

Universidad del Valle de Guatemala
Facultad de Ciencias y Humanidades
Departamento de Ingeniería Civil
Maestría en Ingeniería Estructural

“ANÁLISIS INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA:
UN MÉTODO REFINADO”

LUIS ALBERTO ARGUETA CONTRERAS

Trabajo de Graduación presentado
para optar al grado académico de Maestría en Ingeniería Estructural

Guatemala
2004

Universidad del Valle de Guatemala
Facultad de Ciencias y Humanidades
Departamento de Ingeniería Civil
Maestría en Ingeniería Estructural



“ANÁLISIS INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA:
UN MÉTODO REFINADO”

LUIS ALBERTO ARGUETA CONTRERAS

Guatemala
2004

**“ANÁLISIS INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA:
UN MÉTODO REFINADO”**

Universidad del Valle de Guatemala
Facultad de Ciencias y Humanidades
Departamento de Ingeniería Civil
Maestría en Ingeniería Estructural

“ANÁLISIS INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA:
UN MÉTODO REFINADO”

LUIS ALBERTO ARGUETA CONTRERAS

Trabajo de Graduación presentado
para optar al grado académico de Maestría en Ingeniería Estructural

Guatemala
2004

V.o.B.o.:

(f) 
Ingeniero Milton Matus Izaguirre
Asesor

Tribunal Examinador:

(f) 
Ingeniero Franklin Matzdorf Monroy

(f) 
Ingeniero Milton Matus Izaguirre
Asesor

(f) 
Ingeniero Ricardo Rodas Cordón

Fecha de aprobación: 7 de junio de 2004

PREFACIO

La idea de esta investigación surgió debido que durante los últimos años los ingenieros estructurales han preferido diseñar edificios sin tomar en cuenta la interacción suelo-estructura, ya que este procedimiento es, para algunos, mucho más rápido aunque conservador, además reiteran que la mayoría de edificaciones estándar no lo merita, ya que su procedimiento es más complejo. Hoy en día contamos con herramientas más desarrolladas para poder efectuar análisis mucho más complejos. Tomar en cuenta el comportamiento del suelo en un análisis de interacción suelo-estructura podría generar resultados significativos en la economía de la construcción, máxime que Guatemala es un país sísmico.

El estudio en conjunto está orientado a todos los ingenieros, arquitectos y otros profesionales que se dediquen al campo de las estructuras.

Agradezco al Ing. Milton Matus Izaguirre, asesor de este trabajo de graduación, ya que con su paciencia y conocimiento me ayudó a su elaboración. Agradezco también al Ing. Hugo Nájera, quien se tomó el tiempo necesario a resolver mis dudas respecto a la utilización del programa estructural ETABS v.8. Agradezco al Ing. Franklin Matzdorf Monroy, Director del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad del Valle de Guatemala, quien durante siete años, me ha brindado apoyo y comprensión para poder alcanzar la excelencia académica.

CONTENIDO

	Página
PREFACIO	iv
LISTA DE CUADROS	viii
LISTA DE FIGURAS	x
SIMBOLOGÍA	xi
RESUMEN	xvi
I. INTRODUCCIÓN	01
II. OBJETIVOS	03
A. Objetivo general	03
B. Objetivos específicos	03
III. ANÁLISIS ESTRUCTURAL CON SOPORTES FIJOS SEGÚN AGIES (“ASOCIACIÓN GUATEMALTECA DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA”)	04
A. Conceptos generales	04
1. Método de la carga estática equivalente	04
a. Conceptos generales del método de la carga estática equivalente	04
b. Cortante basal estático equivalente	08
c. Distribución de fuerzas sísmicas	17
d. Otros efectos: deformaciones	18
2. Método de análisis modal espectral	20
a. Conceptos generales	20
b. Modelo analítico	20
c. Corte modal en la base	20
d. Distribución de fuerzas modales	23

	Página
e. Otros efectos: deformaciones	23
IV. ANÁLISIS ESTRUCTURAL INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA SIMPLIFICADO, SEGÚN MODELO DE ATC 3-06 (“APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL”)	25
A. Conceptos generales	25
1. Método de fuerza lateral equivalente	25
a. Corte en la base	25
b. Distribución de fuerzas sísmicas	30
c. Otros efectos: deformaciones	30
2. Método de análisis modal: primer modo	30
a. Corte modal en la base	31
b. Distribución de fuerzas modales	32
c. Otros efectos modales: deformaciones	32
V. ANÁLISIS ESTRUCTURAL INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA REFINADO	33
A. Conceptos generales	33
1. Aplicaciones	33
2. Teoría del valor de sub-grado (coeficiente de balasto)	34
a. Coeficiente vertical K_s	34
1) Valores de K_s para arenas	35
3. Cimiento combinado	35
B. Descripción del análisis	35

	Página
VI. EJEMPLOS	39
A. Descripción del modelo	39
1. Datos generales	39
2. Geometría y características principales de la estructura	39
3. Cargas	41
4. Características de los suelos escogidos	44
B. Vb estático, ΔV estático, deformaciones	44
C. Vb dinámico, ΔV_1 dinámico, deformaciones	48
D. Análisis refinado	51
VII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	57
VIII. CONCLUSIONES	61
IX. RECOMENDACIONES	62
X. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
XI. APÉNDICE	64

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Factor “ R_o ” de respuesta sísmica por capacidad post-elástica (ductilidad) de la estructura	09
2. Períodos T_A y T_B , que definen un espectro de diseño según tipo de suelo	15
3. Funciones de Amplificación dinámica	15
4. Índice de sismicidad	16
5. Valores de K_s	35
6. Características de los elementos estructurales	41
7. Cargas uniformes	41
8. Resultados de integración de cargas y peso total de la estructura	42
9. Características de los suelos utilizados en el análisis	44
10. Valores utilizados en el procedimiento del cortante basal estático equivalente	45
11. Desplazamiento corte estático equivalente	46
12. Fuerzas sísmicas acumuladas en cada nivel, corte estático equivalente	47
13. Análisis fuerza lateral equivalente	47
14. Valores del espectro de diseño recomendado por AGIES para un suelo tipo S2	48
15. Períodos y cortantes obtenidos en el primer análisis modal	49
16. Cortante basal por modo, con factor $V'_{\text{modal}} / V_{\text{modal}} = 1.2$	50
17. Datos generales del primer modo	50

	Página
18. Resultados generales para el análisis modal según ATC	50
19. Resultados del análisis modal según ATC	51
20. Valores de rigideces de los resortes	52
21. Resultados análisis refinado	52
22. Resumen de resultados de cortantes basales	53
23. Resumen de desplazamientos por nivel	54
24. Resumen de fuerzas sísmicas	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Mapa de macrozonificación sísmica de Guatemala	16
2. Factor de amortiguamiento del cimientto	29
3. Descripción de dimensiones del cimientto	36
4. a) Planta de la estructura	40
b) Elevación sobre el eje B	40
c) Etiquetas del modelo	40
5. a) Interpretación de los resultados de integración de cargas muertas	43
b) Interpretación de los resultados de integración de cargas vivas	43
6. Modelo ingresado al programa ETABS	51
7. Comparación en la forma modal, entre los análisis interacción suelo-estructura simplificado y el refinado para el suelo 1	56

LISTA DE SIMBOLOGÍA

A_n :	Área nominal del rectángulo que circunscribe los ejes estructurales exteriores de un edificio.
A_r :	Área real de diafragma que queda dentro del perímetro de los ejes estructurales exteriores de un edificio.
e_x :	Distancia en dirección “x” entre el centro de masa y el centro de rigidez del piso.
e_y :	Distancia en dirección “y” entre el centro de masa y el centro de rigidez del piso.
L_x :	Distancia entre los ejes estructurales extremos en dirección “x”.
L_y :	Distancia entre los ejes estructurales extremos en dirección “y”.
R_r :	Radio de resiliencia.
K :	Rigidez.
K_x :	Rigidez traslacional en dirección “x”.
K_y :	Rigidez traslacional en dirección “y”.
T_E :	Periodo fundamental empírico.
h_N :	Altura total del edificio, desde el nivel del terreno.
V_B :	Cortante basal.
C_s :	Coefficiente sísmico para calcular V_B .
W_s :	Peso de la masa de la edificación capaz de generar fuerzas inerciales que contribuyan al cortante basal.
R_o :	Factor genérico de reducción de fuerza sísmica.
q_1 :	Índice de número de tramos.

q_2 :	Índice de número de ejes estructurales.
q_3 :	Índice de presencia de muros o riostras.
q_4 :	Índice de regularidad en planta.
q_5 :	Índice de Excentricidad en planta.
q_6 :	Índice de isotropía en planta.
q_7 :	Índice de regularidad en elevación.
q_8 :	Índice de condición de piso suave.
L_p :	Longitud en planta del muro.
h_m :	La mayor de las alturas libres de entrepiso en la edificación.
S:	Espaciamiento entre ejes medido de centro a centro.
K_{inf} :	Rigidez relativa del piso inferior del par de niveles analizados.
K_{sup} :	Rigidez relativa del piso superior del par de niveles analizados.
Q:	Factor de calidad sismo-resistente.
R:	Factor de reducción de respuesta sísmica.
S1:	Perfil de suelo rocoso.
S2:	Perfil de suelo firme.
S3:	Perfil de suelo para cenizas, arenas o limos.
T:	Período de vibración.
T_A y T_B :	Periodos de vibración que definen al espectro sísmico de diseño.
$D(T)$:	Función de amplificación dinámica.
A_0 :	Aceleración máxima efectiva.

I_0 :	Índice de sismicidad.
$S_a(T)$:	Espectro de diseño.
F_j :	Cortante en el nivel “j” de la edificación.
W_i, W_j :	Peso asignado al nivel “i” o al nivel “j” de la edificación.
h_i, h_j :	Altura en metros del nivel “i” o del nivel “j” medido desde la base de la edificación.
V_x :	Fuerza sísmica producida por el sismo en dirección “x”.
MT_x :	Momento torsional producido por el sismo en dirección “x”.
MTA_x :	Momento torsional accidental producido por el sismo en dirección “x”.
Δx :	Derivas sísmicas producidas por el sismo en dirección “x”.
δ_{oi} :	Desplazamientos laterales post-elásticos en el piso “i”, producido por el sismo en dirección “x”.
δ_{yi} :	Desplazamiento nominal a la fluencia en el piso “i”, producido por el sismo en dirección “x”.
C_{li} :	Coefficiente de inestabilidad.
P_i :	Carga gravitacional total acumulada encima del nivel “i”.
V_{Bm} :	Cortante en la base para el modo “m”.
C_{sm} :	Coefficiente sísmico de diseño para el modo “m”.
$W\beta_m$:	Peso de la masa de la edificación que participa en el modo “m” capaz de generar fuerzas inerciales que contribuyan al cortante basal.
$\Phi_{i,m}$:	Es la amplitud relativa del desplazamiento en el nivel “i” de la estructura cuando vibra en el modo “m”.
W_i :	Peso del piso “i”.

n :	Número de grados de libertad en la estructura.
C_{Vim} :	Coefficiente para calcular las fuerzas en el nivel “i” para el modo “m”.
F_{im} :	Fuerzas modales equivalentes producidas por el sismo para el nivel “i” para el modo “m”.
δ_{Yim} :	Desplazamientos modales a la fluencia producidas por el sismo para el nivel “i” para el modo “m”.
δ_{Oim} :	Deflexión modal post-elástica en cada nivel producidas por el sismo para el nivel “i” para el modo “m”.
\hat{W} :	Peso efectivo del edificio.
K :	Rigidez del edificio (empotrado en su base).
g :	Aceleración de la gravedad.
h :	Altura efectiva del edificio.
r_{ai} :	Radio de giro equivalente a un cimiento circular.
A_{oi} :	Área del cimiento “i”.
r_{mi} :	Radio de giro equivalente a un cimiento circular, según su momento de inercia.
I_{oi} :	Momento de inercia según el eje horizontal centroidal.
ν :	Módulo de Poisson.
G :	Módulo de cortante del suelo.
$K_{\theta a}$:	Rigidez del cimiento “a” a la rotación.
K_{xa} :	Rigidez vertical del cimiento “a”.
K_{θ} :	Rigidez de la cimentación a la rotación.
K_x :	Rigidez vertical de la cimentación.

d :	Profundidad del cimiento.
K_y :	Rigidez horizontal de la cimentación.
y :	Distancias normales del centro del cimiento al eje de rotación.
\check{T} :	Período efectivo del edificio.
L_o :	Longitud del cimiento en dirección de análisis.
A_o :	Área del cimiento con carga.
I_o :	Momento de inercia del cimiento con carga.
β_{ef} :	Amortiguamiento efectivo.
ΔV :	Reductor del cortante.
V_{ef} :	Cortante efectivo.
\hat{W}_1 :	Peso efectivo de la edificación en el modo fundamental.
V_{ef1} :	Cortante efectivo del primer modo.
δ_{xi1} :	Deflexiones modales modificadas para el primer modo en el nivel "i".
K_s :	El módulo de reacción de sub-grado.
P :	Presión que actúa en un punto, por unidad de área.
y :	Deflexión producida por la carga.
$E_{resorte}$:	Módulo de elasticidad del elemento equivalente al suelo.
$A_{resorte}$:	Área del elemento equivalente al suelo.
$L_{resorte}$:	Longitud del elemento equivalente.

RESUMEN

Con el avance actual de la tecnología, hoy en día contamos con herramientas más desarrolladas para poder realizar análisis estructurales más complejos, de una manera más rápida y exacta. Los profesionales que se dedican al análisis y diseño de estructuras, deben considerar utilizar esta tecnología para poder obtener resultados que puedan ahorrar costos durante la construcción de un edificio. Sin embargo muchos profesionales prefieren un procedimiento más conservador, considerando la estructura empotrada en la base.

Este estudio presenta un procedimiento de análisis interacción suelo-estructura refinado tomando en consideración la rigidez del suelo, por medio de resortes con características que simulen el apoyo de la cimentación a través de la teoría de los valores de sub-grado. Este procedimiento se compara con los recomendados por las normas ATC y AGIES, las cuales toman en cuenta la estructura empotrada en la base.

Los resultados obtenidos por el procedimiento de análisis interacción suelo-estructura refinado, son valores más exactos y reales que los otros procedimientos, sin embargo, para su uso es necesario un programa de computación avanzado y un estudio de suelos, el cual podría no ser significativo comparado con el ahorro en el costo de la construcción.

I. INTRODUCCIÓN

Suponer los apoyos fijos en la cimentación en un análisis estructural, puede ser un procedimiento bastante conveniente, pero a la vez conservador. El comportamiento de los suelos es muy importante en el desempeño sísmico de las estructuras. Es por ello, que al tomarlos en consideración podría llegar a tenerse una optimización de los costos de las edificaciones.

La suposición de apoyos fijos en el análisis estructural de cualquier edificio, ha sido una práctica común por casi todos los ingenieros estructurales.

El trabajo inicia con una descripción general de los procedimientos recomendados por varias normas reconocidas (las normas de AGIES y las normas de ATC) considerando el edificio empotrado en la base. Las normas AGIES, aún no han desarrollado un procedimiento para la consideración del comportamiento del suelo en un análisis de interacción suelo-estructura. Al considerar el empotramiento en la base incrementa la rigidez del sistema, provocando así que el período de la estructura se subestime. Mientras más pequeño es el valor del período, el corte basal incrementa al igual que los momentos y todos los esfuerzos actuantes, lo que representa un incremento en el costo de construcción. Por otro lado, las normas de ATC han desarrollado un procedimiento interacción suelo-estructura simplificado, reduciendo el corte basal por medio de un modificador, el cual disminuye a la vez todos los esfuerzos actuantes, pero aumenta las deformaciones.

Posteriormente se presenta la descripción de un procedimiento de análisis interacción suelo-estructura refinado, tomando en cuenta las rigideces de distintos suelos. Se ejemplifica este procedimiento utilizando el programa de computación avanzado llamado ETABS v.8; los resultados de este análisis, son más exacto y reales que los considerados con los otros métodos. Para poder analizar el efecto de las rigideces de los suelos, se suponen resortes con características especiales que simulen la condición real de apoyo de la cimentación, por medio de la teoría de los valores de sub-grado.

Al comparar los resultados de estos análisis se muestra la importancia de tomar en consideración la interacción suelo-estructura. Sin embargo, puede darse el caso que el modelo no amerite tal análisis. El procedimiento recomendado por ATC muestra una gran reducción de fuerzas, pero posiblemente, haya necesidad de hacer un ajuste a las normas, debido a toda la incertidumbre existente. El método de análisis interacción suelo-estructura refinado, resulta ser un procedimiento relativamente sencillo, aunque también tiene cierta incertidumbre, pero es sumamente necesario un programa de computación que pueda llevar a cabo el análisis.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general

- Dar a conocer un método de análisis interacción suelo-estructura.

B. Objetivos específicos

- Describir con detalle los lineamientos para realizar un análisis interacción suelo-estructura simplificado y otro refinado.
- Describir las diferencias en los resultados de los distintos tipos de análisis interacción suelo-estructura.

III. ANÁLISIS ESTRUCTURAL CON SOPORTES FIJOS SEGÚN AGIES (“ASOCIACIÓN GUATEMALTECA DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA”)

A. CONCEPTOS GENERALES

El edificio se considerará fijo en la base y se diseñará en cada dirección de análisis para resistir como mínimo el cortante basal estático equivalente.

1. Método de la carga estática equivalente

a. Conceptos generales del método de la carga estática equivalente. Para utilizar el método de la carga sísmica equivalente, la estructura debe cumplir con los siguientes parámetros:

- La edificación debe ser clasificada regular en planta y elevación.
- Los edificios no deberán exceder 50 m sobre el nivel del suelo.
- El periodo de vibración fundamental empírico no debe exceder 1.5 seg.

Edificios irregulares en elevación, pero regulares en planta se analizarán para sismo al menos como se especifica en el método del análisis modal.

Edificios irregulares en planta requerirán un análisis dinámico apropiado. Un análisis modal que tome en cuenta los desplazamientos torsionales de las plantas y/o las deformaciones de los diafragmas satisfará este requisito de análisis.

Para poder cumplir con los parámetros uno y tres, se muestran los incisos a continuación.

- Configuración en Planta (numeral 3-1.4.2)

Las estructuras regulares son aquellas edificaciones con:

- Una configuración geométrica en planta aproximadamente simétrica y rectangular, sin grandes agujeros. Una distribución de masa y distribución de sistemas sismo-resistentes bastante coincidentes.

- Diafragmas esencialmente completos.

Deben cumplir con las siguientes condiciones simultáneamente:

a) Más del 75% del área del edificio sobre el nivel del suelo está constituida por pisos cuyas plantas son regulares sin entrantes o salientes de dimensiones significativas.

Una planta se considera irregular si:

$$A_n < (1.25)A_r \quad (1)$$

Donde:

A_n = Área nominal del rectángulo que circunscribe los ejes estructurales exteriores de un edificio.

A_r = Área real de diafragma que queda dentro del perímetro de los ejes estructurales exteriores (se deben descontar los agujeros interiores de los diafragmas) de un edificio.

No se deben tomar en cuenta los voladizos que estén fuera del perímetro de los ejes estructurales exteriores y los sótanos confinados por el terreno circundante.

b) No hay ningún piso con excesiva excentricidad entre su centro de masa y su centro de rigideces, exceptuando los pisos superiores que sumen menos del 15% de la masa del edificio sobre nivel de suelo.

Hay excentricidad excesiva en un piso si:

$$e_x/L_x \text{ ó } e_y/L_y > 0.15 \quad (2)$$

$$e_x/L_x \text{ ó } e_y/L_y > 0.20Rr \quad (3)$$

Hay excentricidad grande en un piso si:

$$e_x/L_x \text{ ó } e_y/L_y > 0.10 \quad (4)$$

$$e_x/L_x \text{ ó } e_y/L_y > 0.15Rr \quad (5)$$

$$Rr = (K_{\text{torcional}}/K_{\text{traslacional}})^{0.5} \quad (6)$$

Donde:

e_x = Distancia en dirección “x” entre el centro de masa y el centro de rigidez del piso.

e_y = Distancia en dirección “y” entre el centro de masa y el centro de rigidez del piso.

L_x = Distancia entre los ejes estructurales extremos en dirección “x”.

L_y = Distancia entre los ejes estructurales extremos en dirección “y”.

Rr = Radio de resilencia.

c) No hay ningún piso con excesiva anisotropía de rigideces.

Hay anisotropía de rigideces excesiva en un piso si:

$$0.67 < K_x/K_y < 1.50 \quad (7)$$

$$0.33 < L_x/L_y < 3.00 \quad (8)$$

Se considera que un piso es isotrópico si:

$$0.75 < K_x/K_y < 1.50 \quad (9)$$

$$0.50 < L_x/L_y < 2.00 \quad (10)$$

Donde:

K_x = Rigidez traslacional en dirección “x”.

K_y = Rigidez traslacional en dirección “y”.

L_x = Distancia entre los ejes estructurales extremos en dirección “x”.

L_y = Distancia entre los ejes estructurales extremos en dirección “y”.

2) Regularidad en elevación (numeral 3-1.4.3)

Deben cumplir con las siguientes condiciones simultáneamente:

a) Si la estructura tiene una configuración geométrica vertical aproximadamente constante y carece de escalonamientos de un tramo o más, exceptuando los escalonamientos entre el sótano y el cuerpo del edificio y los escalonamientos que ocurran dentro del primer 15% de altura.

b) Si la relación masa/rigidez no sufre cambios de más del 15% entre pisos adyacentes (el último piso no requiere verificarse).

c) Si los tabiques, sillares y otros elementos secundarios están dispuestos de manera que no produzcan cambios significativos de rigidez de un piso a otro (de preferencia los tabiques y sillares de concreto o mampostería estarán fuera del plano de las columnas).

3) Periodo fundamental empírico T_E (numeral 3-2.1.5)

En general:

$$T_E = (0.09)(h_n/\sqrt{L}) \quad (11)$$

Para sistemas estructurales E2: sistema de marcos

Es un sistema estructural, integrado con marcos espaciales resistentes a flexión que soportan la carga vertical y además todas las sollicitaciones sísmicas. Todos los marcos deben estar unidos por diafragmas horizontales y pueden ser ordinarios o especiales.

$$T_E = k_{Th} h_N^{0.75} \quad (12)$$

Donde:

$K_T = 0.061$ para marcos de concreto

$K_T = 0.085$ para marcos de acero

h_N = Altura total del edificio, en metros, desde el nivel del terreno

L = Distancia entre los ejes estructurales extremos en la dirección de análisis, en metros

b. Cortante basal estático equivalente. La fórmula general para obtener el valor del cortante basal estático equivalente es la siguiente:

$$V_B = C_s W_s \quad (13)$$

Donde:

V_B = Cortante basal.

C_s = Coeficiente sísmico para calcular V_B .

W_s = Peso de la masa de la edificación capaz de generar fuerzas inerciales que contribuyan al cortante basal.

Se ha ordenado el procedimiento que las normas AGIES proponen, en una serie de pasos, los cuales se muestran a continuación.

Paso 1: Peso W_s (numeral 3-2.1.2)

En general:

W_s = Carga muerta total de la edificación.

En almacenes y bodegas:

W_s = Carga muerta total de la edificación más 25% de la carga viva por lo menos.

En ocasiones especiales:

W_s = Carga muerta total de la edificación más otras cargas vivas que estén rígidamente ancladas a la estructura.

W_s = Carga muerta total de la edificación más las masas líquidas que no sobrepasen el

5% del peso total de la edificación.

En casos necesarios se verificarán las componentes hidrodinámicas de acuerdo a la Sección 2-7.4 de las normas.

Paso 2: Factor genérico de reducción de fuerza sísmica R_o (numeral 3-1.2.2)

Cuadro 1: Factor “ R_o ” de respuesta sísmica por capacidad post-elástica (ductilidad) de la estructura.

SISTEMA ESTRUCTURAL	SISTEMA VERTICAL SISMORRESISTENTE	FACTOR R_o	
E1. SISTEMA DE CAJÓN	Con muros estructurales:		
	De mampostería reforzada	2.5	
	De concreto reforzado	3.5	
	De mampostería sin refuerzo	1.0	
	De mampostería reforzada interiormente	1.7	
	De madera	4.0	
	Con marcos arriostrados	3.0	
E2. SISTEMAS DE MARCOS	E2.1 Marcos ordinarios	De acero estructural	3.5
		De concreto reforzado	1.7
	E2.2 Marcos espaciales	De acero estructural	5.5
		De concreto reforzado	5.0
E3. SISTEMA COMBINADO DE MUROS Y MARCOS	Con muros de mampostería reforzada	3.5	
	Con muros de concreto reforzado	4.5	
	Con marcos arriostrados en vez de muros:		
	Arriostres ordinarios	3.5	
	Arriostres excéntricos	4.0	

Cuadro 1: (Continuación)

Condiciones:

- La longitud del tramo se define por conveniencia como el claro libre entre soportes consecutivos.
- Si dos soportes están acoplados por medio de un dintel, no se contará el dintel como uno de los tramos.
- Si dos soportes están acoplados con una viga o elemento articulado en ambos extremos, no se contará ese tramo.
- Si los marcos en una dirección dada tienen diferentes índices, el índice q_1 será el promedio aritmético de los índices de cada marco en esa dirección de análisis.

Paso 4: Índice q_2 : número de ejes estructurales (numeral 3-1.4.1)

5 ó mas:		+2.5
4 ejes:	$S_{\min} > 0.70 S_{\max}$	+2.5
	$S_{\min} > 0.45 S_{\max}$	+0.0
3 ejes:	$S_{\min} > 0.70 S_{\max}$	+0.0
	$S_{\min} < 0.45 S_{\max}$	-2.5
2 ó menos:		-3.0

(Para relaciones intermedias a las indicadas se puede interpolar o tomar el índice menor).

Donde:

S = Espaciamiento entre ejes medido centro a centro.

Paso 5: Índice q_3 : presencia de muros o riostras (numeral 3-1.4.1)

$q_3 = +2.5$ Si la estructura tiene al menos el 33% de sus ejes estructurales:

Uno o más muros estructurales cuya relación $L/h_m > 1.50$

Dos o más muros estructurales cuya relación $L/h_m > 0.67$

Donde:

L = Longitud en planta del muro

h_m = La mayor de las alturas libres de entrepiso en la edificación.

(Siempre y cuando los muros no generen una planta irregular).

$q_3 = +1.0$ Del valor anterior por cada eje con muros que al menos dos estén acoplados entre si con dinteles dúctiles.

$q_3 = +2.0$ Valor mayor cuando los muros se substituyan por arriostriamientos diagonales excéntricos que cumplan con los requisitos del capítulo 7-4.

$q_3 = +2.5$ Para sistemas estructurales de cajón El.

Paso 6: Índice q_4 : regularidad en planta (numeral 3-1.4.2)

En cada dirección de análisis:

$q_4 = +2.5$ Si todos y cada uno de los pisos sobre el nivel del suelo tienen plantas regulares.

$q_4 = -2.5$ Si ningún piso tiene planta regular.

(Situaciones intermedias podrán interpolarse entre los extremos).

Paso 7: Índice q_5 : excentricidad en planta (numeral 3-1.4.2)

En la dirección de análisis perpendicular a la excentricidad:

$q_5 = -3.0$ Si cualquier piso tiene excentricidad excesiva.

$q_5 = -2.5$ Si todos los pisos tienen excentricidad grande.

$q_5 = +2.5$ Si ninguno tiene excentricidad (todos son simétricos).

(Situaciones intermedias podrán interpolarse y puede ser diferente en cada dirección de análisis).

Paso 8: Índice q_6 : isotropía en planta (numeral 3-1.4.2)

En cada dirección de análisis:

$q_6 = +2.5$ Si todos y cada uno de los pisos sobre el nivel del suelo son isotrópicos.

$q_6 = -2.5$ Si ninguno es isotrópico.

(Situaciones intermedias podrán interpolarse y puede ser diferente en cada dirección).

$q_6 = -3.0$ Si cualquier piso tiene anisotropía excesiva.

Paso 9: Índice q_7 : regularidad en elevación (numeral 3-1.4.3)

$q_7 = +0.0$ Si en todos los pisos se cumplen los tres criterios presentados anteriormente.

$q_7 = -1.5$ Por cada piso en que no se cumplan los tres criterios presentados anteriormente.

$q_7 = -5.0$ Valor mínimo a utilizar en caso la resta de la opción anterior sobrepase este valor.

Paso 10: Índice q_8 : condición de “piso suave” (numeral 3-1.4.3)

Esta condición se da cuando algún piso sobre el suelo tiene una rigidez menor que la rigidez del piso inmediato superior.

$q_8 = -3.0$ Si $K_{inf} / K_{sup} > 0.70$.

$q_8 = +0.0$ Cuando $K_{inf} \geq K_{sup}$ en todos los pisos, debido a que no se da el fenómeno de “piso suave”.

Opcionalmente, para $K_{inf} / K_{sup} < 0.70$

$$q_8 = 10[(K_{inf} / K_{sup}) - 1] \quad (14)$$

Sobre el par de pisos más crítico.

Aunque es altamente recomendable que q_8 no baje de -3.0.

No es necesario verificar el último nivel.

Donde:

K_{inf} = Rigidez relativa del piso inferior del par de niveles analizados.

K_{sup} = Rigidez relativa del piso superior del par de niveles analizados.

Las verificaciones anteriores no eximen al analista de aplicar las normativas sobre efecto P-delta contenidas en las Secciones 3-2.6 y 3-3.9.

Paso 11: Factor de calidad sismo-resistente Q (numeral 3-1.2.3)

$$Q = 1.00 + 0.01 (\sum q_i) \quad (15)$$

$0.8 < Q < 1.15$ De no ser así, el proyecto se deberá modificar.

Paso 12: Factor de reducción de respuesta sísmica R (numeral 3-1.2.1)

$$R = 1.2R_0Q \quad (16)$$

Paso 13: Perfil de suelo (numeral 2-2.2.3)

Para establecer el espectro del sismo de diseño, en estas normas se definen tres perfiles de suelo.

Perfil de Suelo S1:

Satisface cualquiera de las siguientes condiciones:

- Roca de cualquier clase; tal material puede caracterizarse por velocidades de onda de corte mayores que 800 m/s.
- Suelo rígido cuyo basamento rocoso está a menos de 50 m de profundidad y constituido por cenizas volcánicas, arenas, gravas densas o arcillas firmes.

Perfil de Suelo S2:

Satisface cualquiera de las siguientes condiciones:

- Suelo firme, cuyo basamento rocoso está a más de 50 m de profundidad y cuyos depósitos son cenizas volcánicas, suelos granulares, limos densos o arcillas firmes.

En general, suelos firmes y estables cuyos perfiles no clasifican como S1 ni como S3.

Perfil de Suelo S3:

Satisface cualquiera de las condiciones siguientes:

- Depósitos de más de 10 m de espesor de cenizas, arenas o limos desde sueltos hasta de densidad media.

- Depósitos de más de 10 m de espesor de arcillas blandas o semi-blandas, con o sin estratos arenosos intermedios.

En general, perfiles de suelo donde la velocidad de onda de corte del depósito es menor de 200 m/s.

En caso de duda se tomará el resultado más crítico de suponer perfil S2 y S3.

Paso 14: Periodos de vibración que definen al espectro sísmico de diseño T_A y T_B (figura 2-2/2)

Cuadro 2: Periodos T_A y T_B , que definen un espectro de diseño según tipo de suelo

PERFIL DEL SUELO			
	S1	S2	S3
T_A	0.12	0.12	0.12
T_B	0.40	0.52	0.74

Paso 15: Periodo de vibración T (numeral 3-2.1.4)

El periodo T es el periodo fundamental de vibración de la edificación. Al periodo T puede asignársele el valor genérico empírico T_E calculado en el inciso 3 de la primera parte.

Paso 16: Función de amplificación dinámica $D(T)$ (numeral 2-2.2.2)

Cuadro 3: Funciones de Amplificación dinámica

Función de amplificación dinámica	
Cuando $T < T_A$	$D(T) = 1.0 + 1.5T/T_A$ (17)
Cuando $T_A \leq T \leq T_B$	$D(T) = 2.5$ (18)
Cuando $T_B \leq T$	$D(T) = 2.5(T_B/T)^{0.67}$ (19)

Paso 17: Aceleración máxima efectiva A_o (numeral 2-2.2.2)

El valor del parámetro A_o se especifica en la figura 2-2/1. A menos que se indique específicamente, el valor del parámetro A_o para microzonas con índice de sismicidad $I_o = 5$ no necesita ser mayor que el valor para $I_o = 4$.

Cuadro 4: Índice de sismicidad

ZONA	I_o	A_o	A_f	Observaciones
2	2	0.10 g	0.00 g	Cuando sea necesario interpolar, hacerlo sobre líneas norte-sur
3	3	0.10 a 0.30 g	0.00 a 0.10 g	
4.1	4	0.30 g	0.10 a 0.15 g	
4.2	4	0.30 g	0.15 g	

Según el mapa de macrozonificación de la figura siguiente.

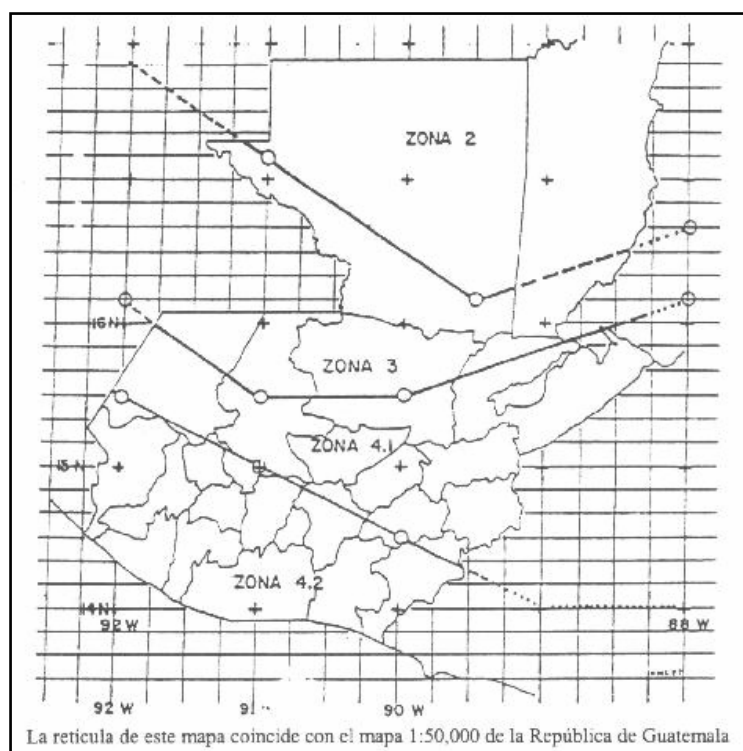


Figura 1: Mapa de macrozonificación sísmica de Guatemala

Paso 18: Espectro básico de diseño $S_a(T)$ (numeral 2-2.2.2)

$$S_a(T) = A_o D(T) \quad (20)$$

Paso 19: Coeficiente C_s (numeral 3-2.1.3)

$$T > T_A \quad C_s = S_a(T)/R \quad (21)$$

$$T < T_A \quad C_s = S_a(T)/[1 + (R - 1)T/T_A] \quad (22)$$

Paso 20: Cortante basal equivalente V_B (numeral 3-2.1.1)

$$V_B = C_s W_s \quad (23)$$

c. Distribución de fuerzas sísmicas

Paso 21: Distribución vertical de fuerzas sísmicas F_j (Sección 3-2.2)

$$F_j = C V_j V_B \quad (24)$$

$$C V_j = W_j h_j^k / \sum (W_i h_i^k) \quad (25)$$

Donde:

F_j = Cortante en el nivel “j” de la edificación.

k = 1 para periodos de 0.5 segundos o menos.

k = $0.75 + 0.5T$ para periodos mayores (26)

W_i, W_j = Peso asignado al nivel “i” o al nivel “j” de la edificación.

h_i, h_j = Altura en metros del nivel “i” o del nivel “j” medido desde la base de la edificación.

Paso 22: Distribución horizontal de fuerzas sísmicas en dirección “x” V_x (Sección 3-2.3)

La fuerza sísmica acumulada desde arriba hasta el nivel “i” se distribuirá a los diversos miembros verticales del sistema sismo-resistente que estén en el piso debajo del nivel “i” tomando en cuenta las rigideces relativas de esos miembros verticales y las del diafragma en el nivel “i”. El analista tomará en cuenta las rigideces finitas del diafragma en el análisis, excepto que pueda justificar el empleo de un modelo analítico de diafragma infinitamente rígido demostrando que los diafragmas son considerablemente más rígidos que los marcos estructurales.

En el proceso de distribuir horizontalmente las fuerzas sísmicas se tomará en cuenta el momento torsional MT_x causado por la localización de las masas de la edificación. A esto se añadirá un momento torsional accidental MT_{Ax} causado por un desplazamiento del centro de masa analítico del 5% de la dimensión de la edificación (medida perpendicularmente a la dirección de aplicación de las fuerzas sísmicas).

d. Otros efectos: deformaciones

Paso 23: cálculo de derivas sísmicas en dirección “x” Δx (Sección 3-2.5)

$$\Delta x = \delta o_i - \delta o_{i-1} \quad (27)$$

Donde:

δo_i = Desplazamientos laterales post-elásticos del piso “i”

$$T \geq T_A \quad \delta o_i = R_o \delta y_i \quad (28)$$

$$T < T_A \quad \delta o_i = [1 + (R_o - 1)T/T_A] \delta y_i \quad (29)$$

Donde:

δy_i = Desplazamiento nominal a la fluencia obtenido del análisis estático equivalente para el nivel “i”.

R_o = Factor de modificación por respuesta post-elástica consignado en el cuadro del paso 2.

T_A = Está definido en el paso 14.

T = Periodo fundamental de vibración de la estructura definido en el paso 15.

Las derivas Δx se compararán con las derivas límite especificadas en la sección 3-1.5.

Cuando sea aplicable, a las derivas Δx se les aplicará el efecto P-Delta especificados en el siguiente paso, antes de compararlas con las derivas límite.

δy_i = Desplazamiento a la primera fluencia producido por el sismo en el nivel “i”.

δo_i = Desplazamiento más allá de la fluencia producido por el sismo en el nivel “i”.

Paso 24: Coeficiente de inestabilidad CI_i (numeral 3-2.6.1)

$$CI_i = [P_i(\Delta_{xi}/R_o)]/[V_i(h_i / h_{i-1})] \quad (30)$$

Donde:

P_i = Carga gravitacional total acumulada encima del nivel “i”.

V_i = Cortante sísmico acumulado actuando en el piso “i”.

Δ_{xi} = Deriva sísmica producida en dirección “x” del piso “i” descrito en el paso 23

h_i, h_{i-1} = Previamente definidas en el paso 21

R_o = Previamente descrito en el paso 2.

Paso 25: Incrementos P-Delta (numeral 3-2.6.2)

Si el coeficiente de inestabilidad excede 0.20 en cualquier piso, deberán introducirse en la estructura los cambios necesarios para reducirlo.

Si el coeficiente en un piso no excede 0.10 no es necesario introducir ninguna corrección a los efectos sísmicos en el piso.

En aquellos pisos donde el coeficiente de inestabilidad CI_i exceda 0.10 se incrementarán todos los efectos sísmicos en el piso, incluyendo las derivas. Las nuevas derivas deberán estar entre los límites especificados en la sección 3-1.5. Los factores de incremento se calcularán con la expresión:

$$[1/(1 - CI_i)] \quad (31)$$

Métodos de análisis alternos que tomen en cuenta efectos incrementales de segundo orden serán aceptables.

2. Método de análisis modal espectral

a. Conceptos generales. Este método tiene aplicación general, tanto para las estructuras que deben analizarse por método dinámicos, como para aquellas que pudieran analizarse con el método de la carga estática equivalente.

En el análisis se deberá incluir un número suficiente de modos de vibración que aseguren que el 90% o más de la masa esta participando en la dirección de análisis bajo consideración.

b. Modelo analítico.

1) Modelos planares. El edificio puede ser analíticamente modelado como un sistema de masas concentradas en cada nivel, que poseen un grado de libertad trasnacional que corresponde con la dirección en que se analiza, siempre y cuando el edificio vibre en dos direcciones ortogonales sin acoplamiento significativo.

2) Modelos no planares. Si no se cumplen las especificaciones anteriores, el edificio puede modelarse como un sistema de masas concentradas en cada nivel, cada masa con dos grados de libertad trasnacionales ortogonales y uno rotacional, siempre y cuando los diafragmas del nivel puedan considerarse rígidos.

3) Modelos multiplanares y tridimensionales. Si no se cumple ninguna de las especificaciones de los dos incisos anteriores, deberá modelarse los entresijos discretizando cada uno en masas interconectadas por diafragmas no rígidos e intersectados en los marcos verticales.

c. Corte modal en la base. Para modelos planares, el análisis debe incluir, para cada dirección de análisis, por lo menos los tres modos de vibración con el período más largo y todos aquellos modos con períodos mayores de 0.4 seg. Para modelos no planares y tridimensionales, deben considerarse para cada dirección de análisis por lo

menos dos modos esenciales traslacionales y por lo menos dos esencialmente rotacionales y todos los modos con períodos mayores que 0.4 seg.

Los períodos y los modos de vibración del edificio serán calculados por métodos reconocidos en ingeniería estructural para la condición de base empotrada.

De la misma manera que el método de la carga sísmica equivalente, se debe cumplir una regularidad en planta, siguiendo el mismo procedimiento que el método anterior. Esto se debe realizar para poder considerar masas concentradas en cada nivel, con un grado de libertad trasnacional, de lo contrario se debe modelar con dos grados de libertad trasnacionales ortogonales y uno rotacional.

La parte del cortante en la base V_{Bm} , con que contribuye el modo “m”, se calculará de acuerdo a la siguiente expresión:

$$V_{Bm} = C_{sm} W \beta_m \quad (32)$$

Donde:

V_{Bm} = Cortante en la base para el modo “m”.

C_{sm} = Coeficiente sísmico de diseño para el modo “m”.

$W \beta_m$ = Peso de la masa de la edificación que participa en el modo “m” capaz de generar fuerzas inerciales que contribuyan al cortante basal.

Se ha ordenado el procedimiento que las normas AGIES proponen, en una serie de pasos, los cuales se muestran a continuación. Se podrá observar que las fórmulas y procedimientos son muy parecidos al procedimiento del método del cortante estático equivalente, evaluadas en el modo de vibración en interés. Es por ello que no se enumeran procedimientos previos.

Paso 1: Crear un modelo

Se debe crear un modelo de la estructura a analizar y definir todos sus grados de libertad.

Paso 2: Resolución del problema de valores propios (Eigen-Solution).

Calcular los períodos y modos de vibración.

Paso 3: Coeficiente sísmico de diseño C_{S_m} (numeral 3-3.5.3)

El coeficiente modal de diseño sísmico, C_{S_m} , se calculará mediante la expresión:

$$C_{S_m} = S_a(T_m) / R \quad (33)$$

Donde:

C_{S_m} = Coeficiente sísmico de diseño para el modo “m”.

$S_a(T_m)$ = Espectro de diseño para el modo “m”.

R = Factor de reducción de respuesta sísmica para el modo “m”.

Paso 4: Factor de participación modal $W\beta_m$ (numeral 3-3.5.2)

$$W\beta_m = [\sum_{(i=1,n)} W_i \Phi_{i,m}]^2 / \sum_{(i=1,n)} W_i (\Phi_{i,m})^2 \quad (34)$$

Donde:

$\Phi_{i,m}$ = Amplitud relativa del desplazamiento en el nivel “i” de la estructura cuando vibra en el modo “m”. se obtiene de los resultados del análisis modal.

W_i = Peso del piso “i”.

n = Número de grados de libertad en la estructura.

Paso 5: Corte modal en la base V_{Bm} (numeral 3-3.5.1)

$$V_{Bm} = C_{S_m} W\beta_m \quad (35)$$

d. Distribución de fuerzas modales

Paso 6: Calcular la expresión C_{Vim} , para cada modo (sección 3-3.6)

$$C_{Vim} = W_i \Phi_{im} / \sum (W_i \Phi_{i,m}) \quad (36)$$

Donde:

i = Número de nivel

m = Número de modo

Paso 7: Fuerzas modales equivalentes F_{im} (sección 3-3.6)

Fuerza modal equivalente en el nivel “i”, para el modo “m”. Debe de calcularse independientemente para cada modo de vibración que se han tomado en cuenta.

$$F_{im} = C_{Vim} V_{Bm} \quad (37)$$

e. Otros efectos: deformaciones

Paso 8: Desplazamientos a la fluencia δ_{Yim} (sección 3-3.6)

Se obtiene de los resultados del análisis modal utilizando la siguiente expresión:

$$\delta_{Yim} = (g/4\pi^2) T_m^2 F_{im} / W_i \quad (38)$$

Paso 9: Calcular la deflexión modal post-elástica en cada nivel δ_{Oxm} (sección 3-3.6)

$$\delta_{Oim} = R_o \delta_{Yim} \quad \text{Si } T \geq T_1 \quad (39)$$

$$\delta_{Oim} = [1 + (R_o - 1)T / T_1] \delta_{Yim} \quad \text{Si } T < T_1 \quad (40)$$

Paso 10: Resultados finales del análisis modal (numeral 3-3.7.3)

Los valores finales serán calculados combinando los distintos valores modales. Llamando Z a la variable de interés, la combinación se hará de la manera siguiente:

$$Z_{COMB} = 0.5 [\sum |Z_i| + \sqrt{\sum Z_i^2}] \quad (41)$$

En caso de que haya varios modos con frecuencias de vibración muy cercanas (por ejemplo menos de 10% de diferencia) se usará la llamada suma cuadrática completa en lugar de la suma cuadrática simple que forma parte de la ecuación anterior.

Paso 11: Prevención de resultados distorsionados (numeral 3-3.7.4)

a.- Calcular el cortante basal estático equivalente V_B' (utilizando $T = 1.4 T_E$), este valor no debe ser menor al V_B , de lo contrario utilizar V_B' .

b.- $[V_B]_{COMB}$ no debe ser menor a V_B' .

De lo contrario todos los resultados del análisis modal se incrementarán proporcionalmente multiplicándolos por el factor $V_B'/V_{B\ COMB}$.

El cortante modal combinado no necesita ser mayor que el cortante basal calculado por el método estático equivalente, si así resultara, los resultados de éste análisis podrán reducirse proporcionalmente.

IV. ANÁLISIS ESTRUCTURAL INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA SIMPLIFICADO, SEGÚN MODELO DE ATC 3-06 (“APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL”)

A. Conceptos generales

Suponer los apoyos fijos en la cimentación en un análisis estructural es un procedimiento bastante aceptado hoy en día. Ésta es verdadera para estructuras que son soportadas en suelos muy rígidos, ya que en este caso el movimiento en la base del edificio podría ser el mismo que el del suelo. Sin embargo, para estructuras soportadas en suelos suaves o menos rígidos, el movimiento en la base de la estructura es generalmente diferente al del suelo.

Bajo otro punto de vista, la respuesta dinámica de la estructura en un sitio depende en la interrelación de las características de la estructura y las características del suelo que la soporta.

El procedimiento ha sido utilizado para incorporar los efectos de la interacción suelo-estructura para determinar las fuerzas sísmicas de diseño y los desplazamientos de la estructura.

1. Método de fuerza lateral equivalente. Este procedimiento es complementario al dado por las normas AGIES en su método del corte estático equivalente. En efecto el procedimiento considera la respuesta de la estructura en su modo fundamental de vibración, y considera los modos de vibración superiores con el peso efectivo del edificio y la distribución de fuerzas laterales.

a. **Corte en la base.** Se ha ordenado el procedimiento de las normas recomendadas ATC en una serie de pasos, los cuales se muestran a continuación

Paso 1: Coeficiente sísmico de diseño C_s (sección 6.2.1)

Este valor fue obtenido en el paso 19, del método estático equivalente.

Paso 2: Peso efectivo del edificio \hat{W} (sección 6.2.1)

Por lo general:

$$\hat{W} = 0.7 * W \quad (42)$$

Donde:

W = Peso total de la estructura

Si el peso está concentrado en un solo nivel se debe de tomar igual a W .

Paso 3: Rigidez del edificio (empotrado en su base) \hat{K} (sección 6.2.1.A)

$$\hat{K} = 4\pi^2 \hat{W} / gT^2 \quad (43)$$

Donde:

\hat{W} = Peso específico del edificio

g = Aceleración de la gravedad

T = Período fundamental de vibración de la edificación. Al período T puede asignársele el valor genérico empírico T_E , calculado en el procedimiento del cortante estático equivalente.

Paso 4: Altura efectiva del edificio \hat{h} (sección 6.2.1.A)

Por lo general:

$$\hat{h} = 0.7 * h_n \quad (44)$$

Donde:

h_n = altura total, al menos que en un mismo piso se concentre el peso de la estructura, se tomará la altura hasta este nivel.

Paso 5: Radio de giro equivalente a un cimiento circular, según su área r_{ai} (sección c6.2.1.A)

$$r_{ai} = \sqrt{A_{oi}/\pi} \quad (45)$$

Donde:

A_{oi} = Área del cimiento i.

Paso 6: Radio de giro equivalente a un cimiento circular, según su momento de inercia r_{mi} (sección c6.2.1.A)

$$r_{mi} = (4I_{oi}/\pi)^{1/4} \quad (46)$$

Donde

I_{oi} = Momento de inercia según el eje horizontal centroidal.

Paso 7: Módulo de Poisson y módulo de cortante del suelo ν , G (sección c6.2.1.A)

Obtener el módulo de Poisson y el módulo de cortante del suelo, por estudio de suelos.

Paso 7: Rigidez vertical K_{xa} (sección c6.2.1.A)

$$K_{xa} = (4G r_{ai} / \{1-\nu\})[1 + 0.4d / r_{ai}] \quad (47)$$

Donde:

G = Módulo de cortante del suelo.

r_{ai} = Radio del cimiento circular

ν = Módulo de Poisson

d = Profundidad del cimiento

Paso 8: Rigidez de cada cimiento a la rotación $K_{\theta a}$ (sección c6.2.1.A)

$$K_{\theta a} = (8G r_{mi}^3 / 2\{1-\nu\})[1 + 2d / r_{mi}] \quad (48)$$

Donde:

G = Módulo de cortante del suelo.

r_{mi} = Radio del cimiento circular según su inercia

ν = Módulo de Poisson

d = Profundidad del cimiento

Paso 9: Rigidez horizontal de cada cimiento K_{ya} (sección c6.2.1.A)

$$K_{ya} = (8G_i r_{ai} / \{2-\nu\})[1 + \frac{2}{3}d / r_{ai}] \quad (49)$$

Paso 10: Valores de las distancias centroidales y (sección c6.2.1.A)

Distancias normales del centroide del cimiento al eje de rotacional.

Paso 11: Rigidez lateral y rotacional de la cimentación K_y , K_{θ} (sección c6.2.1.A)

$$K_y = \sum K_{ya} \quad (50)$$

$$K_{\theta} = \sum k_{xay}^2 + \sum K_{\theta ia} \quad (51)$$

Paso 12: Período efectivo del edificio \check{T} (sección 6.2.1.A)

$$\check{T} = T \{1 + (\check{k} / K_y)[1 + (K_y \check{H}^2 / k_{\theta})]\}^{1/2} \quad (52)$$

Paso 13: Coeficiente sísmico efectivo \hat{C}_s (sección 6.2.1)

Utilizando el procedimiento del método estático equivalente (paso 19), pero utilizando el período efectivo del edificio \check{T} .

Paso 14: Característica del largo del cimiento r (sección 6.2.1.B)

$$\check{H} / L_o \leq 0.5 \quad r = r_a = \sqrt{A_o} / \pi \quad (53)$$

$$\bar{h}/L_o \geq 1 \quad r = r_m = \sqrt{4I_o/\pi} \quad (54)$$

Para valores intermedios de \bar{h}/L_o , el valor de r se puede interpolar.

Donde:

\bar{h} = Altura efectiva

L_o = Longitud del cimiento en dirección de análisis

A_o = Área del cimiento con carga

I_o = Momento de inercia del cimiento con carga

Paso 15: Factor de amortiguamiento β_o (sección 6.2.1.B)

Calcular \bar{h}/r y \check{T}/T , y utilizar la figura 2.

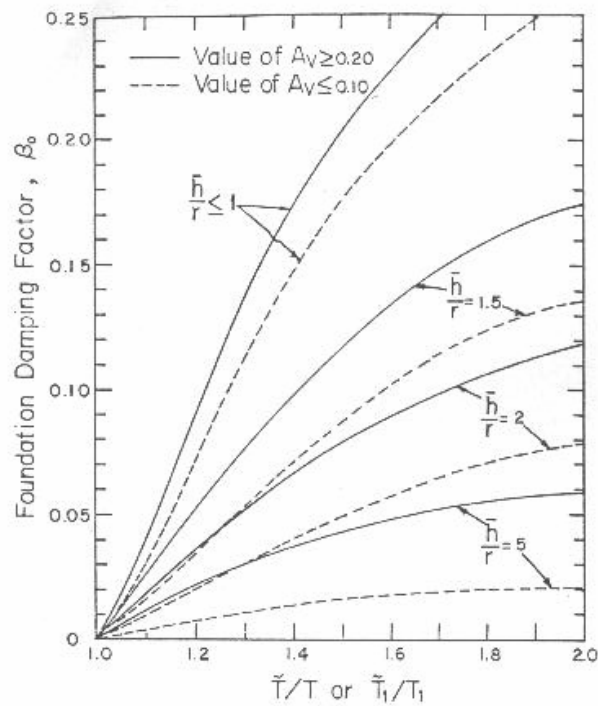


Figura 2: Factor de amortiguamiento del cimiento

Paso 16: Amortiguamiento efectivo β_{ef} (sección 6.2.1.B)

$$\beta_{ef} = \beta_o + 0.05/(\check{T}/T)^3 \quad (55)$$

Paso 17: Reductor del cortante ΔV (sección 6.2.1)

$$\Delta V = [C_s - \hat{C}_s(0.05/\beta_{ef})^{0.4}] \hat{W} \quad (56)$$

Paso 18: Calcular el cortante efectivo V_{ef} (sección 6.2.1)

$$V_{ef} = V - \Delta V \geq 0.7 V \quad (57)$$

Donde:

V = Cortante obtenido con el método de la carga sísmica equivalente.

b. Distribución de fuerzas sísmicas

Paso 19: Distribución vertical de fuerzas sísmicas F_j

El mismo procedimiento que el utilizado por el método de la carga estática equivalente, pero con los nuevos resultados.

c. Otros efectos: deformaciones

Paso 20: Desplazamientos a la fluencia δ_{Yim}

El mismo procedimiento que el utilizado por el método de la carga estática equivalente, pero con los nuevos resultados.

2. Método de análisis modal: primer modo. Estudios sobre la reacción dinámica elástica de un sistema de múltiples grados de libertad, revelan que, dentro del rango de parámetros que son de interés en el diseño de estructuras sometidas a sismo, la interacción suelo-estructura afecta substancialmente solo a la respuesta sísmica contribuida por el modo fundamental de vibración. La contribución de los modos más altos, son computados como si la estructura fuera empotrada en la base, y el valor máximo es determinado, para estructuras rígidas, utilizando la raíz cuadrada de las suma de cuadros de los máximos contribuidores modales.

a. Corte modal en la base. Este procedimiento es complementario al dado por las normas AGIES en su método del corte modal en la base. Sólo se utilizarán los resultados del primer modo de vibración.

Se ha ordenado el procedimiento de las normas recomendadas ATC en una serie de pasos, los cuales se muestran a continuación

Paso 1: Peso efectivo de la edificación en el modo fundamental \hat{W}_1 (sección c6.3)

$$\hat{W} = \hat{W}_1 = [\sum W_i \Phi_{i,m}]^2 / \sum W_i (\Phi_{i,m}^2) \quad (58)$$

Se puede observar que es la misma fórmula usada en el método del cortante modal de las normas recomendadas AGIES, para encontrar el factor de participación modal.

Paso 2: Repetir procedimiento utilizado en el método de la fuerza lateral equivalente de las normas recomendadas ATC, pero utilizando los valores obtenidos del método del análisis modal del primer modo:

$$T = T_1$$

$$\check{T} = \check{T}_1$$

$$\acute{K} = \acute{K}_1$$

$$\hat{W} = \hat{W}_1$$

Paso 3: Calcular la altura efectiva \bar{h} (sección 6.3.1)

$$\bar{h} = \sum W_i \Phi_{im} h_i / \sum W_i \Phi_{im} \quad (59)$$

Paso 4: Factor de amortiguamiento β_o (sección 6.3.1)

Con nuevos valores de \bar{h}/r y \check{T}/T , utilizar figura 2.

Paso 5: Cortante reductor ΔV_1 (sección 6.3.1)

Con fórmula de procedimiento anterior, pero con nuevos valores.

Paso 6: Cortante efectivo del primer modo V_{ef1} (sección 6.3.1)

$$V_{ef1} = V_1 - \Delta V_1 \quad (60)$$

El valor del cortante reducido no puede ser menor a $0.7V_1$.

b. Distribución de fuerzas sísmicas

Paso 7: Fuerzas modales sísmicas (sección 6.3.2)

Las nuevas fuerzas modales sísmicas, deben ser calculadas como si no existiera interacción suelo-estructura, pero utilizando el valor V_{ef1} .

c. Otros efectos modales: deformaciones

Paso 8: Deflexiones modales modificadas δ_{xi1} (sección 6.3.2)

$$\delta_{xi1} = [V_{ef1} / V_1] [\{M_{o1}h_i / K_\theta\} + \delta_{x1}] \quad (61)$$

Donde:

δ_{xi1} = Deflexiones modales horizontales modificadas para el nivel “i” por el modo 1.

M_{o1} = Momento de volteo en la base para el modo fundamental en un edificio empotrado en la base, utilizando el cortante V_1 .

h_i = Altura del nivel “i”.

V. ANÁLISIS ESTRUCTURAL INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA REFINADO

A. Conceptos generales

Cuando se trabaja con la interacción suelo-estructura, es cada vez más frecuente utilizar programas de cálculo en ordenador, que utilizan el modelo matemático de Winkler (o del coeficiente de balasto), para definir el comportamiento del terreno. Los manuales que ilustran la utilización de estos programas suelen dar algunas recomendaciones para la elección del coeficiente de balasto, pero en general ignoran que este parámetro no es una constante característica del terreno y que su valor debe hacerse variar con la geometría y el tipo de problema objeto de estudio. (Muzás, 2002)

1. Aplicaciones. Los problemas de la interacción suelo-estructura son basados en el comportamiento de la estructura que se encuentra en total contacto con el suelo, y el comportamiento del suelo son inter-independientes. (Hunt, 1986)

Este concepto es muy importante en mecánica de suelos, más que todo cuando es necesario evaluar las deformaciones y fuerzas actuantes de una estructura, relativamente flexible. Ya que estos factores determinarán las áreas de concreto y acero. Los problemas en los que es más usada la interacción suelo-estructura son en los siguientes casos de cimentaciones:

- Cimientos continuos o cimientos semi-rígidos tipo mat.
- Cimentaciones profundas sometidas a fuerzas laterales.
- Pavimentos.
- Cimientos sometidos a cargas sísmicas.

(Hunt, 1986)

2. Teoría del valor de sub-grado (coeficiente de balasto)

a. **Coefficiente vertical K_s .** Definición: El módulo de reacción de sub-grado K_s (o coeficiente de balasto), es definido como la unidad de presión requerida para producir una unidad de deflexión;

$$K_s = p/y \text{ [fuerza/longitud}^3; \text{ lb/plg}^3, \text{ kg/cm}^3, \text{ etc.]} \quad (62)$$

Donde:

P = Presión que actúa en un punto, por unidad de área.

y = Deflexión producida por la carga.

(Hunt, 1986)

Este parámetro tiene la dimensión de un peso específico y, aunque depende de las propiedades del terreno, no es una constante del mismo ya que el asiento de una cimentación apoyada sobre un medio pseudo elástico, depende de las dimensiones del área cargada y existen grandes diferencias si se estudian estructuras verticales. (Muzás, 2002)

Entre los factores que influyen en el valor del coeficiente K_s , se pueden enumerar los siguientes:

- Tamaña del cimiento; para el mismo suelo, K_s disminuye mientras el ancho del cimiento crece.
- Forma del cimiento; para cimientos del mismo ancho, misma carga p y soportados en el mismo suelo, los valores de K_s disminuyen al incrementar el largo del cimiento.
- Profundidad del cimiento; para arenas, el valor de K_s aumenta con la profundidad, mientras arcillas son casi independientes de la profundidad.
- Lugares abajo del nivel freático disminuyen el valor de K_s .

- Zonas de esfuerzo; deben ser muy similares la superficie en contacto con la muestra usada en laboratorio.

(Hunt, 1986)

1) Valores de K_s para arenas

Cuadro 5: Valores de K_s

Tipo de arena		K_s [kg/cm ³]
1	Arena floja	0.64 – 1.92
2	Arena media	1.92 – 9.58
3	Arena densa	9.58 – 31.95
4	Arena muy densa	> 31.95

(Muzás, 2002)

3. Cimiento combinado. Validez de la teoría de sub-grado para cimientos combinados.

Las condiciones en que está basada la teoría de sub-grado son:

1. El valor de K_s es independiente de la presión, y
2. K_s tiene el mismo valor en cualquier punto de la superficie en donde actúa la presión de contacto.

(Hunt, 1986)

B. Descripción del análisis

El análisis estructural interacción suelo-estructura refinado, se basa en tomar en cuenta el valor del coeficiente de balasto, por medio de resortes o elementos de armadura, como apoyos de la estructura, simulando la rigidez del suelo, en vez de tomarla empotrada. Para poder realizar este objetivo es necesario el uso de un programa estructural, en el caso de este trabajo se utilizó ETABS v.8.

Para poder modelar los valores del coeficiente de balasto, es necesario utilizar un elemento con estas características. En el caso del programa ETABS, es posible insertar resortes como apoyos; pero en casos que no tengamos esta herramienta se pueden utilizar elementos de armadura (debido que únicamente trabajan bajo carga axial). Ya sea cualquiera de los dos casos, resortes o elementos de armadura, es necesario, por medio del coeficiente de balasto, obtener sus características.

El primer paso sería dividir el cimiento corrido en segmentos, se recomienda segmentos pequeños alrededor de 1.5 m.

El valor de K_s depende, entre otros, no solo del tipo de suelo sino también en las características de la cimentación. Las dimensionales del coeficiente de balasto son kg/cm^3 (p/y). Si al valor de K_s lo multiplicamos por el área de contacto del cimiento (ancho x largo) a consideración, obtendríamos la rigidez de un resorte.

$$K = K_s \times \text{ancho} \times \text{largo} \quad (63)$$

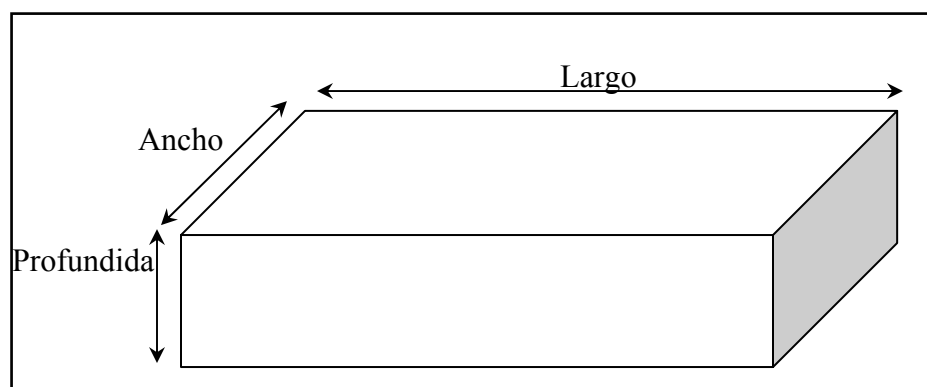


Figura 3: Descripción de dimensiones del cimiento

En el caso de utilizar elementos de armadura, podemos obtener las propiedades del elemento con la siguiente fórmula:

$$K = E_{\text{resorte}} A_{\text{resorte}} / L_{\text{resorte}} \quad (64)$$

Donde:

K = Rigidez del elemento.

E_{resorte} = Módulo de elasticidad del elemento.

A_{resorte} = Área axial del elemento.

L_{resorte} = Longitud del elemento.

Los valores de E y L son arbitrarios, por lo que se puede asumir cualquier, se recomienda utilizar unidades unitarias.

Al modelo se le debe colocar en el cimiento un soporte lateral, para evitar que la estructura sea inestable.

En el caso de este trabajo, se utilizó el Espectro de Diseño recomendado por AGIES para un suelo tipo S2.

El programa de computación a utilizar cuenta con la herramienta de un análisis elástico con resortes. Para poder realizar este análisis en un programa de computadora se deben seguir los siguientes pasos principales:

1. Especificar la geometría de la estructura.
2. Definir las propiedades de los materiales.
3. Especificar los elementos que forman parte de la estructura. Aquí se deben definir las características de las secciones transversales de los elementos del edificio. Estas características dependerán del material seleccionado.
4. Asignar a los elementos del modelo estructural las secciones especificadas en el paso anterior.
5. Se debe definir el Espectro de Diseño a utilizar. En este trabajo se utilizó el Espectro de Diseño recomendado por AGIES para un suelo tipo S2.

6. Asignar restricciones a los elementos y a los nudos. Los nudos en la estructura se deben definir libres.
7. Asignar las cargas estáticas a los nudos y/o elementos.
8. Asignar la masa en los nudos, correspondiente al peso propio de losas, acabados en losas, piso, etc.
9. Definir los casos del Espectro de diseño, donde se debe indicar su amortiguamiento (5%), su forma de combinación modal (SRSS), dirección de análisis y su factor de escala.
10. Definir las combinaciones de carga, en el caso de este trabajo se utilizaron las combinaciones presentadas por AGIES.
11. Debido a que se decidió que el programa no calculara el peso propio del modelo, si no se ingresaron las cargas bajo cargas muertas. Debido a ello, es necesario indicarle al programa que la fuente de masas de la estructura es la carga muerta.
12. Asignar un apoyo lateral a la altura del cimiento.
13. Dividir el cimiento en segmentos de 1.5 m de longitud.
14. En cada punto de intersección se deben asignar resortes, definiendo su rigidez y su dirección.
15. En las opciones de la corrida del análisis, marcar los grados de libertad y modos de vibración en consideración.

VI. EJEMPLOS

A. Descripción del modelo

1. Datos generales. El modelo a analizar es ficticio. El edificio presenta un sistema estructural de marcos de concreto reforzado. Es de 5 niveles de altura, con una altura total de 17.25 m. Está ocupado por apartamentos.

El modelo fue sujeto a un análisis por el método de corte estático equivalente, a tres análisis utilizando el método de la fuerza lateral equivalente (análisis interacción suelo-estructura: método simplificado) para encontrar un diferencial de cortante por características de tres distintos suelos, y tres análisis refinados sujetos a los suelos escogidos. Los tres tipos de suelo fueron escogidos al azar.

2. Geometría y características principales de la estructura. En la dirección “x” se tienen cuatro luces de 6 metros cada una y en la dirección “y” tres luces de 6 metros. El área total del edificio es 432 metros cuadrados. En el eje “z”, se tienen 5 losas la altura. El primer nivel tiene una altura de 4.25 m, y resto de 3.25 m cada una. Todas las columnas y vigas mantienen sus mismas dimensiones como se observa en el Cuadro 6.

Debido a que el trabajo trata sobre la comparación de resultados entre varios análisis, sólo se analizó en dirección “x” sobre el eje B. Pero debido a la simetría del edificio, sabemos que van a ser los mismos resultados para los ejes C, y el doble para los resultados de los ejes D y A.

El cimiento corrido tiene las dimensiones de 2.0 metros de ancho, 0.75 m de profundidad y 27.5 m de largo.

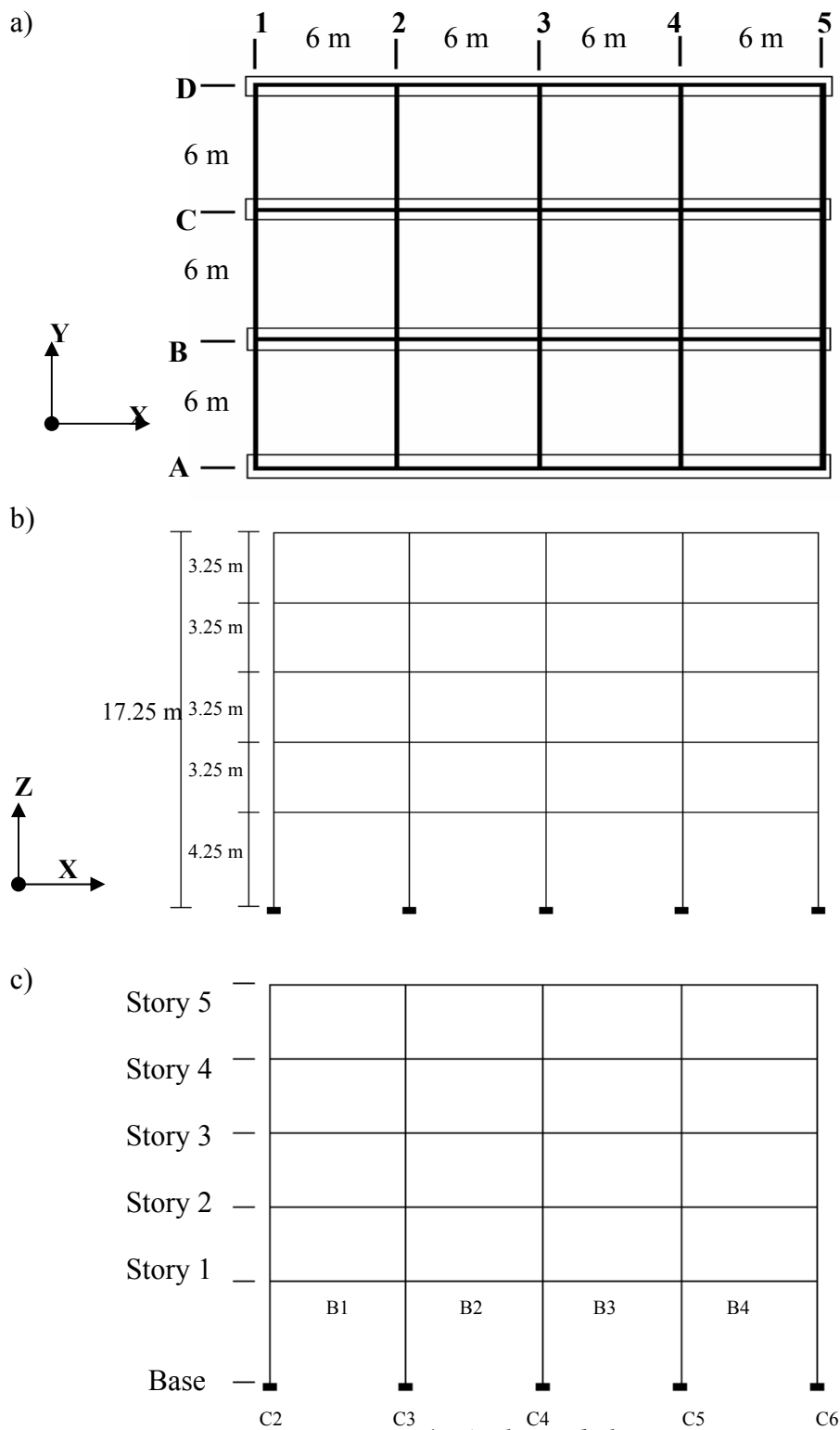


Figura 4: a) Planta de la estructura
 b) Elevación sobre el eje B
 c) Etiquetas del modelo

Cuadro 6: Características de los elementos estructurales

Elemento	F'c en kg/cm ² (lb/plg ²)	F'c en kg/cm ² (lb/plg ²)	Dimensiones (cm)
Columnas	281 (4,000)	(4,218) 60,000	60 x 60
Vigas			40 x 70
Losas			Losa nervurada prefabricada t = 27cm (con toping)

3. Cargas. Toda la integración de cargas se realizó utilizando una hoja electrónica. Para obtener los valores de la carga viva y muerta para un edificio de apartamentos, se utilizó el código UBC '97, con la ayuda de valores proporcionados también por una compañía de losas prefabricadas en Guatemala. Cabe mencionar que el programa ETABS es capaz de calcular el peso propio de la estructura, pero debido al interés educacional, se realizó la integración en la misma hoja electrónica. Debido al uso de losa prefabricada la integración se realizó por áreas tributarias.

Cuadro 7: Cargas uniformes

Tipo de carga	Categoría	Cargas
Viva	Residencial	196 kg/m ²
Muerta	Losa	566 kg/m ²
Muerta	Vigas	672 kg/m
Muerta	Columnas	864 kg/m
Muerta	Piso de Granito	60 kg/m ²
Muerta	Cielo Falso	20 kg/m ²
Muerta	Tabicación	150 kg/m ²
Muerta	Instalaciones	65 kg/m ²
Muerta	Relleno (10cm)	110 kg/m ²
Muerta	Baldosa de barro	90 kg/m ²

En el Cuadro 8 podemos observar la integración de cargas. Los subíndices 1 y 2 , representan la azotea y el resto de niveles respectivamente.

Cuadro 8: Resultados de integración de cargas y peso total de la estructura

Tipo de carga	Valores de cargas
Cargas muertas	
W_1	4,772.04 kg/m
W_2	6,500.04 kg/m
P_1	4,032.00 kg
P_2	6,840.00 kg
Cargas Vivas	
W_1	600.00 kg/m
W_2	1,173.00 kg/m
P_1	240.00 kg
P_2	469.46 kg
Peso Total de la estructura	812,377.40 kg (895.493 Ton)

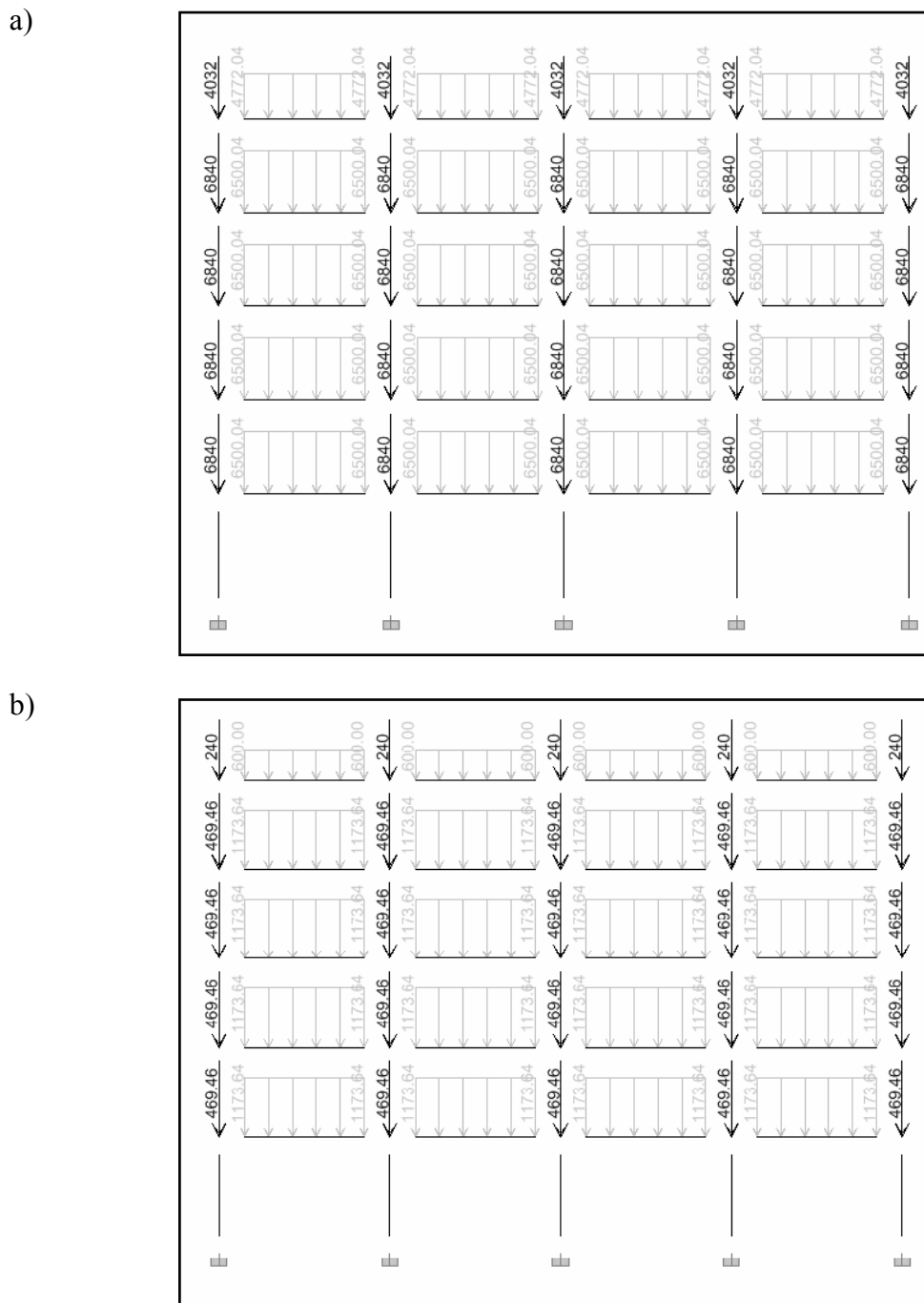


Figura 5: a) Interpretación de los resultados de integración de cargas muertas
b) Interpretación de los resultados de integración de cargas vivas

Los análisis estructurales se realizaron utilizando dos herramientas: a) una hoja electrónica, para los cálculos de cortante basal según el método de la carga estática equivalente y el procedimiento de la carga lateral equivalente (ATC). y b) un programa

de computación llamado ETABS v.8, para calcular las fuerzas y desplazamientos laterales y además para correr todo el análisis refinado.

4. Características de los suelos escogidos. A continuación se muestra una tabla con los valores de suelo escogidos al azar para el análisis.

Cuadro 9: Características de los suelos utilizados en el análisis

Características	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3
Módulo de Poisson	0.35	0.35	0.35
Aceleración máxima efectiva A_0	0.35 g	0.35 g	0.35 g
Módulo de Cortante (ton/m^2)	1,059.63	2,226.30	8,391.44
Velocidad de onda (m/s)	150	200	350
Peso específico (ton/m^3)	1.1	1.3	1.6
Módulo de Cortante Promedio (ton/m^2)	2,522.94	5,300.71	19,979.61
Coefficiente de Balasto K_s (kg/cm^3)	1.3	2.5	5

B. V_b estático, ΔV estático, deformaciones

A continuación se presentan los resultados obtenidos bajo el procedimiento recomendado por las normas AGIES por el método estático equivalente.

Para realizar este análisis se formuló una hoja electrónica (Apéndice 1) para calcular el coeficiente sísmico de diseño, el cortante estático equivalente es simplemente la multiplicación entre el coeficiente sísmico del diseño y el peso de la estructura.

Para realizar el procedimiento se tomaron los siguientes valores:

Cuadro 10: Valores utilizados en el procedimiento del cortante basal estático equivalente

Características	Valores
K_t	0.061
h_{total}	17.25 m
R_o	5
T_E	0.516 seg
q_1	2.5
q_2	2.5
q_3	0
q_4	2.5
q_5	2.5
q_6	2.5
q_7	0
q_8	0
Tipo se suelo	S2
Zona	4.2

Con estos valores se obtuvo un coeficiente sísmico de diseño de:

$$C_s = 0.1296$$

Que multiplicado por el peso de la estructura obtenemos el siguiente valor:

$$V_{Estático} = C_s \times W$$

$$V_{Estático} = 0.1296 \times 895.49 \text{ ton}$$

$$V_{Estático} = 116.06 \text{ ton}$$

Además utilizaremos el resultado del análisis modal para modelar este mismo procedimiento pero con el período del primer modo.

Por lo consiguiente utilizaremos $T = T_1$, o sea $T = 0.79883$ seg. Los resultados fueron los siguientes:

$$C_s = 0.0972$$

$$V'_{\text{Estático}} = 87.06 \text{ ton}$$

Es necesario revisar que el cortante no sea menor al cortante utilizando $1.4T_E$ como el período de diseño, o sea que $1.2 T_E = 0.6196$ seg. Se obtuvieron los siguientes resultados:

$$C_s = 0.1153$$

$$V''_{\text{Estático}} = 103.25 \text{ ton}$$

Debido a que $V'_{\text{Estático}} < V''_{\text{Estático}}$, se debe de utilizar los resultados de $V''_{\text{Estático}}$. Para el cálculo de las fuerzas sísmicas y desplazamientos se utilizó el programa ETABS v.8. Las diferencias con el procedimiento ya mencionado son las siguientes:

1. No se modela el cimiento corrido.
2. No se utiliza un espectro de diseño.

Los resultados obtenidos fueron las siguientes:

Cuadro 11: Desplazamientos corte estático equivalente

Altura	Nivel	Desplazamientos
17.25 m	5	2.68 cm
14.00 m	4	2.47 cm
11.75 m	3	2.07 cm
7.50 m	2	1.51 cm
4.25 m	1	0.83 cm

Cuadro 12: Fuerzas sísmicas acumuladas en cada nivel, corte estático equivalente

Nivel	Fuerzas sísmicas acumuladas en cada nivel
5	25.89 ton
4	55.56 ton
3	78.35 ton
2	94.24 ton
1	103.25 ton

Para realizar el procedimiento recomendado por las normas ATC, se utilizó una continuación de la hoja electrónica anterior, la cual se puede observar en el Apéndice 2.

El procedimiento de las normas recomendadas por ATC, es un procedimiento complementario al estático equivalente. Debido a ello, los valores utilizados fueron los ya descritos tanto como las características de la estructura como la de los suelos. Los resultados fueron los siguientes:

Cuadro 13: Análisis fuerza lateral equivalente

TIPO DE SUELO	SUELO 1	SUELO 2	SUELO 3
C_s'	0.0949	0.1053	0.1116
ΔV	18.28 ton	8.90 ton	3.25 ton
$V_{\text{basal efectivo}}$	84.94 ton	94.32 ton	99.98 ton
Desplazamientos Horizontales por nivel			
5	2.21 cm	2.45 cm	2.60 cm
4	2.03 cm	2.25 cm	2.39 cm
3	1.70 cm	1.89 cm	2.00 cm
2	1.24 cm	1.37 cm	1.46 cm
1	0.68 cm	0.76 cm	0.80 cm

Cuadro 13: (Continuación)

Fuerzas sísmicas acumuladas en cada nivel			
5	21.29 ton	23.64 ton	25.06 ton
4	45.68 ton	50.74 ton	53.78 ton
3	64.42 ton	71.55 ton	75.83 ton
2	77.49 ton	86.07 ton	91.22 ton
1	84.89 ton	94.30 ton	99.94 ton

El valor de C_s' que muestra la tabla, es el coeficiente sísmico de cada análisis, el cual se obtiene dividiendo el corte en la base reducido (V_{efectivo}) entre el peso de la estructura, es el necesario para realizar el resto del análisis el programa de computación.

C. V_b dinámico, ΔV_1 dinámico, deformaciones

Para el análisis modal se utilizó el espectro de diseño recomendado por AGIES para un tipo de suelo S2. El espectro no se encuentra normalizado pero si dividido por el factor de reducción de respuesta sísmica R (6.75). Los valores del espectro son los siguientes:

Cuadro 14: Valores del espectro de diseño recomendado por AGIES para un suelo tipo S2

Período T (seg)	Aceleración
0	0.052
0.1	0.117
0.11	0.123
0.12	0.130
0.2	0.130
0.3	0.130
0.4	0.130
0.5	0.130
0.6	0.118
0.7	0.106
0.8	0.097
0.9	0.090
1	0.084
1.1	0.078
1.2	0.074

Cuadro 14: (Continuación)

1.3	0.070
1.4	0.067
1.5	0.064
1.6	0.061
1.7	0.059
1.8	0.056
1.9	0.054

El análisis fue realizado utilizando el programa ETABS v.8. La diferencia con el procedimiento a llevar a cabo en el programa ya mencionado, es simplemente que no se modela con el cemento corrido.

Todas las combinaciones modales se realizaron por la raíz cuadrada de suma de cuadrados (SRSS). Los resultados principales del primer análisis fueron los siguientes:

Cuadro 15: Períodos y cortantes obtenidos en el primer análisis modal.

MODO	PERÍODO	V_{Base}
Modo 1	0.7988 seg	77.58 ton
Modo 2	0.2522 seg	9.51 ton
Modo 3	0.1397 seg	2.30 ton
Fuerza total en la base (SRSS)		78.20 ton

Debido a que las recomendaciones de AGIES, recomienda que el cortante modal no sea menor al cortante utilizando $1.4T_E$. Se obtuvieron los siguientes resultados:

$$1.4T_E = 0.72$$

Entonces;

$$V'_{\text{modal}} = 93.84 \text{ ton} > V_{\text{modal}} = 78.20 \text{ ton}$$

Por ello, y siguiendo las indicaciones de las recomendaciones, se deben de multiplicar los resultados por el factor $V'_{\text{modal}} / V_{\text{modal}} = 1.2$. Los resultados fueron los siguientes:

Cuadro 16: Cortante basal por modo, con factor $V'_{modal}/V_{modal} = 1.2$

MODO	Factor corrector	V _{Base}
Modo 1	1.2	93.092 ton
Modo 2		11.411 ton
Modo 3		2.760 ton
Fuerza total en la base (SRSS)		93.83 ton

El procedimiento recomendado por las normas ATC, fue realizado utilizando los resultados del análisis modal en ETABS y complementado con el uso de dos hojas electrónicas (Apéndices 2 y 3). Los resultados para este análisis se dividieron en resultados generales y específicos de cada suelo.

Resultados del análisis modal para el primer modo, utilizado para los análisis de los tres distintos tipos de suelos:

Cuadro 17: Datos generales del primer modo

Nivel	h	phi	W	W*phi*h	W*phi	W*(phi^2)
1	4.25	0.00142	190.26573	1.14825371	0.270177343	0.000384
2	7.5	0.00256	190.26573	3.653102108	0.487080281	0.001247
3	10.75	0.00348	190.26573	7.117841139	0.662124757	0.002304
4	14	0.00412	190.26573	10.97452758	0.783894827	0.00323
5	17.25	0.00444	134.73515	10.31936519	0.598224069	0.002656
Σ				33.21	2.80	0.01

Cuadro 18: Resultados generales para el análisis modal según ATC

Variables	Resultados
T ₁	0.79883
K ₁	1,604.27 ton/m
Ŵ ₁	799.18 ton
h	11.855 m

Resultados para los distintos tipos de suelo:

Cuadro 19: Resultados del análisis modal según ATC

Tipo de Suelo	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3
ΔV	7.17 ton	3.23 ton	0.65 ton
$V_{\text{efectivo modo 1}}$	70.41 ton	74.35 ton	76.93 ton
V_{m2}	9.51 ton	9.51 ton	9.51 ton
V_{m3}	2.30 ton	2.30 ton	2.30 ton
SRRS	<i>71.09 ton</i>	<i>74.99 ton</i>	<i>77.55 ton</i>

D. Análisis refinado

Para este análisis se utilizó programa ETABS v.8, con el procedimiento encontrado en el capítulo de descripción del análisis. Además se utilizó una hoja electrónica (Apéndice 4) para el cálculo de las rigideces de los resortes. Los resultados del análisis fueron los siguientes:



Figura 6: Modelo ingresado al programa ETABS.

Cuadro 20: Valores de rigideces de los resortes

	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3
Rigidez	3.9×10^6 kg/m	7.5×10^6 kg/m	15×10^6 kg/m

Cuadro 21: Resultados análisis refinado

TIPO DE SUELO	SUELO 1	SUELO 2	SUELO 3
Períodos			
Modo 1	0.8777 seg	0.8503 seg	0.8320 seg
Modo 2	0.2579 seg	0.2582 seg	0.2571 seg
Modo 3	0.1416 seg	0.1877 seg	0.1499 seg
Fuerzas sísmicas, Espectro de AGIES			
Modo 1	73.218 ton	74.725 ton	76.017 ton
Modo 2	9.912 ton	9.835 ton	9.471 ton
Modo 3	1.917 ton	0 ton	0 ton
V_{basal} (SRRS)	<i>73.910 ton</i>	<i>75.369 ton</i>	<i>76.604 ton</i>
Desplazamientos horizontales máximos por nivel			
5	2.26 cm	2.14 cm	2.07 cm
4	2.05 cm	1.96 cm	1.90 cm
3	1.72 cm	1.65 cm	1.62 cm
2	1.27 cm	1.23 cm	1.20 cm
1	0.73 cm	0.70 cm	0.69 cm
Fuerzas sísmicas acumuladas en cada nivel			
5	17.579 ton	17.468 ton	17.591 ton
4	37.915 ton	38.392 ton	38.863 ton
3	53.898 ton	54.784 ton	55.645 ton
2	66.045 ton	67.326 ton	68.459 ton
1	73.910 ton	75.369 ton	76.604 ton

Para facilitar la lectura de los resultados, se muestran las siguientes tablas:

Cuadro 22: Resumen de resultados de cortantes basales.

Tipo de análisis	Cortante Basal
<i>Empotrado en la base</i>	
Estático Equivalente (AGIES)	103.25 ton
Fuerza Lateral Equivalente (ATC)	
Suelo 1	84.94 ton
Suelo 2	94.32 ton
Suelo 3	99.98 ton
Modal (AGIES)	93.83 ton
Modal (ATC)	
Suelo 1	71.09 ton
Suelo 2	74.99 ton
Suelo 3	77.55 ton
Análisis Refinado	
Suelo 1	73.91 ton
Suelo 2	73.37 ton
Suelo 3	76.60 ton

Cuadro 23: Resumen de Desplazamientos por nivel.

Tipo de análisis	Desplazamientos			
<i>Estático Equivalente (AGIES)</i>	<i>S2</i>	<i>Suelo 1</i>	<i>Suelo 2</i>	<i>suelo 3</i>
<i>Nivel 1</i>	2.68 cm			
<i>Nivel 2</i>	2.47 cm			
<i>Nivel 3</i>	2.07 cm			
<i>Nivel 4</i>	1.51 cm			
<i>Nivel 5</i>	0.83 cm			
<i>Fuerza Lateral Equivalente (ATC)</i>				
<i>Nivel 1</i>		2.21 cm	2.45 cm	2.60 cm
<i>Nivel 2</i>		2.03 cm	2.25 cm	2.39 cm
<i>Nivel 3</i>		1.70 cm	1.89 cm	2.00 cm
<i>Nivel 4</i>		1.24 cm	1.37 cm	1.46 cm
<i>Nivel 5</i>		0.68 cm	0.76 cm	0.80 cm
<i>Análisis Refinado</i>				
<i>Nivel 1</i>		2.26 cm	2.14 cm	2.07 cm
<i>Nivel 2</i>		2.05 cm	1.96 cm	1.90 cm
<i>Nivel 3</i>		1.72 cm	1.65 cm	1.62 cm
<i>Nivel 4</i>		1.27 cm	1.23 cm	1.20 cm
<i>Nivel 5</i>		0.73 cm	0.70 cm	0.69 cm

Cuadro 24: Resumen de Fuerzas sísmicas.

Tipo de análisis	Fuerzas sísmicas acumuladas en cada nivel			
<i>Estático Equivalente (AGIES)</i>	<i>S2</i>	<i>Suelo 1</i>	<i>Suelo 2</i>	<i>suelo 3</i>
<i>Nivel 1</i>	25.89 ton			
<i>Nivel 2</i>	55.56 ton			
<i>Nivel 3</i>	78.35 ton			
<i>Nivel 4</i>	94.24 ton			
<i>Nivel 5</i>	103.25 ton			
<i>Fuerza Lateral Equivalente (ATC)</i>				
<i>Nivel 1</i>		21.29 ton	23.64 ton	25.06 ton
<i>Nivel 2</i>		45.68 ton	50.74 ton	53.78 ton
<i>Nivel 3</i>		64.42 ton	71.55 ton	75.83 ton
<i>Nivel 4</i>		77.49 ton	86.07 ton	91.22 ton
<i>Nivel 5</i>		84.89 ton	94.30 ton	99.94 ton
<i>Análisis Refinado</i>				
<i>Nivel 1</i>		17.58 ton	17.47 ton	17.59 ton
<i>Nivel 2</i>		37.92 ton	38.39 ton	38.86 ton
<i>Nivel 3</i>		53.90 ton	54.78 ton	55.64 ton
<i>Nivel 4</i>		66.04 ton	67.33 ton	68.46 ton
<i>Nivel 5</i>		73.91 ton	75.37 ton	76.60 ton

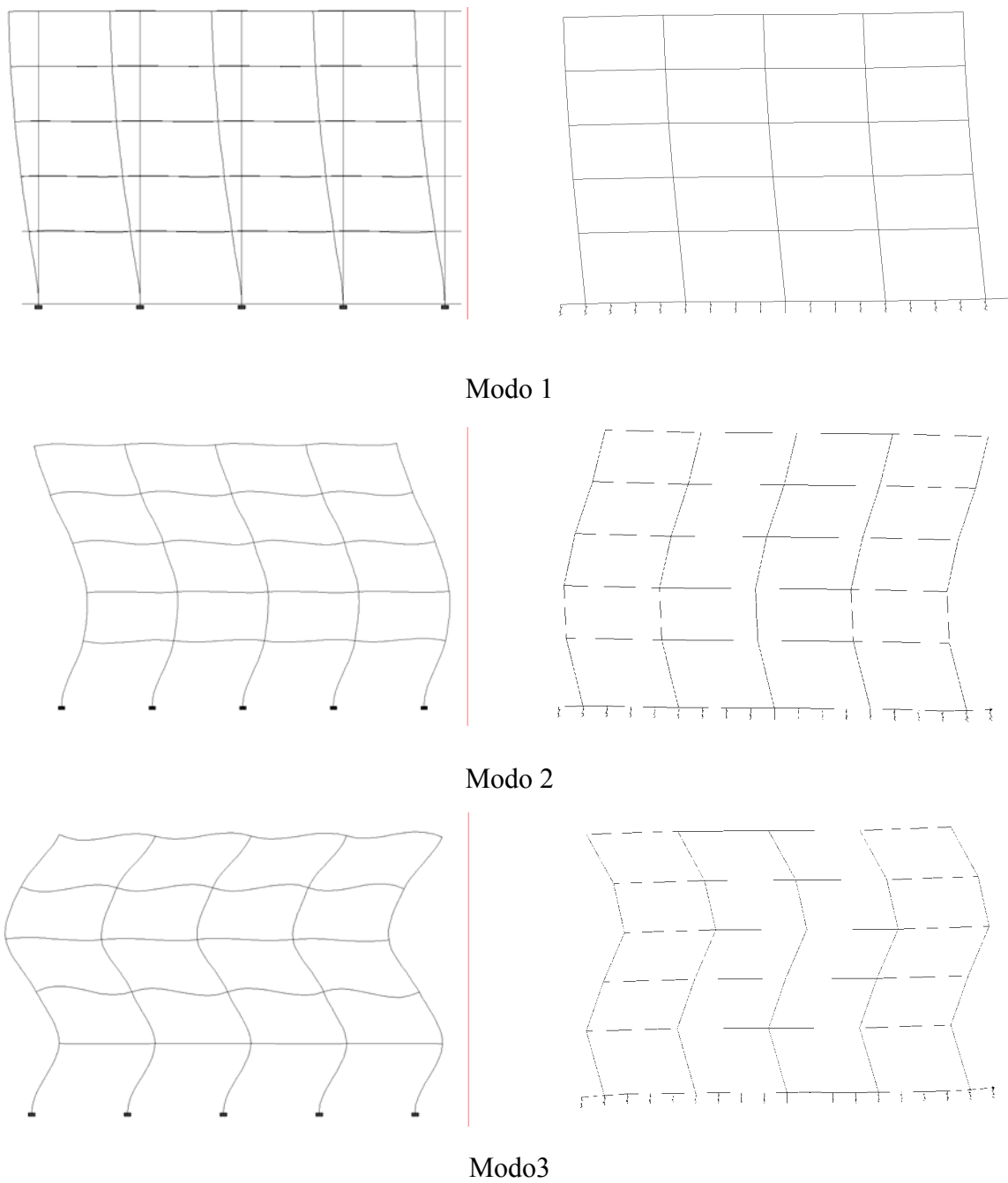


Figura 7: Comparación en la forma modal, entre los análisis interacción suelo-estructura simplificado y el refinado para el suelo 1

VII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Efectivamente, el procedimiento recomendado por las normas de AGIES por el método de la carga sísmica equivalente es el más conservador. Debido a que el objetivo de este trabajo es la comparación entre los procedimientos alternos con dicho análisis, los resultados se basarán en el obtenido del mismo. Modelar la estructura empotrada es para muchos ingenieros estructurales un procedimiento mucho más rápido aunque conservador.

El método de la carga sísmica equivalente, podría tener varios resultados, según la cantidad de ciclos que el profesional sea capaz de realizar. Se puede observar que el resultado del primer ciclo, utilizando el período genérico empírico T_E , es bastante conservador, y tiene una diferencia bastante significativa al tomar en cuenta el período fundamental de vibración obtenido por el método de Rayleigh (2^{do} ciclo). A pesar de la diferencia, las normas no permiten utilizar un período mayor a 1.2 veces el período empírico (3^{er} ciclo). Este período máximo surge debido a que estamos considerando la estructura empotrada. Esta consideración incrementa la rigidez del sistema, reduciendo el período y aumentando simultáneamente el cortante. Debido a ello el resultado a utilizar será 103.25ton como nuestro cortante basal utilizando el método de carga sísmica equivalente.

El procedimiento del método de análisis estructural interacción suelo-estructura simplificado según normas de ATC (método de la fuerza lateral equivalente), muestra un resultado significativo según el tipo de suelo utilizado. Los valores de las características de los suelos utilizados, fueron valores escogidos al azar, debido a que no existen tablas específicas para todos los suelos. Sabemos que mientras más rígido es un material, mayor es su densidad y las ondas viajan en él a una velocidad más alta. Los resultados confirman lo descrito. Los resultados muestran que podría no ser necesario realizar este procedimiento cuando existan suelos relativamente rígidos. Pero, por el otro lado, si el suelo es relativamente flexible, podríamos tener una reducción alrededor de un 15% en el cortante basal.

Debido a que este último procedimiento es complementario al método de la carga estática equivalente, ya trae las restricciones del cortante desde el procedimiento anterior; es decir se está trabajando con los resultados del 3^{er} ciclo de análisis. Los resultados de los análisis interacción suelo-estructura utilizando los resultados de Rayleigh (2^{do} ciclo) se pueden observar en el Apéndice 2.

Como se pudo observar en los resultados, en todos los análisis modales, solo se obtuvieron los resultados de los cortantes basales de los primeros tres modos. Esto fue debido a que el programa de computación ETABS v.8, no muestra las matrices de deformaciones y fuerzas sísmicas acumuladas por nivel para cada modo de vibración; sólo muestra los cortantes por modo.

El primer ciclo del análisis modal recomendado por las normas AGIES, dio un resultado de 78.20ton. Pero las normas no permiten utilizar un cortante menor, al obtenido utilizando $1.4T_E$ como período fundamental. Notamos que esta vez las normas permiten un 20% más al período empírico, el código permite esto debido a que, es un método más exacto y a la vez efectivo. El resultado muestra que debemos corregir nuestros valores incrementándolos en un 20%, obtenemos un cortante modal de 93.83ton, 10% menor al procedimiento del cortante estático equivalente.

Con respecto al análisis modal recomendado por las normas ATC, encontramos resultados bastante significativos. Pero debemos hacer énfasis que en este procedimiento no estamos utilizando un límite en el período de la estructura, tal como lo fue el $1.4T_E$ de método modal según las normas recomendadas por AGIES. Debido a ello, los resultados son bastante bajos, tenemos un cortante promedio de 74.54 ton. Comparando este resultado, con el obtenido en el análisis modal por AGIES antes de utilizar el $1.4T_E$ (78.20 ton), la diferencia ya no es tanta. En todas las normas utilizadas, no aparece explícitamente que debamos utilizar algún factor para modificar el período de la estructura, pero debido a que en los otros métodos fue utilizado, se propone utilizar alguno. En el caso de las normas recomendadas por AGIES, se utiliza un factor de 1.4, debido a que la estructura se encuentra empotrada en la base durante el análisis, por lo

que el factor modificador para el procedimiento recomendado por ATC no podría ser el mismo. Con los resultados obtenidos y efectuando el procedimiento de atrás para adelante, se ha llegado a proponer un factor modificador del período de la estructura de $1.6T_E$. Con este factor multiplicador se obtendría un cortante promedio, para los suelos analizados, de 85.13ton. La diferencia es de casi un 10% comparado con el procedimiento modal, empotrado en la base.

Los resultados del método interacción suelo-estructura refinado, son bastantes similares entre los distintos suelos utilizados, a pesar que las rigideces utilizadas en los resortes varía casi el doble entre los primeros dos suelos, y el doble entre el segundo y el tercero suelo. La diferencia no llega a ser mayor a tres toneladas. Esto quiere decir, que solo por la consideración de la interacción suelo-estructura se puede reducir considerablemente el cortante basal. Comparando con el método de la carga sísmica equivalente, tenemos un 37% de reducción promedio. Las diferencias entre el análisis simplificado y refinado, son mínimas, si no se tomara en cuenta el factor que se ha propuesto. Si se tomara en cuenta la diferencia sería de un 13%. Con estos resultados método refinado que se propone podría convertirse en el más recomendable. Siempre y cuando el diseñador cuente con una herramienta como lo es el programa ETABS v.8. De lo contrario el método recomendado por ATC para el análisis modal tomando en cuenta la interacción suelo-estructura pasaría a ser el más recomendable.

En las tablas de resultados se pudo observar que las diferencias entre los desplazamientos horizontales no son notables. Aunque al comparar los resultados del método de la carga sísmica equivalente con los resultados del método refinado, si podríamos reafirmar los resultados sobre los cortantes basales.

Las normas recomendadas por ATC, recomiendan procedimientos para lograr una mejor exactitud de diseño. Pero estos procedimientos pueden tener un impacto económico, debido a que es necesario un estudio de suelos mucho más profundo. Llevar a cabo estos procedimientos, es recomendable solo para cuando se está trabajando con una estructura de alta importancia.

El método interacción suelo-estructura refinado propuesto, sigue considerando algunas de las asunciones ya mencionadas; sin embargo, es un procedimiento más exacto, y para ciertas estructuras podría ser un método bastante eficaz.

VIII. CONCLUSIONES

1. Los análisis que consideran la estructura empotrada en la base son fáciles y rápidos de aplicar, teniendo inherentemente un grado de conservacionismo.
2. Se recomienda un análisis estructural suelo-estructura, requiriendo las propiedades de los suelos y una herramienta adecuada de computo. Mientras más específicos y más refinados estén los estudios de suelos, el análisis del modelo va a tender a ser más real.
3. Los programas estructurales son herramientas sumamente útiles en el análisis estructural. Pero sin los conocimientos necesarios, los resultados no pueden ser analizados, perdiendo totalmente su confiabilidad.
4. Con el avance de la tecnología, los profesionales que se dedican a analizar y diseñar estructuras, deberían de considerar utilizar un procedimiento más exacto que el de considerar la estructura empotrada en la base.
5. El costo del estudio de suelos podría no ser significativo, en ciertos casos, comparado con el ahorro en la construcción de la estructura.

IX. RECOMENDACIONES

1. Hacer un estudio más completo para establecer un límite al cortante según el procedimiento de análisis interacción suelo-estructura simplificado modal.
2. Se recomienda a los desarrolladores de software en ingeniería estructural, que en las versiones estudiantiles de sus programas, permitan observar mayor información de las propiedades de la estructura
3. Se le recomienda a la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (AGIES), agregar los capítulos necesarios para realizar un análisis interacción suelo-estructura.
4. A todos los centros educativos superiores, el uso de herramientas potenciales, como lo es el ETABS, no son métodos que puedan sustituir clases educativas. Sin los principios de análisis y diseño, es imposible hacer útil una herramienta de esta categoría. Pero sí se recomienda agregar a su material a cubrir durante la carrera el uso de algún paquete potencial.

X. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bowles, Joseph E. 1977. *Foundation Analysis and Design*. United States of America, Mc. Graw-Hill. 750 pages.
- Hunt, Roy E. 1986. *Geotechnical Engineering Analysis and Evaluation*. United States of America, Mc. Graw-Hill. 729 pages.
- Molina P., Miguel Ángel. 1990. *Comportamiento de Taludes Bajo Cargas Sísmicas, Un Caso Particular*. Tesis de Maestría Universidad del Valle de Guatemala. 288 págs.
- Muzás L., Fernando. 2002. <<Consideraciones Sobre la Elección de Coeficientes de Balasto>>. *Revista de Obras Públicas*. 3 (427): 45-51.
- NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and other Structures (FEMA Publication 302)*. 1997. Building Seismic Safety Council. California, United States of America.
- Normas Estructurales de Diseño y Construcción Recomendadas para la República de Guatemala*. 1996. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (AGIES). Guatemala.
- Reglamentos para el Diseño de Ingeniería Estructural*. 1997. Código Uniforme de la Edificación (UBC). Volumen 2. 5ª ed. California, EE.UU.
- Tentative Provisions for the Development of Seismic regulations for Buildings, ATC 3-06*. 1996. Applied Technology Council (ATC). California, United States of America.

XI. APÉNDICE

Apéndice 1: Corte Estático Equivalente (AGIES)

Periodo de vibración fundamental empírico

Kt= 0.061
 h total= 17.25 m
 $Te = Kt \cdot hn^{0.75}$
 Te= 0.619587868

Vb=CsWs
Vb = 103.2 Tons

PASO 1: Ws
 Ws= 895.49 tons

PASO 2: Factor genérico de reducción Ro
 Por tabla
 Ro= 5

Paso 3: Índice q1, número de tramos
 Por tabla
 Dirección x q1= 2.5 Dirección y q1= no es el caso

Paso 4: Índice q2, número de ejes estructurales
 Por tabla
 Dirección x q2= 2.5 Dirección y q2= no es el caso

Paso 5: Índice q3, Presencia de muros o riostras
 Por tabla
 Dirección x q3= 0 Dirección y q3= no es el caso

Paso 6: Índice q4, Regularidad en planta
 Por tabla
 Dirección x q4= 2.5 Dirección y q4= no es el caso

Paso 7: Índice q5, Excentricidad en planta
 Por tabla
 Dirección x q5= 2.5 Dirección y q5= no es el caso

Paso 8: Índice q6, Isotropía en planta
 Por tabla
 Dirección x q6= 2.5 Dirección y q6= no es el caso

Paso 9: Índice q7, Regularidad en elevación
 Por tabla
 Dirección x q7= 0 Dirección y q7= no es el caso

Paso 10: Índice q8, Condición de piso suave
 Por tabla
 Dirección x q8= 0 Dirección y q8= no es el caso

Paso 11: Factor de Calidad sismo-resistente Q

$Q = 1.00 + 0.01(\sum qi)$
 Dirección x Q= 1.125

Dirección y Q= #j VALOR!

Si $0.8 < Q < 1.15$ modificar proyecto

Paso 12: Factor de Reducción de Respuesta Sísmica R
 $R = 1.2RoQ$
 R= 6.75

Paso 13: Perfil del Suelo
 Perfil: s2

Paso 14: Períodos de vibración que definen al espectro sísmico de diseño Ta y Tb

Por tabla
 Ta = 0.12 siempre es este valor
 Tb = 0.52

Paso 15: Período de Vibración T
 T=Te

T = 0.61958787 componer de vuela

Paso 16: Función de Amplificación Dinámica D(T)

Por Tabla
 D(T) = 2.22 tenía 2.5

Paso 17: Aceleración Máxima Efectiva Ao

Por Tabla
 Zona 4.2 lo = 4
 Ao = 0.35 g
 Af = 0.15 g

Paso 18: Espectro Básico de Diseño Sa(T)

Sa(T) = AoD(T)
 Sa(T) = 0.77807479

Paso 19: Coeficiente Sísmico de Diseño Cs

T > TA Cs = Sa(T)/R
 T < TA Cs = Sa(T)/[1 + (R - 1)T/TA]
 Cs = 0.11527034

Apéndice 2a: Procedimiento normas ATC, delta V; para suelo 1

Propiedades de la estructura

Largo del cimiento = 27 m
 Ancho del cimiento = 2 m
 Embebido del cimiento = 0.75 m
 Area total del cimiento = 54 m²
 Inercia del cimiento = 6561 m⁴
 Periodo de AGIES = 0.620 seg

Propiedades del suelo

Modulo de poisson $\nu = 0.35$ Peso especifico del suelo = 1.1 ton/m³
 Modulo de cortante G = 1059.633 ton/m² Modulo de cortante promedio = 2522.936 ton/m²
 velocidad de honda = 150 m/s Factor multiplicador = 0.42 segun tabla 6-A ATC
 (Av)

Paso 1: Coeficiente sísmico, agies Cs

Cs = 0.12

Paso 2: Peso efectivo del edificio \hat{W}

$\hat{W} = 0.7 \cdot W = 626.84$ tons

Paso 3: Rigidez efectiva del edificio K

$\hat{K} = 4,071.46$ ton/m

Paso 4: Altura efectiva del edificio \bar{h}

$\bar{h} = 0.7h_n = 12.075$ m

Paso 5: Radios equivalentes a un cimiento circular

rai = 2.34 rmi = 9.56

Paso 6: Calculo de rigideces horizontal, vertical y torcional

Kxi = 17,208.99 ton/m
 Kyi = 7,706.42 ton/m
 K θ i = 6,591,846.69 ton/m

Paso 7: Distancia normales del centroide del cim. al centroide de la estructura

yi = 0 m

Paso 8: Rigideces lateral y rocosa del cimiento

Ky = 7,706.42 ton/m
 K θ = 6,591,846.69 ton/m

Paso 9: Periodo efectivo del edificio \hat{T}

$\hat{T} = 0.788211507$

Paso 10: Nueva funcion de Amplificacion Dinamica D(T)

Por Tabla

D(T) = 1.891958441

Paso 11: Nuevo Espectro Basico de Diseño Sa(T)

Sa(T) = AoD(T)

Sa(T) = 0.662185454

Paso 12: Nuevo Coeficiente Sísmico de Diseño \hat{C}_s

T > TA Cs = Sa(T)/R
 T < TA Cs = Sa(T)/[1 + (R - 1)T/TA]
 $\hat{C}_s = 0.098101549$

Paso 13: Caracteristicas del largo del cimiento

$\bar{h}/L = 0.447222222$

si $\bar{h}/L < 0.5$ entonces r = ra = 4.145925

si $\bar{h}/L > 1$ entonces r = rm = 9.560262

Si el valor es intermedio, se debe de interpolar

Paso 14: Calcular el valor de \bar{h}/r y \bar{T}/T

Insertar el valor de r obtenido en el paso anterior = 4.14592

$\bar{h}/r = 2.91250193$

$\bar{T}/T = 1.272154521$

Paso 15: Ir a grafica y obtener valor del amortiguamiento β_0

$\beta_0 = 0.045$

Paso 16: Calcular el valor del amortiguamiento efectivo β_{ef}

$\beta_{ef} = 0.069285688$ (Tef/T)³ = 2.058826

Paso 17: Calcular el reductor del cortante ΔV

$\Delta V = 18.28487$ tons modifique

CORTANTE REDUCIDO

Vef = 84.94 tons

El cortante reducido no puede NUNCA ser menor a 0.7V

V = 103.2237594 tons

0.7V = 72.25663161 tons

Cs para ingresar en el programa SAP

Cs = 0.0949

Apéndice 2b: Procedimiento normas ATC, delta V; para suelo 2

Propiedades de la estructura

Largo del cimiento = 27 m
 Ancho del cimiento = 2 m
 Embebido del cimiento = 0.75 m
 Area total del cimiento = 54 m²
 Inercia del cimiento = 6561 m⁴
 Periodo de AGIES = 0.620 seg

Propiedades del suelo

Modulo de poisson ν = 0.35 Peso especifico del suelo = 1.3 ton/m³
 Modulo de cortante G = 2226.3 ton/m² Modulo de cortante promedio = 5300.714 ton/m²
 velocidad de onda = 200 m/s Factor multiplicador = 0.42 segun tabla 6-A ATC
 (Av)

Paso 1: Coeficiente sísmico, agies Cc
 Cs = 0.1153

Paso 2: Peso efectivo del edificio \dot{W}
 $\dot{W} = 0.7 \cdot W = 626.84$ tons

Paso 3: Rigidez efectiva del edificio K
 $\dot{K} = 4,071.46$ ton/m

Paso 4: Altura efectiva del edificio \dot{h}
 $\dot{h} = 0.7h_n = 12.075$ m

Paso 5: Radios equivalentes a un cimiento circular
 $r_{ai} = 2.34$ $r_{mi} = 9.56$

Paso 6: Calculo de rigideces horizontal, vertical y torcional
 $K_{xi} = 36,156.27$ ton/m
 $K_{yi} = 16,191.27$ ton/m
 $K_{\theta i} = 13,849,536.48$ ton/m

Paso 7: Distancia normales del centroide del cim. al centroide de la estructura
 $y_i = 0$ m

Paso 8: Rigideces lateral y rocosa del cimiento
 $K_y = 16,191.27$ ton/m
 $K_{\theta} = 13,849,536.48$ ton/m

Paso 9: Periodo efectivo del edificio \dot{T}
 $\dot{T} = 0.704894889$

Paso 10: Nueva funcion de Amplificacion Dinamica D(T)
 Por Tabla
 $D(T) = 2.039007985$

Paso 11: Nuevo Espectro Basico de Diseño Sa(T)
 $S_a(T) = A_o D(T)$
 $S_a(T) = 0.713652795$

Paso 12: Nuevo Coeficiente Sísmico de Diseño \dot{C}_s
 $T > T_A$ $C_s = S_a(T)/R$
 $T < T_A$ $C_s = S_a(T)/[1 + (R - 1)T/T_A]$
 $\dot{C}_s = 0.10572634$

Paso 13: Caracteristicas del largo del cimiento

$\dot{r}/L = 0.447222222$
 si $\dot{r}/L < 0.5$ entonces $r = r_a = 4.145925$
 si $\dot{r}/L > 1$ entonces $r = r_m = 9.560262$

Si el valor es intermedio, se debe de interpolar

Paso 14: Calcular el valor de \dot{r}/r y \dot{T}/T

Insertar el valor de r obtenido en el paso anterior = 4.14592
 $\dot{r}/r = 2.91250193$
 $\dot{T}/T = 1.137683492$

Paso 15: Ir a grafica y obtener valor del amortiguamiento β_o

$\beta_o = 0.022$

Paso 16: Calcular el valor del amortiguamiento efectivo β_{ef}

$\beta_{ef} = 0.055955149$ $(T_{ef}/T)^3 = 1.472531$

Paso 17: Calcular el reductor del cortante ΔV

$\Delta V = 8.90$ tons

CORTANTE REDUCIDO

V_{ef} = 94.32 tons

El cortante reducido no puede ser menor a 0.7V

V = 103.2237594 tons
 0.7V = 72.25663161 tons

Cs para ingresar en el programa ETABS v.8

Cs = 0.1053

Apéndice 2c: Procedimiento normas ATC, delta V; para suelo 3

Propiedades de la estructura

Largo del cimiento = 27 m
 Ancho del cimiento = 2 m
 Embebido del cimiento = 0.75 m
 Area total del cimiento = 54 m²
 Inercia del cimiento = 6561 m⁴
 Periodo de AGIES = 0.620 seg

Propiedades del suelo

Modulo de poisson $\nu = 0.35$ Peso especifico del suelo = 1.6 ton/m³ Valores dados por Matzdorf
 Modulo de cortante $G = 8391.437$ ton/m² Modulo de cortante promedio = 19979.61 ton/m²
 velocidad de honda = 350 m/s Factor multiplicador = 0.42 segun tabla 6-A ATC
 (Av)

Paso 1: Coeficiente sísmico, C_s
 $C_s = 0.12$

Paso 2: Peso efectivo del edificio \hat{W}
 $\hat{W} = 0.7 \cdot W = 626.84$ tons

Paso 3: Rigidez efectiva del edificio K
 $\hat{K} = 4,071.46$ ton/m

Paso 4: Altura efectiva del edificio \bar{h}
 $\bar{h} = 0.7h_n = 12.075$ m

Paso 5: Radios equivalentes a un cimiento circular
 $r_{ai} = 2.34$ $r_{mi} = 9.56$

Paso 6: Calculo de rigideces horizontal, vertical y torcional
 $K_{xi} = 136,281.33$ ton/m
 $K_{yi} = 61,028.63$ ton/m
 $K_{\theta i} = 52,202,099.06$ ton/m

Paso 7: Distancia normales del centroide del cim. al centroide de la estructura
 $y_i = 0$ m

Paso 8: Rigideces lateral y rocosa del cimiento
 $K_y = 61,028.63$ ton/m
 $K_{\theta} = 52,202,099.06$ ton/m

Paso 9: Periodo efectivo del edificio \hat{T}
 $\hat{T} = 0.643323752$

Paso 10: Nueva funcion de Amplificacion Dinamica $D(T)$
 Por Tabla
 $D(T) = 2.167776112$

Paso 11: Nuevo Espectro Basico de Diseño $S_a(T)$
 $S_a(T) = A_o D(T)$
 $S_a(T) = 0.758721639$

Paso 12: Nuevo Coeficiente Sismico de Diseño \hat{C}_s
 $T > T_A$ $C_s = S_a(T)/R$
 $T < T_A$ $C_s = S_a(T)/[1 + (R - 1)T/T_A]$
 $\hat{C}_s = 0.112403206$

Paso 13: Caracteristicas del largo del cimiento

$\bar{h}/L = 0.447222222$
 si $\bar{h}/L < 0.5$ entonces $r = r_a = 4.145925$
 si $\bar{h}/L > 1$ entonces $r = r_m = 9.560262$

Si el valor es intermedio, se debe de interpolar

Paso 14: Calcular el valor de \bar{h}/r y \hat{T}/T

Insertar el valor de r obtenido en el paso anterior = 4.14592
 $\bar{h}/r = 2.91250193$
 $\hat{T}/T = 1.038309148$

Paso 15: Ir a grafica y obtener valor del amortiguamiento β_o

$\beta_o = 0.008$

Paso 16: Calcular el valor del amortiguamiento efectivo β_{ef}

$\beta_{ef} = 0.052667327$ $(T_{ef}/T)^3 = 1.119386$

Paso 17: Calcular el reductor del cortante ΔV

$\Delta V = 3.24690$ tons modifique

CORTANTE REDUCIDO

$V_{ef} = 99.98$ tons

El cortante reducido no puede NUNCA ser menor a 0.7V

$V = 103.2237594$ tons
 $0.7V = 72.25663159$ tons

Cs para ingresar en el programa SAP

$C_s = 0.1116$

Apéndice 2d: Procedimiento normas ATC, delta V; para suelo 1 utilizando resultados de Rayleigh (segundo ciclo)

Propiedades de la estructura

Largo del cimiento = 27 m
 Ancho del cimiento = 2 m
 Embebido del cimiento = 0.75 m
 Area total del cimiento = 54 m²
 Inercia del cimiento = 6561 m⁴
 Periodo de AGIES = 0.799 seg

Propiedades del suelo

Modulo de poisson $\nu = 0.35$ Peso especifico del suelo = 1.1 ton/m³
 Modulo de cortante $G = 1059.633$ ton/m² Modulo de cortante promedio = 2522.936 ton/m²
 velocidad de honda = 150 m/s Factor multiplicador = 0.42 segun tabla 6-A ATC
 (Av)

Paso 1: Coeficiente sísmico, agies Cs
 Cs = 0.12

Paso 2: Peso efectivo del edificio \hat{W}
 $\hat{W} = 0.7 \cdot W = 626.84$ tons

Paso 3: Rigidez efectiva del edificio \hat{K}
 $\hat{K} = 3,157.90$ ton/m

Paso 4: Altura efectiva del edificio \hat{h}
 $\hat{h} = 0.7h_n = 12.075$ m

Paso 5: Radios equivalentes a un cimiento circular
 $r_{ai} = 2.34$ $r_{mi} = 9.56$

Paso 6: Calculo de rigideces horizontal, vertical y torcional
 $K_{xi} = 17,208.99$ ton/m
 $K_{yi} = 7,706.42$ ton/m
 $K_{\theta i} = 6,591,846.69$ ton/m

Paso 7: Distancia normales del centroide del cim. al centroide de la estructura
 $y_i = 0$ m

Paso 8: Rigideces lateral y rocosa del cimiento
 $K_y = 7,706.42$ ton/m
 $K_{\theta} = 6,591,846.69$ ton/m

Paso 9: Periodo efectivo del edificio \hat{T}
 $\hat{T} = 0.971695563$

Paso 10: Nueva funcion de Amplificacion Dinamica D(T)
 Por Tabla
 $D(T) = 1.644436098$

Paso 11: Nuevo Espectro Basico de Diseño Sa(T)
 $S_a(T) = A_o D(T)$
 $S_a(T) = 0.575552634$

Paso 12: Nuevo Coeficiente Sísmico de Diseño \hat{C}_s
 $T > T_A$ $C_s = S_a(T)/R$
 $T < T_A$ $C_s = S_a(T)/[1 + (R - 1)T/T_A]$
 $\hat{C}_s = 0.085267057$

Paso 13: Caracteristicas del largo del cimiento

$\bar{r}/L = 0.447222222$
 si $\bar{r}/L < 0.5$ entonces $r = r_a = 4.145925$
 si $\bar{r}/L > 1$ entonces $r = r_m = 9.560262$

Si el valor es intermedio, se debe de interpolar

Paso 14: Calcular el valor de \bar{r}/r y \bar{T}/T

Insertar el valor de r obtenido en el paso anterior = 4.14592
 $\bar{r}/r = 2.91250193$
 $\bar{T}/T = 1.216398437$

Paso 15: Ir a grafica y obtener valor del amortiguamiento β_o

$\beta_o = 0.045$

Paso 16: Calcular el valor del amortiguamiento efectivo β_{ef}

$\beta_{ef} = 0.072780653$ $(T_{ef}/T)^3 = 1.799814$

Paso 17: Calcular el reductor del cortante ΔV

$\Delta V = 26.26032$ tons modifique

CORTANTE REDUCIDO

Vef = 76.96 tons

El cortante reducido no puede NUNCA ser menor a 0.7V

$V = 103.2237594$ tons
 $0.7V = 72.25663161$ tons

Cs para ingresar en el programa SAP

Cs = 0.0859

Apéndice 2e: Procedimiento normas ATC, delta V; para suelo 2 utilizando resultados de Rayleigh (segundo ciclo)

Propiedades de la estructura

Largo del cimiento = 27 m
 Ancho del cimiento = 2 m
 Embebido del cimiento = 0.75 m
 Area total del cimiento = 54 m²
 Inercia del cimiento = 6561 m⁴
 Periodo de AGIES = 0.799 seg

Propiedades del suelo

Modulo de poisson ν = 0.35 Peso especifico del suelo = 1.3 ton/m³
 Modulo de cortante G = 2226.3 ton/m² Modulo de cortante promedio = 5300.714 ton/m²
 velocidad de onda = 200 m/s Factor multiplicador = 0.42 segun tabla 6-A ATC
 (Av)

Paso 1: Coeficiente sísmico, agies Cc
 Cs = 0.1153

Paso 2: Peso efectivo del edificio \dot{W}
 $\dot{W} = 0.7 \cdot W = 626.84$ tons

Paso 3: Rigidez efectiva del edificio K
 $\dot{K} = 4,071.46$ ton/m

Paso 4: Altura efectiva del edificio \dot{h}
 $\dot{h} = 0.7h_n = 12.075$ m

Paso 5: Radios equivalentes a un cimiento circular
 rai = 2.34 rmi = 9.56

Paso 6: Calculo de rigideces horizontal, vertical y torcional
 $K_{xi} = 36,156.27$ ton/m
 $K_{yi} = 16,191.27$ ton/m
 $K_{\theta i} = 13,849,536.48$ ton/m

Paso 7: Distancia normales del centroide del cim. al centroide de la estructura
 $y_i = 0$ m

Paso 8: Rigideces lateral y rocosa del cimiento
 $K_y = 16,191.27$ ton/m
 $K_{\theta} = 13,849,536.48$ ton/m

Paso 9: Periodo efectivo del edificio \dot{T}
 $\dot{T} = 0.704894889$

Paso 10: Nueva funcion de Amplificacion Dinamica D(T)
 Por Tabla
 $D(T) = 2.039007985$

Paso 11: Nuevo Espectro Basico de Diseño Sa(T)
 $S_a(T) = A_o D(T)$
 $S_a(T) = 0.713652795$

Paso 12: Nuevo Coeficiente Sísmico de Diseño \dot{C}_s
 $T > T_A$ $C_s = S_a(T)/R$
 $T < T_A$ $C_s = S_a(T)/[1 + (R - 1)T/T_A]$
 $\dot{C}_s = 0.10572634$

Paso 13: Caracteristicas del largo del cimiento

$\dot{r}/L = 0.447222222$
 si $\dot{r}/L < 0.5$ entonces $r = r_a = 4.145925$
 si $\dot{r}/L > 1$ entonces $r = r_m = 9.560262$

Si el valor es intermedio, se debe de interpolar

Paso 14: Calcular el valor de \dot{r}/r y \dot{T}/T

Insertar el valor de r obtenido en el paso anterior = 4.14592
 $\dot{r}/r = 2.91250193$
 $\dot{T}/T = 1.137683492$

Paso 15: Ir a grafica y obtener valor del amortiguamiento β_o

$\beta_o = 0.022$

Paso 16: Calcular el valor del amortiguamiento efectivo β_{ef}

$\beta_{ef} = 0.094771281$ $(T_{ef}/T)^3 = 0.687084$

Paso 17: Calcular el reductor del cortante ΔV

$\Delta V = 20.94$ tons

CORTANTE REDUCIDO

Vef = 82.28 tons

El cortante reducido no puede ser menor a 0.7V

V = 103.2237594 tons
 0.7V = 72.25663161 tons

Cs para ingresar en el programa ETABS v.8

Cs = 0.0919

Apéndice 2f: Procedimiento normas ATC, delta V; para suelo 3 utilizando resultados de Rayleigh (segundo ciclo)

Propiedades de la estructura
 Largo del cimiento = 27 m
 Ancho del cimiento = 2 m
 Embebido del cimiento = 0.75 m
 Area total del cimiento = 54 m²
 Inercia del cimiento = 6561 m⁴
 Periodo de AGIES = 0.799 seg

Propiedades del suelo
 Modulo de poisson $\nu = 0.35$
 Modulo de cortante G = 8391.437 ton/m²
 velocidad de honda = 350 m/s (Av)

Peso especifico del suelo = 1.6 ton/m³ Valores dados por Matzdorf
 Modulo de cortante promedio = 19979.61 ton/m²
 Factor multiplicador = 0.42 segun tabla 6-A ATC

Paso 1: Coeficiente sísmico, agies Cs
 Cs = 0.12

Paso 2: Peso efectivo del edificio W
 $\hat{W} = 0.7 \cdot W = 626.84$ tons

Paso 3: Rigidez efectiva del edificio K
 $\hat{K} = 4,071.46$ ton/m

Paso 4: Altura efectiva del edificio \bar{h}
 $\bar{h} = 0.7h_n = 12.075$ m

Paso 5: Radios equivalentes a un cimiento circular
 $r_{ai} = 2.34$ $r_{mi} = 9.56$

Paso 6: Calculo de rigideces horizontal, vertical y torcional
 $K_{xi} = 136,281.33$ ton/m
 $K_{yi} = 61,028.63$ ton/m
 $K_{\theta i} = 52,202,099.06$ ton/m

Paso 7: Distancia normales del centroide del cim. al centroide de la estructura
 $y_i = 0$ m

Paso 8: Rigideces lateral y rocosa del cimiento
 $K_y = 61,028.63$ ton/m
 $K_{\theta} = 52,202,099.06$ ton/m

Paso 9: Periodo efectivo del edificio \hat{T}
 $\hat{T} = 0.829432497$

Paso 10: Nueva funcion de Amplificacion Dinamica D(T)
 Por Tabla
 $D(T) = 1.828432565$

Paso 11: Nuevo Espectro Basico de Diseño Sa(T)
 $S_a(T) = A_oD(T)$
 $S_a(T) = 0.639951398$

Paso 12: Nuevo Coeficiente Sismico de Diseño \hat{C}_s
 $T > T_A$ $C_s = S_a(T)/R$
 $T < T_A$ $C_s = S_a(T)/[1 + (R - 1)T/T_A]$
 $\hat{C}_s = 0.094807614$

Paso 13: Características del largo del cimiento

$\bar{T}/L = 0.447222222$
 si $\bar{T}/L < 0.5$ entonces $r = r_a = 4.145925$
 si $\bar{T}/L > 1$ entonces $r = r_m = 9.560262$

Si el valor es intermedio, se debe de interpolar

Paso 14: Calcular el valor de \bar{T}/r y \hat{T}/T

Insertar el valor de r obtenido en el paso anterior = 4.14592
 $\bar{T}/r = 2.91250193$
 $\hat{T}/T = 1.338684211$

Paso 15: Ir a grafica y obtener valor del amortiguamiento β_o

$\beta_o = 0.008$

Paso 16: Calcular el valor del amortiguamiento efectivo β_{ef}

$\beta_{ef} = 0.052667327$ $(T_{ef}/T)^3 = 1.119386$

Paso 17: Calcular el reductor del cortante ΔV

$\Delta V = 14.04968$ tons modifique

CORTANTE REDUCIDO

Vef = 89.17 tons

El cortante reducido no puede NUNCA ser menor a 0.7V

V = 103.2237594 tons
 0.7V = 72.25663159 tons

Cs para ingresar en el programa SAP

Cs = 0.0996

Apéndice 3: Valores para procedimiento de normas ATC, método modal

"Tabla de datos generales del primer modo de vibración"

T1 = 0.79883 seg

Nivel	h	phi	W [ton]	W*phi*h	W*phi	W*(phi^2)
1	4.25	0.00142	190.26573	1.14825371	0.270177343	0.000384
2	7.5	0.00256	190.26573	3.653102108	0.487080281	0.001247
3	10.75	0.00348	190.26573	7.117841139	0.662124757	0.002304
4	14	0.00412	190.26573	10.97452758	0.783894827	0.00323
5	17.25	0.00444	134.73515	10.31936519	0.598224069	0.002656
Sum			895.80	33.21	2.801501278	0.01

$$h(\text{efectivo}) = \text{Sum}(W*\phi*h)/\text{sum}(W*\phi)$$

$$h = 11.8554612 \text{ m}$$

$$W1(\text{efectivo}) = \text{sum}^2(W*\phi)/\text{sum}(W*\phi^2)$$

$$W1 = 799.18 \text{ tons}$$

$$K(\text{efectivo}) = 4*\pi^2*W1/(g*T1^2)$$

$$k = 1,604.27 \text{ ton/m}$$

Apéndice 4: TABLAS PARA OBTENER PROPIEDADES DE LOS RESORTES EQUIVALENTES

SUELO 1

$K = \text{kg/cm}^3$ $K = EA/L$
 $K = k_s \cdot \text{ancho} \cdot b$

Características del largo tributario del cimiento

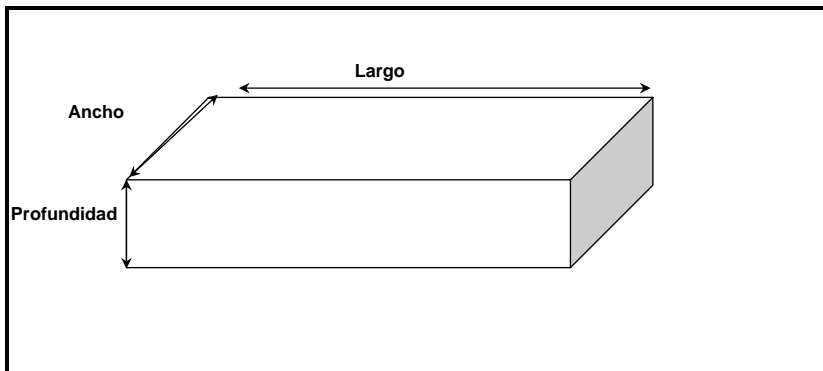
Largo = 150 cm
 Ancho = 200 cm
 Profundidad = 75 cm

Característica del Suelo

$K_s = 1.3 \text{ kg/cm}^3$

Propiedades para el resorte equivalente

$K = 39,000 \text{ kg/cm}$ **3,900,000 kg/m**
 $L = 1 \text{ unitario}$
 $E = 1 \text{ unitario}$
 $A = 39,000 \text{ cm}^2$



SUELO 2

$K = \text{kg/cm}^3$ $K = EA/L$
 $K = k_s \cdot \text{ancho} \cdot b$

Características del largo tributario del cimiento

Largo = 150 cm
 Ancho = 200 cm
 Profundidad = 75 cm

Característica del Suelo

$K_s = 2.5 \text{ kg/cm}^3$

Propiedades para el resorte equivalente

$K = 75,000 \text{ kg/cm}$ **7,500,000 kg/m**
 $L = 1 \text{ unitario}$
 $E = 1 \text{ unitario}$
 $A = 75,000 \text{ cm}^2$

SUELO 3

$K = \text{kg/cm}^3$ $K = EA/L$
 $K = k_s \cdot \text{ancho} \cdot b$

Características del largo tributario del cimiento

Largo = 150 cm
 Ancho = 200 cm
 Profundidad = 75 cm

Característica del Suelo

$K_s = 5 \text{ kg/cm}^3$

Propiedades para el resorte equivalente

$K = 150,000 \text{ kg/cm}$ **15,000,000 kg/m**
 $L = 1 \text{ unitario}$
 $E = 1 \text{ unitario}$
 $A = 150,000 \text{ cm}^2$