
Tmaxsa=2*pi/sqrt(Landasa)
%Calculo del periodo del sistema no aislado
[Modalsna,Espectralsna]=eig(Ksna,Msna);
NGDLD=size(Modalsna,1);
b=ones(NGDLD,1);
Landasna=min(Espectralsna*b);
Tmaxsna=2*pi/sqrt(Landasna)
[Modal,Espectral]=eig(K,Morig);
NGDLD1=size(Modal,1);
b1=ones(NGDLD1,1);
Landa=min(Espectral*b1);
```

```

Tmaxsistot=2*pi/sqrt(Landa);
%calculo de las derivas maximas
derm1(i1,j1)=EdificioplanoEspS(Morig,K,chi,g);
k1=(k1)*fac1;K(1,1)=k1+kp;
wp=sqrt((K(1,1)-K(2,2))/Mo(2,2));
Tp=2*pi/wp;Tp1(i1)=Tp;
%cálculo del factor de aislamiento
Tcoc1(j1)=Tmaxsa/Tmaxsna;
end
end
k1=k1/fac1;K(1,1)=k1+kp;
%cálculo de la deriva de la estructura básica (sin amortiguamiento de masa y sin
aislamiento en la base)
dermno=EdificioplanoEspNorms(Msna,Ksna,chi,g,dim2);
% generación de los gráficos
figure(11);
surf(Tcoc1,m4,derm1);
view ([65,37])
set (gca,'FontSize',[12])
title('modelo con pendulo superior con col.25x25 cm Suelo S1');
xlabel('factor de aislamiento'),ylabel('masa auxiliar'),zlabel('deriva max. ');
%cálculo de las derivas normalizadas
normalizderm=derm1/dermno
%generación del gráfico: en eje "x" van los factores de aislamiento; en eje "y" van
los porcentajes de masa; en eje "z" van las derivas normalizadas
figure(1111);
surf(Tcoc1,m4,normalizderm);
view ([65,37])
set (gca,'FontSize',[12])
title('modelo con pendulo superior ');
xlabel('factor de aislamiento'),ylabel('masa auxiliar'),zlabel('deriva max.normalizada');

```

Función que calcula las derivas de la estructura

```

function [derm]=EdificioplanoEspS(M,K,chi,g)
%función para calcular la respuesta en un edificio plano
% Se determina la matriz modal y la matriz espectral
[Modal,Espectral]=eig(K,M);
dim=size(Modal,1);
b=ones(dim,1);
%ciclo que calcula los factores de participación, beta, los periodos y las frecuencias
for j=1:dim
FactPart(j)=Modal(:,j)'*M*b/(Modal(:,j)'*M*Modal(:,j));
Beta(j)=FactPart(j)*(Modal(:,j)'*M*b);
Ti=2*pi/sqrt(Espectral(j,j));

```

```

wi2=4*pi^2/Ti^2;
[ftm(j,:)] = RespuestaEsp(s(FactPart(j),wi2,chi,Ti,g);
end
s=0.
for j=1:dim
%prod=abs(Modal(j,:))*abs(ftm);
%um(j,:)=prod;
prod1=(Modal(1,j)*ftm(j))^2;
um2(j,:)=prod1;
s=s+prod1;
end
um1=sqrt(s);
um(1)=um1;
s=0.
for j=1:dim
prod2=(Modal(2,j)*ftm(j))^2;
um2(j,:)=prod2;
s=s+prod2;
end
um2=sqrt(s);
um(2)=um2;
s=0.
for j=1:dim
prod3=(Modal(3,j)*ftm(j))^2;
um2(j,:)=prod3;
s=s+prod3;
end
um3=sqrt(s);
um(3)=um3;
if dim>=3
for i=1:dim-1
derm(i)=max(abs(um(i+1)-um(i)));
end
end
derm=um(2)-um(1);

```

Función que calcula la respuesta de la estructura

```

function [ftm]= RespuestaEsp(s(FactPart,wi2,chi,Ts,g)
% versión de la función Respuesta especifica para ser usada
% por la función EdificioplanoEsp
% calculo del espectro
[Adf]=Espectro(Ts);
ftm=FactPart*Adf/wi2*g;

```

Función que calcula el espectro de diseño

```
function [Adf]=Espectro(Ts)
Adf=0;
% calculo del espectro
%a=el factor de importancia
%fi=el factor de correccion del coeficiente de aceleracion horizontal
%Ao=el coeficiente de aceleracion horizontal o aceleracion max.del terreno
%R=el factor de reduccion de respuesta
%S=el tipo de suelo 1,2,3,4:
a=1;fi=1;Ao=0.3;R=1;S=1;
if S==1
b=2.5;To=0.10;Ta=0.4;p=1.0;
else
if S==2
b=2.5;To=0.15;Ta=0.65;p=0.9;
else
if S==3
b=2.7;To=0.20;Ta=0.90;p=0.8;
else
if S==4
b=3.0;To=0.30;Ta=1.2;p=0.8;
end
end
end
end
c=(R/b)^0.25;
if R<5
Tm=0.1*(R-1);
else
Tm=0.4;
end
if Tm>=Ta
Tm=Ta;
else
if Tm<=To
Tm=To;
else
if Tm>To
Tm=Tm;
end
end
end
Ad(1)=0.30;
```

```

T(1)=0.0;
for i=2:402
T(i)=T(i-1)+0.02;
if T(i)<Tm
Ad(i)=a*fi*Ao*(1+T(i)/Tm*(b-1))/((1+(T(i)/Tm)^c*(R-1)));end
if Ts<=T(i) & Ts>T(i-1);Adf=Ad(i-1)+(Ad(i)-Ad(i-1))*(Ts-T(i-1))/(T(i)-T(i-1));end
else
if T(i)>=Tm & T(i)<=Ta
Ad(i)=a*fi*b*Ao/R;
if Ts<=T(i) & Ts>T(i-1);Adf=Ad(i-1)+(Ad(i)-Ad(i-1))*(Ts-T(i-1))/(T(i)-T(i-1));end
else
if T(i)>Ta
Ad(i)=a*fi*b*Ao/R*(Ta/T(i))^p;
if Ts<=T(i) & Ts>T(i-1);Adf=Ad(i-1)+(Ad(i)-Ad(i-1))*(Ts-T(i-1))/(T(i)-T(i-1));end
end
end
end
end

```

Función que calcula la deriva del modelo básico para luego normalizar

```

function dermno=EdificioplanoEspNorms(M,K,chi,g,dim2)
[Modal,Espectral]=eig(K,M);
% Se determina la matriz modal y la matriz espectral
dim=size(Modal,1);
b=ones(dim,1);
%ciclo que calcula los factores de participación, beta, los periodos y las frecuencias
for j=1:dim
FactPart(j)=Modal(:,j)'*M*b/(Modal(:,j)'*M*Modal(:,j));
Beta(j)=FactPart(j)*(Modal(:,j)'*M*b);
Ti=2*pi/sqrt(Espectral(j,j));
wi2=4*pi^2/Ti^2;
[ftm(j,:)]=RespuestaEsp2s(FactPart(j),wi2,chi,Ti,g);
end
if dim2<=3
dermno=sqrt((Modal*ftm)^2);
else
umn=Modal*ftm
for i=1:dim-2
dermno(i)=abs(umn(i+1))-abs(umn(i));
end
end
dermno=max(dermno);

```