



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE SISMO ESTÁTICO Y DINÁMICO, PARA MARCOS DE CONCRETO REFORZADO

Joaquin Ortega Menéndez

Asesorado por el Ing. Daniel Alfredo Cruz Pineda

Guatemala, noviembre de 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE SISMO ESTÁTICO Y
DINÁMICO, PARA MARCOS DE CONCRETO REFORZADO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

JOAQUIN ORTEGA MENÉNDEZ

ASESORADO POR EL ING. DANIEL ALFREDO CRUZ PINEDA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Julio González Podszueck
EXAMINADOR	Ing. Tonio Bonatto Mérida
EXAMINADOR	Ing. Maynor Feizal Zimeri Corado
EXAMINADOR	Ing. Rubén Rodolfo Pérez Oliva
SECRETARIO	Ing. Francisco Javier González Lopez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE SISMO ESTÁTICO Y DINÁMICO, PARA MARCOS DE CONCRETO REFORZADO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha abril de 2008.

Joaquin Ortega Menéndez

Guatemala Agosto de 2011

Ingeniero Ronald Estuardo Galindo Cabrera
Jefe departamento de estructuras
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Por este medio hago constar que he asesorado el trabajo de graduación del estudiante **Joaquín Ortega Menéndez**, titulado **ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE SISMO ESTÁTICO Y DINÁMICO, PARA MARCOS DE CONCRETO REFORZADO**.

Después de haber revisado y corregido dicho trabajo de graduación, considero que el mismo llena los requisitos exigidos por la escuela de Ingeniería Civil, por lo que dejo constancia de aprobación para su autorización.

Sin otro particular, me suscribo de usted, atentamente



Ing. Daniel Alfredo Cruz Pineda

Ingeniero civil

Asesor



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
www.ingenieria-usac.edu.gt



Guatemala,
24 de agosto de 2011

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

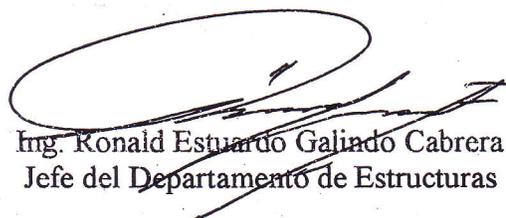
Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE SISMO ESTÁTICO Y DINÁMICO, PARA MARCOS DE CONCRETO REFORZADO**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Joaquín Ortega Menendez, quien contó con la asesoría del Ing. Daniel Alfredo Cruz Pineda.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera
Jefe del Departamento de Estructuras



FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO
DE
ESTRUCTURAS
USAC

/bbdeb.



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
www.ingenieria-usac.edu.gt



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Daniel Alfredo Cruz Pineda y del Jefe del Departamento de Estructuras, Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera, al trabajo de graduación del estudiante Joaquín Ortega Menendez, titulado **ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE SISMO ESTÁTICO Y DINÁMICO, PARA MARCOS DE CONCRETO REFORZADO**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, noviembre de 2011.

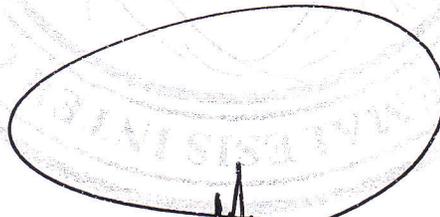
/bbdeb.



DTG. 508.2011

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE SISMO ESTÁTICO Y DINÁMICO, PARA MARCOS DE CONCRETO REFORZADO**, presentado por el estudiante universitario Joaquín Ortega Menéndez, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 16 de noviembre de 2011

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Mis padres** Joaquín Molina y Matilde Grajeda (q.e.p.d) muy especialmente.
- Mis hermanos** Etelvina, Elba, Anabella, Amparo, Dinarda, Zoila, Enma y en especial a mi hermano Ronaldo Antonio.
- Mi esposa** Dyna Eugenia de Paz Gonzalez .
- Mis lindos hijos** André Joaquin de Paz y Sabrina Eugenia de Paz.
- Mis amigos** De la corporación AICSA, en especial al Ingeniero Jorge Adrover Barrundia y al Arquitecto Ernesto Ruiz.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios

Dios del amor y de colores.

Mi asesor

Ing. Daniel Cruz por el asesoramiento y apoyo para este trabajo de tesis.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. ASPECTOS FUNDAMENTALES DEL DISEÑO ESTRUCTURAL	1
1.1. Aspectos teóricos	1
1.1.1. Sismos.....	2
1.1.2. Sismología	2
1.1.3. Medidas de movimiento del suelo.....	3
1.1.4. Inercia.....	5
1.1.5. Período	5
1.1.6. Amortiguamiento.....	6
1.1.7. Ductilidad	6
1.1.8. Rigidez.....	6
1.1.9. Espectro de respuesta.....	7
1.2. Aspectos de configuración estructural.....	11
1.2.1. Escala.....	11
1.2.2. Altura	12
1.2.3. Proporción	12
1.2.4. Simetría	12
1.2.5. Redundancia.....	13
1.3. Aspectos sísmicos de Guatemala.	13
1.3.1. Sistemas de fallas en Guatemala	13

2.	ANÁLISIS DEL CORTANTE BASAL.....	17
2.1.	Presentación del proyecto.....	17
2.2.	Metodología de análisis.....	18
2.2.1.	Método estático.....	18
2.2.2.	Método dinámico.....	18
2.3.	Análisis sísmico según UBC 97 (estático).....	19
2.3.1.	Metodología de análisis sísmico según UBC 97	19
2.3.1.1.	Bases de diseño.....	19
2.3.1.2.	Categoría de ocupación.....	19
2.3.1.3.	Geología del sitio.....	19
2.3.1.4.	Perfil de tipo de suelo.....	20
2.3.1.5.	Características sísmicas de riesgo en el sitio.....	20
2.3.1.6.	Zona sísmica.....	20
2.3.1.7.	Factor de cercanía.....	21
2.3.1.8.	Factor de respuesta.....	23
2.3.2.	Requerimientos de configuración.....	24
2.3.2.1.	Estructuras regulares.....	24
2.3.2.2.	Estructuras irregulares.....	26
2.3.3.	Sistemas estructurales.....	26
2.3.3.1.	Generales.....	26
2.3.3.2.	Limitaciones de altura.....	27
2.4.	Método estático.....	27
2.4.1.	Cortante basal de diseño.....	27
2.4.2.	Período de la estructura.....	28
2.4.3.	Distribución de fuerza vertical.....	28
2.4.4.	Distribución horizontal del corte.....	29
2.5.	Método dinámico.....	30
2.5.1.	Introducción al análisis estructural dinámico.....	30

2.5.2.	Respuesta dinámica	31
2.5.2.1.	Acción dinámica definida en términos determinísticos.....	31
2.5.2.2.	Acción dinámica definida en términos estocásticos	32
2.5.2.3.	Sistemas de masas concentradas.....	32
2.5.3.	Ecuaciones de movimiento	34
2.5.3.1.	Principio de D’Alambert	34
2.5.3.2.	Principio del trabajo virtual.....	34
2.5.4.	Espectro de respuesta sísmica.....	34
2.5.5.	Sistemas de varios grados de libertad.....	35
2.5.5.1.	Modos naturales	35
2.5.5.2.	Frecuencias naturales	35
2.5.6.	Métodos de cálculo.....	35
2.5.6.1.	Sistemas libres no amortiguados.....	36
2.5.6.2.	Método superposición modal.....	36
	2.5.6.2.1. Análisis modal	36
	2.5.6.2.2. Procedimiento del análisis modal.....	37
3.	EJEMPLO REPRESENTATIVO	41
3.1.	Integración de carga vertical y sísmica.....	41
3.2.	Ubicar obra	41
3.2.1.	Predimensionamiento de vigas y columnas.....	41
3.2.2.	Plantas y elevaciones del proyecto.....	42
3.3.	Condiciones del sitio.....	43
3.3.1.	Condiciones o requerimientos básicos	43
3.3.1.1.	Regularidad	43

3.4.	Cálculo de peso propio.....	43
3.4.1.	Integración de peso estructural	43
3.4.2.	Integración de peso muerto nivel 4	44
3.4.3.	Integración de peso muerto nivel 2 y 3.....	44
3.4.4.	Integración de peso muerto nivel 1	45
3.4.5.	Tabla resumen de pesos por nivel	45
3.5.	Determinación de cortante basal.....	46
3.5.1.	Determinación de período	46
3.5.2.	Determinación de factores para análisis	46
3.6.	Integración de cortante basal dinámico.....	50
3.6.1.	Cálculo de rigidez.....	50
3.6.2.	Calculo de masas.....	52
3.6.3.	Desarrollando la fórmula de desacoplamiento modal.....	54
3.7.	Análisis modal espectral.....	59
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	63
4.1.	Análisis de los resultados obtenidos entre el cortante basal estático (UBC) y cortante basal dinámico (análisis modal espectral).....	63
4.2.	Análisis gráfico de las fuerzas para el cortante dinámico y estático respectivamente	64
4.3.	Comprobación de los resultados mediante el programa de análisis estructural ETABS.....	65
4.3.1.	Método estático	66
4.3.2.	Desplazamientos debido a carga sísmica en X.....	69
4.3.3.	Desplazamientos debido a carga sísmica en Y.....	70
4.4.	Método dinámico.....	70

4.4.1.	Análisis de desplazamientos modos de vibración y cortantes en eje X.....	72
4.5.	Cortante basal dinámico X.....	74
4.5.1.	Análisis de desplazamientos modos de vibración y cortantes en eje Y.....	75
4.6.	Cortante basal dinámico Y.....	77
CONCLUSIONES		79
RECOMENDACIONES		81
BIBLIOGRAFÍA.....		83
APÉNDICES		85

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Función de amplificación dinámica para perfil de suelo S1, con 5% de amortiguamiento crítico	8
2.	Función de amplificación dinámica para perfil de suelo S2, con 5% de amortiguamiento crítico	9
3.	Función de amplificación dinámica para perfil de suelo S3, con 5% de amortiguamiento crítico	10
4.	Placas intercontinentales	14
5.	Fallas activas primarias y secundarias en el territorio nacional	15
6.	Discretización de un sistema de masas concentradas en marcos de varios niveles	33
7.	Discretización de un sistema de masas concentradas en marcos de un nivel	33
8.	Función de amplificación dinámica para perfil de suelo, con 5% de amortiguamiento crítico según UBC 97	38
9.	Función de amplificación dinámica para perfil de suelo, con 5% de amortiguamiento crítico según AGIES	38
10.	Esquema planta arquitectónica	42
11.	Esquema, elevación de arquitectónica	42
12.	Determinación de rigidez por medio de desplazamientos relativos	51
13.	Método de vibración 1	55
14.	Método de vibración 2	56
15.	Método de vibración 3	57

16.	Método de vibración 4	58
17.	Espectro de respuesta para un suelo tipo S2 y fator R = 8,5	59
18.	Esquema distribución de fuerza cortante dinámico y estático	64
19.	Modelo tridimensional en estudio	65
20.	Modo de vibración 1 período 0,8694 s	72
21.	Modo de vibración 2 período 0,2543 s	72
22.	Modo de vibración 3 período 0,1385 s	73
23.	Modo de vibración 4 período 0,0815 s	73
24.	Modo de vibración 1 período 0,8694 s	75
25.	Modo de vibración 2 período 0,2627 s	76
26.	Modo de vibración 3 período 0,1308 s	76
27.	Modo de vibración 4 período 0,0821 s	77

TABLAS

I.	Escala Richter y Mercali modificada	4
II.	Factores de zona	21
III.	Tipos de fuente sísmica para factor Na	21
IV.	Tipos de fuente sísmica para factor Nv	22
V.	Factores de fuente sísmica	22
VI.	Coeficiente sísmico Ca	23
VII.	Coeficiente sísmico Cv	23
VIII.	Irregularidades verticales	25
IX.	Irregularidades en planta	25
X.	Sistemas estructurales	26
XI.	Factores para function de amplificación dinámica	39
XII.	Propiedades de sección	41
XIII.	Cálculo de peso nivel 4	44
XIV.	Cálculo de peso nivel 2 y 3	44

XV.	Cálculo de peso nivel 1	45
XVI.	Resumen pesos por nivel	45
XVII.	Cálculo corte por nivel	48
XVIII.	Cálculo corte por nivel	49
XIX.	Cálculo corte por eje en cada nivel	50
XX.	Cálculo de masa y rigidez	52
XXI.	Resumen masas y rigidez equivalente del modelo matemático	53
XXII.	Matriz para frecuencia 7,51	55
XXIII.	Matriz para frecuencia 21,80	56
XXIV.	Matriz para frecuencia 33,58	57
XXV.	Matriz para frecuencia 42,27	58
XXVI.	Matriz comparativa análisis estático y dinámico	63
XXVII.	Desplazamientos debido a carga sísmica X	69
XXVIII.	Desplazamientos debido a carga sísmica Y	70
XXIX.	Factor de corrección entre sismo estático y dinámico	71
XXX.	Cortante basal obtenido del programa Etabs sentido X	74
XXXI.	Cortante basal obtenido del programa Etabs sentido Y	78

GLOSARIO

AGIES	Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica.
Corte basal	Fuerza de reacción que se coloca en la base de la estructura, representa la fuerza equivalente al peso de la estructura que por medio de inercia participará durante un evento sísmico.
Espectro de respuesta	Representación gráfica que permite mostrar los valores máximos de una variable de respuesta (por ejemplo el desplazamiento) de un sistema de un grado de libertad como función de la frecuencia propia de vibración del sistema, cuando es sometido a una excitación dada.
Falla	Una fractura o zona de fracturas de la roca sobre un plano donde han ocurrido desplazamientos de un lado respecto del otro ya sea en sentido vertical, horizontal o transversal. Se denominan fallas activas aquellas que han sufrido algún desplazamiento en los dos últimos millones de años o en las que se observa alguna actividad sísmica.

Intensidad

Parámetro que indica el efecto de las sacudidas en un lugar afectado por las sacudidas sísmicas. Se mide a través de las reacciones de las personas, del grado de destrozos producidos en las construcciones y por las perturbaciones provocadas en el terreno (grietas, deslizamientos, desprendimientos, etcétera).

Período

El tiempo que demora un sistema que vibra en completar una oscilación completa, normalmente se mide en segundos. Es el inverso de la frecuencia, que corresponde al número de oscilaciones que el sistema completa por unidad de tiempo, normalmente se mide en ciclos por segundo (*hertz*).

Sismo

Liberación súbita y brusca de energía elástica acumulada por la deformación lenta en la superficie de la Tierra, que se propaga en forma de ondas sísmicas. Los terremotos son sacudidas de corta duración, pero de gran intensidad, que se producen en la corteza terrestre.

RESUMEN

Para el análisis y diseño de estructuras de concreto se debe adoptar el método de análisis sismo resistente más propicio, según las características con que cuenta la estructura, existen varios métodos muy sencillos pero igualmente efectivos, el resultado obtenido es un análisis más exacto y de forma más rápida.

Con los códigos internacionales como el UBC e IBC así como las normas nacionales (AGIES), se tienen parámetros que permiten delimitar el cálculo de una estructura, según sus condiciones tanto geométricas como de ocupación, la arquitectura actual demanda obras más atractivas visualmente hablando, por lo que es necesario salir de los parámetros usuales, quedando las estructuras calculadas al margen de los métodos clásicos, haciéndose necesario el recurrir a herramientas un tanto más sofisticadas que permitan cumplir con la tarea de diseño.

La realización de este trabajo de graduación proyecta el estudio de los casos en que una estructura sale de los parámetros regulares, y en torno a esto es necesario realizar un nuevo procedimiento de manera que pueda ser determinado el cortante basal de la misma.

OBJETIVOS

General

Proporcionar un documento que sirva como fuente de consulta y que contenga el proceso de análisis sísmico de marcos de concreto reforzado, utilizando el método estático y dinámico.

Específicos

1. Describir los métodos de análisis sísmico estático.
2. Describir los métodos de análisis sísmico dinámico.
3. Realizar un análisis comparativo entre los dos métodos.

INTRODUCCIÓN

La Ingeniería Civil tiene a su cargo la responsabilidad de la infraestructura de un país, es por esto que es de suma importancia concebir y calcular estructuras que se encuentren entre los rangos permisibles que dictan los códigos tanto en geometría como en ubicación.

Con el avance del tiempo han surgido materiales que permiten crear cada vez estructuras más osadas, y esto ha hecho que la forma en que estas estructuras se calculan también haya evolucionado, en Guatemala es muy común el cálculo de estructuras sismo-resistentes por medio de los métodos clásicos, estos métodos al ser también muy aproximados, carecen de ciertas características que permitan aplicarlos a tipos muy específicos de estructuras, lo que nos lleva a adoptar métodos más propicios para poder ejercer dichas tareas.

Estos métodos toman en cuenta características de las estructuras que el método clásico no toma en cuenta, la comparación que se realizará para este documento tocará los dos extremos del análisis sismo-resistente, teniendo por un lado el análisis sismo estático y por el otro lado los métodos de análisis dinámico, con un análisis de resultados final se darán las impresiones obtenidas por medio de los cálculos numéricos

1. ASPECTOS FUNDAMENTALES DEL DISEÑO ESTRUCTURAL

1.1. Aspectos teóricos

Un diseño estructural combina factores, que aunque son desarrollados por disciplinas diferentes, actúan como un conjunto al momento de ocurrir un evento sísmico. Los aspectos en mención son los siguientes:

- Una buena práctica de la ingeniería estructural
- Una correcta configuración de los elementos que la componen
- Un adecuado estudio del sitio en donde se localizará la estructura

Con frecuencia el diseño de estructuras se suele enfatizar en el primer aspecto, como único factor relevante. En realidad los dos últimos conceptos pueden tomar mayor relevancia que el primero, pues en zonas cercanas a fallas geológicas, una edificación tiene una probabilidad del 100% de sufrir daños graves sin importar el diseño que este edificio posea.

Los primeros cuatro aspectos que se muestran a continuación se relacionan con la naturaleza de los movimientos sísmicos; los siguientes corresponden a las propiedades mecánicas de las edificaciones ante cargas dinámicas.

1.1.1. Sismo

Un sismo es un movimiento brusco y errático de la superficie terrestre. Las vibraciones no poseen una trayectoria específica y pueden presentarse en cualquier dirección.

Existen tres clases de movimientos sísmicos: tectónicos, volcánicos y artificiales.

- Los primeros son producto de la tensión de las placas tectónicas, con su zona de conflicto, que a su vez son áreas cercanas a sus fronteras.
- Los volcánicos anuncian la cercanía de erupciones y raramente son destructivos.
- Los sismos artificiales son producto de las actividades humanas en el subsuelo.

De las tres clases de movimientos, la más importante es la de origen tectónico debido a que la misma libera el 80% de la energía sísmica del planeta.

1.1.2. Sismología

Rama de la geofísica que estudia los terremotos. El estudio de la sismología es extensivo a la observación del movimiento del suelo producido por los deslizamientos de las placas tectónicas.

Los movimientos de las placas tectónicas son producto de la convección del magma, fundido en el núcleo de la esfera terrestre. Dicha convección provoca deslizamientos en las zonas fronteras de las placas, dando así lugar a los movimientos sísmicos en las áreas cercanas a estas fracturas.

Las ondas sísmicas se clasifican según la profundidad de donde son generadas. Las ondas de cuerpo o volumen son generadas a grandes profundidades, mientras que las superficiales se producen cerca a la superficie terrestre.

Las ondas llamadas de cuerpo o volumen son de tipo P y S. Las ondas P hacen oscilar el suelo en la misma dirección que se propaga el sismo y son las que viajan a mayor velocidad, estas causan básicamente compresión en el medio de transporte. La onda S produce vibraciones perpendiculares a lo largo de su propagación. Dichas ondas viajan más lentamente y producen esfuerzos de corte en el medio de transporte.

Las ondas superficiales son del tipo *Rayleigh* y *Love*. Las ondas *Rayleigh* (R), hacen vibrar el suelo, de forma elíptica vertical y horizontalmente. Este movimiento es similar al movimiento de las ondas, en el agua. La onda tipo *Love* (L), hace vibrar el suelo, en forma horizontal, en sentido perpendicular a la propagación de la onda, sin movimiento vertical.

1.1.3. Medidas del movimiento del suelo

La intensidad del movimiento del suelo se mide por medio de la escala de *Richter* y la escala *Mercalli*. Dichas escalas son utilizadas para comparar y evaluar la intensidad de los sismos (ver tabla I).

Tabla I. **Escala *Richter* y *Mercali* modificada**

Escala <i>Mercali</i> modificada		Escala <i>Richter</i>
I	No sentido. Efectos marginales.	2,5
II	Sentido por personas que descansan, o en pisos altos.	
III	Sentido en interiores, los objetos oscilan.	3,5
IV	Objetos colgantes oscilan, ventanas y puertas hacen ruido.	
V	Se siente en el exterior. Se afectan los líquidos.	
VI	Las personas caminan tambaleándose.	4,5
VII	Es difícil mantenerse de pie. Daños en mampostería.	
VIII	Daños en mampostería, colapso parcial.	6,0
IX	Pánico general. Se daña seriamente la mampostería.	Destructivo
X	La mayor parte de la mampostería y las estructuras de acero de marcos se destruyen junto con cimientos.	7,0 Importante
XI	Ductos subterráneos completamente fuera de servicio.	8,0
XII	Daño casi total. Grandes masas rocosas se desplazan.	Gran terremoto

Fuente: Robert Reiherman, Arnold Christopher. Manual de configuración y diseño sísmico de edificios. Volumen 1. p. 35.

La escala de *Richter* mide la liberación de energía en el epicentro y su escala es logarítmica, esto significa que un sismo magnitud cinco es diez mil veces mayor que un sismo de magnitud 1.

La escala de *Mercali* mide los efectos que tiene el sismo sobre la estructura. La evaluación de la escala *Mercali* es subjetiva debido a que la intensidad del terremoto varía con la distancia del foco y el tipo de subsuelo del área en evaluación.

1.1.4. Inercia

Propiedad de la materia de resistencia al movimiento o cambio de dirección del mismo. En el análisis antisísmico la inercia de una edificación es proporcional a su masa y las fuerzas a aplicar para simular un sismo en un modelo son un porcentaje del peso total de la estructura.

1.1.5. Período

El período es el intervalo de tiempo en el cual un sistema masa-resorte completa un ciclo completo de movimiento. El período es la medida de la frecuencia natural de la vibración. La mayoría de modelos dinámicos en estructuras se reducen básicamente, a sistemas de este tipo.

Cuando el período de movimiento de una estructura coincide con el período del suelo, se produce resonancia, en la que el suelo y estructura actúan como conjunto provocando mayor amplificación de fuerza dinámica sobre la edificación.

1.1.6. Amortiguamiento

Mecanismo mediante el cual un sistema masa-resorte disipa energía y vuelve a su estado original de reposo. El valor numérico del amortiguamiento comprende a un porcentaje del amortiguamiento crítico, el cual consiste en el valor de amortiguamiento en que un sistema masa-resorte regresa al estado estático al ser trasladado fuera de su posición de reposo. En las estructuras, el amortiguamiento es proporcionado por el rango elástico de la deformación de las vigas y columnas.

1.1.7. Ductilidad

Propiedad de la materia que permite su deformación sin que la misma se rompa o astille. En estructuras, la ductilidad se utiliza como mecanismo de disipación de energía, para evitar el colapso de la edificación cuando se ha excedido su capacidad estimada de carga lateral o vertical.

En un sismo, las cargas laterales reales pueden exceder los valores estimados en el cálculo, proporcionando de esta manera, la ductilidad de los miembros estructurales, el mecanismo último de disipación de energía.

1.1.8. Rigidez

La rigidez es la capacidad de resistencia de un cuerpo a cambiar por la acción de fuerzas exteriores sobre el mismo.

En estructuras el concepto de rigidez es relativo a la capacidad de deformación de un miembro estructural ante la acción de fuerzas externas.

Analizando nuevamente el sistema masa-resorte, la rigidez corresponde al elemento elástico, que reduce las desviaciones laterales a diferencia del amortiguador, que disipa la energía, para que el sistema vuelva al reposo.

La importancia del concepto, radica en que la rigidez determina las deflexiones que presenta un miembro ante cargas externas y es por eso, que la mayoría de métodos de análisis estructural utilizan matrices de rigideces para cuantificar fuerzas internas de una estructura.

Toda deformación de un miembro es proporcional a su rigidez. Este postulado es especialmente importante en los desplazamientos laterales producidos por sismo. Ya que un sistema de marcos generalmente se encuentra sujeto por una losa, lo cual ocasiona que la distribución de fuerzas sea proporcional a la rigidez de cada tramo.

1.1.9. Espectro de respuesta

Gráfica de la relación del período de una estructura en resonancia, con la aceleración a que la misma se halla sujeta a esta respuesta máxima. Al referir el período con el tipo de suelo se obtienen distintos tipos de curva que amplifican o mitigan las fuerzas dinámicas sobre el modelo de estudio.

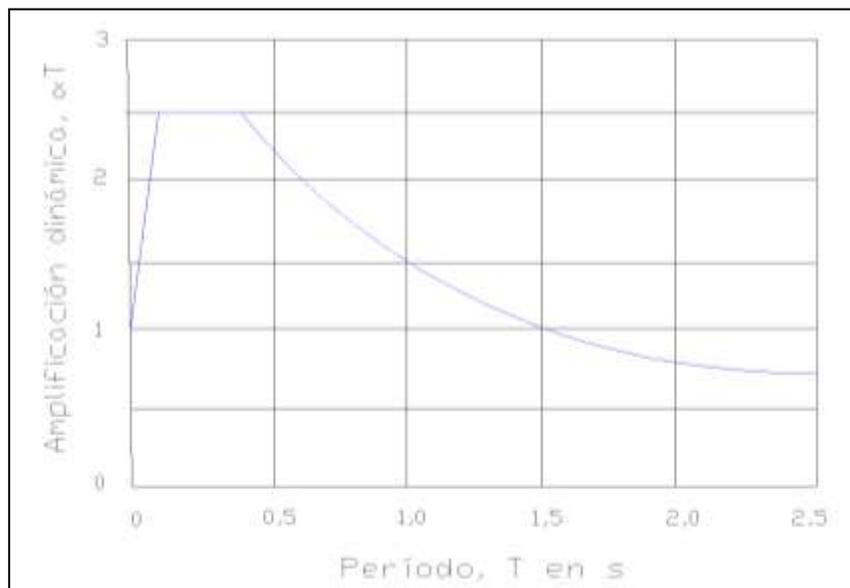
La mayoría de códigos utilizan esta relación para obtener el corte basal y las ecuaciones utilizadas en el diseño corresponden a las curvas del espectro de respuesta.

- Perfil de suelo S1

Este perfil satisface cualquiera de las siguientes condiciones:

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

Figura 1. **Función de amplificación dinámica para perfil del suelo S1, con 5% de amortiguamiento crítico**



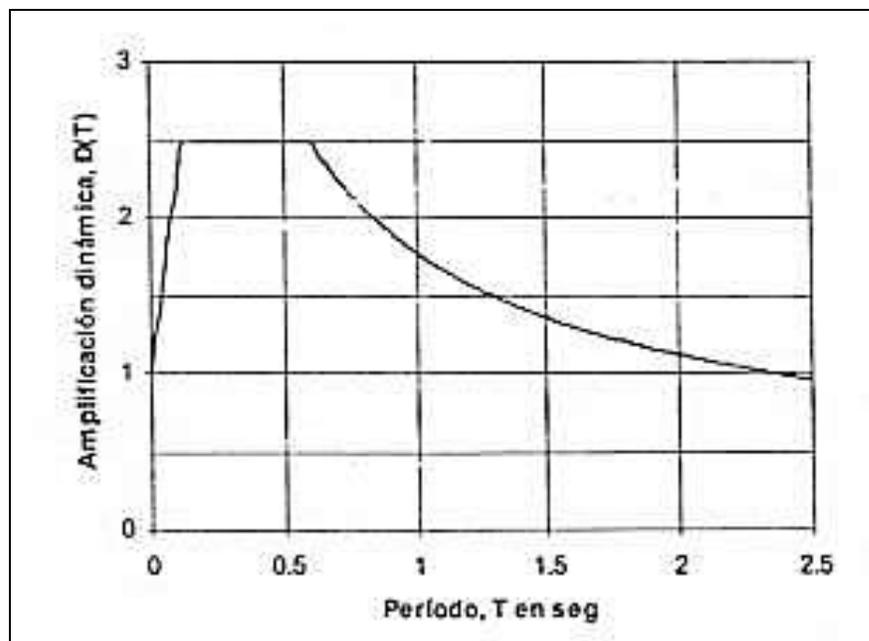
Fuente: Normas Estructurales de diseño recomendadas para la República de Guatemala, AGIES NR-2: 2000. p. 13.

- Perfil de suelo S2

Este perfil satisface cualquiera de las siguientes condiciones:

- ✓ Suelo firme, cuyo basamento rocoso está a más de 50 metros de profundidad y cuyos depósitos son cenizas volcánicas, suelos granulares densos, limos densos o arcillas firmes.
- ✓ En general, suelos firmes y estables cuyos perfiles no clasifican como S1 ni como S3.

Figura 2. **Función de amplificación dinámica para perfil del suelo S2, con 5% de amortiguamiento crítico**



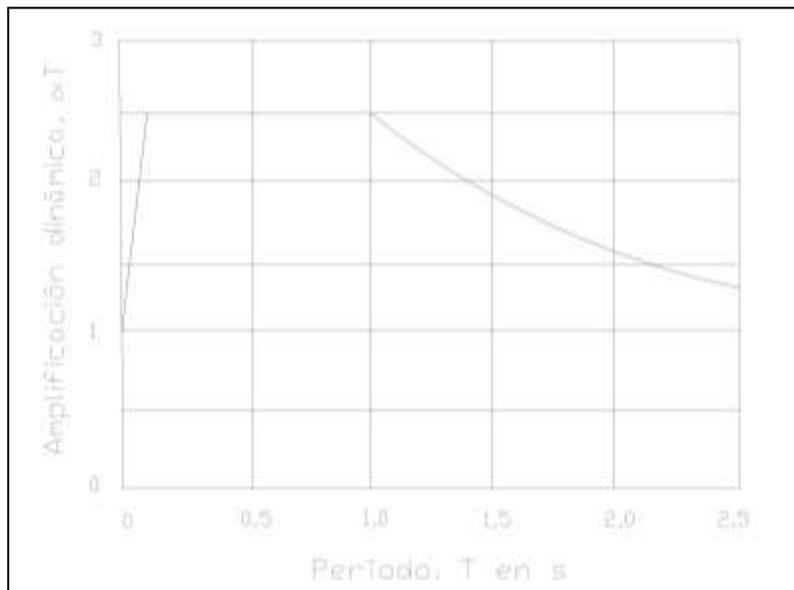
Fuente: Normas Estructurales de diseño recomendadas para la República de Guatemala, AGIES NR-2:2000, p. 13.

- Perfil de suelo S3

Este perfil satisface cualquiera de las condiciones siguientes:

- ✓ Depósitos de más de 10 metros de espesor de cenizas, arenas o limos desde sueltos hasta de densidad media.
- ✓ Depósitos entre 10 y 20 metros de espesor de arcillas blandas o sin estratos arenosos intermedios.
- ✓ En general, perfiles de suelo donde la velocidad de onda de corte del depósito es menor que 200 metros por segundo.

Figura 3. **Función de amplificación dinámica para perfil del suelo S3, con 5% de amortiguamiento crítico**



Fuente: Normas Estructurales de diseño recomendadas para la República de Guatemala, AGIES NR-2:2000. p. 14.

1.2. Aspectos de la configuración estructural

En zonas sísmicas como Guatemala, los aspectos de configuración estructural tienen igual o mayor relevancia que la ingeniería de cálculo, esto debido principalmente a la incertidumbre de las cargas reales a soportar, así como el comportamiento de un edificio ante un sismo. Es por eso que tienen que seguirse ciertos principios de configuración cuyo objetivo es la certeza de la conducta de la edificación ante las cargas dinámicas, que usualmente, son muy complejas.

El código supone para el uso de sus ecuaciones de análisis estático, edificaciones regulares en su geometría y distribución de miembros estructurales. La omisión de estos parámetros provocan las aplicaciones de factores de castigo, que en la realidad solo son mitigantes para los esfuerzos reales a soportar.

1.2.1. Escala

Este principio se relaciona principalmente, a la dimensión o tamaño de la edificación. En construcciones pequeñas, tales como casas y edificios pequeños, pueden omitirse algunas consideraciones de geometría regular. En construcciones medianas o altas los principios de proporción, simetría, distribución y redundancia son esenciales. Su desatención provocará cargas indeterminadas de volteo y comportamiento errático que requerirá un análisis dinámico cuidadoso.

1.2.2. Altura

La altura se encuentra proporcionalmente relacionada con el período de la edificación. Los edificios pequeños tendrán un corte basal mayor debido a su rigidez, los de mayor altura sufrirán menores cortes en su base, pero conforme se incrementa la altura, proporcionalmente se incrementará la rigurosidad de simetría geométrica y proporción.

1.2.3. Proporción

Se refiere a la relación de ancho y alto, de fachadas y plantas, en la geometría de la construcción. Relaciones ancho-alto en fachadas muy dispares producirán edificios esbeltos expuestos a fuerzas de volteo. Relaciones distantes en planta implicará distribuciones no uniformes de fuerzas, concentrando esfuerzos en puntos determinados.

1.2.4. Simetría

Propiedad de distribución geométrica de la edificación. La misma se determina ubicando el centro geométrico de planta y fachada trazando posteriormente dos ejes coordenados X y Y, y comparando la geometría resultante de la sección, si la misma es semejante a ambos lados de los ejes, el edificio es simétrico en planta y fachada según sea el caso.

1.2.5. Redundancia

Propiedad que distribuye la carga total en varios elementos o miembros soportantes. Esto se define en realidad como el número de marcos en ambos sentidos geométricos de la edificación. La redundancia evita el colapso proporcionando vías alternas de distribución a las cargas con dirección natural de transporte hacia las cimentaciones. Si determinado miembro falla, no necesariamente colapsará toda la estructura.

1.3. Aspectos sísmicos de Guatemala

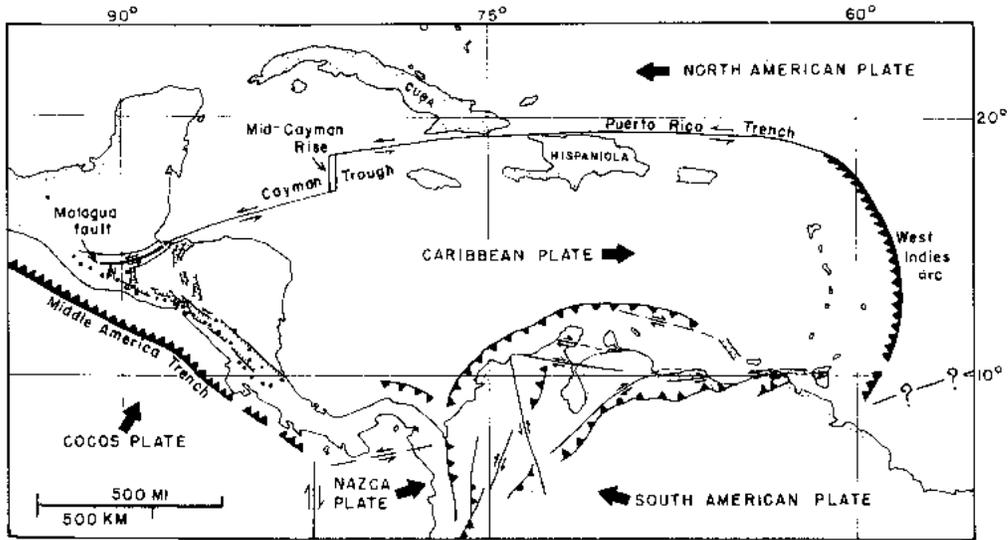
Esto corresponde al estudio de vulnerabilidad a sismos debido a la cercanía de agentes naturales, tales como fallas y volcanes.

Su importancia radica en que los códigos y normas en discusión, utilizan como parámetros de diseño, dichos agentes como factores determinantes para el uso de sus ecuaciones, (ver figura 4).

1.3.1. Sistemas de fallas de Guatemala

En Guatemala los sistemas de fallas más relevantes son los de Motagua y Chixoy-Polochic. La del Motagua se encuentra ubicada a 25 kilómetros al norte de la ciudad capital y la del Polochic a 80 kilómetros. La cercanía de dichas fracturas, son de vital importancia en el código, debido a que los mismos son factores que amplifican la fuerza cortante basal en la edificación bajo análisis, (ver figura 5).

Figura 4. Placas intercontinentales



Fuente: *Plakfer George. The Guatemala Earthquake and Caribbean Plate Tectonics. p. 19.*

2. ANÁLISIS DEL CORTANTE BASAL

2.1. Presentación del proyecto

Para ejemplificar el análisis del cortante basal según UBC 97 (método estático) y análisis modal espectral (análisis dinámico), se presentará a continuación un anteproyecto a desarrollar, los requisitos son los siguientes:

Requisitos arquitectónicos

- Edificación de cuatro niveles
- Nivel uno a tres locales comerciales
- Nivel cuatro terrazas con acceso

Propiedades de materiales

- Concreto 4 000 psi
-
- Acero 60 000 psi

Ubicación de la obra

- Valle de la ciudad de Guatemala

2.2. Metodología de análisis

La metodología de análisis de UBC y análisis modal espectral, permite utilizar integración de áreas tributarias y pesos muertos para ambas sistemáticas.

2.2.1. Método estático

El método estático podrá ser usado en las siguientes estructuras:

- Regulares debajo de los 73 metros y que posean un sistema resistente a fuerzas laterales descritas en la tabla 16-N.
- Estructuras irregulares que no tienen más de cinco pisos o 19 metros de altura.

2.2.2. Método dinámico

El método dinámico será usado en las siguientes estructuras:

- Estructuras de más de 73 metros de altura
- Estructuras que posean una irregularidad en cuanto a rigidez, peso o geometría vertical u horizontal tipo 1, 2 o 3 definidos en la tabla 16-L.

2.3. Análisis sísmico según UBC 97 (estático)

A continuación se presenta una metodología de análisis sísmico estático según UBC 97, la misma fue tomada de la norma y orientada para el análisis de edificaciones con marcos dúctiles de concreto resistentes a momentos.

2.3.1. Metodología de análisis sísmico según UBC 97

2.3.1.1. Bases de diseño

Los procedimientos para diseño de todas las estructuras serán determinadas considerando la zona sísmica, características del sitio, ocupación, configuración, sistemas estructurales y altura de acuerdo con esta sección.

2.3.1.2. Categoría de ocupación

Para propósitos del análisis sismo-resistente, cada estructura será clasificada según el tipo de ocupación de acuerdo con la tabla 16-K. dicha tabla asigna los factores de importancia I e I_p , agregando observaciones estructurales a cada categoría.

2.3.1.3. Geología del sitio

A cada sitio deberá ser asignado un tipo de suelo basado en un adecuado estudio geotécnico, usando para ello el procedimiento de categorización de la tabla 16-J.

2.3.1.4. Perfil de tipo de suelo

Los perfiles de suelo Sa, Sb, Sc, Sd y Se son definidos en la tabla 16-J y el perfil de suelo tipo Sf es definido como un suelo que requiere las evaluaciones de sitio:

- Suelos vulnerables a colapso bajo cargas sísmicas tales como suelos propensos a licuefacción, arcillas altamente deformables o suelos muy débiles.
- Suelos o arcillas orgánicas cuyos estratos excedan los 3 metros
- Arcillas muy plásticas cuyos estratos sean mayores a 7,62 metros

2.3.1.5. Características sísmicas de riesgo en el sitio

Serán establecidas basados en la proximidad al lugar de Fuente: s activas de sismo, tipo de suelo y características de la estructura.

2.3.1.6. Zona sísmica

A cada sitio le será asignada una zona sísmica, en el caso específico de Guatemala UBC 97 recomienda una zona tipo 4.

Tabla II. **Factores de zona**

Zona	1	2 ^a	2B	3	4
Z	0,075	0,15	0,20	0,30	0,40

Fuente: UBC 97 TABLA 16-I. p. 2-30.

2.3.1.7. **Factor de cercanía**

A cada sitio le será asignado el factor de cercanía de origen sísmico de acuerdo con la tabla 16-S y el tipo de origen sísmico de acuerdo a la tabla 16-U.

Tabla III. **Tipos de fuente sísmica para factor Na**

Tipo de fuente: sísmica	Distancia más cercana a la fuente: conocida		
	≤ 2 km	5 km	≥ 10 km
A	1,5	1,2	1,0
B	1,3	1,0	1,0
C	1,0	1,0	1,0

Fuente: UBC 97 TABLA 16-S. p. 2-35.

Tabla IV. **Tipos de fuente sísmica para factor Nv**

Tipo de fuente: sísmica	Distancia más cercana a la fuente: conocida		
	≤ 2 km	5 km	≥ 10 km
A	2,0	1,6	1,0
B	1,6	1,2	1,0
C	1,0	1,0	1,0

Fuente: UBC 97 TABLA 16-T. p. 2-35.

Tabla V. **Factores de fuente sísmica**

Fuente sísmica	Descripción de la fuente	Máxima magnitud de momento	Tasa de deslizamiento TD (mm/año)
A	Fallas capaces de producir eventos de gran magnitud y que tienen una alta tasa de actividad sísmica.	$M \geq 7$	$TD \geq 5$
B	Todas las otras fallas distintas a las tipo A y C	$M \geq 7$ $M < 7$ $M \leq 6,5$	$TD < 5$ $TD > 2$ $TD < 2$
C	Fallas que no son capaces de producir eventos de gran magnitud y que tienen una baja tasa de actividad sísmica.	$TD < 6,5$	$TD \leq 2$

Fuente: UBC 97 tabla 16-U. p. 2-35.

2.3.1.8. Factores de respuesta

A cada estructura le será asignado un coeficiente sísmico C_a de acuerdo con la tabla 16-Q y el coeficiente sísmico C_v , de acuerdo con la tabla 16-R.

Tabla VI. **Coeficiente sísmico C_a**

	Factor de zona sísmica				
Perfil de suelo	0,07	0,15	0,20	0,30	0,40
Sa	0,06	0,12	0,16	0,24	0,32 Nv
Sb	0,08	0,15	0,20	0,30	0,40 Nv
Sc	0,09	0,18	0,24	0,33	0,40 Nv
Sd	0,12	0,22	0,28	0,36	0,44 Nv
Se	0,19	0,30	0,34	0,36	0,36 Nv
Sf	Requiere estudio especial				

Fuente: UBC 97 tabla 16-Q. p. 2-34.

Tabla VII. **Coeficiente sísmico C_v**

	Factor de zona sísmica				
Perfil de suelo	0,07	0,15	0,20	0,30	0,40
Sa	0,06	0,12	0,16	0,24	0,32 Nv
Sb	0,08	0,15	0,20	0,30	0,40 Nv
Sc	0,13	0,25	0,32	0,45	0,56 Nv
Sd	0,18	0,32	0,40	0,54	0,64 Nv
Se	0,26	0,50	0,64	0,84	0,96 Nv
Sf	Requiere estudio especial				

Fuente: UBC 97 tabla 16-R. p. 2-35.

2.3.2. Requerimientos de configuración

2.3.2.1. Estructuras regulares

Las estructuras regulares no tendrán significativas discontinuidades físicas en planta o elevación o en su sistema resistente de fuerzas laterales tales como los descritos en el siguiente párrafo.

2.3.2.2. Estructuras irregulares

Las estructuras irregulares tienen significativas discontinuidades físicas en la configuración en planta o elevación o en su sistema resistente de fuerzas laterales. Los aspectos irregulares son descritos en las tablas 16-L y 16-M.

Tabla VIII. Irregularidades verticales

1.	<p>Irregularidad de rigidez</p> <p>Un piso suave es aquel en que su rigidez es menor del 70% menor que la del piso superior o 80% de un promedio de los tres niveles superiores.</p>
2.	<p>Irregularidad de masa</p> <p>Serán consideradas como masas irregulares donde existan diferencias efectivas de masas del 15% en niveles adyacentes.</p>
3.	<p>Geometría vertical irregular</p> <p>Serán consideradas como geometrías verticales irregulares cuando las dimensiones horizontales del sistema resistente de fuerzas laterales, sea mayor al 130% de un nivel adyacente.</p>
4.	<p>Discontinuidad en capacidad- piso débil</p> <p>Un piso débil es aquel que posee una capacidad de resistencia menor al 80% del piso superior. La resistencia de un nivel es el total de resistencia sísmica que todos los elementos que comparten fuerzas en el nivel considerado.</p>

Fuente: UBC 97 TABLA 16-L. p. 2-31.

Tabla IX. Irregularidades en planta

1.	<p>Irregularidad torsional- diafragmas flexibles</p> <p>Se considera que hay irregularidad torsional cuando la estructura presenta una diferencia de 1,2 veces de derivas laterales en los extremos de los ejes estructurales.</p>
2.	<p>Esquinas reentrantes</p> <p>Se consideran como esquinas reentrantes donde existan tramos estructurales que se introduzcan en la estructura más del 15% de la longitud total de la dirección bajo análisis.</p>
3.	<p>Discontinuidad en el diafragma</p> <p>Diafragmas con abruptas discontinuidades o variaciones de rigidez, incluyendo aquellos que contengan áreas abiertas de más del 50% del total de la zona cerrada.</p>

Fuente: UBC 97 TABLA 16-L. p. 2-31.

2.3.3. Sistemas estructurales

2.3.3.1. Generales

Los sistemas estructurales deberán ser clasificados como uno de los tipos listados en la tabla 16-N.

Tabla X. **Sistemas estructurales**

Sistemas básicos estructurales	Sistema resistente de fuerza lateral	R	Limitación de altura (m)
Sistemas de muros de carga	Muros de corte		
	<ul style="list-style-type: none"> • Concreto • Mampostería 	4,5 4,5	48 48
Sistemas de marcos resistentes al momento	Marcos especiales resistentes de momento		
	<ul style="list-style-type: none"> • Acero • Concreto 	8,5 8,5	Sin limite Sin limite
	Sistemas de mampostería resistente a momentos.	6,5	48
	Marcos ordinarios resistente a momento		
<ul style="list-style-type: none"> • Acero • Mampostería 	4,5 3,5	- 48	
Sistemas duales	Muros de corte		
	<ul style="list-style-type: none"> • concreto con marcos especiales • concreto con marcos ordinarios 	8,5 4,2	Sin límite 48

Fuente: UBC 97 tabla 16-N. p. 2-32.

2.3.3.2. Limitaciones de altura

Los límites de altura de las edificaciones y las zonas sísmicas 3 y 4 están dados en la tabla 16-N.

2.4. Método estático

2.4.1. Cortante basal de diseño

El cortante basal total en una dirección específica será determinado por la siguiente fórmula:

$$V = (C_v I W) / (R T) \quad [30-4]$$

El cortante total de diseño no excederá lo siguiente:

$$V \leq 2,5 C_a I W / R \quad [30-5]$$

El cortante total de diseño no deberá ser menor que lo siguiente:

$$V \geq 0,11 C_a I W \quad [30-6]$$

Adicionalmente, para la zona sísmica 4, el cortante total de diseño no será menor de:

$$V \geq 0,8 Z N_v I W / R, \text{ si } Z = 0,40 \quad [30-7]$$

2.4.2. Período de la estructura

El valor T deberá ser determinado por alguno de los siguientes métodos.

- Método A

Para todos los edificios, el valor T puede aproximarse de la siguiente fórmula:

$$T_a = C_t (h_n)^{3/4} \quad [30-8]$$

Dónde

$C_t = 0,20$ para mampostería

$C_t = 0,30$ para marcos resistente a momentos de concreto

$C_t = 0,35$ para marcos resistente a momentos de acero

2.4.3. Distribución de fuerza vertical

La fuerza total será distribuida basándose en la altura de la estructura de acuerdo con las siguientes fórmulas en la ausencia de un proceso riguroso.

$$V = F_t + \sum_{i=0}^n F_1 \quad [30-8]$$

La fuerza concentrada F_t , en el último nivel del edificio, que es en adición a F_n , será determinada de la fórmula:

$$F_t = 0,07 T V \quad [30-14]$$

El valor T usado para propósito de calcular F_t puede ser el período que corresponda con el diseño del cortante computado usando la fórmula (28-1). F_t no excederá $0,25 V$ y puede ser considerado como cero cuando T es 0,7 segundos o menos. El valor restante del cortante de la base será distribuido basándose en la altura de la estructura, incluyendo el nivel n , de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$F_x = \frac{(V - F_t) w_x h_x}{\sum_{k=0}^n w_i h_i} \quad [30-14]$$

2.4.4. Distribución horizontal del corte

El diseño del corte, V_x en cualquier piso es la suma de las fuerzas F_t y F_x arriba de ese piso. V_x será distribuido a los elementos verticales del sistema resistente de fuerzas laterales en proporción a sus rigideces, considerando la rigidez del diafragma.

Donde los diafragmas sean rígidos, la masa de cada nivel será asumida, Se debe desplazar el centro de masa ya calculado en cada dirección a una distancia del 5% de las dimensiones del edificio en el nivel perpendicular a la dirección de la fuerza bajo consideración.

2.5. Método dinámico

2.5.1. Introducción al análisis estructural dinámico

Un sistema dinámico se caracteriza por variables que pueden experimentar cambios en el tiempo pueden ser predecibles si se conocen las influencias extremas que actúan sobre el sistema.

Una acción tiene carácter dinámico si su variación con el tiempo es rápida, y da origen a fuerzas de inercia en las estructuras.

Algunas fuentes de vibración capaces de afectar la estructura son:

- Movimiento sísmico
- Vibraciones causadas por vientos
- Vibraciones causadas por olas y corrientes
- Vibraciones causadas por explosiones
- Vibraciones causadas por choques o impactos

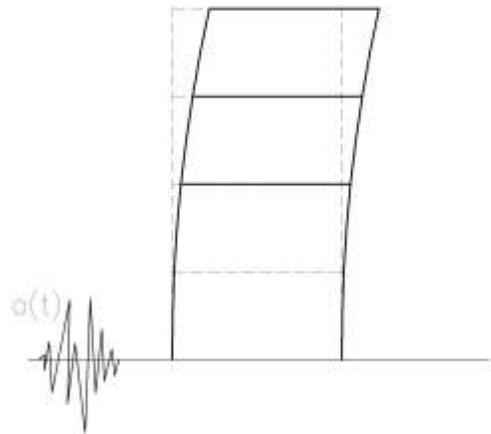
En la definición de las cargas dinámicas están el determinista y el no determinista una carga dinámica tiene características determinista cuando su variación temporal es completamente conocida en cada instante de tiempo. Y por lo contrario una carga es no determinista si algunos de sus parámetros o su variación con el tiempo han sido definidos estadísticamente.

2.5.2. Respuesta dinámica

Se define como respuesta dinámica cualquier cantidad que pueda caracterizar el efecto de las cargas dinámicas en una estructura.

Respuestas dinámicas:

- Aceleración
- Velocidad
- Desplazamiento
- Esfuerzo
- Deformación
- Definición de la acción dinámica



2.5.2.1. Acción dinámica definida en términos determinísticos

Las acciones dinámicas definidas utilizando representaciones deterministas son funciones del tiempo cuyo valor en cada instante es conocido, este tipo de representaciones es apropiado en el análisis *a posteriori* de una estructura esto es en la comprobación de su comportamiento sísmico, una vez que se disponga de un acelerograma de un movimiento sísmico específico.

2.5.2.2. Acción dinámica definida en términos estocásticos

La representación estocástica se utiliza cuando la acción dinámica no puede representarse mediante funciones temporales cuyos valores sean conocidos en cada instante de tiempo.

Las cargas se simulan mediante familias de funciones definidas conforme características probabilísticas y utilizando métodos propios de la teoría de probabilidades.

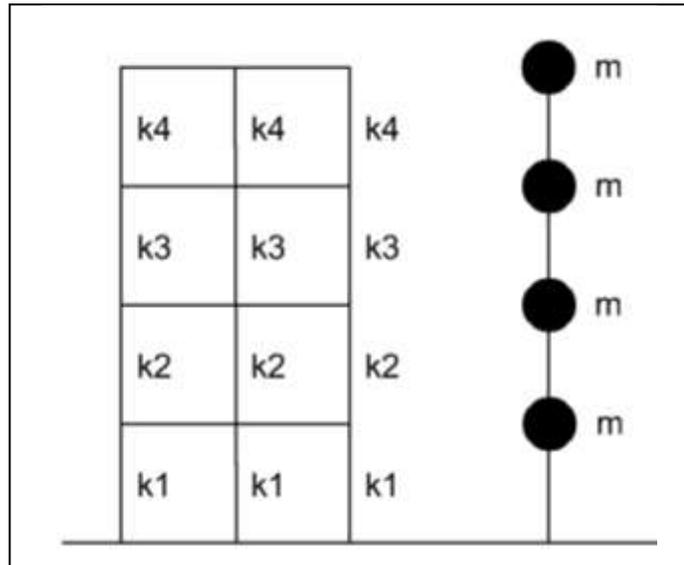
El análisis sísmico es un caso claro en el cual es necesario modelizar la acción dinámica mediante procesos estocásticos debido a las incertidumbres a los eventos futuros.

En el caso sísmico solo la acción y la respuesta se modelizan estocásticamente mientras que los parámetros del modelo estructural se definen en forma determinista.

2.5.2.3. Sistemas de masas concentradas

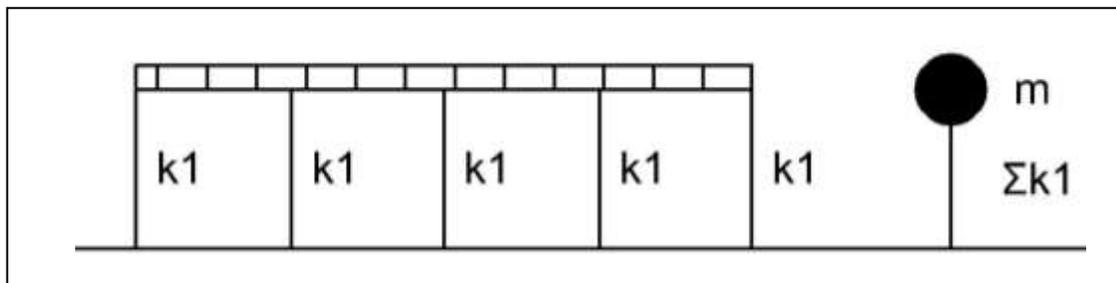
Consiste en condensar las masas en un solo punto que emule el efecto de las fuerzas de inercia y generar un modelo con una rigidez equivalente del sistema, (ver figura 6 y 7).

Figura 6. **Discretización de un sistema de masas concentradas en marcos de varios niveles**



Fuente: elaboración propia.

Figura 7. **Discretización de un sistema de masas concentradas en marcos de un nivel**



Fuente: elaboración propia.

2.5.3. Ecuaciones de movimiento

- Principio de D’Alambert
- Trabajo virtual

2.5.3.1. Principio de D’Alambert

Un sistema dinámico está en equilibrio cuando todas las fuerzas que actúan, incluidas las de inercia cumplen con las ecuaciones de equilibrio estático en cada instante, según la segunda ley de Newton.

$$F = m * a$$

2.5.3.2. Principio del trabajo virtual

El principio de trabajo virtual establece que un sistema se encuentra en equilibrio bajo la acción de fuerzas externas que actúan sobre ella, incluyendo las de inercia si para cualquier desplazamiento que se imponga en el sistema, el trabajo realizado por las fuerzas externas es igual al de las fuerzas internas.

2.5.4. Espectro de respuesta sísmica

El espectro es una familia de curvas tal que cada una representa la máxima respuesta de distintos osciladores, con distintas frecuencias y amortiguamientos, se denomina espectro de respuesta a la representación gráfica de los valores de respuesta máxima.

Los espectros de respuesta en desplazamiento, velocidad y aceleración se definen para un cierto acelerograma como los máximos valores de las respuestas expresadas en función de la frecuencia o el período para un amortiguamiento crítico.

2.5.5. Sistemas de varios grados de libertad

2.5.5.1. Modos naturales

Son las configuraciones o combinaciones de desplazamiento que un sistema puede tener.

2.5.5.2. Frecuencias naturales

La primera frecuencia (la menor) es la frecuencia fundamental del sistema, a menor frecuencia mayor período.

$$T = 2\pi/\omega$$

2.5.6. Métodos de cálculo

- Desacoplamiento modal
- Interacción matricial
- Método de Newmark
- Método de Helzar
- Jacobi o matriz inversa
- Método de Stodola

2.5.6.1. Sistemas libres no amortiguados

$$F_{ext} = 0 \quad Mu + ku = 0$$

$$U = A \sin wt$$

$$U = -w^2 u$$

$$-w^2 uM + KU = 0$$

2.5.6.2. Método superposición modal

Este análisis debe basarse en una representación apropiada del movimiento del suelo y debe realizarse utilizando los principios aceptados de la dinámica.

2.5.6.2.1. Análisis modal

El procedimiento de análisis modal es apropiado para calcular la respuesta de estructuras complejas de varios grados de libertad a movimientos sísmicos. La respuesta estructural es modelada como la máxima respuesta de vibración de la estructura real. Combinando la respuesta de los modos individuales se obtienen las fuerzas externas equivalentes, el cortante basal y el cortante de piso, que pueden usarse de la misma forma como en el procedimiento de fuerza lateral estática.

El procedimiento de análisis modal tiene la ventaja de determinar la distribución real de las fuerzas laterales, de las masas y una distribución de rigideces a lo largo de la altura de una estructura irregular, que puede diferir apreciablemente de la distribución lineal simplificada, asumida en el método de la fuerza lateral estática.

Además considera los efectos de los modos más altos de la respuesta de una estructura, algunos de los cuales pueden contribuirse significativamente en la respuesta global de la estructura.

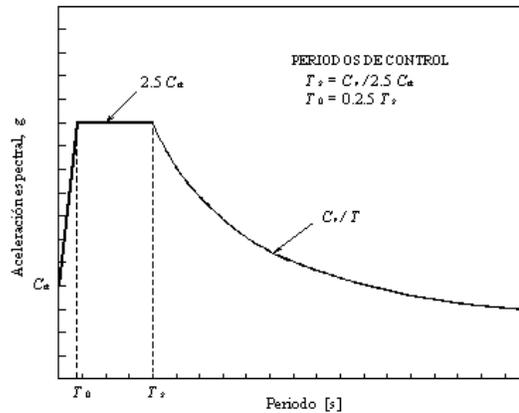
2.5.6.2.2. Procedimiento del análisis modal

Las fases necesarias en el procedimiento del análisis modal se basan en seleccionar un espectro de respuesta sísmico apropiado, aplicando una técnica de análisis dinámico para un modelo matemático de la estructura, combinando la respuesta de un número suficiente de modos para asegurar, que por lo menos el 90% de la masa participante de la estructura esté incluida, en el cálculo de respuesta para cada dirección horizontal principal.

El espectro de diseño presentado en el código UBC e ilustrado en la figura 8, puede utilizarse después de aplicarse valores apropiados de C_a y C_v consistente con el lugar específico. Las ordenadas de aceleración del espectro de diseño deben multiplicarse por la aceleración, debido a la gravedad. Alternativamente, se pueden utilizar espectros de diseño de lugares específicos como el ilustrado en la figura 9.

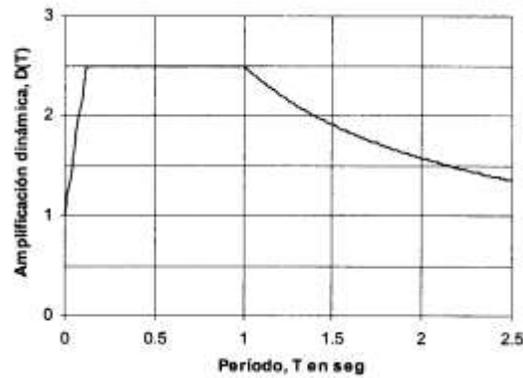
El cual es el espectro definido por AGIES este debe tener como mínimo 10% de probabilidad de ser excedido en 50 años, además el espectro debe desarrollarse para una relación de amortiguamiento de 5%, a menos que se demuestre que un valor diferente sea consistente con el comportamiento estructural anticipado a la intensidad de vibración establecida para el sitio.

Figura 8. **Función de amplificación dinámica para perfil del suelo, con 5% de amortiguamiento crítico según UBC 97**



Fuente: Normas estructurales de diseño recomendadas para la república de Guatemala, AGIES NR-2: 2000. p. 14.

Figura 9. **Función de amplificación dinámica para perfil del suelo, con 5% de amortiguamiento crítico según AGIES**



Fuente: Normas estructurales de diseño recomendadas para la república de Guatemala, AGIES NR-2: 2000. p. 14.

Tabla XI. **Factores para función de amplificación dinámica**

Función de amplificación dinámica	
Cuando $T < T_A$	$D(T) = 1,0 + 1,5 T / T_A$
Cuando $T_A < T < T_B$	$D(T) = 2,5$
Cuando $T = T_B$	$D(T) = 2,5 (T_B / T)^{0,67}$

Fuente: Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica. Normas estructurales de diseño y construcción recomendadas para la república de Guatemala. p. 2-13.

Del desacoplamiento modal se obtienen los modos de vibración.

$$-w^2[m] + k = 0$$

Ya obtenidos los modos de vibración de la estructura, por medio de la superposición modal se obtienen los desplazamientos máximos debido al espectro de respuesta sísmico.

$$m\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -mrUg$$

Los modos de vibración son ortogonales y linealmente independientes

$$w^2 = \frac{k}{m} = 2 \xi w$$

$$\phi^T m \phi \ddot{u} + \phi^T [c] \phi \dot{u} + \phi^T [k] \phi u = \phi^T m r \ddot{u} \quad \text{sustituyendo valores}$$

$$\ddot{u} + 2 \xi w \dot{u} + w^2 u = \frac{\phi^T [M] r}{\phi^T [M] \phi} \ddot{u}$$

En donde el valor $\frac{\phi^T [M] r}{\phi^T [M] \phi}$ es el coeficiente de participación [c] por lo que se podría escribir la expresión como sigue:

$$U_{max} = [c] \frac{S_a}{w^2}$$

Debido a que la aceleración "ü" viene del espectro de respuesta esta se sustituye de la siguiente manera:

$$U_{max} = \phi_i \frac{\phi^T [M] r S_a}{\phi^T [M] \phi w^2}$$

Luego se combinan todos los modos de vibración de la siguiente manera, sumando los cuadrados de cada uno de los valores del modo y luego obteniendo la raíz cuadrada del mismo.

$$U_{total} = \sqrt{\sum U_{max}^2}$$

Para el cálculo de la fuerza se parte del principio de la rigidez siendo este:

$$F = KU$$

$$F = KU_{max}$$

$$F = K \phi C \frac{1}{w^2} S_a$$

$$F_{total} = \sqrt{\sum F_{max}^2}$$

Este método proporciona la distribución de fuerzas por nivel con los cuales se obtiene el cortante basal en la base del modelo, a diferencia del análisis estático el cual se reparte ya con el cortante obtenido.

3. EJEMPLO REPRESENTATIVO

3.1. Integración de carga vertical y sísmica

Se integrara la carga de la edificación utilizando las propiedades geométricas y de los materiales ya descritos.

3.2. Ubicar obra

La obra estará ubicada en el valle de la ciudad capital.

3.2.1. Predimensionamiento de vigas y columnas

Las dimensiones de los elementos a trabajar son los siguientes:

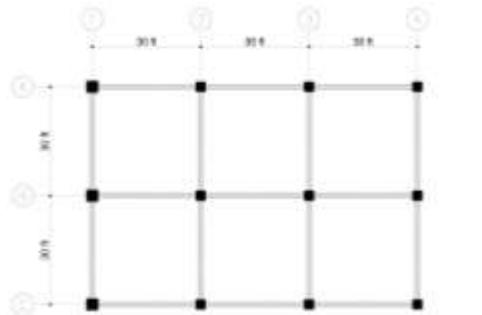
Tabla XII. **Propiedades de sección**

Elemento	Base [ft]	Altura [ft]
Viga primaria	1,64	2,95
Columna	2,62	2,62
Losa	t = 8 in o 0,667 ft	

Fuente: elaboración propia.

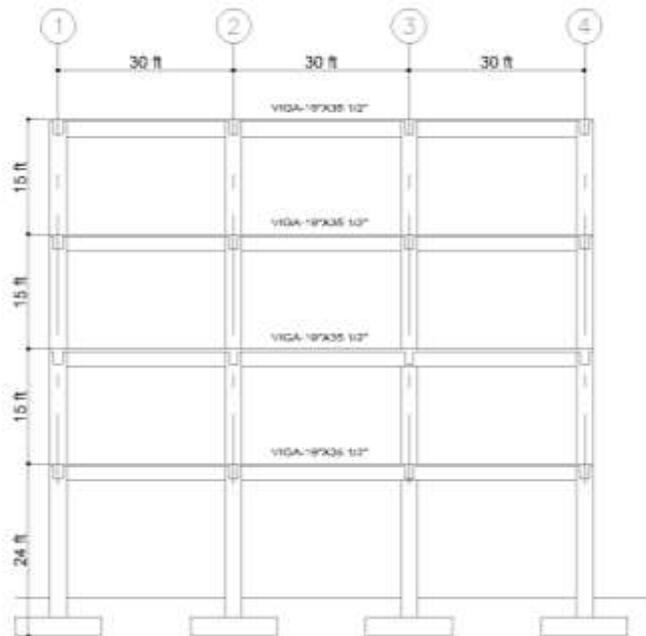
3.2.2. Plantas y elevaciones del proyecto

Figura10. Esquema, planta arquitectónica



Fuente: elaboración propia.

Figura11. Esquema, elevación de arquitectura



Fuente: elaboración propia.

3.3. Condiciones del sitio

La obra para ambos casos se debe encontrar por lo menos a una distancia de 15 kilómetros de la falla activa más cercana, según el estudio de suelos el material es un limo arcilloso catalogado como un suelo tipo S2, según el AGIES.

3.3.1. Condiciones o requerimientos básicos

3.3.1.1. Regularidad

Según la tabla 16-L y 16-M del UBC 97, la estructura es regular en todos los aspectos.

3.4. Cálculo de peso propio

3.4.1. Integración de peso estructura

Para calcular la carga vertical y sísmica se integran las cargas debido al peso de toda la estructura sin tomar factores de reducción en la carga viva.

Para la integración de la carga viva se tomará un valor del 10% del valor integrado para los niveles 1, 2,3 y para el nivel 4 no se tomará valor de carga viva.

3.4.2. Integración de peso muerto nivel 4

Tabla XIII. Cálculo de peso nivel 4

Nivel 4			
	Base ft	Altura ft	Longitud ft
Columnas	2,62	2,62	6,83
Vigas	1,64	2,95	456,39
Vigas secundarias	0,00	0,00	0,00

Peso de elementos						
	Carga / ft ²	k	Cantidad	Area ft ²	Longitud ft	Peso [Kip]
Losa	0,13			5 400,00		702,00
Vigas principales	0,56				465,39	261,41
Vigas secundarias	0,00				0,00	0,00
Columnas	1,03		12,00		6,83	84,69
Carga viva	0,00			4 950,00		14,85

Fuente: elaboración propia.

3.4.3. Integración de peso muerto nivel 2 y 3

Tabla XIV. Cálculo de peso nivel 2 y 3

Nivel 2 & 3			
	Base ft	Altura ft	Longitud ft
Columnas	2,62	2,62	14,33
Vigas	1,64	2,95	456,39
Vigas secundarias	0,00	0,00	0,00

Peso de elementos						
	Carga / ft ²	k	Cantidad	Area ft ²	Longitud ft	Peso [Kip]
Losa	0,13			5 400,00		702,00
Vigas principales	0,56				465,39	261,41
Vigas secundarias	0,00				0,00	0,00
Columnas	1,03		12,00		14,33	177,64
Carga viva	0,00			4 950,00		49,5

Fuente: elaboración propia.

3.4.4. Integración de peso muerto nivel 1

Tabla XV. Cálculo de peso nivel 1

Nivel 1			
	Base ft	Altura ft	Longitud ft
Columnas	2,62	2,62	14,33
Vigas	1,64	2,95	456,39
Vigas secundarias	0,00	0,00	0,00

Peso de elementos						
	Carga / ft ²	k	Cantidad	Area ft ²	Longitud ft	Peso [Kip]
Losa	0,13			4 950,00		643,50
Vigas principales	0,56				465,39	261,41
Vigas secundarias	0,44				0,00	0,00
Columnas	1,03		12,00		30,83	382,14
Carga viva	0,01			4 950,00		49,5

Fuente: elaboración propia.

3.4.5. Tabla resumen de pesos por nivel

Tabla XVI. Resumen pesos por nivel

Peso nivel 4	1 062,95	Kips
Peso nivel 3	1 190,55	Kips
Peso nivel 2	1 190,55	Kips
Peso nivel 1	1 395,05	Kips
Peso total	4 839,11	Kips

Fuente: elaboración propia.

La integración de cargas por nivel da como resultado un peso total de 4 839,11 Kips equivalente a 2 200 toneladas.

3.5. Determinación de cortante basal

3.5.1. Determinación de período

Según la fórmula (16-34) UBC 97

$$T = C_t (h_n)^{3/4}$$

$$T = 0,03(69)^{3/4} \quad \text{donde} \quad T = 0,718 \text{ segundos}$$

Debido a que el período es mayor a 0,70 segundos se agregará al cortante basal una fuerza en el último nivel de la siguiente forma:

$$F_t = 0,07 * \text{período} * \text{cortante basal}$$

3.5.2. Determinación de factores para análisis

$I = 1$	Ver tabla 16-K	
$R = 8,5$	Ver tabla 16-N	Ver tabla X
$N_a = 1$	Ver tabla 16-S	Ver tabla III
$N_v = 1,2$	Ver tabla 16-T	Ver tabla IV
$C_v = 0,56$ $N_v = 1$	Ver tabla 16-T	Ver tabla VII
$C_a = 0,40$ $N_a = 1$	Ver tabla 16-Q	Ver tabla VI

El cortante basal total de diseño en una dirección especificada será determinada por la siguiente ecuación:

$$V = \frac{C_v * I}{R * T} * W = V = \frac{C_v * I}{R * T} * W \text{ ecuación 16-34}$$

$$V = \frac{0,56*1}{8,5*0,718} * W = 0,0917 * W = 0,0917 * W$$

Pero el cortante basal no excederá el valor de

$$V = \frac{2,5 * Ca * I}{R} * W = V = \frac{2,5 * Ca * I}{R} * W \quad \text{ecuación 16-34}$$

$$V = \frac{2,5 * 0,40 * 1}{8,5} * W = 0,1176 * W$$

También el cortante Basal no será menor a

$$V = 0,11 * Ca * I * W = V = 0,11 * Ca * I * W \quad \text{ecuación 16-34}$$

$$V = 0,11 * 0,40 * 1 * W = 0,04 * W$$

Adicionalmente para la zona sísmica 4, el cortante basal de diseño no será menor de

$$V = \frac{0,8 * Z * N_v * I}{R} * W = V = \frac{0,8 * Z * N_v * I}{R} * W \quad \text{ecuación 16-34}$$

$$V = \frac{0,8 * 0,4 * 1 * 1}{8,5} * W = 0,03764 * W$$

Como el valor V de la ecuación 16-34 se encuentra en el rango de las otras ecuaciones, el valor del cortante basal será igual a

$$V = 0,0917 * W = 0,0917 * 4\,839,11 = 444,03 \text{ Kips}$$

El cortante basal por medio del análisis estático da un valor de 444,03 Kips, este valor se comparará con el valor obtenido por el método de análisis modal espectral.

Además de este valor se agregará el valor de la fuerza Ft en el último nivel.

$$F_t = 0,07 * 0,718 * 444,03 = 22,31 \text{ Kips}$$

Por lo que se tiene un valor de cortante basal total igual a 466,35 Kips equivalente a 211,98 toneladas de fuerza.

Las fuerzas por nivel se calculan de la siguiente forma:

$$\frac{(V - F_t) h_{ix} * w_{ix}}{\sum_{i=0}^n h_x * w_x}$$

Tabla XVII. **Cálculo corte por nivel**

Distribución de cortante basal			
Nivel	Peso del nivel Kips	Altura Ft	Peso * altura
Peso nivel 4	1 062,95	69,00	73 343,61
Peso nivel 3	1 190,55	54,00	64 289,88
Peso nivel 2	1 190,55	39,00	46 431,58
Peso nivel 1	1 395,05	24,00	33 481,18
			217 546,25

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Cálculo corte por nivel**

Distribución de fuerzas por nivel (Nivel 4)

Corte basal X	444,03	Kips	Corte en sentido X al 100% Corte en sentido Y al 100%
Ft X	22,32	Kips	
Corte basal Y	444,03	Kips	
Ft Y	22,32	Kips	

	Sentido X		Sentido Y
Fuerza nivel 4	172,01644	Fuerza nivel 4	172,01644
Fuerza nivel 3	131,2203	Fuerza nivel 3	131,2203
Fuerza nivel 2	94,7702	Fuerza nivel 2	94,7702
Fuerza nivel 1	68,3375	Fuerza nivel 1	68,3375
Total	466,3443	Kips	466,3443 Kips

Distribución de fuerzas sobre Eje B

Vx =	172,0164	Vx =	131,2203
Vy =	172,0164	Vy =	131,2203
Nivel 4		Nivel 3	
Eje A	57,3388	Eje A	43,7401
Eje B	57,3388	Eje B	43,7401
Eje C	57,3388	Eje C	43,7401
Eje 1	43,0041	Eje 1	32,8051
Eje 2	43,0041	Eje 2	32,8051
Eje 3	43,0041	Eje 3	32,8051
Eje 4	43,0041	Eje 4	32,8051
Vx =	94,7702	Vx =	68,3375
Vy =	94,7702	Vy =	68,3375

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Cálculo corte por eje en cada nivel**

NIVEL 2		NIVEL 1	
Eje A	31,5901	Eje A	22,7792
Eje B	31,5901	Eje B	22,7792
Eje C	31,5901	Eje C	22,7792
Eje 1	23,6925	Eje 1	17,0844
Eje 2	23,6925	Eje 2	17,0844
Eje 3	23,6925	Eje 3	17,0844
Eje 4	23,6925	Eje 4	17,0844

Fuente: elaboración propia.

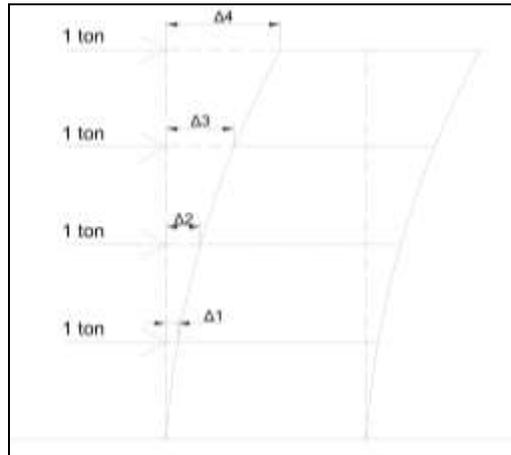
3.6. Integración de cortante basal dinámico

Para el caso de análisis dinámico, se sincretizará el edificio en un sistema de masas concentradas y marcos rígidos equivalentes.

3.6.1. Cálculo de rigidez

Para el cálculo de la rigidez del marco, se tomará en cuenta el aporte debido a los elementos verticales, es decir columnas, aplicando una carga de una tonelada, calculando deflexiones y luego obteniendo la rigidez relativa del marco, como se muestra a continuación. Este cálculo se realizará para un marco, multiplicando este valor por el número de ejes para obtener la rigidez equivalente del sistema.

Figura 12. **Determinación de rigidez por medio de desplazamientos relativos**



Fuente: elaboración propia.

$$\text{Rigidez de marco (K}_0\text{)} = \frac{\sum \text{Facumulada}}{X_0 - X_{0-1}}$$

Tabla XX. **Cálculo de masa y rigidez**

Cálculo de masas y rigidez sentido X

Aplicando cargas de una tonelada al marco se obtienen los siguientes desplazamientos:

D1	0,013199	cm	K1	=	75,7633154	t
D2	0,023902	cm	K2	=	93,4317481	t
D3	0,034042	cm	K3	=	98,6193294	t
D4	0,044597	cm	K4	=	93,8526513	t
F1	1	t	K1	=	227,289946	t
F2	1	t	K2	=	280,295244	t
F3	1	t	K3	=	295,857988	t
F4	1	t	K4	=	281,557954	t

3 marcos

Fuente: elaboración propia.

Los datos resaltados son los obtenidos para los tres marcos.

3.6.2. Cálculo de masas

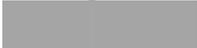
El cálculo de las masas se realizará, de la misma manera que se integró el peso de la estructura para el caso de carga estática, dividiendo el valor correspondiente al peso por el valor de la gravedad dada en $[cm/s^2]$.

Tabla XXI. **Resumen masas y rigidez equivalente del modelo matemático**

Integración por nivel		
	Masa t	Rigidez t/cm
Nivel 4	0,5241	281,557954
Nivel 3	0,5671	295,857988
Nivel 2	0,5671	280,295244
Nivel 1	0,592	227,289946

Fuente: elaboración propia.

Modelo matemático para el análisis

Modelo matemático			
N4		0,5241	masa 4 t cm/s ²
		281,557954	rigidez 4 t / cm
N3		0,5671	masa 3 t cm/s ²
		295,8579882	rigidez 3 t / cm
N2		0,5671	masa 2 t cm/s ²
		280,2952443	rigidez 2 t / cm
N1		0,592	masa 1 t cm/s ²
		227,2899462	rigidez 1 t / cm

Fuente: elaboración propia.

3.6.3. Desarrollando la fórmula de desacoplamiento modal

$$[-W^2 M + K]\{U\}$$

Con la ayuda del programa *Mathematica* v7,0 se obtiene la suma de las matrices

$$\text{mat} = \text{MatrixForm}\left[-W^2 * \begin{pmatrix} m1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k1 + k2 & -k2 & 0 & 0 \\ -k2 & k2 + k3 & -k3 & 0 \\ 0 & -k3 & k3 + k4 & -k4 \\ 0 & 0 & -k4 & k4 \end{pmatrix}\right]$$

$$A = \begin{pmatrix} 507.58 - 0.592 W^2 & -280.29 & 0 & 0 \\ -280.29 & 576.14 - 0.5671 W^2 & -295.85 & 0 \\ 0 & -295.85 & 577.40 - 0.5571 W^2 & -281.55 \\ 0 & 0 & -281.55 & 281.55 - 0.5241 W^2 \end{pmatrix}$$

Se calcula el determinante de la matriz "A" utilizando el programa *Mathematica* dando como resultado

$$\text{Out}[23]= 5.30658 \times 10^9 - 1.12782 \times 10^8 W^2 + 352224. W^4 - 337.884 W^6 + 0.0980232 W^8$$

Solve[sol1 = 0, W]

{(W → -42.2736), (W → -33.5854), (W → -21.8051), (W → -7.51562), (W → 7.51562), (W → 21.8051), (W → 33.5854), (W → 42.2736)}

Cálculo de los períodos por medio de las frecuencias "W" encontradas

$$T1 = (2 * \text{Pi}) / 7.51562 \text{ sg}$$

$$T2 = (2 * \text{Pi}) / 21.8051 \text{ sg}$$

$$T3 = (2 * \text{Pi}) / 33.5854 \text{ sg}$$

$$T4 = (2 * \text{Pi}) / 42.2736 \text{ sg}$$

$$\text{Out}[12]= 0.836017$$

$$\text{Out}[13]= 0.288152$$

$$\text{Out}[14]= 0.187081$$

$$\text{Out}[15]= 0.148631$$

Cada una de las frecuencias se sustituye en la matriz A para obtener los desplazamientos para cada uno de los 4 modos de vibración de la estructura.

Tabla XXII. **Matriz para frecuencia 7,51**

PARA	7,51562
------	---------

474,1463405	-280,2952443	0	0
-280,2952443	544,1208476	-295,857988	0
0	-295,8579882	545,383557	-281,557954
0	0	-281,557954	251,954405

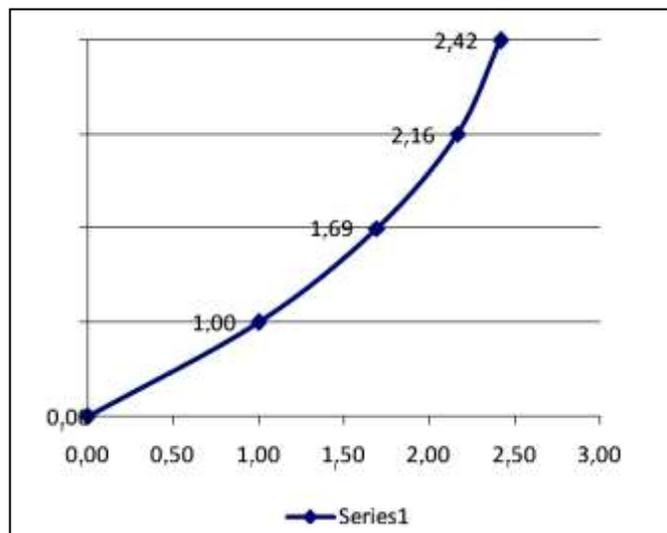
 \times

1
U2
U3
U4

U1	1
U2	1,6916
U3	2,16366
U4	2,41789

Fuente: elaboración propia.

Figura13. **Modo de vibración 1**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Matriz para frecuencia 21,80**

PARA	21,8051
------	---------

226,111458	-280,2952443	0	0
-280,2952443	306,5185134	-295,857988	0
0	-295,8579882	307,781223	-281,557954
0	0	-281,557954	32,3681175

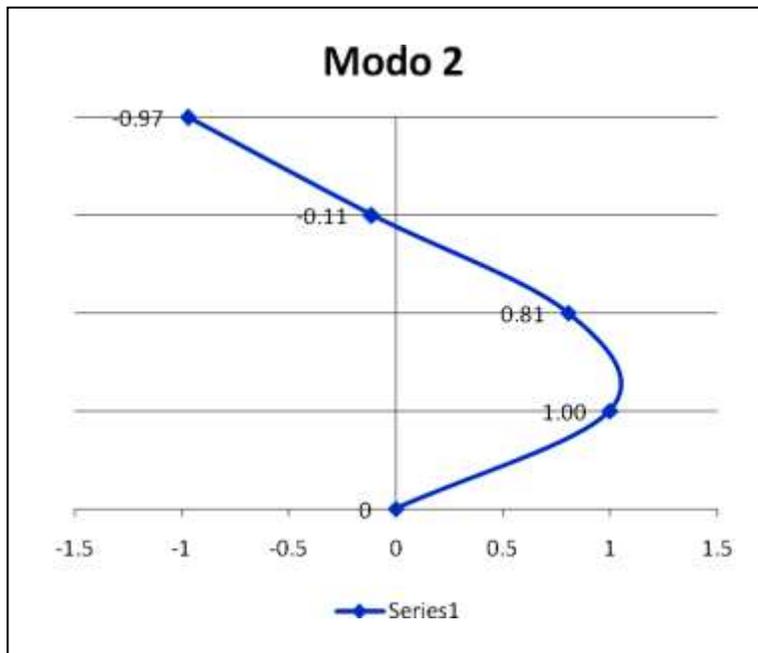
 \times

1
U2
U3
U4

U1	1
U2	0,80669
U3	-0,11164
U4	-0,97112

Fuente: elaboración propia.

Figura14. **Modo de vibración 2**



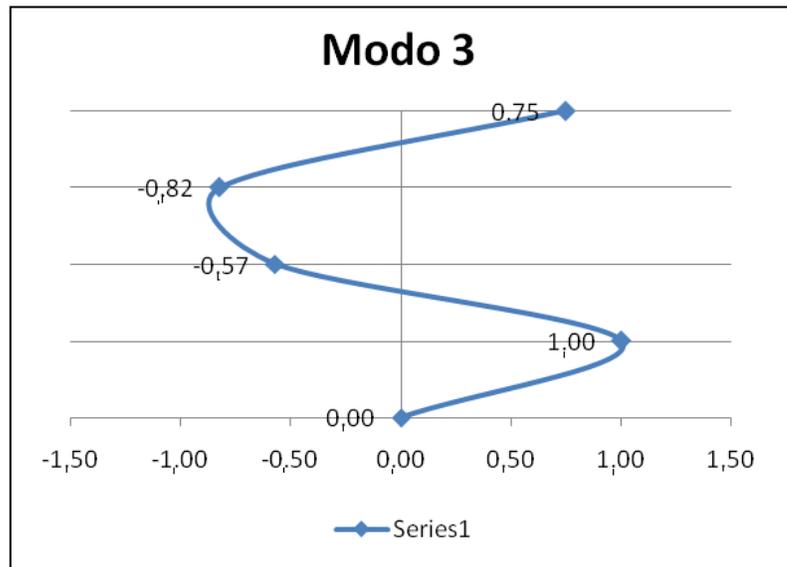
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Matriz para frecuencia 33,58**

PARA 33,5854								
-160,178433	-280,295244	0	0	X	1	U1	1	
-280,295244	-63,5237112	-	0		U2	U2	-	0,57146
0	-295,857988	-	-		U3	U3	-0,8247	
0	0	-	-		U4	U4	0,74996	
		295,857988	62,2610016					
		281,557954	309,615889					

Fuente: elaboración propia.

Figura15. **Modo de vibración 3**



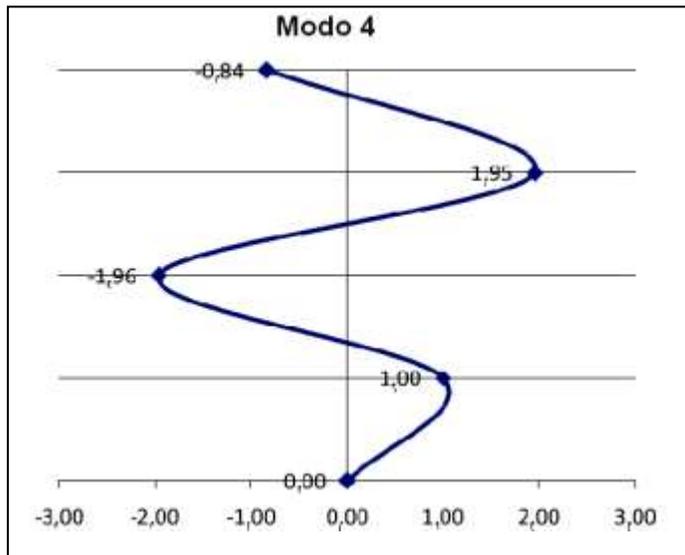
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Matriz para frecuencia 42,27**

PARA	42,2736						
-550,352706	-280,295244	0	0	X	1	U1	1
-280,295244	-437,286938	-	0		U2	U2	-
0	-295,857988	295,857988	-		U3	U3	1,96348
0	0	-	-		U4	U4	1,95468
		436,024228	281,557954				-
		-	-				0,84019
		281,557954	655,038754				

Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Modo de vibración 4**

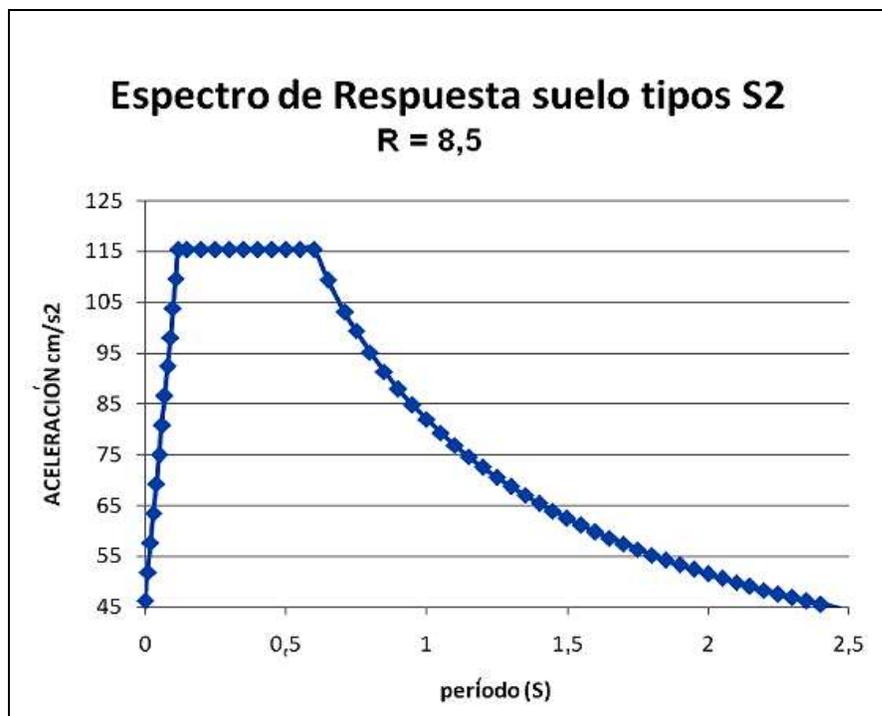


Fuente: elaboración propia.

3.7. Análisis modal espectral

Con los cuatro modos de vibración ya calculados se procede a encontrar el desplazamiento máximo debido a cada uno de los modos, esto con la ayuda del espectro de respuesta para un sitio S2 y un factor R de 8,5 (ver anexo 1).

Figura 17. **Espectro de respuesta para un suelo tipo S2 y factor R = 8,5**



Fuente: elaboración propia.

Análisis modelo espectral desplazamientos

Modo 1

$$T= 0,148556073 \quad Sa = 115,4117 \text{ cm/s}^2$$

$$D_{max} = \begin{matrix} 0,0017821 \\ -0,003499 \\ 0,0034835 \\ -0,001497 \end{matrix} \text{ cm}$$

Modo 2

$$T= 0,186986012 \quad Sa = 115,4117 \text{ cm/s}^2$$

$$D_{max} = \begin{matrix} 0,0135676 \\ -0,007753 \\ -0,011189 \\ 0,0101752 \end{matrix} \text{ cm}$$

Modo 3

$$T= 0,288006017 \quad Sa = 115,4117 \text{ cm/s}^2$$

$$D_{max} = \begin{matrix} 0,0792093 \\ 0,0638974 \\ -0,008843 \\ -0,076922 \end{matrix} \text{ cm}$$

Modo 4

$$T= 0,835593071 \quad Sa = 93,28 \text{ cm/s}^2$$

$$D_{max} = \begin{matrix} 0,8421032 \\ 1,4244985 \\ 1,8220289 \\ 2,0361094 \end{matrix} \text{ cm}$$

La aceleración S_a es la obtenida del espectro de respuesta del sitio en estudio (ver anexo 1).

De modo que la fuerza es igual a la rigidez multiplicada por el desplazamiento, se obtendrá el máximo desplazamiento debido al primer modo de vibración, siendo estos los desplazamientos con los cuales se calcularán las derivadas del marco de concreto reforzado.

Desplazamiento máximo debido
al modo fundamental

Dmax	=	0,8459
		1,426
		1,8221
		2,0376

Análisis modal espectral cortantes

Modo 1

$$T = 0,148556073 \qquad Sa = 115,4117 \text{ cm/s}^2$$

$$F_{max} = \begin{matrix} 1,8854004 \\ -3,54623 \\ 3,5303396 \\ -1,4024 \end{matrix} \text{ t}$$

Modo 2

$$T = 0,186986012 \qquad Sa = 115,4117 \text{ cm/s}^2$$

$$F_{max} = \begin{matrix} 9,0599279 \\ -4,95965 \\ -7,157447 \\ 6,0152989 \end{matrix} \text{ t}$$

Modo 3

$$T = 0,288006017 \qquad Sa = 115,4117 \text{ cm/s}^2$$

$$F_{max} = \begin{matrix} 22,29534 \end{matrix} \text{ t}$$

17,228953
-2,384371
-19,16808

Modo 4

T= 0,835593071 Sa = 93,28 cm/s²

Fmax =

28,158963
45,630084
58,363932
60,276066

 t

Realizando suma de cuadrados para cada uno de los casos se obtendrá el siguiente valor de cortante total debido al primer modo fundamental de vibración.

Fuerzas Máximas	Fmax	=	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="text-align: center;">37,09</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">49,154</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">58,955</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">63,551</td></tr> </table>	37,09	49,154	58,955	63,551	t
37,09								
49,154								
58,955								
63,551								
	Cortante basal dinámico		208,75	t				

Con un valor de 208,75 t equivalente a 459,25 Kips, este valor es cercano al obtenido por medio del análisis estático.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Análisis de los resultados obtenidos entre el cortante basal estático (UBC) y cortante basal dinámico (análisis modal espectral)

Se presentan los resultados en una matriz comparativa para un entendimiento más explícito.

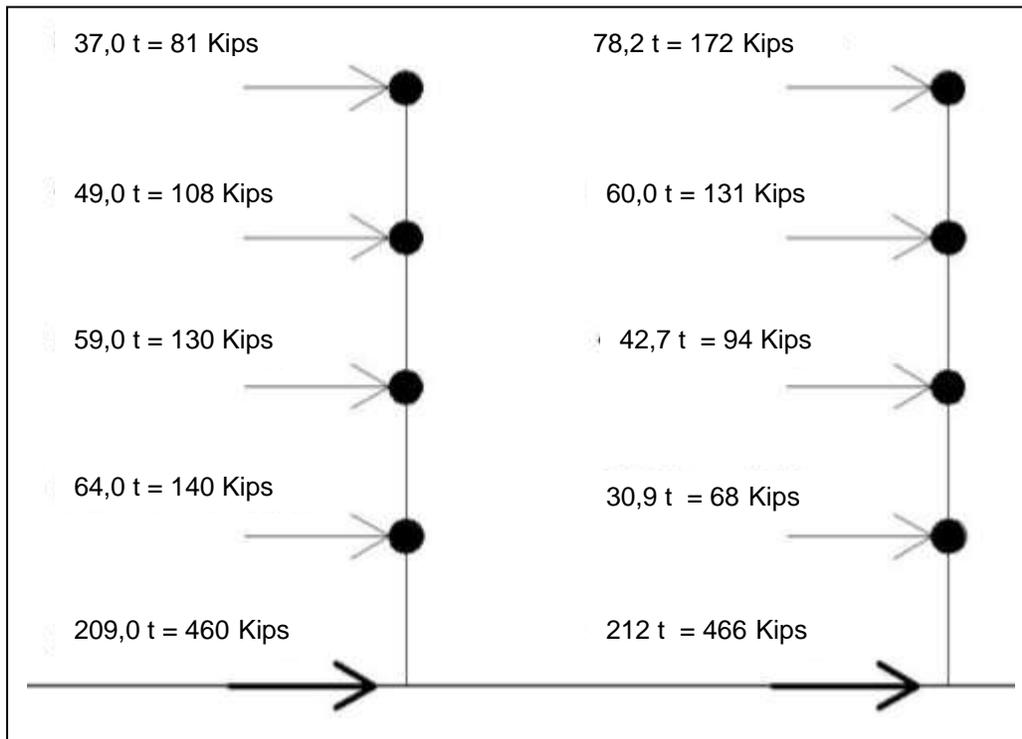
Tabla XXVI. **Matriz comparativa análisis estático y dinámico**

	Análisis estático	Análisis dinámico
Período fundamental [s]	0,718	0,836
Peso [Kip] (t)	4 839 (2 200)	-
Masa [Kip in/s ²] (t cm/s ²)	-	12,6 (2,25)
Desplazamiento máximo N4 [cm]	2,35	2,03
Desplazamiento máximo N3 [cm]	2,09	1,82
Desplazamiento máximo N2 [cm]	1,65	1,43
Desplazamiento máximo N1 [cm]	1,06	0,84
Fuerza máxima N4 [Kip] (t)	172 (78,2)	81 (37)
Fuerza máxima N3 [Kip] (t)	131 (60)	108 (49)
Fuerza máxima N2 [Kip] (t)	94 (42,7)	130 (59)
Fuerza máxima N1 [Kip] (t)	68 (30,9)	139 (63)
Corte Basal [Kip] (t)	466 (212)	458 (208)

Fuente: elaboración propia.

4.2. Análisis gráfico de las fuerzas para el corte dinámico y estático respectivamente

Figura 18. Esquema distribución de fuerzas cortante dinámico y estático



Fuente: elaboración propia.

Con base en el análisis realizado a una edificación regular y simétrica, se puede concluir que el análisis sísmico estático es bastante acertado para este tipo de edificaciones, siendo el análisis dinámico el que castiga esta regularidad, además de esto, se pudo notar que el período se incrementa alrededor del 16% en comparación al análisis estático.

4.3. Comprobación de los resultados mediante el programa de análisis estructural ETABS

Se comprobarán los resultados obtenidos, por medio del programa de análisis estructural ETABS V 9,5; con los mismos datos de cargas y geometría.

Figura 19. **Modelo tridimensional en estudio**



Fuente: elaboración propia.

4.3.1. Método estático

Para el análisis estático se utiliza el método estático explicado en el capítulo 16 del código UBC 97, dando el resultado obtenido a continuación.

AUTO SEISMIC UBC 97

Case: SY

AUTO SEISMIC INPUT DATA

Direction: Y

Typical Eccentricity = 5%

Eccentricity Overrides: No

Period Calculation: Method A

Ct = 0,03 (in feet units)

Top Story: STORY4

Bottom Story: BASE

R = 8,5

I = 1

hn = 828,000 (Building Height)

Soil Profile Type = SC

Z = 0,4

Ca = 0,4000

Cv = 0,5600

Seismic Source Type = B

Distance to Source = 15 km

Na = 1,0000

Nv = 1,0000

AUTO SEISMIC CALCULATION FÓRMULAS

$$T_a = C_t (h_n)^{3/4}$$

$$V = (C_v I W) / (R T) \quad (\text{Eqn. 1})$$

$$V \leq 2,5 C_a I W / R \quad (\text{Eqn. 2})$$

$$V \geq 0,11 C_a I W \quad (\text{Eqn. 3})$$

$$V \geq 0,8 Z N_v I W / R, \text{ if } Z = 0,40 \text{ and } C_a \text{ \& } C_v \text{ from code} \quad (\text{Eqn. 4})$$

If $T \leq 0,7$ sec, then $F_t = 0$

If $T > 0,7$ sec, then $F_t = 0.07 T V \leq 0,25 V$

AUTO SEISMIC CALCULATION RESULTS

$T_a = 0,7182$ sec

T Used = 0,7182 sec

W Used = 4 510,87

V (Eqn 1) = 0,0002W

V (Eqn 2) = 0,0003W

V (Eqn 3) = 0,0001W

V (Eqn 4) = 0,0001W

V Used = 0,0917W = 413,78 Kips

F_t Used = 20,80

AUTO SEISMIC STORY FORCES

STORY	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
STORY4	0,00	155,05	0,00	0,000	0,000	83 725,575
STORY3	0,00	118,23	0,00	0,000	0,000	63 846,632
STORY2	0,00	85,39	0,00	0,000	0,000	46 111,456
STORY1	0,00	55,11	0,00	0,000	0,000	29 758,372

AUTO SEISMIC UBC 97

Case: SX

AUTO SEISMIC INPUT DATA

Direction: X

Typical Eccentricity = 5%

Eccentricity Overrides: No

Period Calculation: Method A

$C_t = 0,03$ (in feet units)

Top Story: STORY4

Bottom Story: BASE

R = 8,5

I = 1

hn = 828,000 (Building Height)

Soil Profile Type = SC

Z = 0,4

Ca = 0,4000

Cv = 0,5600

Seismic Source Type = B

Distance to Source = 15 km

Na = 1,0000

Nv = 1,0000

AUTO SEISMIC CALCULATION FÓRMULAS

$T_a = C_t (h_n^{3/4})$

$V = (C_v I W) / (R T)$ (Eqn. 1)

$V \leq 2,5 C_a I W / R$ (Eqn. 2)

$V \geq 0,11 C_a I W$ (Eqn. 3)

$V \geq 0,8 Z N_v I W / R$, if $Z = 0.40$ and C_a & C_v from code (Eqn. 4)

If $T \leq 0,7$ sec, then $F_t = 0$

If $T > 0,7$ sec, then $F_t = 0,07 T V \leq 0,5 V$

AUTO SEISMIC CALCULATION RESULTS

$T_a = 0,7182$ sec

T Used = 0,7182 sec

W Used = 4 510,87

V (Eqn 1) = 0,0002W

V (Eqn 2) = 0,0003W

V (Eqn 3) = 0,0001W

V (Eqn 4) = 0,0001W

V Used = 0,0917W = 413,78 Kips

Ft Used = 20,80

AUTO SEISMIC STORY FORCES

STORY	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
STORY4	155,05	0,00	0,00	0,000	0,000	-55 355,228
STORY3	118,23	0,00	0,00	0,000	0,000	-42 222,231
STORY2	85,39	0,00	0,00	0,000	0,000	-30 493,834
STORY1	55,11	0,00	0,00	0,000	0,000	-19 686.,30

4.3.2. Desplazamientos debido a carga sísmica en X

Tabla XXVII. Desplazamientos debido a carga sísmica X

Story	Point	Load	UX [in]	UY [in]	UZ [in]
Story 4	179	SX	0,8512	0,0078	-0,0077
Story 3	179	SX	0,7564	0,0067	-0,0074
Story 2	179	SX	0,5998	0,0051	-0,0065
Story 1	179	SX	0,3861	0,003	-0,0048

Fuente: elaboración propia.

4.3.3. Desplazamientos debidas a carga sísmica en Y

Tabla XXVIII. Desplazamientos debido a carga sísmica Y

Story	Point	Load	UX [in]	UY [in]	UZ [in]
Story 4	177	SY	0,0002	0,9194	-0,0086
Story 3	177	SY	0,0001	0,8124	-0,0082
Story 2	177	SY	0,0001	0,6384	-0,0072
Story 1	177	SY	0,0001	0,4037	-0,0052

Fuente: elaboración propia.

4.4. Método dinámico

Para el cálculo de reacciones se utilizará el método CQC y SRSS del programa ETABS, para el cálculo de los modos de vibración se utilizará el método *Eigenvectors*.

El sismo dinámico se empatará al 100% con el sismo estático, puesto que el sismo dinámico siempre o muchas veces será menor al estático esto debido a que el primero toma la demanda de la edificación.

Para esto se tomará un factor de corrección que dependerá de los cortantes basales, el cálculo de detalla a continuación.

Tabla XXIX. **Factor de corrección entre sismo estático y dinámico**

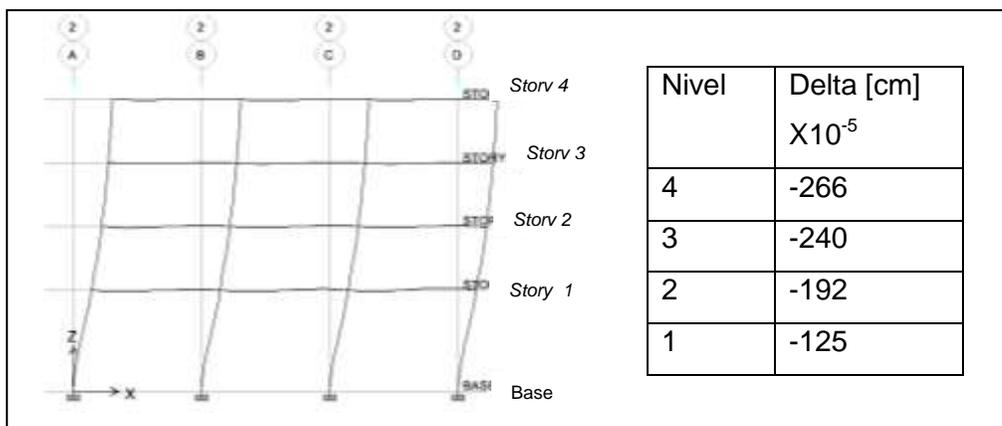
Estático		468,93			
103%	Dinámico U1	483,71	483,71	Factor de corrección	0,969
	Dinámico U2	0			
101%	Dinámico U1	0	471,75	Factor de corrección	0,994
	Dinámico U2	471,75			
100%	Dinámico U1	468,74	468,74	Factor de corrección	1,000
	Dinámico U2	0			
100%	Dinámico U1	0	468,95	Factor de corrección	1,000
	Dinámico U2	468,95			

Fuente: elaboración propia.

En este caso en particular el cortante basal dinámico fue más grande que el cortante basal estático, marcando factores de corrección por debajo de 1,00, ya con esta corrección realizada se muestran los modos de vibración de la estructura sobre el eje X y Y.

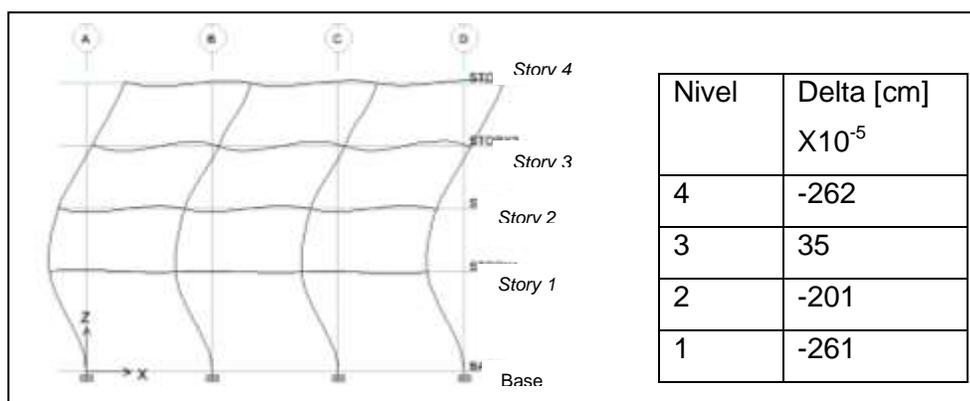
4.4.1. Análisis de desplazamientos modos de vibración y cortantes en eje X

Figura 20. Modo de vibración 1 período 0,8694 s



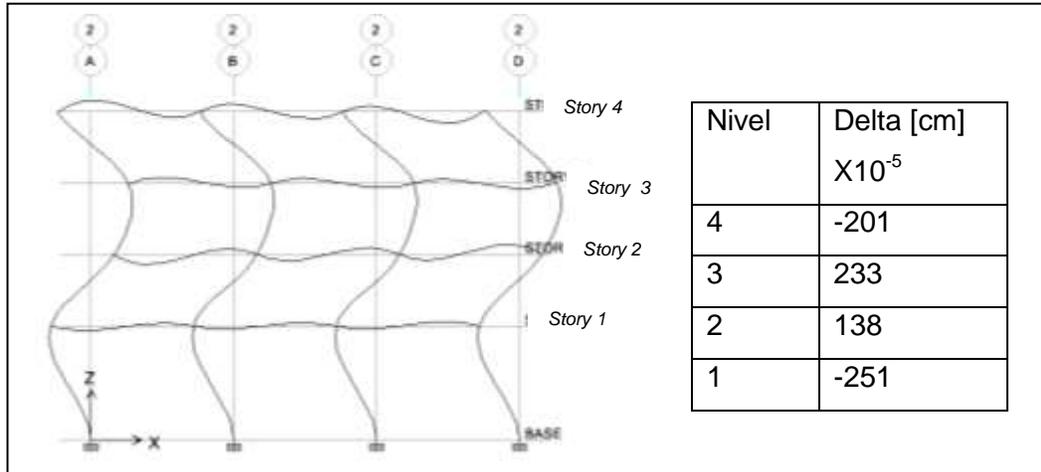
Fuente: elaboración propia.

Figura 21. Modo de vibración 2 período 0,2543 s



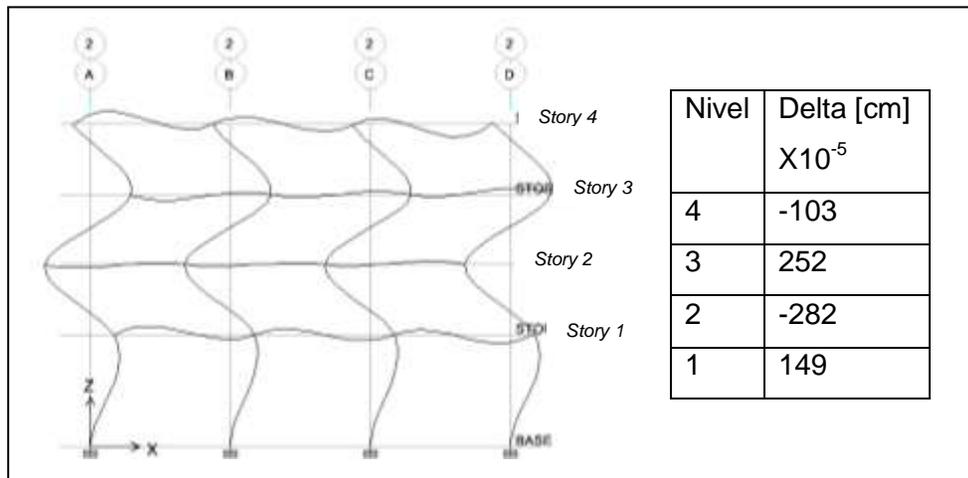
Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Modo de vibración 3 período 0,1285 s**



Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Modo de vibración 4 período 0,0815 s**



Fuente: elaboración propia.

4.5. Cortante basal dinámico X

Luego de realizado el análisis de los modos de vibración y encontrar los períodos correspondientes a cada uno de ellos, se procede a obtener el cortante basal dinámico por medio del método CQC, dando como resultado un valor de 468,74 Kips.

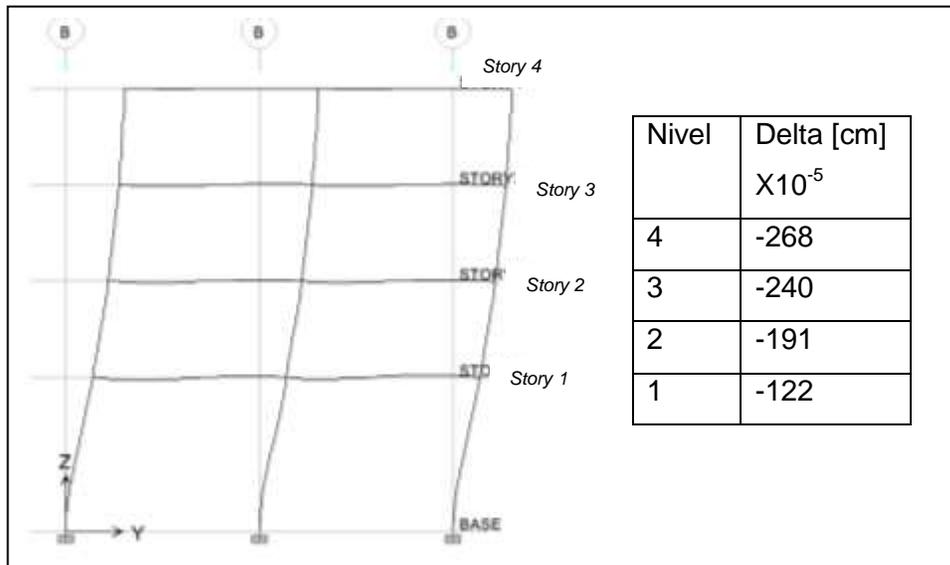
Tabla XXX. Cortante basal obtenido del programa Etabs sentido X

Spec	Mode	Dir	F1	F2	F3
SX	1	U1	0	0	0
SX	2	U1	467,16	0	0
SX	3	U1	0	0	0
SX	4	U1	0	0	0
SX	5	U1	35,64	0	0
SX	6	U1	0	0	0
SX	7	U1	0	0	0
SX	8	U1	5,52	0	0
SX	9	U1	0	0	0
SX	10	U1	0	0	0
SX	11	U1	0,65	0	0
SX	12	U1	0	0	0
SX	All	All	468,74	0	0

Fuente: elaboración propia.

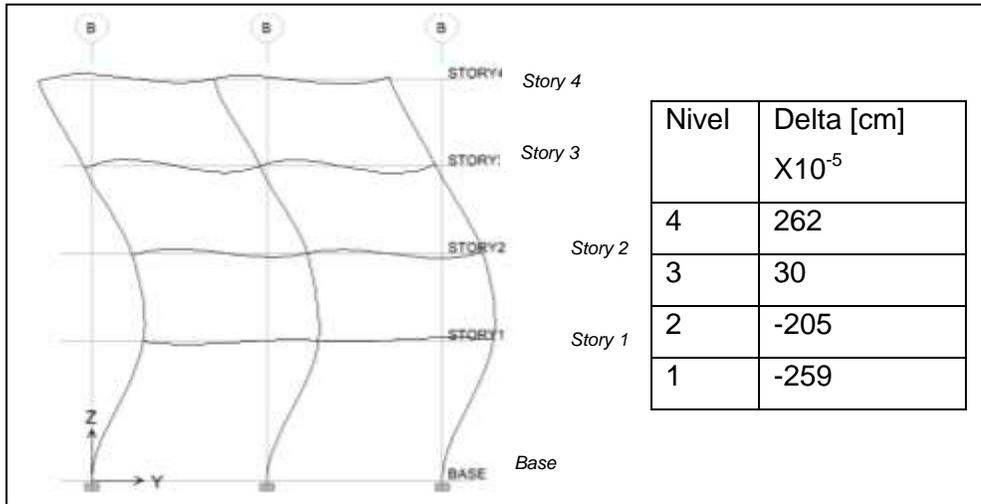
4.5.1. Análisis de desplazamientos modos de vibración y cortantes en eje Y

Figura 24. Modo de vibración 1 período 0,8964 s



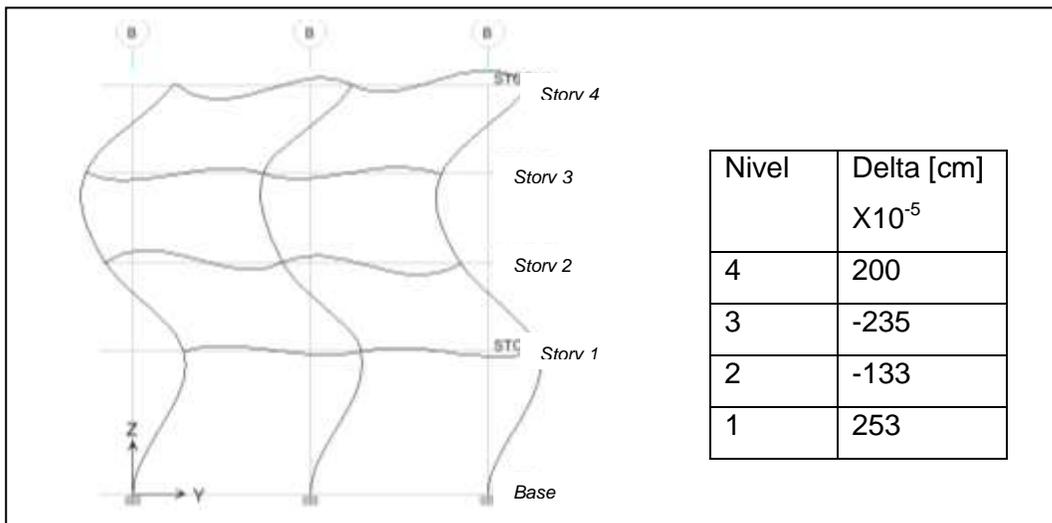
Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Modo de vibración 2 período 0,2627 s**



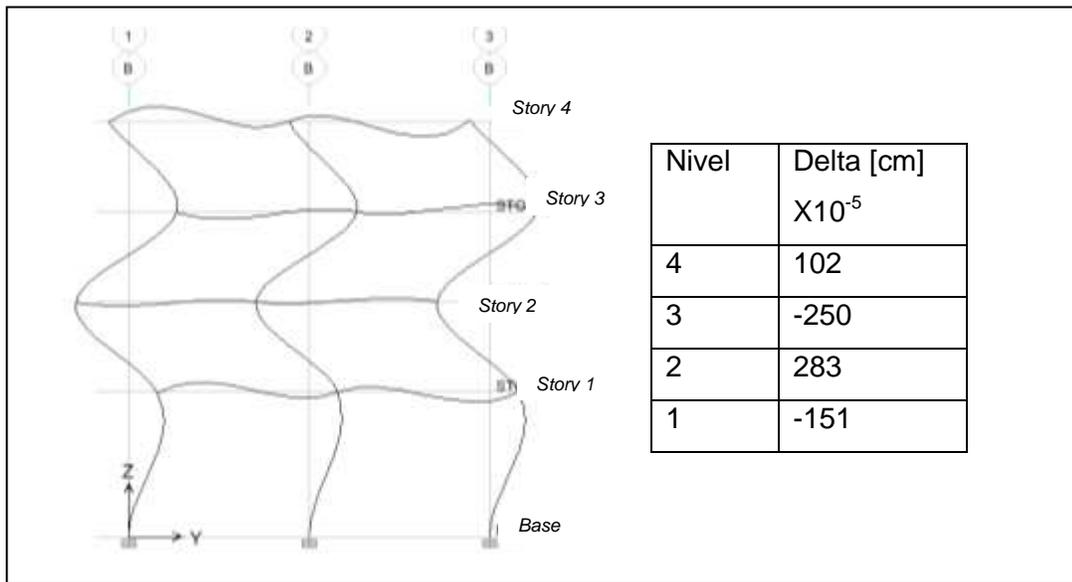
Fuente: elaboración propia.

Figura 26. **Modo de vibración 3 período 0,1308 s**



Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Modo de vibración 4 período 0,0821 s**



Fuente: elaboración propia.

4.5.2. Cortante basal dinámico Y

Luego de realizado el análisis de los modos de vibración y encontrar los períodos correspondientes a cada uno de ellos, se procede a obtener el cortante basal dinámico por medio del método CQC, dando como resultado un valor de 413,8 Kips.

Tabla XXXI. **Cortante basal obtenido del programa Etabs sentido Y**

Spec	Mode	Dir	F1	F2	F3
SY	1	U2	0	467,08	0
SY	2	U2	0	0	0
SY	3	U2	0	0	0
SY	4	U2	0	38,9	0
SY	5	U2	0	0	0
SY	6	U2	0	0	0
SY	7	U2	0	6,19	0
SY	8	U2	0	0	0
SY	9	U2	0	0	0
SY	10	U2	0	0,73	0
SY	11	U2	0	0	0
SY	12	U2	0	0	0
SY	All	All	0	468,95	0

Fuente: elaboración propia.

Las variaciones presentadas entre el análisis estático y dinámico realizados de la forma manual, presentaron muy pocas variaciones, siendo el único valor con una variación considerable el período del modo de vibración 4 teniendo un valor de 0,08 contra 0,14 presentado en el análisis manual, las razones para esta variación, puede ser el método de análisis ya que el programa utiliza el método de *Eingenvektors*, un método más refinado en comparación al método utilizado en el cálculo manual, por lo que podemos dar por satisfactorio el análisis manual presentado en este documento.

CONCLUSIONES

1. El factor de reducción sísmico R , aún cuando toma en cuenta la tipología estructural, no da parámetros que establezcan condiciones de geometría para el análisis sísmico de los marcos dúctiles, ya sea de concreto o acero, es por eso, que la versatilidad del análisis dinámico, calcula cuál es la participación de la masa durante el evento sísmico.
2. La arquitectura ha evolucionado a lo largo de la historia, tanto en su tipología, como en los métodos constructivos empleados para su realización, además los materiales con que son construidos han sido mejorados permitiendo construir edificaciones cada vez más altas y complejas, haciendo necesario el uso de métodos más refinados para el análisis sísmico de las edificaciones.
3. Una correcta distribución de la masa puede generar un diseño sísmico más eficiente cuando se analiza por medios dinámicos.
4. Los modos de vibración comienzan a tomar trascendencia cuando las estructuras tienden a tener mayor altura.

5. Los valores del sismo estático tienden a tener un mayor valor en comparación del sismo dinámico, esto debido a que el método estático obtiene un valor de cortante basal el cual luego reparte a los niveles. En cambio el método dinámico encuentra cuál es la fuerza resistida según masa y rigidez del nivel, con esto calcula el córtante basal ajustado a estos parámetros.
6. Los códigos de análisis sísmicos, mandan a que por lo menos el 90% de la masa de la estructura debe aportarse a la hora de realizar un análisis dinámico.
7. Al igual que el cortante basal dinámico puede ser por lo menos el 80% del valor del cortante estático, siempre y cuando se cumplan criterios de regularidad en las estructuras.

RECOMENDACIONES

1. Tomar en cuenta las limitaciones del análisis estático en cuanto a altura y factores de regularidad, si se desea realizar una estructura de una altura de cuatro pisos o más, se deberá realizar un análisis dinámico de la estructura.
2. Se recomienda un mayor análisis y estudio del factor de reducción sísmico, debido a que generaliza en tipologías pero deja por un lado los factores como geometrías o irregularidades, factores que son determinantes en diseños muy específicos.
3. Las fórmulas para determinar períodos del método estático, utilizan fórmulas experimentales más exactas, cuando se realizan análisis espectrales se considera la estructura con solo vigas, columnas y losas por lo cual el período es menor al real, debido a todo lo que se desprecia.
4. Se deberá tomar en cuenta aunque no se tocó el tema en este documento la participación de los factores torsionales en el método de superposición modal.
5. Tomar en cuenta que para el análisis estático se abarca un solo período como base, mientras que en el análisis dinámico, la combinación de los distintos modos de vibración, dependiendo cuántos sean necesarios para alcanzar el 90% de participación de masa en el análisis.

6. No tomar el primer modo de vibración como crítico, todos los modos posibles deberán ser tomados en cuenta, de manera que se determine el crítico.
7. Implementar el uso del método descrito en AGIES, de modo que puedan ser utilizados parámetros más aplicables a Guatemala.
8. Al utilizar las normas AGIES, se limitan los análisis para una localidad específica del país, lo cual da resultados más precisos, en consecuencia el diseño será mucho mejor en comparación a un análisis con normas extranjeras.

BIBLIOGRAFÍA

1. ADOBE. *Mathematica. 7.0.* [CD-ROM]. USA, 2009.
2. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica. *Normas estructurales de diseño y construcción recomendadas para la República de Guatemala.* Guatemala: AGIES, 1996. 375 p.
3. CHOPRA, A. K. *Dynamics of structures: theory an applications to earthquake engineering.* 2a, ed. New Yersey: Prentice Hall, 2001 884 p.
4. Etabs. 9.5. *Programa de análisis y diseño estructural.* [CD-ROM]. USA: s.e, 2005.
5. International Conference of Building Oficiais. *Unifor Bulding Code.* Estados Unidos: s.e., 1997.
6. PAZ, M. *Structural dynamic: theory and computation.* 4a, ed. New York: Chapman & Hall, 1997. 824 p.

APÉNDICE

Construcción de espectro de respuesta según AGIES NR -2

Con base en las ecuaciones dadas en la norma AGIES NR-2 p 13

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

Se definen los parámetros para la construcción de un espectro de sitio así:

Espectro básico

A _o	0,4
g	981
A _o *g	392,4

Fórmulas

$D(T) = 1,0 + 1,5(T/T_A)$
$D(T) = 2,5$
$D(T) = 2,5(T_B/T)^{0,67}$

	T _A	T _B
S1	0,12	0,4
S2	0,12	0,6
S3	0,12	1

Zona 4

Amplificación Dinámica

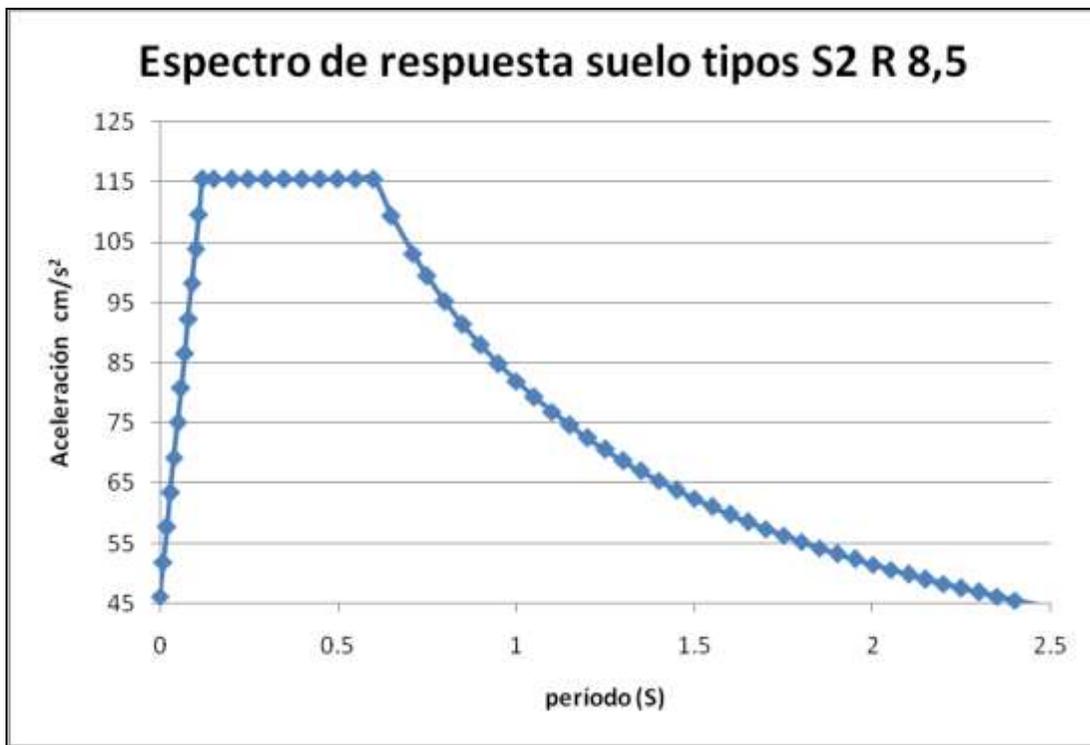
S	2
TA	0.12
TB	0.6
R	8.5

Se trabajará bajo períodos en un rango de 0 a 3,65 segundos, dando los siguientes resultados.

T	Sa
0	46,16470588
0,01	51,93529412
0,02	57,70588235
0,03	63,47647059
0,04	69,24705882
0,05	75,01764706
0,06	80,78823529
0,07	86,55882353
0,08	92,32941176
0,09	98,10000000
0,1	103,8705882
0,11	109,6411765
0,12	115,4117647
0,15	115,4117647
0,2	115,4117647
0,25	115,4117647
0,3	115,4117647
0,35	115,4117647
0,4	115,4117647
0,45	115,4117647
0,5	115,4117647
0,55	115,4117647
0,6	115,4117647
0,65	109,385428
0,71	103,1022934
0,75	99,38489265
0,8	95,17899793
0,85	91,39043389
0,9	87,95670226
0,95	84,82748751
1	81,96178714
1,05	79,32582345
1,1	76,89149773
1,15	74,63522843
1,2	72,53706591
1,25	70,58000921
1,3	68,74947299
1,35	67,03286699
1,4	65,41926125
1,45	63,89911716
1,5	62,46406964
1,55	61,10674937

T	Sa
1,6	59,82063669
1,65	58,59994074
1,7	57,43949885
1,75	56,33469233
1,8	55,28137556
1,85	54,27581599
1,9	53,31464316
1,95	52,39480517
2	51,51353132
2,05	50,66829991
2,1	49,85681051
2,15	49,07695979
2,2	48,32682051
2,25	47,60462323
2,3	46,90874018
2,35	46,23767113
2,4	45,590031
2,45	44,96453877
2,5	44,36000778
2,55	43,77533704
2,6	43,20950352
2,65	42,66155525
2,7	42,13060517
2,75	41,61582557
2,8	41,11644317
2,85	40,63173461
2,9	40,16102245
2,95	39,70367148
3	39,25908548
3,05	38,8267042
3,1	38,40600062
3,15	37,99647851
3,2	37,59767019
3,25	37,20913444
3,3	36,83045463
3,35	36,46123701
3,4	36,10110914
3,45	35,74971844
3,5	35,40673086
3,55	35,07182964
3,6	34,74471422
3,65	34,42509919

Espectro de sitio para un suelo tipo S2, R 8,5 y con 5% de amortiguamiento crítico, este es el espectro a usar para el análisis modal espectral, sus dimensionales están dadas en sistema internacional como lo indica la gráfica.



Fuente: elaboración propia.