



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

**CONSIDERACIÓN DEL EFECTO DE LA COMPONENTE VERTICAL SÍSMICA  
EN EL DISEÑO DE CONCRETO REFORZADO**

**Oswaldo Roberto Hernández Silin**

Asesorado por el Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila

Guatemala, mayo de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CONSIDERACIÓN DEL EFECTO DE LA COMPONENTE VERTICAL SÍSMICA  
EN EL DISEÑO DE CONCRETO REFORZADO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**OSWALDO ROBERTO HERNÁNDEZ SILIN**

ASESORADO POR EL ING. MARIO RODOLFO CORZO ÁVILA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

GUATEMALA, MAYO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

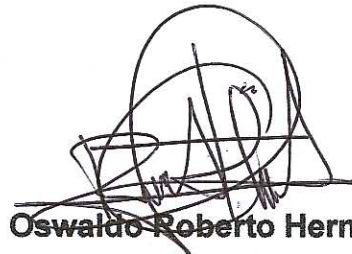
DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Mario Estuardo Arriola Ávila
EXAMINADOR	Ing. Nicolás de Jesús Guzmán Sáenz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **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:

### **CONSIDERACIÓN DEL EFECTO DE LA COMPONENTE VERTICAL SÍSMICA EN EL DISEÑO DE CONCRETO REFORZADO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil,  
con fecha agosto de 2010

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping loops and lines, positioned above the printed name.

**Oswaldo Roberto Hernandez Silin**

Guatemala, 1 de abril de 2013

Ing. Ronald Estuardo Galindo  
Coordinador Área de Estructuras  
Facultad de Ingeniería  
Universidad San Carlos de Guatemala

Ingeniero Galindo.

Me dirijo a usted para informarle que he revisado el trabajo de graduación titulado **CONSIDERACIÓN DEL EFECTO DE LA COMPONENTE VERTICAL SÍSMICA EN EL DISEÑO DE CONCRETO REFORZADO**, realizado por el estudiante universitario **Oswaldo Roberto Hernández Silín** con carne **2006-30143**, tema que fue aprobado en marzo de 2013.

Considero que el trabajo desarrollado, satisface los requisitos exigidos, por lo cual recomiendo su aprobación.

Atentamente,

  
Ingeniero Mario Rodolfo Corzo Ávila  
Asesor de Trabajo de Graduación  
Colegiado No. 2089

**Mario Rodolfo Corzo Ávila**  
**INGENIERO CIVIL**  
**Colegiado No. 2089**



**USAC**  
**TRICENTENARIA**  
 Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
 Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala,  
 8 de abril de 2013

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 **CONSIDERACIÓN DEL EFECTO DE LA COMPONENTE VERTICAL SÍSMICA EN EL DISEÑO DE CONCRETO REFORZADO**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Oswaldo Roberto Hernández Silin, quien contó con la asesoría del Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila.

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.

*Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua*





**USAC**  
**TRICENTENARIA**  
 Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
 Escuela de Ingeniería Civil



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila y del Jef del Departamento de Estructuras, Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera, al trabajo de graduación del estudiante Oswaldo Roberto Hernández Silin, titulado **CONSIDERACIÓN DEL EFECTO DE LA COMPONENTE VERTICAL SÍSMICA EN EL DISEÑO DE CONCRETO REFORZADO**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

  
 Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, mayo de 2013.

/bbdeb.

Mas de **134** años de Trabajo Académico y Mejora Continua



Universidad de San Carlos  
de Guatemala

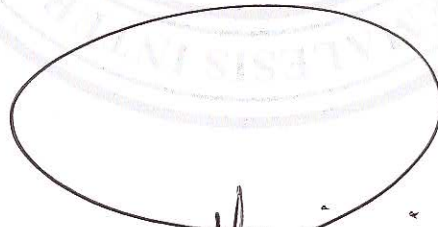


Facultad de Ingeniería  
Decanato

DTG. 336.2013

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: **CONSIDERACIÓN DEL EFECTO DE LA COMPONENTE VERTICAL SÍSMICA EN EL DISEÑO DE CONCRETO REFORZADO**, presentado por el estudiante universitario **Oswaldo Roberto Hernández Silin**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano



Guatemala, 21 de mayo de 2013

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Fuente de vida y sabiduría para culminar este paso en mi vida.
- Mis padres** Humberto Hernández y Blanca Silin modelo a seguir, este éxito es de ustedes.
- Mis hermanos** Blanca, Luis y Daniel Hernández Silin, que sea ejemplo e inspiración para superarse.
- Mis abuelos** Felipa Sac por el apoyo y cariño que siempre ha tenido hacia mí y Juan Hernández, Miguel Ángel Silin y Elisa Quijivix (q.e.p.d.) siempre me están ayudando y protegiendo.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>La Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por brindarme los medios para conseguir este logro.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por brindarme los conocimientos necesarios para alcanzar este logro.
<b>Mis amigos</b>	Alberto Monzón y Francisco Ronquillo por el apoyo brindado siempre.
<b>Ing. Mario Corzo</b>	Por el gran apoyo durante la carrera y los consejos para realizar esta tesis.
<b>Mi familia</b>	De una u otra manera contribuyeron en la obtención de este logro.



1.2.2.1.	Cálculo de un espectro de respuesta ...	22
1.2.3.	Método de la carga sísmica equivalente .....	25
1.2.3.1.	Cálculo del sismo de diseño.....	27
1.3.	Marco sísmico para Guatemala .....	30
2.	COMPONENTE VERTICAL DEL SISMO .....	35
2.1.	Componente vertical .....	35
2.2.	Estudios sobre la componente vertical.....	38
2.3.	Consecuencias de la aceleración vertical de alta.....	40
2.4.	Componente vertical de sismo y códigos .....	41
3.	CASO DE ESTUDIO .....	43
3.1.	Análisis estático equivalente .....	43
3.1.1.	Modelo estructural.....	43
3.1.2.	Parámetros de análisis.....	45
3.1.2.1.	Cargas.....	45
3.1.3.	Resultados de análisis .....	48
3.1.3.1.	Carga axial .....	48
3.1.3.2.	Momento de flexión .....	49
3.1.3.3.	Derivas .....	51
3.1.4.	Cálculo del refuerzo .....	52
3.2.	Análisis espectros de respuesta.....	54
3.2.1.	Registros analizados .....	54
3.2.1.1.	Cape Mendocino - California .....	54
3.2.1.2.	Imperial Valley – Frontera México California .....	55
3.2.1.3.	Northridge – California .....	56
3.2.1.4.	San Salvador – El Salvador.....	58
3.2.1.5.	Managua – Nicaragua .....	59

3.2.2. Análisis .....	61
CONCLUSIONES .....	67
RECOMENDACIONES .....	69
BIBLIOGRAFÍA .....	71
APÉNDICE.....	73



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Capas de la tierra .....	3
2.	Placas tectónicas de la tierra .....	6
3.	Tipos de bordes en placas tectónica .....	7
4.	Tipos de fallas .....	10
5.	Parámetros de la falla .....	11
6.	Ondas de cuerpo.....	12
7.	Ondas superficiales.....	13
8.	Registro de un sismo.....	14
9.	Correlación entre magnitud y energía liberada .....	19
10.	Registros de aceleración sismo Northridge 1994.....	20
11.	Espectro de respuesta .....	21
12.	Aproximación lineal de una carga senoidal .....	23
13.	Planteamiento del método por segmentos .....	24
14.	Construcción de un espectro de respuesta .....	25
15.	Zonificación sísmica República de Guatemala.....	26
16.	Mapa de tectónico de Centroamérica.....	31
17.	Sistema tectónico Guatemala .....	32
18.	Graben de la ciudad de Guatemala .....	33
19.	Coeficientes espectrales V/H .....	39
20.	Vista 3D del modelo de análisis .....	44
21.	Elevación típica del modelo.....	44
22.	Diagrama de carga axial incluyendo incremento de carga muerta.....	48
23.	Diagrama de carga axial sin incluir incremento de carga muerta.....	49

24.	Envolvente de momento de flexión incluyendo incremento de carga muerta .....	50
25.	Envolvente de momento de flexión sin incluir incremento de carga muerta .....	50
26.	Derivas laterales considerando incremento de carga muerta .....	51
27.	Derivas laterales sin considera incremento de carga muerta .....	52
28.	Cuantía de acero longitudinal en vigas del eje C .....	53
29.	Mapa de intensidad sismo Cape Mendocino .....	55
30.	Mapa de intensidad sismo Imperial Valley .....	56
31.	Mapa de intensidad sismo Northridge.....	57
32.	Mapa de intensidades sismo San Salvador .....	58
33.	Mapa de intensidad sismo Managua .....	60
34.	Espectro de respuesta sismo Cape Mendocino.....	61
35.	Espectro de respuesta sismo Imperial Valley .....	61
36.	Espectro de respuesta sismo Northridge .....	62
37.	Espectro de respuesta sismo San Salvador .....	62
38.	Espectro de respuesta sismo Managua.....	63
39.	Cocientes espectrales.....	63
40.	Promedio cocientes espectrales .....	64

## TABLAS

I.	Espesores de la corteza terrestre .....	3
II.	Densidad de la superficie terrestre .....	5
III.	Propiedades de las escales de magnitud .....	18
IV.	Sismos con componentes verticales grandes.....	36
V.	Registros del sismo de Northridge con grandes componentes verticales.....	37
VI.	Registros del sismo de Kobe con grandes componentes verticales ...	37



VII.	Cociente de aceleración vertical a horizontal propuestas .....	38
VIII.	Componente vertical en códigos de diseño estructural .....	41
IX.	Secciones usadas en modelo de estudio .....	43
X.	Distribución de cortante.....	47
XI.	Derivas laterales.....	51
XII.	Resumen de análisis .....	52
XIII.	Sismos analizados .....	60



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>S<sub>cr</sub></b>	Aceleración espectral a 0,2 segundos en basamento rocoso
<b>S<sub>cs</sub></b>	Aceleración espectral a 0,2 segundos modificado al sitio de análisis
<b>S<sub>cd</sub></b>	Aceleración espectral de diseño para períodos de 0,2 segundos
<b>S<sub>1d</sub></b>	Aceleración espectral de diseño para períodos de 1 segundo
<b>S<sub>1r</sub></b>	Aceleración espectral para 1 segundo en basamento rocoso
<b>S<sub>1s</sub></b>	Aceleración espectral para 1 segundo modificado al sitio de análisis
<b>S<sub>a</sub>(T)</b>	Aceleración espectral para un período T
<b>g</b>	Aceleración provocada por la gravedad
<b>h<sub>n</sub></b>	Altura del edificio desde la base

<b>M</b>	Carga muerta de la estructura
<b>S</b>	Carga provocada por el sismo
<b>V</b>	Carga viva de la estructura
<b>V<sub>t</sub></b>	Carga viva de techo
<b>C<sub>v<sub>x</sub></sub></b>	Coefficiente de distribución de cortante basal
<b>C<sub>s</sub></b>	Coefficiente sísmico
<b>V<sub>B</sub></b>	Corte basal de cadencia
<b>u<sub>i</sub></b>	Desplazamiento lateral en el nivel i
<b>e</b>	Exponencial
<b>K<sub>d</sub></b>	Factor de calibración de aceleraciones dependiendo del período de retorno del sismo de diseño
<b>Na</b>	Factor de modificación de cercanía a la falla para períodos cortos
<b>Nv</b>	Factor de modificación de cercanía a la falla para períodos largos
<b>F<sub>a</sub></b>	Factor de modificación de suelo para periodos cortos

$F_v$	Factor de modificación de suelo para periodos largos
$R$	Factor genérico de reducción de la respuesta sísmica
$K_T$	Factor para cálculo de período aproximado
$\omega_d$	Frecuencia circular de vibración amortiguada
$\omega$	Frecuencia circular natural de vibración
$F_x$	Fuerza lateral en el nivel x
$P(\tau)$	Función que representa la carga en método exacto por segmentos
$T_a$	Período aproximado de vibración de un sistema
$T_s$	Período de transición que separa periodos cortos de los largos
$T$	Período natural de vibración de un sistema
$W_s$	Peso sísmico efectivo
$W_x$	Peso sísmico efectivo del nivel x
$\beta$	Porcentaje de amortiguamiento



## GLOSARIO

<b>AGIES</b>	Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica
<b>ASCE</b>	Sociedad Americana de Ingenieros Civiles
<b>EMS</b>	Escala de intensidad macro sísmica europea
<b>Epicentro</b>	Proyección en la superficie del origen de la ruptura
<b>Falla</b>	Zona en la cual se genera ruptura de corteza que produce un sismo
<b>Hipocentro</b>	Punto bajo la superficie donde se dice que se originan la ruptura
<b>JMA</b>	Escala de intensidad usada por la Agencia Meteorológica de Japón
<b>Mb</b>	Escala de magnitud de ondas de cuerpo
<b>Mcs</b>	Escala de intensidad Mercalli
<b>M<sub>L</sub></b>	Escala de magnitud local o Richter
<b>M<sub>m</sub></b>	Escala de intensidad Mercalli Modificado

<b>Ms</b>	Escala de magnitud de onda superficial
<b>M<sub>sk</sub></b>	Escala de intensidad Medvedev Sponheuer Karnik
<b>M<sub>w</sub></b>	Escala de magnitud de momento
<b>NSE</b>	Norma de Seguridad Estructural
<b>PGA H</b>	Aceleración pico del suelo horizontal
<b>PGA V</b>	Aceleración pico del suelo vertical
<b>Placa tectónica</b>	Larga y estable lámina de roca rígida de unos 100 kilómetros de espesor
<b>SDOF</b>	Sistemas de un solo grado de libertad
<b>UBC</b>	Código Uniforme de Edificación



## RESUMEN

En el presente trabajo se estudia la componente vertical sísmica, para evaluar los efectos que esta puede inducir en el comportamiento de una estructura de concreto reforzado.

Se analiza el modelo de un edificio de 3 niveles, compuesto por marcos dúctiles especiales, 2 veces; la primera considerando los efectos del sismo como fuerzas horizontales y una segunda considerando al sismo como 3 fuerzas; 2 horizontales y 1 vertical perpendicular a las 2 anteriores

Se compararan los resultados de carga axial en columnas, momentos de flexión en vigas, derivas laterales y refuerzos obtenidos al realizar el análisis incluyendo la componente vertical del sismo, un incremento de carga gravitacional, con los resultados tomando al sismo simplemente como 2 componentes horizontales.

Adicionalmente se presentan registros de acelerómetros de sismos, se calcularan los espectros de respuesta usando el método por segmentos para las 3 componentes, calcularan los cocientes V/H para cada registros y se comparan con los porcentajes de carga gravitacional que sugieren los códigos



## **OBJETIVOS**

### **General**

Determinar la influencia de incluir la componente vertical de los sismos en el diseño de concreto reforzado.

### **Específicos**

1. Evaluar cambios en la respuesta de estructuras al considerar la componente vertical del sismo de acuerdo al código de AGIES.
2. Determinar una relación V/H con las aceleraciones espectrales de registros de sismo.
3. Contrastar los cocientes espectrales con los valores sugeridos por códigos de diseño actualmente.



## INTRODUCCIÓN

La componente vertical del sismo ha sido poco estudiada, debido a la rigidez que poseen las estructuras, en este sentido comparada con la rigidez horizontal, recientes observaciones demostraron que en algunos casos las vibraciones verticales son más dañinas que las horizontales, adicionalmente los códigos de diseño actuales no prestan mucha atención a las vibraciones verticales.

Los efectos de la componente vertical del sismo son representados como un incremento de carga muerta, este incremento podría quedarse corto si la estructura se encuentra dentro del rango de períodos susceptibles a las vibraciones verticales, otro posible efecto es la modificación de parámetros en la respuesta de la estructura; carga axial en columnas, deflexiones en vigas, derivas laterales, entre otras.

Anteriormente se realizaron estudios que caracterizan las vibraciones verticales en función de las vibraciones horizontales, Newmark en 1974 realizó un estudio para la agencia de energía nuclear de los Estados Unidos, en el cual concluyo que los efecto de las vibraciones verticales eran aproximadamente  $2/3$  de las vibraciones horizontales, aunque, Borzorginia, Niazi y Campbell en 1995 analizaron registros del sismo de Northridge, en dicho estudio se concluyó que para sitios cercanos a la falla, las vibraciones verticales sobrepasan los  $2/3$  de las vibraciones horizontales propuesta por Newmark.

Inicialmente se describen conceptos de sismología, origen de los sismos, tipos y escalas para medirlos, formas de representarlos en el análisis

estructural, se describe el panorama sísmico de Guatemala para luego hablar sobre las vibraciones verticales del suelo; describiendo su origen, estudios preliminares y efectos dañinos observados con anterioridad.

El caso de estudio, es el modelo de un edificio de marcos dúctiles de concreto reforzado, se analizó considerando la componente vertical como un incremento en la carga muerta, como lo describe la Norma NSE 2 de AGIES, se compararon 3 parámetros en el modelo: carga axial, momentos de flexión y derivas laterales.

También se buscaron registros de sismos ocurridos en Guatemala, pero desafortunadamente no se obtuvieron dado a la falta de una red sismográfica en el país, por esa razón se tomaron registros de otros países que poseen una amenaza sísmica similar a la de Guatemala, se calcularon los cocientes espectrales, se compararon con el porcentaje de carga muerta que se incrementa para considerar las vibraciones verticales.

..

# 1. SISMOLOGÍA

## 1.1. Generalidades

La sismología abarca el estudio de sismos y ondas sísmicas que se mueven a través y alrededor de la tierra. Un sismo es un movimiento repentino y fugaz de la superficie terrestre. De acuerdo a geólogos, la tierra ha sufrido sismos por cientos de millones de años, incluso antes de la existencia de la humanidad.

### 1.1.1. Antecedentes históricos

Hablando en tiempo geológico, es bastante reciente, a mediados del siglo XVII, que un sismo ha sido visto como un fenómeno natural impulsado por los procesos de la tierra como un planeta. De esta manera el trabajo posterior, especialmente en el siglo XIX, condujo a un enorme progreso en la parte instrumental para la obtención de datos de sismos.

Datos sismológicos de muchos sismos, fueron recogidos y analizados para mapear y entender el fenómeno de sismos, estos datos incluso fueron usados para resolver la estructura interna de la tierra en un grado notable, el cual, a su vez ayudó al desarrollo de diferentes teorías que explican las causas de los sismos.

Mientras que el conocimiento derivado del estudio de la información sismológica, ha ayudado en el diseño racional de las estructuras para soportar los sismos, también ha revelado la naturaleza incierta de los futuros sismos

para los que dichas estructuras deben ser diseñadas. Por lo tanto, los conceptos probabilísticos para hacer frente a los sismos y los diseños sismo-resistentes también han surgido.

Ambos sismólogos e ingenieros de terremotos, utilizan los datos sismológicos para la comprensión de un sismo y sus efectos, pero sus objetivos son diferentes. Los sismólogos centran su atención en los problemas mundiales de los sismos y están más preocupados por los aspectos geológicos, incluyendo la predicción de sismos.

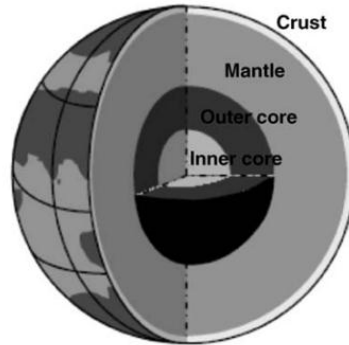
Los ingenieros de terremotos, por otra parte, se refieren principalmente a los efectos locales de los sismos, que son capaces de causar daños significativos a las estructuras. Estos datos en una forma que es más apropiado para la predicción de daños en estructuras o, alternativamente el diseño seguro de las estructuras. Sin embargo, hay muchos temas en sismología que son de interés inmediato de la ingeniería, especialmente en la mejor comprensión de los datos sismológicos y su uso para el diseño sísmico de estructuras.

### **1.1.2. La tierra y su interior**

Durante la formación de la tierra, fue generada gran cantidad de calor debido a la fusión de las masas, cuando la tierra se enfrió, las masas se agruparon unas con otras, las pesadas fueron hacia el centro, mientras las más livianas se elevaron. Esto condujo a que la tierra se constituyera en distintas capas de masas.



Figura 1. **Capas de la tierra**



Fuente: T. K. Datta. *Seismic analysis of structures*. p. 2.

Investigaciones geológicas junto a información sismológica, reveló que la tierra está constituida principalmente por 4 distintas capas llamadas: núcleo interior, núcleo exterior, manto y corteza, como se ve en la figura 1.

Tabla I. **Espesores de la corteza terrestre**

Fuente Consultada	Espesor de la Corteza (km)
A.S. Elnashai & L.D. Sarno	4 – 6 bajo los océanos 25-60 bajo los continentes
T. K. Datta	5 – 15 bajo los océanos 40 bajo los continentes
USGS	5 bajo los océanos 30 bajo los continentes 100 bajo grandes montañas

Fuente: elaboración propia.

La corteza, es la capa externa de roca con una geología estructural compleja, su espesor varía dependiendo de la fuente de consulta, en la tabla I se muestra la comparación entre 3 fuentes distintas. La discontinuidad entre la corteza y la siguiente capa, el manto fue descubierto por Mohorovicic a través

de la observación de un cambio brusco en la velocidad de las ondas sísmicas, pasando del manto a la corteza. Esta discontinuidad es conocida como la discontinuidad de Mohorovicic, discontinuidad M.

La corteza oceánica, es relativamente delgada, mientras que la corteza bajo las montañas es relativamente gruesa, tabla 1, esta observación también demuestra el principio de isostasia, el cual dice que la corteza flota sobre el manto. Basado en este principio, el manto se considera que posee una capa superior que es bastante rígida, como la corteza.

La parte superior que incluye a la corteza, de aproximadamente 120 kilómetros de espesor, es conocida como litosfera, inmediatamente bajo esta se encuentra una zona llamada astenosfera, la cual se extiende aproximadamente 200 kilómetros. Esta zona se cree que es de roca fundida y de características plásticas. La astenosfera es sólo una pequeña fracción del espesor total del manto, estimada en 2 900 kilómetros, pero debido a su carácter plástico soporta la litosfera que flota sobre ella.

La litosfera flotante no se mueve como una sola unidad, sino como un conjunto de una serie de placas de diversos tamaños a una velocidad que se encuentra en el rango de 1 a 10 centímetros por año. El movimiento de las placas es diferente, tanto en magnitud como en dirección, este movimiento diferencial de las placas, es la base de la fundación de la teoría tectónica de sismos.

Por debajo del manto está el núcleo central. Se observó que sólo las ondas P pasan a través del núcleo central. Las ondas P y S pueden pasar a través del manto. El núcleo interno es muy denso y se ha supuesto que esta compuesto por metales como hierro y níquel, con 1 290 kilómetros de espesor.

Circundante a este, existe una capa de densidad similar de espesor de 2 200 kilómetros, que se cree que es un líquido, de modo que ondas S no pueden pasar a través de él.

En el núcleo, la temperatura es de unos 2 500 grados centígrados, la presión se encuentra alrededor de 4 millones de atmosferas y la densidad es de aproximadamente 14 gramos por centímetro cúbico. Cerca de la superficie, son 25 grados centígrados, 1 atmosfera y una densidad entre 1,1 y 2,1 gramos por centímetro cúbico.

Tabla II. **Densidad de la superficie terrestre**

<b>Tipo de Suelo</b>	<b>Densidad [g/cm<sup>3</sup>]</b>
Suelo húmedo	1,76
Arcillas medias o duras	1,92
Tierras sumergidas	1,1
Arenas	1,5
Gravas	2,1

Fuente: Crespo Vallalaz. Mecanica de suelos y cimentaciones. p. 177.

### **1.1.3. Teoría de las placas tectónicas**

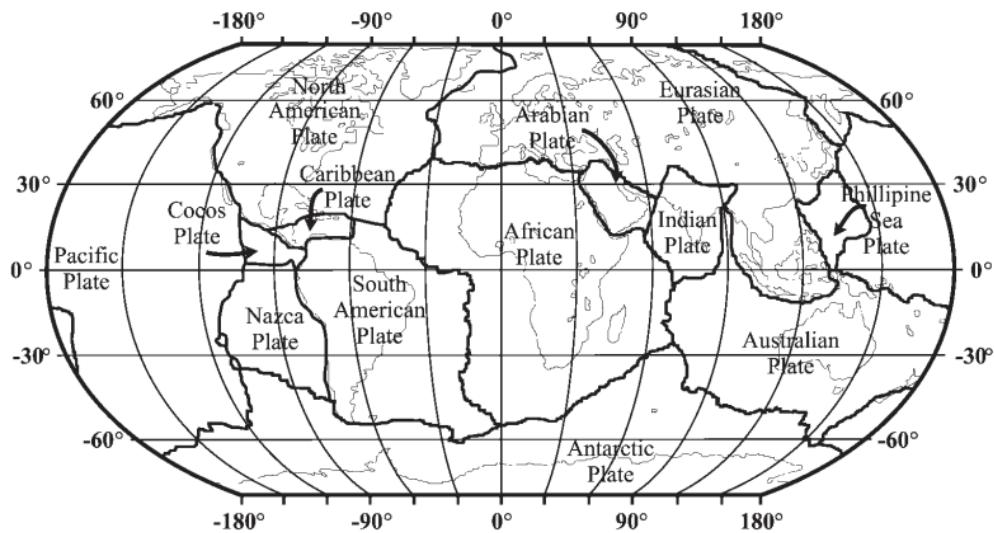
Nace de la teoría de la deriva continental y expansión del lecho marino. En dorsales oceánicas, 2 grandes masas continentales, se encontraban unidas. Estas masas se alejan por el flujo de magma caliente hacia arriba a la superficie de la tierra en las dorsales oceánicas, grandes elevaciones submarinas situadas en la parte central de los océanos. A medida que el material llega a la superficie y se enfría, se forma una corteza adicional en la litosfera.

Con el tiempo, la corteza recién formada se extiende hacia el exterior, debido al afloramiento continuo de roca fundida. La nueva corteza se hunde

bajo la superficie del mar, ya que se enfría y se continúan extendiendo hacia el exterior. La expansión continúa hasta que la litosfera llega a una zona de aguas profundas, donde se precipita hacia abajo en la astenosfera, zonas de subducción.

Los movimientos continentales se asocian con una variedad de patrones de circulación. Como resultado, el movimiento continental no tiene lugar como una unidad, sino que se produce a través del móvil de la litosfera en piezas, llamadas placas tectónicas. Las cuales son largas y estables láminas de roca rígida de unos 100 kilómetros de espesor que forman la corteza o litosfera y parte la parte superior del manto de la tierra.

Figura 2. **Placas tectónicas de la tierra**



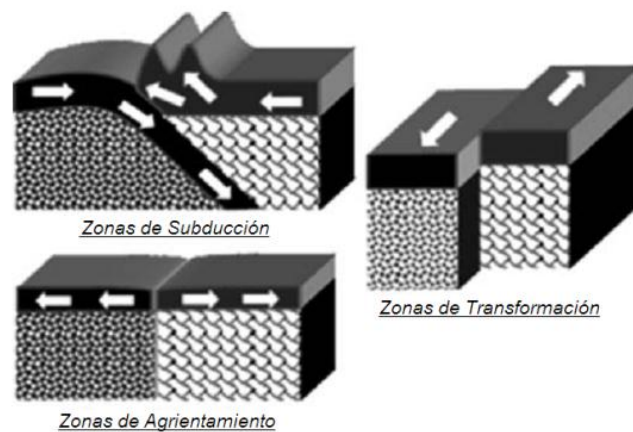
Fuente: A.S. Elnashai y L.D. Sarno. *Fundamentals of earthquake engineering*. p. 3.

De acuerdo con la teoría de desplazamiento continental, la litosfera está dividida en 15 placas, como se muestra en la figura 2, incluyendo la corteza

continental y oceánica, en cuyos bordes se concentra gran cantidad de las fuerzas. Debido al movimiento relativo del sistema litosfera-astenosfera. Esas fuerzas estimulan cambios físicos y químicos, y afectan la geología de las placas contiguas. Sin embargo, solo la litosfera tiene la resistencia y el comportamiento frágil a la fractura, esto causa un sismo.

Existen 3 tipos de interacciones entre placas, dados por los 3 tipos de límites llamados: divergentes, convergentes y transformación, ver figura 3.

Figura 3. **Tipos de bordes en placas tectónica**



Fuente: T. K. Datta. *Seismic analysis of structures*. p. 4.

#### 1.1.3.1. **Divergente o zonas de agrietamiento**

Las placas se separan unas de otras y se produce ya sea un derramamiento de magma o la litosfera se separa del interior de la tierra. Las fisuras son diferentes desde la dorsal mediooceánica, donde se crea corteza oceánica y litosfera nueva por la difusión del fondo del mar.

De modo contrario, en fisuras no se produce corteza o litosfera. Si el agrietamiento continúa, eventualmente a la dorsal mediooceánica se puede formar, creando un borde divergente entre 2 placas tectónicas. La dorsal medio atlántica, es un ejemplo de borde de placa divergente

No obstante, el área de la superficie de la tierra no cambia con el paso del tiempo y por lo tanto la creación de nueva litosfera, se compensa con la destrucción en otro lugar de una cantidad equivalente de la corteza.

### **1.1.3.2. Convergentes o zona de subducción**

Placas adyacentes convergen y colisionan. Existen 2 tipos de zonas de convergencia: bordes convergentes de litosfera oceánica y continental. El primer tipo ocurre cuando 2 placas consistentes de litosfera oceánica colisionan. La roca oceánica es máfica y pesada, comparada con las rocas continentales; por tanto, se hunde fácilmente y es destruida en una zona de subducción.

El segundo tipo de borde convergente, ocurre cuando ambas placas de roca consisten de litosfera continental. Los continentes están compuestos de roca ligera, por ello no se sumergen. De cualquier modo, en este caso la sismicidad está extendida sobre un área amplia. Los anillos euroasiático y de fuego del pacífico, son ejemplos de bordes convergentes de litosfera oceánica y continental respectivamente.

En el proceso de subducción son generados altos esfuerzos y fracturamiento de las rocas de la corteza. Se producen fracturas frágiles de la superficie a lo largo de deslizamientos friccionados en las grietas. Los esfuerzos son aliviados y energía sísmica a la forma de un sismo es liberada.

### **1.1.3.3. Zona de transformación o deslizamiento horizontal transcurrente**

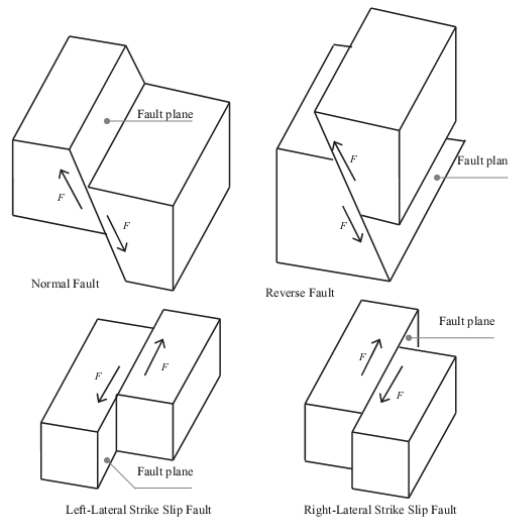
Dos placas se deslizan una sobre otra, pero sin crear nueva litosfera o sin que se realice un proceso de subducción con litosfera antigua. Estas pueden compensar dorsales oceánicas, zonas de subducción o ambas. Límites de deslizamiento transcurrente horizontal, pueden conectar tanto zonas divergentes y convergentes como 2 zonas convergentes. La falla del Motagua es un ejemplo de un límite de transformación, conectando las placas de Norte América y el Caribe.

### **1.1.4. Origen de los sismos**

Las fallas en los bordes de placa, son los lugares más propensos a los sismos que se producen. Estos fenómenos se denominan sismos interplaca. Una serie de sismos también ocurren dentro de la placa fuera de las fallas. Estos terremotos son conocidos como los terremotos intraplaca, en el que una súbita liberación de energía se lleva a cabo, debido al deslizamiento mutuo de las capas de piedra. Este deslizamiento genera fallas nuevas, llamadas fallas sísmicas.

Sin embargo, las fallas son la causa de los sismos y no sus resultados. Estas fallas, que han sido sometidas a la deformación de los últimos miles de años, y seguirán sometidas en el futuro, se denominan fallas activas. En las fallas (nueva o vieja), 2 tipos de desviaciones se observan, llamadas: deslizamiento de inmersión y de desgarre. Deslizamiento de inmersión se lleva a cabo en la dirección vertical, mientras que por deslizamiento tiene lugar en la dirección horizontal, como se muestra en la figura 4.

Figura 4. Tipos de fallas



Fuente: T. K. Datta. *Seismic analysis of structures*. p. 4.

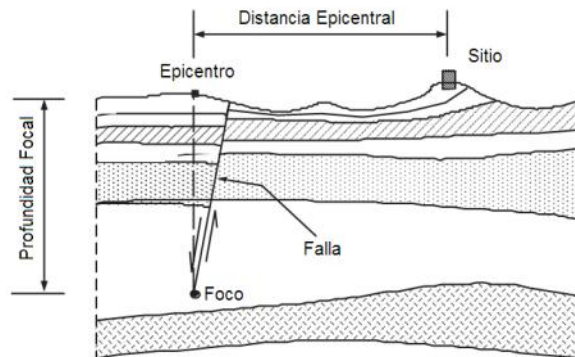
La mayoría de los sismos son producidos por deslizamiento en las fallas o en los bordes de placa. Sin embargo, hay muchos casos donde las fallas se crean debido a los sismos. La longitud de la falla sobre la que el deslizamiento se lleva a cabo, puede encontrarse sobre varios cientos de kilómetros. En los grandes sismos, terremotos, una reacción en cadena se llevaría a cabo a lo largo de toda la longitud del deslizamiento. En un momento dado, el origen del terremoto prácticamente sería un punto y el origen que viaja a lo largo de la falla.

El foco o hipocentro de un sismo, es el punto bajo la superficie donde se dice que se origina la ruptura como se muestra en la figura 5. La proyección del foco en la superficie se llama epicentro. La mayoría de los sismos tienen una profundidad focal en el rango de 5 a 15 kilómetros, mientras que los eventos intermedios tienen focos entre 20 a 50 kilómetros y los sismos profundos se



producen entre 300 a 700 kilometros bajo tierra. Los 3 tipos son también conocidos como focos; superficial, intermedio y profundo, respectivamente.

Figura 5. **Parámetros de la falla**



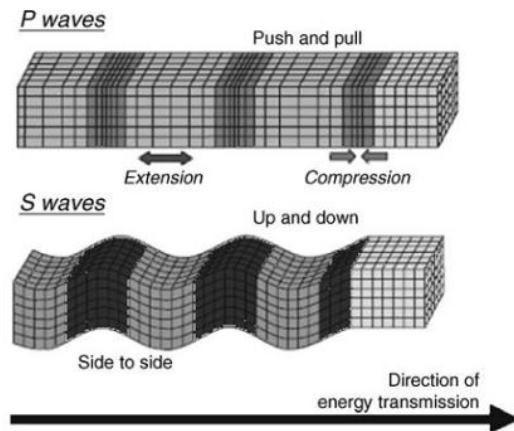
Fuente: A.S. Elnashai y L.D. Sarno. *Fundamentals of earthquake engineering*. p. 9.

### 1.1.5. **Ondas sísmicas**

La gran energía de deformación liberada durante un sismo, provoca la propagación de las ondas radiales dentro de la tierra (ya que es una masa elástica) en todas las direcciones. Estas ondas elásticas, llamadas ondas sísmicas, transmiten energía de un punto a otro de la tierra a través de diferentes capas y, finalmente, llevan la energía a la superficie, lo que provoca la destrucción.

Dentro de la tierra, las ondas elásticas se propagan a través de un medio casi ilimitado, isótropo y homogéneo, y forman lo que se conoce como ondas de cuerpo. En la superficie, estas ondas se propagan como ondas de superficie.

Figura 6. **Ondas de cuerpo**



Fuente: T. K. Datta. *Seismic analysis of structures*. p. 8.

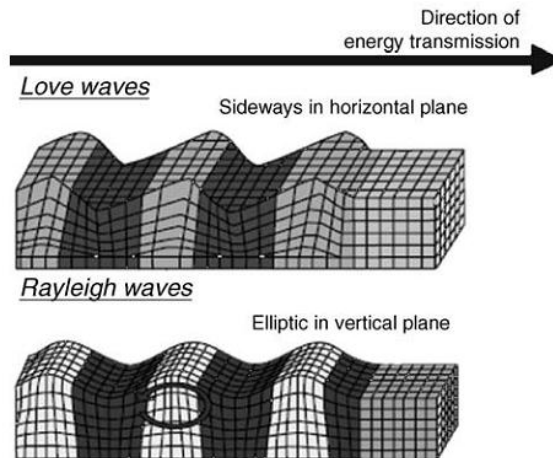
Las ondas de cuerpo son de 2 tipos; las ondas P (*Push Waves*) y ondas S (*Shear waves*). Las ondas P, como se muestra en la parte superior de la figura 6, son las ondas longitudinales en las que la dirección del movimiento de las partículas está en la misma dirección o contraria a la de propagación de ondas. Las ondas S, también se muestran en la figura 6, son las ondas transversales en las que la dirección del movimiento de las partículas, es perpendicular a la dirección de propagación de las ondas.

Las ondas P llegan más rápido que las ondas S. Cerca de la superficie, la velocidad de las ondas se encuentra en el rango de 5 a 7 y 3 a 4 kilómetros por segundo, respectivamente.

Las ondas superficiales se propagan en la superficie de la tierra. Estas son mejores para detectar sismos superficiales. Se clasifican como ondas L, ondas Love y ondas R, ondas de Rayleigh. En las ondas L, el movimiento de las partículas se lleva a cabo en el plano horizontal solamente, y es transversal a la

dirección de propagación, como se muestra en la figura 7. La velocidad de la onda depende de la longitud de onda, el espesor de la capa superior y las propiedades elásticas de los 2 medios de las capas estratificadas. Las ondas L viajan más rápido que las ondas R y son las primeras en aparecer en el grupo de ondas superficiales.

Figura 7. **Ondas superficiales**

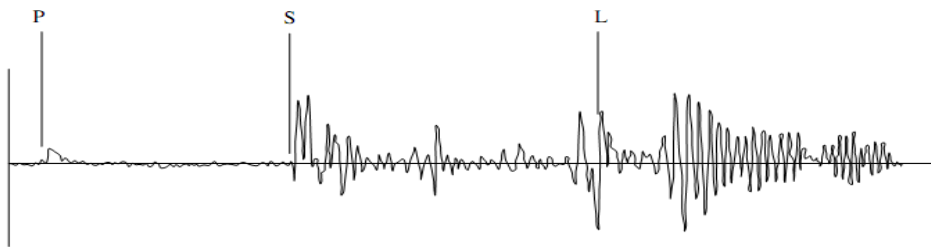


Fuente: T. K. Datta. *Seismic analysis of structures*. p. 8.

En las ondas R, el movimiento de las partículas es siempre en un plano vertical y traza una trayectoria elíptica, que es retrógrado a la dirección de propagación de ondas, como se muestra en la figura 7. La velocidad de la onda R es de aproximadamente 0,9 veces la velocidad de la onda transversal. En capas estratificadas, las ondas R se dispersan, velocidad de la onda que varían con frecuencia, como ocurre con las ondas L.

Las ondas sísmicas que se registran en la superficie de la tierra son generalmente de naturaleza irregular. El registro de un sismo bastante fuerte, muestra un rastro de los tipos de ondas, como se muestra en la figura 8.

Figura 8. **Registro de un sismo**



Fuente: T. K. Datta. *Seismic analysis of structures*. p. 9.

#### **1.1.6. Medición de los sismos**

El tamaño del sismo se expresa de varias maneras. Mediciones cualitativas o no instrumentales y cuantitativos o instrumental, este último puede ser sobre la base de calibraciones regional o mundial aplicables.

Mediciones no instrumentales, son de gran importancia para los eventos que sucedieron antes de la medición instrumental, por lo tanto, son esenciales en la elaboración de catálogos de terremotos históricos para fines de análisis de riesgo. De los sismos que han sido registrados instrumentalmente, las escalas cualitativas son complementarias a los datos instrumentales. La valoración y utilización de los registros históricos, no es sencillo y puede conducir a resultados erróneos debido a los sesgos inevitables. Por otra parte, el período de observación, durante el cual los datos se emplean para determinar las proyecciones futuras, es un asunto de gran importancia.

### **1.1.6.1. Intensidad**

Es una medida no instrumental de la perceptibilidad de los daños a las estructuras, los efectos de la superficie del suelo y las reacciones humanas ante el sismo. Se trata de un método descriptivo que se ha utilizado tradicionalmente para establecer el tamaño del terremoto, especialmente para eventos preinstrumentos. Se trata de una evaluación de los daños subjetivos, debido a su carácter cualitativo, en relación con la densidad de población, la familiaridad con el terremoto y el tipo de construcciones.

Escalas discretas se utilizan para cuantificar la intensidad sísmica, los niveles están representados por números romanos y cada grado de intensidad proporciona una descripción cualitativa de los efectos del sismo. Varias escalas de intensidad han sido propuestas en todo el mundo. Los primeros intentos de clasificación de los daños del terremoto de intensidad, se llevaron a cabo en Italia y Suiza alrededor de finales de 1700 y principios de 1900. Algunas de estas escalas se siguen utilizando en Europa (junto con las escalas modernas), Estados Unidos y Japón. Algunas de las escalas de intensidad más comunes son las siguientes:

- Mercalli - Cancani - Seiberg (MCS): escala de 12 niveles, utilizada en el sur de Europa.
- Mercalli Modificada (MM): escala de 12 niveles, propuesto en 1931 por Wood y Neumann, quien adaptó la escala MCS para el conjunto de datos de California. Se utiliza en América del Norte y otros países, entre ellos Guatemala.

- Medvedev - Sponheuer - Karnik (MSK): escala de 12 niveles, desarrollado en Europa Central y Oriental y se utiliza en otros países.
- Escala Macro sísmica europea (EMS): escala de 12 niveles, aprobado desde 1998 en Europa. Esta desarrollado en base a la escala de MM.
- Agencia Meteorológica de Japón (JMA): escala de 7 niveles, utilizada en Japón. Ha sido revisada en los últimos años y recientemente se ha correlacionado con la máxima aceleración horizontal del suelo.

Escalas de intensidad, pueden incluir una descripción de la calidad de la construcción de estructuras en la región expuesta. Por ejemplo, la escala Mercalli Modificado indica los diferentes niveles de daños, dependiendo del sistema estructural, si este fue mal construido o mal diseñadas (VII), los edificios ordinarios (VIII) o de las estructuras construidas, especialmente para soportar terremotos (IX).

Sin embargo, las escalas de intensidad no tienen en cuenta las condiciones del suelo local, que puede afectar significativamente el daño inducido por el terremoto su distribución.

#### **1.1.6.2. Magnitud**

Es una medida cuantitativa del tamaño del terremoto y las dimensiones de la falla. Se basa en las amplitudes máximas de las ondas de cuerpo o las ondas superficiales. Por tanto, es una escala fundamental, cuantitativa y objetiva.

Los primeros intentos de definir las escalas de magnitud se realizaron en Japón por Wadati y en California por Richter en la década de 1930. Existen varias escalas, muchas de estas son frecuencia - dependiente, porque miden las amplitudes de las ondas sísmicas con diferentes propiedades. Escalas relacionadas directamente con los parámetros de la fuente, también se han propuesto, estas no dependen específicamente de ondas, y por lo tanto son independientes de la frecuencia. Las escalas de magnitud más comunes se describen a continuación:

- Magnitud Local o Richter ( $M_L$ ): mide la amplitud máxima de la onda sísmica en micras registrada en un sismógrafo estándar Wood-Anderson, situado a una distancia de 100 kilómetros del epicentro del terremoto. La escala Richter se ha calibrado asumiendo que la magnitud  $M_L = 3$  corresponde a un sismo, a una distancia de 100 kilómetros con una amplitud máxima de  $A = 1$  milímetro. Sismos con  $M_L$  mayor de 5,5 causan daños significativos, mientras que un sismo de  $M_L = 2$ , es el evento más pequeño que normalmente sienten las personas.
- Magnitud de onda del cuerpo ( $m_b$ ): esta escala es adecuada para sismos profundos que tienen pocas olas de superficie. Por otra parte,  $m_b$  puede medir sucesos lejanos, por ejemplo, distancias epicentrales no menos de 600 kilómetros. Mide la amplitud de las ondas P, con un período de alrededor de 1 segundo, es decir, longitud de ondas menores de 10 kilómetros.
- Magnitud de ondas superficiales ( $M_S$ ): se utiliza para los grandes sismos. Sin embargo, no puede ser usado para caracterizar eventos profundos o sismos regionales relativamente pequeños. Es una medida de las amplitudes de las ondas L y R con un período de 20 segundos, es decir,

la longitud de onda de alrededor de 60 kilómetros, que son comunes para sismos muy distantes, por ejemplo, donde el epicentro se encuentra en más de 2 000 kilómetros.

- Magnitud de momento ( $M_w$ ): representa el mecanismo de corte que se lleva a cabo en las fuentes del sismo. No tiene que ver con cualquier longitud de onda. Como resultado,  $M_w$  se puede utilizar para medir el espectro de movimientos de tierra.

Tabla III. **Propiedades de las escalas de magnitud**

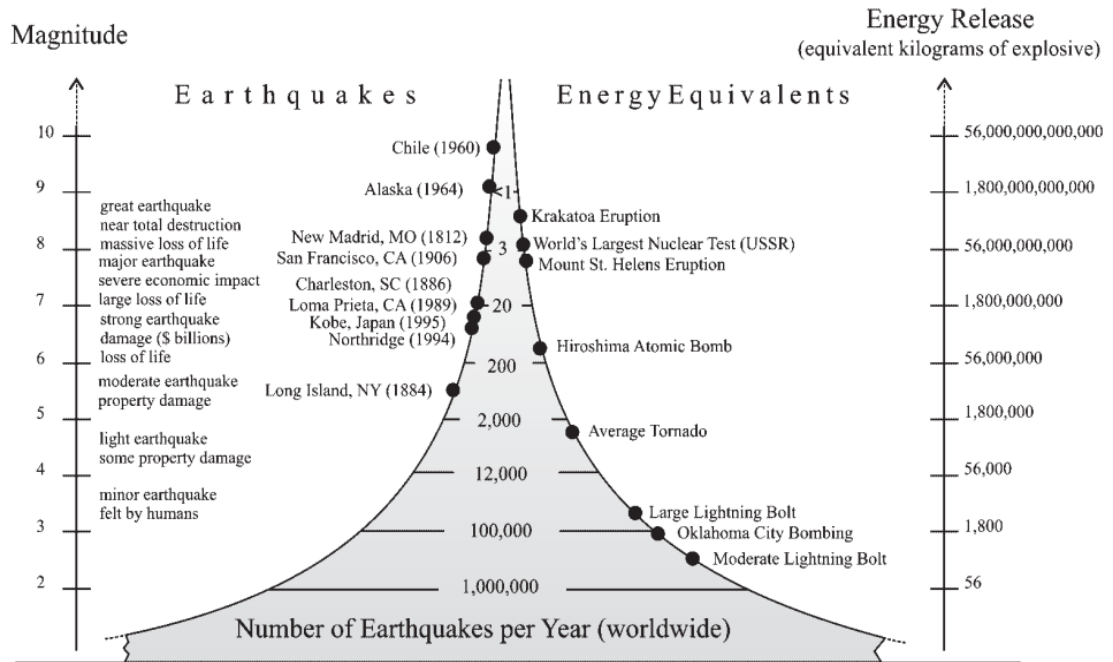
Escala	Autor	Tamaño del Sismo	Profundidad del Sismo	Distancia Epicentral (km)	Parámetro Referencia	Aplicabilidad
$M_L$	Richter	Pequeño	Superficial	< 600	Amplitud de la onda	Regional California
$m_b$	Guterberg y Richter	Pequeño a mediano	Profundo	> 1 000	Amplitud de ondas P	Mundial
$M_S$	Richter y Gutenberg	Grande	Superficial	> 2 000	Amplitud de ondas L y R	Mundial
$M_w$	Kanamori	Todos	Todas	Todas	Momento sísmico	Mundial

Fuente: Adaptado de A.S. Elnashai y L.D. Sarno. *Fundamentals of earthquake engineering*. p.19.

Las principales propiedades de las escalas de magnitud descritas anteriormente, se resumen en la tabla III. La definición matemática de la magnitud, implica que todas las escalas anteriores prácticamente no tienen límites superior e inferior. La figura 9 indica la correlación entre la magnitud de ondas superficiales,  $M_S$ , y la energía liberada durante un sismo y otros eventos. El número de sismos por año también se proporciona.



Figura 9. **Correlación entre magnitud y energía liberada**



Fuente: A.S. Elnashai y L.D. Sarno. *Fundamentals of earthquake engineering*. p. 21.

## 1.2. Representaciones del movimiento del suelo

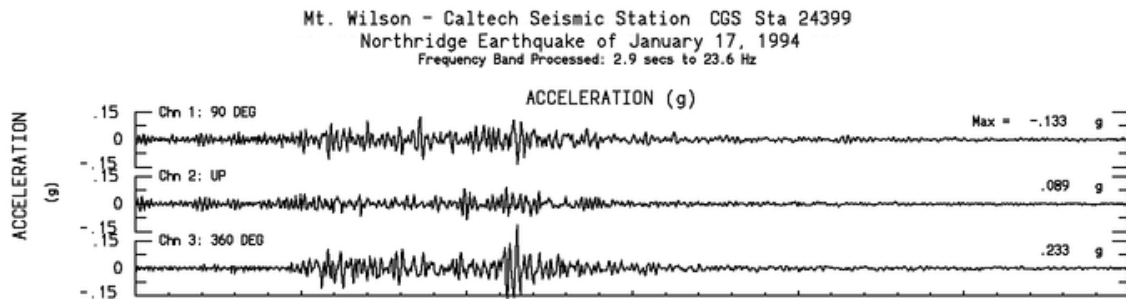
Para el análisis sísmico y diseño de estructuras, el movimiento del suelo puede ser definido de diversas maneras, dependiendo de la naturaleza del análisis que se lleve a cabo.

### 1.2.1. Registros tiempo historia

La manera más común para describir un movimiento del terreno, es con un registro de la historia del tiempo. Los parámetros de movimiento pueden ser la aceleración, velocidad o desplazamiento, o las 3 combinadas entre sí.

En general, la cantidad medida directamente, es la aceleración y el resto de parámetros son las cantidades derivadas. Sin embargo, el desplazamiento y la velocidad también se pueden medir directamente.

Figura 10. **Registros de aceleración sismo Northridge 1994**



Fuente: *Center for Engineering Strong Motion Data*. [http://strongmotioncenter.org/NCESMD/data/northridge\\_17jan1994/ce24399.gif](http://strongmotioncenter.org/NCESMD/data/northridge_17jan1994/ce24399.gif).  
Consulta: 7 de junio de 2012.

Las medidas de registros tiempo historia, incluyen errores derivados de muchas fuentes, tales como ruidos en las frecuencias altas y bajas, errores de línea de base, y el error instrumental. Estos errores se eliminan de los datos antes de utilizarlos. En los últimos años, los sismógrafos digitales son más comúnmente utilizados, pero los varios errores antes mencionados están igualmente presentes en las formas analógicas y digitales. Historias de tiempo de los movimientos de tierra, se utilizan directamente para el análisis de dominio del tiempo de estructuras sometidas a determinadas entradas sísmicas.

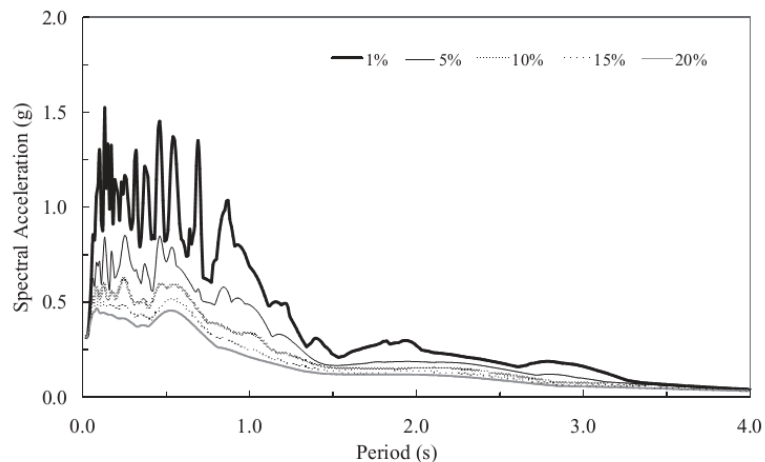
En cualquier estación de medición, los movimientos de tierra se registran en 3 direcciones ortogonales, 2 de ellas están en dirección horizontal y el tercero está en la dirección vertical como se muestra en la figura 10. Por lo

tanto, 3 componentes de los movimientos de tierra están disponibles desde cualquier estación de medición. Para el análisis estructural, estos 3 componentes de los movimientos de tierra se transforman en los correspondientes a las direcciones principales.

### 1.2.2. Espectros de respuesta

Los registros de movimientos fuertes del suelo, son utilizados para conocer la historia de respuesta dinámica, de la cual se derivan los espectros de respuesta.

Figura 11. Espectro de respuesta



Fuente: A.S. Elnashai y L.D. Sarno. *Fundamentals of earthquake engineering*. p. 135.

Un espectro de respuesta, no es más que la gráfica de las máximas respuestas de aceleración, velocidad o desplazamientos de un sistema de un grado de libertad, con varios períodos de vibración natural cuando es sometido a determinado movimiento del suelo durante un sismo. Generalmente, se

calcula una familia de curvas para una excitación dada, que muestra el efecto de la variación del amortiguamiento estructural.

Para aplicaciones prácticas a estructuras, es suficiente emplear el máximo, o espectral, de los valores de los parámetros de respuesta en lugar de usar los valores en cada instante del registro tiempo historia.

Las demandas sísmicas pueden ser dadas por espectros de respuesta de varios tipos: elásticos, inelásticos, suavizado y parametrizado.

#### **1.2.2.1. Cálculo de un espectro de respuesta**

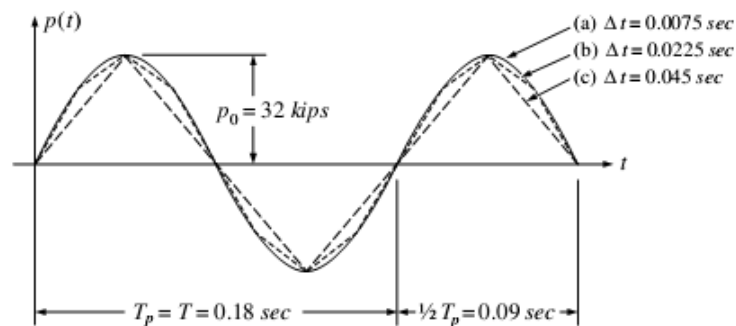
La parte difícil de la construcción de un espectro de respuesta, es obtener la respuesta de un sistema SDOF ante un registro tiempo historia determinado, para esto se utilizan métodos paso a paso que son aplicables tanto para sistemas lineales como no lineales.

El método paso a paso más simple para el análisis de sistemas de SDOF, es el método exacto por segmentos, que se basa en la solución exacta de la ecuación de movimiento para la respuesta de una estructura lineal a una carga que varía linealmente durante un intervalo de tiempo discreto. En el uso de este método, la historia de carga se divide en intervalos de tiempo, por lo general definidas por cambios significativos de la pendiente en la historia de carga; entre estos puntos, se supone que la pendiente de la curva de carga permanece constante.

Aunque la expresión de la respuesta derivada de estos segmentos de carga que varía linealmente es exacta, se debe reconocer que la historia de carga sólo se aproxima a la real por la pendiente constante del segmento.

Entonces, la respuesta calculada generalmente no es una representación exacta de la verdadera respuesta a la carga real, sin embargo, el error se puede disminuir mediante la reducción de la longitud de los intervalos de tiempo para tener una mejor aproximación de la carga, como se muestra en la figura 12.

Figura 12. **Aproximación lineal de una carga senoidal**



Fuente: Ray W. Clough & Joseph Penzien. *Dynamics of structures*. p. 115.

Si se desea, la longitud de los intervalos de tiempo se puede variar de un paso al siguiente, con el fin de lograr el mejor ajuste posible de la historia de carga por la secuencia de segmento de línea recta; sin embargo, por razones de eficiencia computacional, se acostumbra a utilizar un intervalo de tiempo constante.

La representación de la historia de carga,  $p(\tau) = p_0 + \alpha\tau$ , para un intervalo de tiempo  $h$ , se muestra en la figura 13, de modo que la ecuación de movimiento está dada por  $m\ddot{x} + v\dot{x} + kx = p_0 + \alpha\tau$ , la ecuación resultante luego de combinar la respuesta a vibración simple más la solución particular se tiene:

$$x(t) = A_0 + A_1 t + A_2 e^{-\beta\omega_d t} \cos \omega_d t + A_3 e^{-\beta\omega_d t} \sin \omega_d t \quad \text{donde}$$

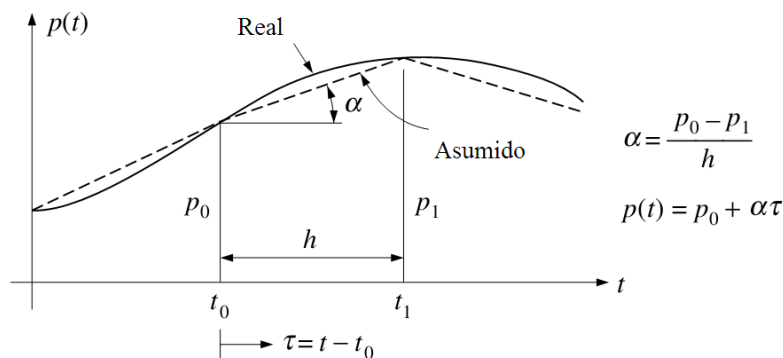
$$A_0 = \frac{x_0}{\omega^2} - \frac{2\beta\alpha}{\omega^3}$$

$$A_1 = \frac{\alpha}{\omega^2}$$

$$A_2 = x_0 - A_0$$

$$A_3 = \frac{1}{\omega_d} \left[ x'_0 + \beta\omega A_2 - \frac{\alpha}{\omega^2} \right]$$

Figura 13. Planteamiento del método por segmentos



Fuente: Ray W. Clough & Joseph Penzien. *Dynamics of structures*. p. 113.

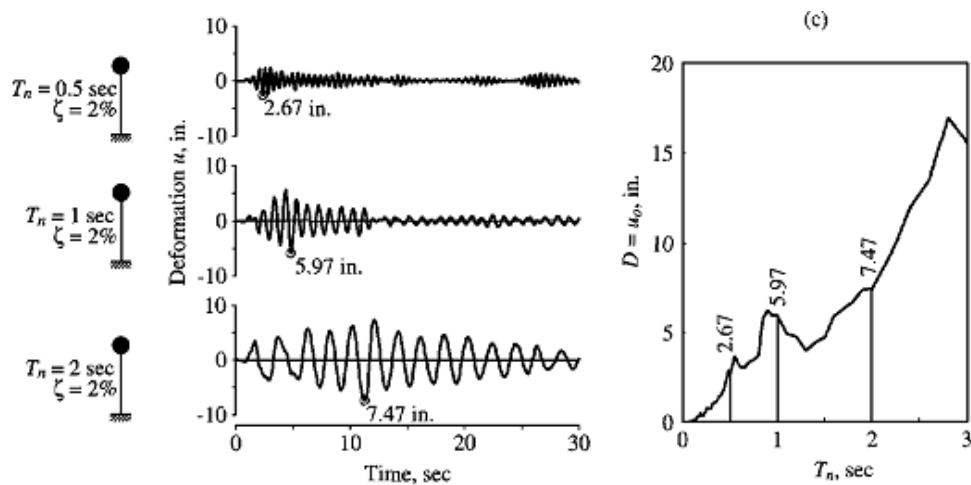
De igual forma la expresión para la respuesta de velocidad se muestra a continuación:

$$\dot{x}(t) = A_1 + (A_3\omega_d - \beta\omega A_2)e^{-\beta\omega t} \cos \omega_d t - (\omega_d A_2 + \beta\omega A_3)e^{-\beta\omega t} \sin \omega_d t$$

El procedimiento que se usará para la construcción del espectro de respuesta con un amortiguamiento  $\beta$ , consiste en calcular la respuesta máxima mediante el método exacto por segmentos para varios SDOF, con diferentes períodos de vibración natural ante la excitación de un mismo sismo y graficar en

el eje horizontal los períodos de vibración y en el eje vertical las repuestas máximas, como se muestra en la figura 14. La variación de los períodos de vibración natural, se representa mejor de forma logarítmica.

Figura 14. **Construcción de un espectro de respuesta**

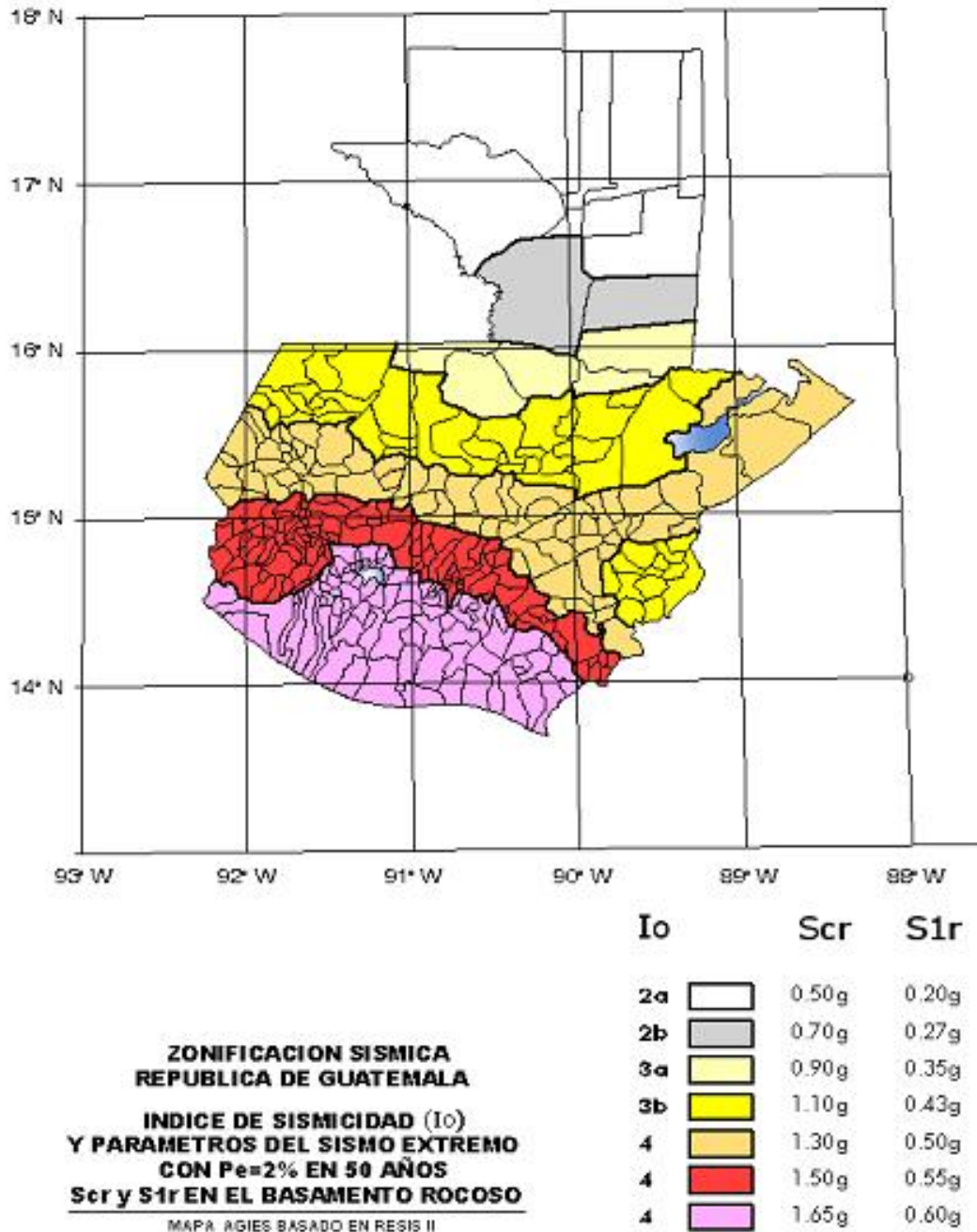


Fuente: Anil K. Chopra. *Dynamic of structures theory and application to earthquake engineering*. p. 199.

### 1.2.3. Método de la carga sísmica equivalente

El método de la carga sísmica estática equivalente, permite que las demandas sísmicas sean modeladas como fuerzas estáticas horizontales (y también verticales) aplicadas externamente a lo alto y ancho de la edificación. La cuantificación de la fuerza equivalente es semiempírica. Está basada en un espectro de diseño sísmico definido en el capítulo 4 de NSE 2, la masa efectiva de la edificación, las propiedades elásticas de la estructura y el cálculo empírico del período fundamental de vibración de la edificación, según lo definido en el capítulo 3 de NSE 3 publicada por AGIES.

Figura 15. Zonificación sísmica República de Guatemala



Fuente: AGIES. Norma de Seguridad Estructural 2. p. 14.



### 1.2.3.1. Cálculo del sismo de diseño

Los parámetros principales necesarios para el cálculo de los sismos de diseño, son  $S_{cr}$  y  $S_{1r}$  que se encuentran en el listado de amenaza sísmica por municipios de la NSE 2-10. Ver figura 15.

Estos parámetros deben ser modificados por factores, dependiendo del tipo de sitio,  $F_a$  y  $F_v$  para períodos cortos y largos respectivamente, y las intensidades sísmicas especiales,  $N_a$  y  $N_v$  para períodos cortos y largos respectivamente, dichos valores se encuentran en las tablas 4.2, 4.3, 4.6 y 4.7 de la NSE 2-10

$$S_{cs} = S_{cr} \times F_a \times N_a$$

$$S_{1s} = S_{1r} \times F_v \times N_v$$

Luego las aceleraciones deben ser calibradas, dependiendo del período de retorno que se desea usar para el diseño, en función del tipo de obra el buen criterio del diseñador dará un período de retorno mayor o menor.

$$S_{cd} = S_{cs} \times K_d$$

$$S_{1d} = S_{1s} \times K_d$$

El período de transición,  $T_s$ , que separa los períodos cortos de los largos es:

$$T_s = S_{1d} / S_{cd}$$

El período de vibración de la estructura, se puede calcular de forma empírica usando:

$$T_a = K_T(h_n)^x$$

Donde  $K_T$  y  $x$  dependen del tipo de estructuras, para marcos de concreto reforzado los valores son 0,047 y 0,90 respectivamente, y  $h_n$  es la altura del edificio desde la base.

O de forma analítica, usando la siguiente expresión:

$$T_F = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (W_i u_i^2)}{g \sum_{i=1}^n (F_i u_i)}}$$

Donde:

$W_i$  = peso sísmico en el nivel "i"

$u_i$  = desplazamiento lateral del centro de masa del nivel "i", estos desplazamientos se pueden calcular ignorando los efectos de giro de planta

$F_i$  = fuerza estática equivalente para el nivel "i"

$g$  = aceleración de la gravedad

Los períodos  $T$  que se utilizaran con el método estático equivalente, en cada dirección de análisis serán:

- Directamente los periodos empíricos  $T_a$
- Periodos analíticos  $T_F$  menores a  $1,4 T_a$

Las ordenadas espectrales,  $S_a(T)$ , para cualquier período de vibración  $T$ , se definen con:

$$S_a(T) = S_{cd} \quad \text{si } T \leq T_s$$

$$S_a(T) = S_{1d} \quad \text{si } T > T_s$$

De modo que el coeficiente sísmico,  $C_s$ , en cada dirección de análisis, se establecerá de la siguiente forma:

$$C_s = \frac{S_a(T)}{R}$$

Donde:

$$C_s \geq 0,044 S_{cd}$$

$$C_s \geq 0,044 S_{1d} / R$$

$R$  es el factor genérico de reducción de la respuesta sísmica, que representa la cantidad de energía que puede disipar la estructura después de pasar la zona elástica, para estructuras de marcos dúctiles de concreto reforzado, el valor es de 8, para conocer los demás valores se puede consultar la tabla 1.1 de NSE 3-10.

El total de las fuerzas sísmicas equivalentes que actúan sobre la edificación, en cada dirección de análisis, se representará por medio del cortante basal estático a cadencia,  $V_B$ , descrito por:

$$V_B = C_s W_s$$

Donde  $W_s$  es el peso sísmico efectivo que debe incluir como mínimo la carga muerta total de la edificación y el 25 por ciento de la carga viva que no califica como reducible.

El corte basal de cadencia, se distribuirá a lo alto del edificio de acuerdo con:

$$F_x = C_{vx} V_B$$

Donde:

$$C_{vx} = \frac{W_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n (W_i h_i^k)}$$

$F_x$  es el corte de cadencia en el nivel "x" de la edificación

$h_x$  es la altura del nivel "x" sobre la base

$k = 1$  para  $T \leq 0,5s$

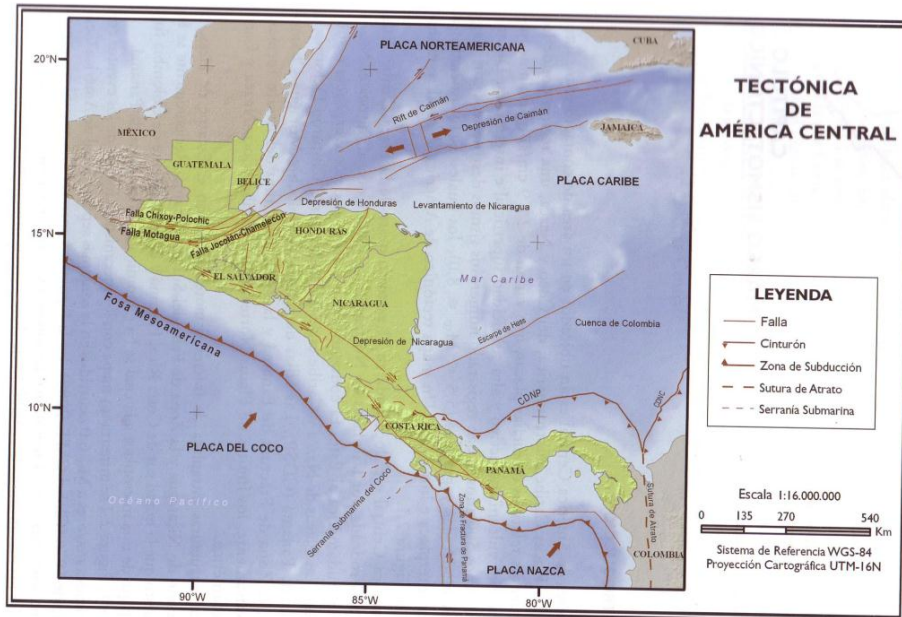
$k = 0,75 + 0,5 T$  para  $0,5 < T \leq 2,5 s$

$k = 2$  para  $T > 2,5s$

### 1.3. Marco sísmico para Guatemala

El marco tectónico regional centroamericano, está dominado por la interacción de 3 placas: Norteamérica, Caribe y Cocos, como se muestra en la figura 16. Sus movimientos relativos y tipo de corteza definen 2 clases de límites entre las placas: de transcurrencia entre las placas de Norteamérica-Caribe y de subducción o convergencia entre Cocos-Caribe.

Figura 16. **Mapa de tectónico de Centroamérica**



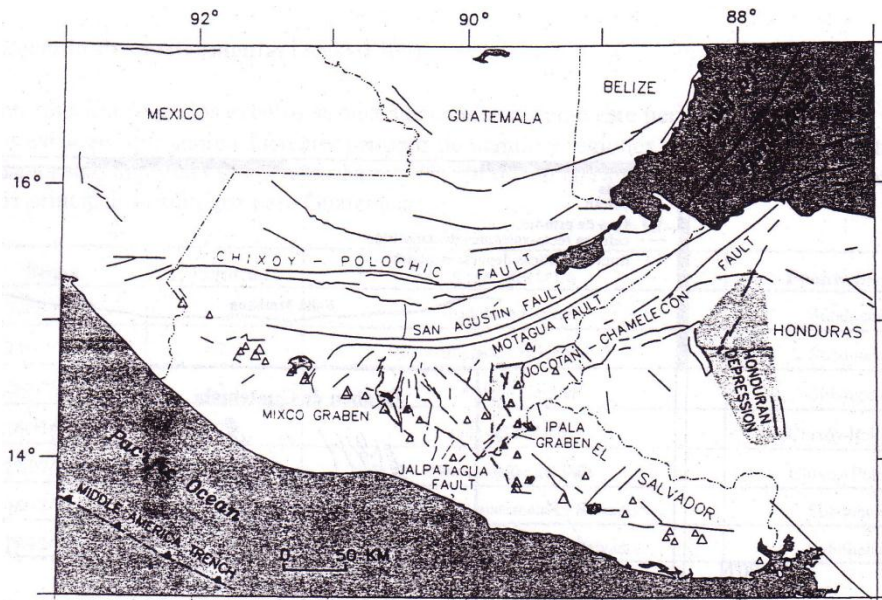
Fuente: Enrique Molina. Amenaza sísmica en el valle de la ciudad de Guatemala. p. 7.

Las velocidades relativas de las placas de Norteamérica y la de Cocos con respecto a la del Caribe, son de 3 y 7 centímetros por año respectivamente. Las principales manifestaciones de estos tipos de contacto entre placas, son en el primer caso los sistemas de grandes fallas de rumbo lateral izquierdo de Chixoy-Polochic, Motagua y Jocotán-Chamelecon, y en el segundo caso, la gran actividad volcánica cercana al borde sur de la placa del Caribe, así como la Fosa Mesoamericana.

Otra característica es, el arco volcánico que se encuentra dentro de un sistema de fallas superficiales y paralelas a la fosa mesoamericana, conocido como graben o depresión de Nicaragua, cuyo rasgo en superficie va desde el sur-este de Guatemala hasta Costa Rica. Este graben no es continuo, sino más

bien está formado por secciones ligeramente corridas en latitud y limitadas por fallas transversales, ver figura 17

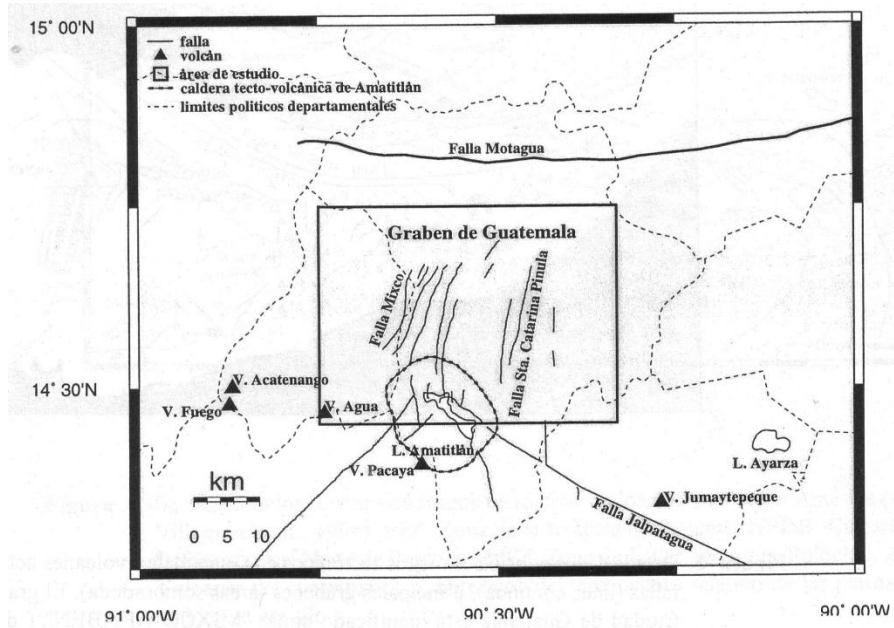
Figura 17. Sistema tectónico Guatemala



Fuente: Enrique Molina. Amenaza sísmica en el valle de la ciudad de Guatemala. p. 8.

Por último, en la zona más occidental de la Placa del Caribe, entre el arco volcánico y el límite entre las Placas de Norteamérica y el Caribe, existe una serie de grábenes con rumbos casi norte-sur, los cuales han sido interpretados como producto de un campo de esfuerzos tensionales con ejes aproximadamente este-oeste. La ciudad de Guatemala está asentada precisamente en uno de estos grábenes, ver figura 18.

Figura 18. Graben de la ciudad de Guatemala



Fuente: Enrique Molina. Amenaza sísmica en el valle de la Ciudad de Guatemala. p. 9.





## **2. COMPONENTE VERTICAL DEL SISMO**

### **2.1. Componente vertical**

La componente vertical del movimiento de los sismos, generalmente ha sido ignorada en ingeniería estructural. Esto está gradualmente cambiando debido al incremento en registros cercanos a la falla obtenidos recientemente, junto con las observaciones de campo que confirman los posibles efectos destructivos de vibraciones verticales.

La aparición de la componente vertical de movimiento del suelo, se asocia principalmente con el inicio de la propagación vertical compresiva de las ondas P, mientras secundariamente las ondas S de corte, son la causa principal de las componentes horizontales del sismo. La longitud de las ondas P, es más corta que la de las ondas S, lo que significa que el movimiento vertical es asociado con frecuencias más grandes que su contraparte horizontal.

Cerca del origen de un sismo, el movimiento del suelo es caracterizado principalmente por parámetros de origen y la dinámica de la ruptura. El espectro de las ondas P tiene un pico más grande que las ondas S. Las frecuencias pico P y S, cambian gradualmente a frecuencias más bajas cuando las ondas se propagan de la fuente, debido a la fuerte atenuación diferencial de las frecuencias altas. En consecuencia, las amplitudes de movimiento vertical se atenúan a un ritmo más rápido. El comportamiento de estas 2 componentes del movimiento del suelo, se caracteriza por la relación vertical sobre horizontal,  $V/H$ , de las aceleraciones máximas del suelo.

Normalmente, la componente vertical del movimiento del suelo contiene menos energía que la componente horizontal en toda la gama de frecuencias de interés. Sin embargo, tiende a tener toda su energía concentrada en un estrecho rango de altas frecuencias, que puede resultar perjudicial para las estructuras con períodos verticales dentro de este rango. Se ha observado que relaciones V/H con frecuencia son mayores que 1,0 cerca de la fuente de un terremoto. La tabla IV, proporciona ejemplos de terremoto con un alto componente vertical: se puede observar que los coeficientes de V/H pueden ser mayores a 2,0.

Tabla IV. **Sismos con componentes verticales grandes**

Sismo	País	Fecha	PGA H	PGA V	Relación V/H
<b>Gzli</b>	ex-URSS	17/5/1976	0,622	1,353	2,17
<b>Coyote Lake</b>	E.E.U.U.	6/8/1979	0,256	0,420	1,64
<b>Loma Prieta</b>	E.E.U.U.	17/10/1989	0,424	0,514	1,21
<b>Managua</b>	Nicaragua	23/12/1972	0,340	0,38	1,12

Fuente: Adaptado de A.S. Elnashai y L.D. Sarno. *Fundamentals of earthquake engineering*. p. 152.

El sismo de 1994 de Northridge en California, produjo relaciones V/H mayores a 1,7 y el sismo de 1995 de Hyoyo-ken Nanbu, desarrollo relaciones V/H pico superiores a 2,0. Características de algunos registros que poseen una fuerte medida de la componente vertical durante los sismos de Northridge y Kobe están dadas en las tablas V y VI respectivamente. Los registros están ordenados en función de las distancias epicentrales de cada estación

Por otra parte, hay gran evidencia de que la componente vertical, asumiendo que se debe a las ondas P, no está muy influenciada por los efectos no lineales del sitio, como las ondas horizontales S, lo que daría una explicación razonable para la siguiente observación. Durante el sismo de 1995 Hyogo-ken

Nambu (Kobe, Japón), la licuefacción en Port Island causo una abrupta reducción en las sacudidas del suelo horizontales, pero el movimiento vertical continuo amplificándose a través de la capa licuada. La relación V/H de aceleración pico fue de 1,63 como se observa en la tabla VI.

Tabla V. **Registros del sismo de Northridge con grandes componentes verticales**

Estación	Distancia (km)	PGA H	PGA V	Relación V/H
Tarzana, Cedar Hill Nursery	5	1.82	1.18	0.65
Arleta, Nordhoff Avenue Fire	10	0.35	0.59	1.69
Sylmar, County Hospital	16	0.91	0.60	0.66
Newhall, LA County Fire Station	20	0.63	0.62	0.98

Fuente: Adaptado de A.S. Elnashai y L.D. Sarno. *Fundamentals of earthquake engineering*. p. 153.

Tabla VI. **Registros del sismo de Kobe con grandes componentes verticales**

Estación	Distancia (km)	PGA H	PGA V	Relación V/H
Estación JMA	18	0.84	0,34	0,41
Port Island Array	20	0,35	0,57	1,63
Universidad de Kobe	25	0,31	0,43	1,39

Fuente: Adaptado de A.S. Elnashai y L.D. Sarno. *Fundamentals of earthquake engineering*. p. 153.

La propagación vertical de las ondas de dilatación, es amplificada de manera idéntica a la de propagación de ondas de corte vertical. En consecuencia, la componente vertical del movimiento puede ser linealmente amplificada de roca a la superficie hasta niveles muy altos, lo que lleva a observaciones de relaciones altas V/H cerca de la fuente.

## 2.2. Estudios sobre la componente vertical

Muchas de las investigaciones realizadas acerca de este tema, se han enfocado en obtener relaciones de intensidades sísmicas (aceleración, desplazamiento, velocidad máximos de terreno y/o espectrales) entre la componente vertical y la horizontal, ya sea tomando en cuenta o ignorando su relación con otras variables como la magnitud, distancia epicentral, la frecuencia o períodos, entre otras. En general se intenta predecir la intensidad vertical a través de la correspondiente intensidad horizontal.

Tabla VII. **Cociente de aceleración vertical a horizontal propuestas**

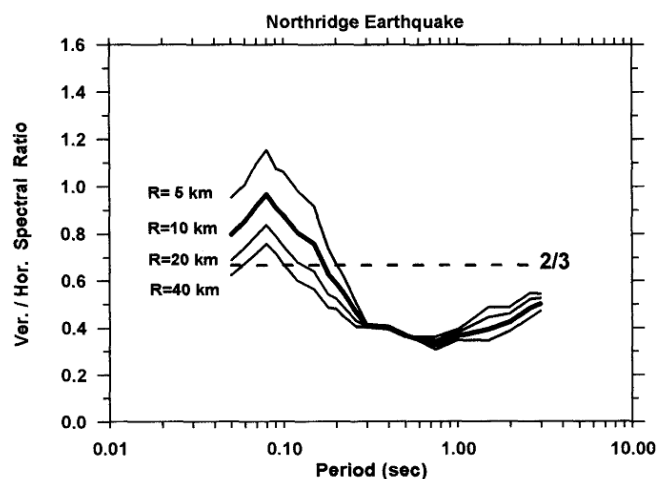
Referencia	Características de los registros	V/H
Newmark	33 registros de EE. UU.	2/3
Kawashima	Registros del Japón	1/5
Ambrasays y Simpson	104 registros mundiales, $R < 15\text{km}$ , $M > 6$ , $A_v > 0,1g$	1,75
Mahammadioun	Suelos aluviales cercanos a la falla	0,75
Boomer y Martinez	130 registros $A_v > 0,2g$	1

Fuente: Adaptado de Perea y Esteva. Componente vertical de registros sísmicos en México y su efecto en la respuesta sísmica no lineal en edificios. p. 7.

Nathan Newmark realizó uno de los primeros estudios sobre la componente vertical de movimientos fuertes del terreno. En dicho trabajo se obtienen cocientes de las aceleraciones máximas del terreno entre la componente vertical y la horizontal de 33 registros de Estados Unidos. El estudio señala que, en promedio, la aceleración vertical es del orden de 2/3 del horizontal. Dicho cociente ha sido adoptado en muchos códigos de diseño sismoresistentes, ante la ausencia de otra información. Otros autores, aunque con una diferente base de registros, han propuesto valores de dicho cociente aplicable a otros sitios. En la tabla VII, se muestran algunos valores de cociente V/H propuestos por algunos autores.

Algunos estudios han destacado que el cociente de aceleraciones máximas del terreno horizontal y vertical, es altamente dependiente de la distancia epicentral y del período de oscilación de la estructura. Por ejemplo Borzorginia, Niazi y Campbell examinan las características del espectro de respuesta de la componente vertical a campo abierto para el terremoto de Northridge en 1994, analizando la dependencia de la componente vertical y horizontal, respecto de la distancia sitio fuente. En este trabajo se señala que para todos los terremotos, la relación componente vertical/componente horizontal (V/H) es una función entre el período y la distancia epicentral como se muestra en la figura 18.

Figura 19. **Coefficientes espectrales V/H**



Fuente: Bozargnia Y., Niazi M. *Characteristics of free-field vertical ground motion during the Northridge earthquake*. p. 522.

Para períodos bajos y con fuente cercana al sitio, excedía ampliamente el orden de 2/3 comúnmente asumido. Pero para períodos largos se reducía a menos de 2/3. Lo anterior puede ser considerado como una condición de carácter universal.

Perea y Esteva, muestran que la magnitud del sismo y la distancia entre el epicentro y el sitio mantienen una relación similar con la magnitud espectral de ambos componentes; el horizontal y el vertical, y que son los efectos del sitio los que principalmente controlan las diferencias en las amplitudes espectrales en dichas direcciones. Lo anterior obedece a que ambos componentes, el horizontal y el vertical, comparten las mismas características de la fuente y los efectos del trayecto

### **2.3. Consecuencias de la aceleración vertical de alta**

Daños consistentes con un alto nivel de aceleración vertical se observó en el terremoto de Northridge en 1994. Bozargnia Y., Niazi M. presentan en su informe casos en los que se desarrollaron fallas frágiles inducidas por compresión directa y por la reducción de la resistencia al corte y la ductilidad debido a la variación en las fuerzas axiales que surgen a partir del movimiento vertical.

Para una respuesta de modo vertical, en primer lugar, la reducción de la fuerza axial en las columnas o paredes, es más significativa para los pisos, ya que representa un cambio mayor en relación a la carga axial estática pre existente. Las columnas interiores se muestran más vulnerables, y las oscilaciones verticales de las losas en su período natural, causando un daño considerable. El acero mostró evidencia de fatiga de bajo ciclo, que habría sido aportado por las vibraciones verticales.

Durante el terremoto de Hyogo-ken Nanbu de 1995, algunos edificios mostraron una amplificación de la aceleración vertical de más de 2 veces. Esto se puede atribuir a la baja amortiguación en la dirección vertical, debido a la ausencia de un mecanismo eficiente que disipe la energía. Una respuesta

cuasi-resonante fue observada porque los edificios son muy rígidos en la dirección vertical, lo que corresponde a los pulsos de alta frecuencia de movimiento vertical, junto con la baja amortiguación.

#### 2.4. Componente vertical de sismo y códigos

Los códigos de construcción representan la componente vertical de los sismos como un incremento de carga muerta, o como una fracción de las aceleraciones de diseño horizontal, en la tabla VIII se muestra un resumen de las consideraciones de códigos de diseño estructural de la región.

Tabla VIII. **Componente vertical en códigos de diseño estructural**

Código	Año de publicación	País	Caso Estático	Caso Dinámico
AGIES NSE2-10	2010	Guatemala	$\pm 0.15$ Scd M	0.15 Scd
ASCE 7-10	2010	E.E. U.U.	$\pm 0.20$ Sds M	0.2 Sds
UBC 97	1997	E.E. U.U.	$\pm 0.50$ Ca I M	De acuerdo respuesta dinámica pero no $< 0.50$ Ca I M
IBC 2003	2003	E.E. U.U.	$\pm 0.20$ Sds M	0.2 Sds
CHOC-99	1999	Honduras	0.50 Z Wp	2/3 Aceleración Horizontal.
RNC-07	2007	Nicaragua	No Considera	No Considera
CSCR -2002	2002	Costa Rica	No Considera	No Considera
REP-04	2004	Panamá	$\pm 0.50$ Ca M	No Considera
RCDF	2004	México	No Considera	No Considera
EUROCODIGO 8	1998	Europa	Posee una zonificación en la cual se muestra aceleraciones verticales con las cuales se puede construir un espectro de diseño elástico	

Fuente: elaboración propia.

Algunos países de Centroamérica no consideran la componente vertical del sismo en sus códigos de diseño, Costa Rica y Nicaragua, según Perea y

Esteva, la componente vertical del sismo si es considerada por el reglamento de construcción de la ciudad de México como:

$$F_v = \pm 2 (C_M + C_V) / 3$$

Aunque al realizar la consulta en el reglamento edición 2004, no se encontró ninguna mención de la misma. En la tabla VIII se observa que el código de construcción europeo, eurocódigo, es el que presenta mayor detalle en cuanto a la representación de la carga sísmica vertical, aunque las aceleraciones pico horizontales, 0,10 veces la gravedad, son menores a las que se pueden desarrollar en Guatemala, 0,4 veces la gravedad para la ciudad de Guatemala.



### 3. CASO DE ESTUDIO

#### 3.1. Análisis estático equivalente

Se presenta el análisis de un edificio de 3 niveles, mediante un análisis estático equivalente, para conocer la influencia de la componente vertical del sismo, tomando como referencia la Norma de Seguridad Estructural propuesto por AGIES.

##### 3.1.1. Modelo estructural

Se plantea un modelo de 3 losas con una altura de 3,5 metros por nivel, consistente de marcos estructurales y losas macizas de concreto reforzado.

La sección de los elementos estructurales se muestra en la tabla IX

Tabla IX. **Secciones usadas en modelo de estudio**

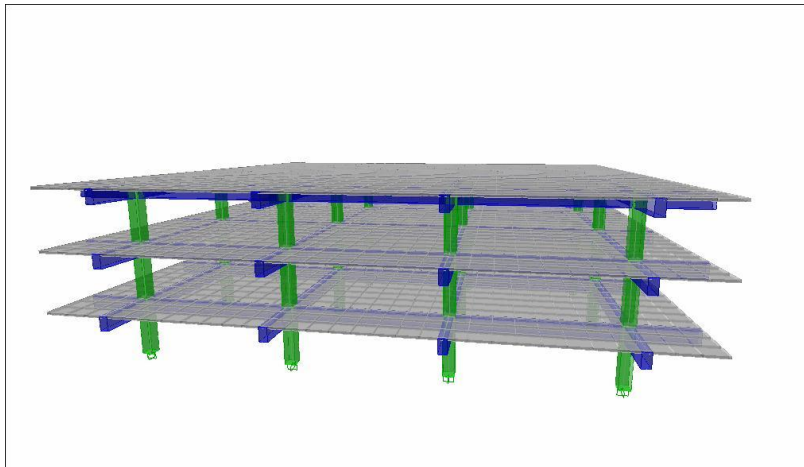
Elemento	Sección
Vigas	0,40 x 0,70 m
Columnas	0,55 x 0,55 m
Losas	0,12 m de espesor

Fuente: elaboración propia.

Todos los elementos estructurales son de concreto reforzado, con una resistencia a la compresión a los 28 días de 280 kilogramos por centímetro cuadrado (4 000 psi).

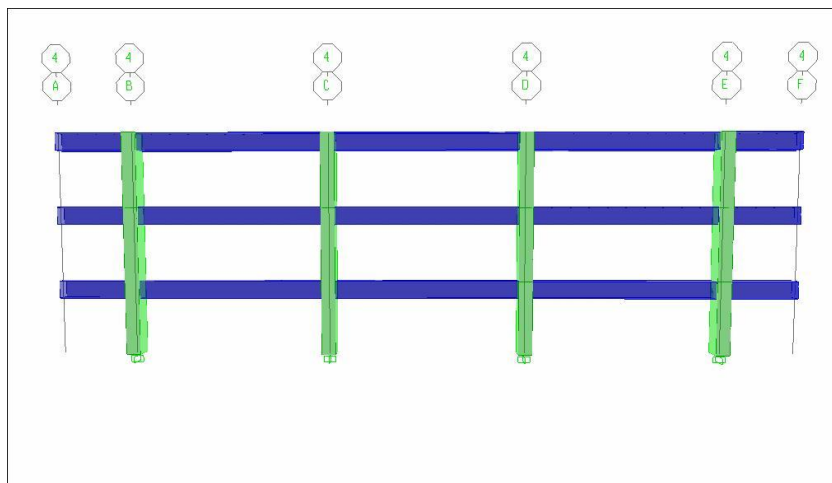
En las figuras 20 y 21, se muestra una vista en 3D y una elevación típica del modelo analizado.

Figura 20. **Vista 3D del modelo de análisis**



Fuente: elaboración propia, con programa Etabs 9.7.4.

Figura 21. **Elevación típica del modelo**



Fuente: elaboración propia, con programa Etabs 9.7.4.

### 3.1.2. Parámetros de análisis

En esta sección se describen los parámetros usados para el análisis de modelo descrito anteriormente; cargas y combinaciones usadas de acuerdo al código local.

#### 3.1.2.1. Cargas

Se propone analizar el modelo, suponiendo que se usará como oficinas, por lo cual se usará una carga viva recomendada por AGIES de 250 kilogramos por metro cuadrado, una sobre carga de 175 kilogramos por metro cuadrado que incluye peso de piso y divisiones livianas.

La carga lateral se calculará por medio del método estático equivalente de AGIES, todos los coeficientes que se usaran a continuación, fueron obtenidos de la Norma de Seguridad Estructural 2 edición 2010.

Asumiendo que se construirá en la ciudad de Guatemala los parámetros  $S_{cr}$  y  $S_{1r}$  son 0,55 y 1,5 respectivamente. Para un perfil de suelo D, suelo firme y rígido bastante común en la ciudad, los factores  $F_a$  y  $F_v$  son 1 y 1,5 respectivamente, y como no existe información de una falla cercana y activa que pueda generar sismos de gran intensidad  $N_a$  y  $N_v$  son 1. Por lo tanto los valores para  $S_{cs}$  y  $S_{1s}$  son:

$$S_{cs} = S_{cr} \times F_a \times N_a$$
$$S_{cs} = 1,5 \times 1 \times 1 = 1,5$$

$$S_{1s} = S_{1r} \times F_v \times N_v$$
$$S_{1s} = 0,55 \times 1,5 \times 1 = 0,825$$

Como se mencionó en el capítulo 1, los valores de  $S_{cs}$  y  $S_{1s}$  deben calibrarse dependiendo del tipo de sismo usado para el diseño, en este caso se usará un sismo ordinario, cuyas aceleraciones poseen una probabilidad del 10 por ciento de ser excedidas en 50 años, de manera que el factor de escala  $K_d$  será  $2/3$  de modo que los factores para construir el sismo de diseño serán:

$$S_{cd} = S_{cs} \times K_d$$

$$S_{cd} = 1,5 \times 2/3 = 1$$

$$S_{1d} = S_{1s} \times K_d$$

$$S_{1d} = 0,825 \times 2/3 = 0,55$$

Entonces el período de transición,  $T_s$ , será

$$T_s = S_{1d} / S_{cd}$$

$$T_s = 0,55 / 1 = 0,55 \text{ s}$$

El periodo aproximado de la estructura  $T_a$  es:

$$T_a = 0,047 (9)^{0,9} = 0,3368 \text{ s} < 0,55 \text{ entonces } S_a(T) = 1$$

El corte de cadencia,  $V_B$ , para este modelo modificado por el factor de respuesta sísmica  $R$  es:

$$V_B = S_a(T) / R$$

$$V_B = 1 / 8 = 0,125$$

La distribución del cortante en los niveles, se muestra en la tabla X tomando una masa sísmica 1 854,51 toneladas, resultado de tomar el peso de

la estructura, el peso de los elementos superpuestos, pisos, tabiques y acabados, y 25 por ciento de las cargas de ocupación, NSE 3-10 sección 1.10.3.

Tabla X. **Distribución de cortante**

<b>Nivel</b>	<b>Corte [Ton]</b>
Nivel 3	104,41
Nivel 2	84,93
Nivel 1	42,47
Total	231,81

Fuente: elaboración propia.

Para la carga vertical del sismo, se tomó 2 opciones; la primera conforme a las normas de AGIES, considerando un incremento del 15 por ciento de carga muerta y otra prueba considerando un 30 por ciento de incremento de carga muerta.

Las combinaciones de carga usadas en el análisis, son las recomendadas por AGIES en la NSE 2-10 capítulo 4:

- 1,4 M
- 1,3M + 1,6V + 0,5 Vt
- 1,3M + V + 1,6 Vt
- 1,2M + V + S
- 0,9M + S

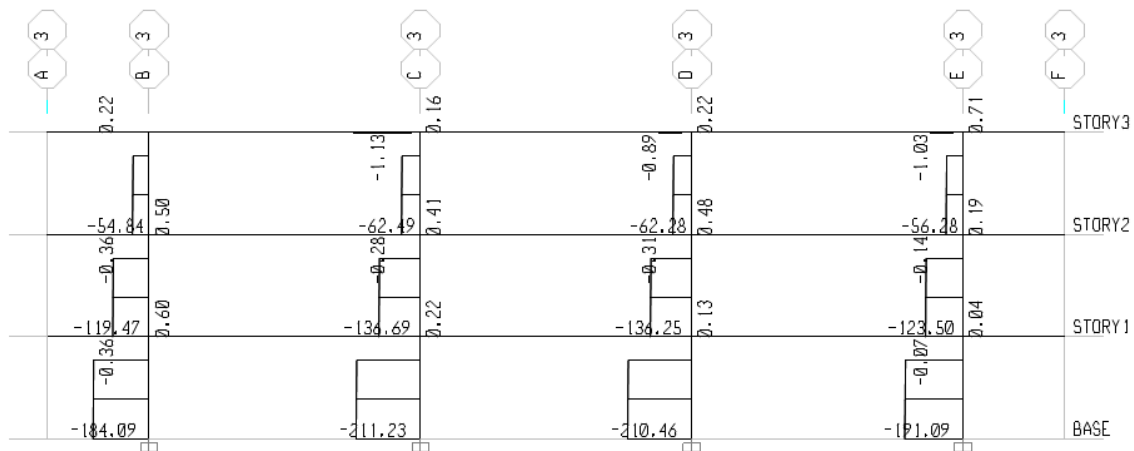
### 3.1.3. Resultados de análisis

Después de haber realizado el análisis, se presentan los resultados y una comparación entre los mismos, que se usarán para emitir un comentario acerca de los efectos de incluir o no la carga vertical provocada por los sismos.

#### 3.1.3.1. Carga axial

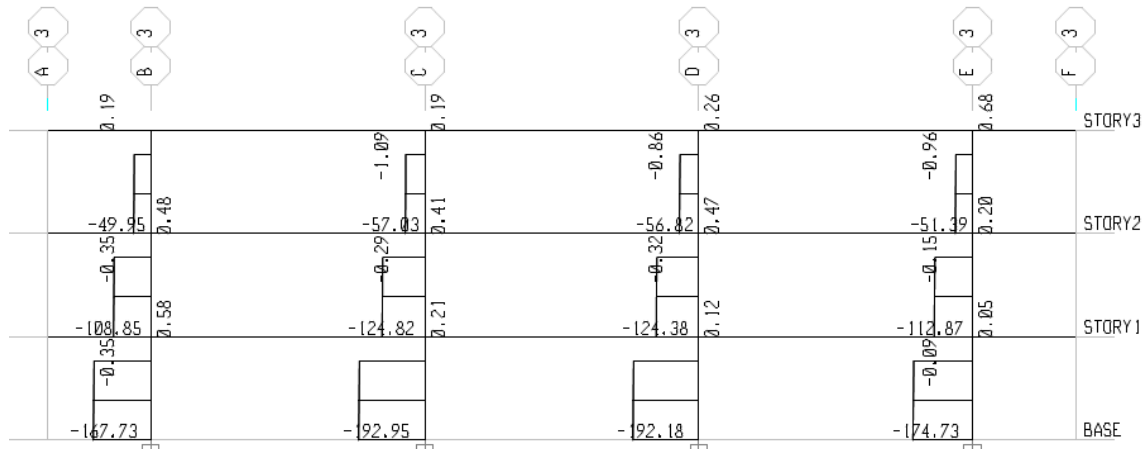
Las diferencias de carga axial, considerando el incremento de carga muerta en las combinaciones de carga usadas en el análisis, alcanzaron un valor máximo de 11 y 38,5 por ciento, usando 15 y 30 por ciento respectivamente, respecto a los valores sin el incremento de carga.

Figura 22. Diagrama de carga axial incluyendo incremento de carga muerta



Fuente: elaboración propia, con programa Etabs 9.7.4.

Figura 23. **Diagrama de carga axial sin incluir incremento de carga muerta**



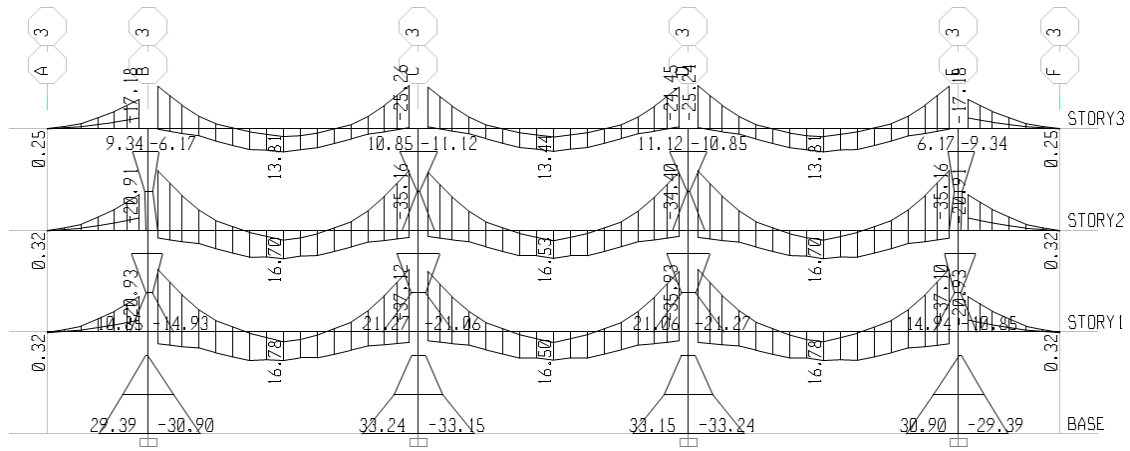
Fuente: elaboración propia, con programa Etabs 9.7.4.

### 3.1.3.2. Momento de flexión

En columnas, el momento de flexión varía 1 y 6,35 por ciento al añadir 15 y 30 por ciento respectivamente de incremento de la carga muerta como efecto de la componente vertical, lo que no representa un cambio significativo en el cálculo del refuerzo necesario.

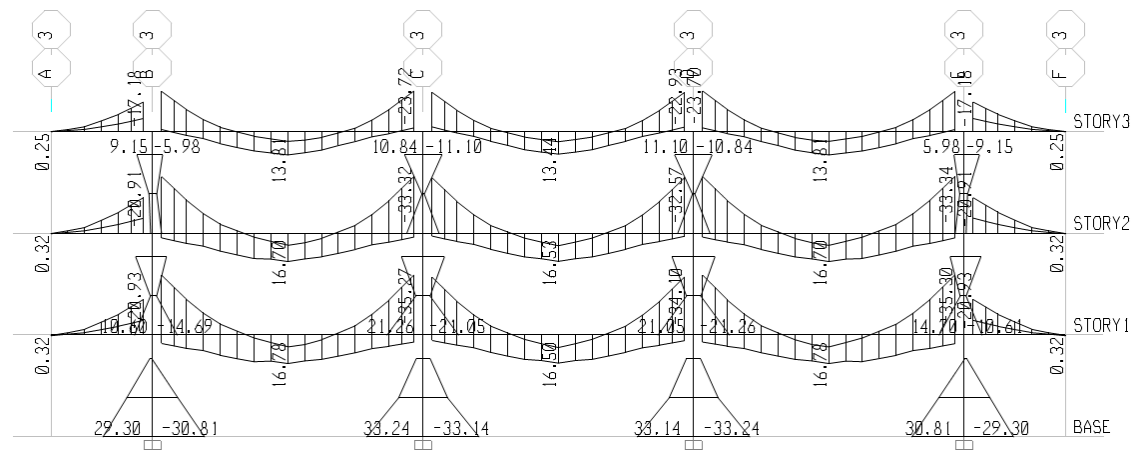
En vigas, los momentos no varían de forma significativa con el incremento de 15 por ciento, mientras que al tomar 30 por ciento, la variación de momentos es del 10 por ciento, los puntos de inflexión se desplazan en promedio 10 y 18 centímetros, que en relación con la longitud de la viga equivale 1,25 y 2,26 por ciento de la longitud.

**Figura 24. Envoltente de momento de flexión incluyendo incremento de carga muerta**



Fuente: elaboración propia, con programa Etabs 9.7.4.

**Figura 25. Envoltente de momento de flexión sin incluir incremento de carga muerta**



Fuente: elaboración propia, con programa Etabs 9.7.4.



### 3.1.3.3. Derivas

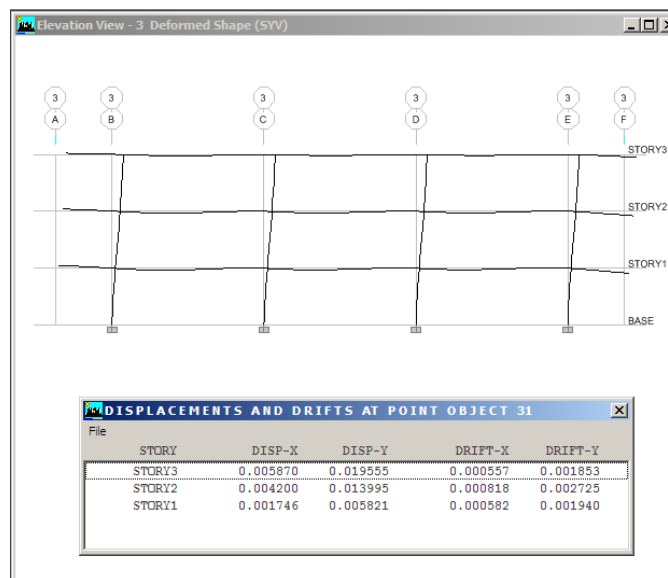
Las derivas unitarias no cambian, independientemente si se incrementa 15 o 30 por ciento la carga muerta para considerar los efectos de la componente vertical sísmica.

Tabla XI. Derivas laterales

Nivel	Dirección X		Dirección Y	
	Sismo + V	Sismo	Sismo + V	Sismo
3	0,001856	0,001856	0,001856	0,001856
2	0,002727	0,002727	0,002727	0,002727
1	0,001941	0,001941	0,001941	0,001941

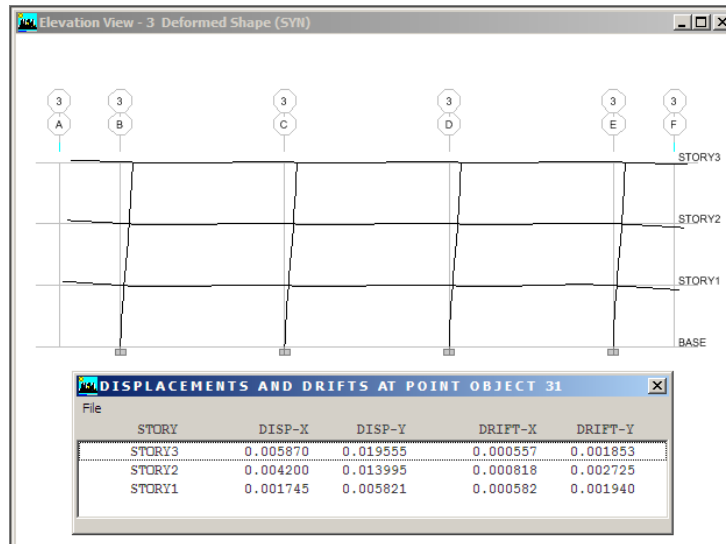
Fuente: elaboración propia.

Figura 26. Derivas laterales considerando incremento de carga muerta



Fuente: elaboración propia, con programa Etabs 9.7.4.

Figura 27. Derivas laterales sin considera incremento de carga muerta



Fuente: elaboración propia, con programa Etabs 9.7.4.

Tabla XII. Resumen de análisis

Parámetro	Elemento	Diferencia	
		15% CM	30% CM
Carga axial	Vigas	No considerado	No considerado
	Columnas	± 11%	± 38%
Momento de flexión	Vigas	± 2%	± 10%
	Columnas	± 1%	± 6.35%
Puntos de inflexión	Vigas	±1.25%	±2.26%
	Columnas	No considerado	No considerado
Derivas laterales	Modelo	No cambia	No cambia

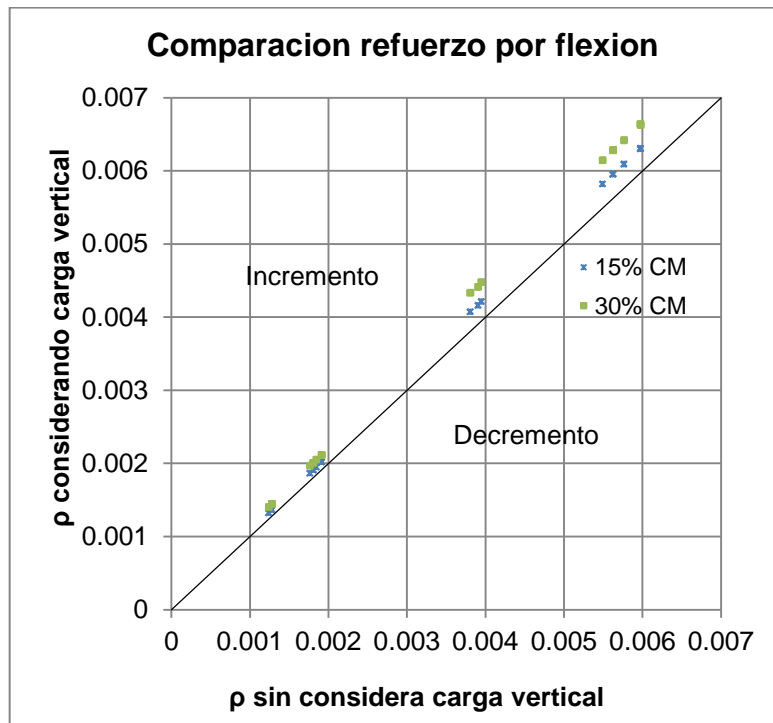
Fuente: elaboración propia.

### 3.1.4. Cálculo del refuerzo

El cálculo del acero de refuerzo, fue calculado por el software ETABS v9.7.4. La figura 28 muestra en eje de las ordenadas las cuantías de refuerzo

obtenidas usando para el cálculo combinaciones que incluyen el incremento de carga muerta y en las abscisas se muestran cuantías de refuerzo obtenidas usando para el cálculo combinaciones sin incremento de carga muerta.

Figura 28. **Cuantía de acero longitudinal en vigas del eje C**



Fuente: elaboración propia.

Se nota que no existe una diferencia entre las cuantías al incluir o no en las combinaciones de diseño la componente vertical del sismo, considerada como 15 por ciento de incremento de carga muerta, se calculó que el incremento máximo registrado fue de 7,72 por ciento, el incremento promedio en la cuantía de refuerzo longitudinal de vigas, fue de 3,79 por ciento. Sin embargo al tomar un incremento de 30 por ciento de carga muerta, el cambio

máximo en el refuerzo es 15,16 por ciento mientras el cambio promedio fue de 7,07 por ciento.

El refuerzo longitudinal de columnas a diferencia de las vigas, no presento cambios, todas las columnas del modelo trabajan con la cuantía de refuerzo mínimo, 1 por ciento, si se consideraba o no la carga vertical inducida por el sismo.

### **3.2. Análisis espectros de respuesta**

Se calculan los espectros de repuesta de 5 sismos y se compara la relación espectral V/H, los porcentajes de incremento de carga gravitacional que proponen los códigos de diseño estructural.

#### **3.2.1. Registros analizados**

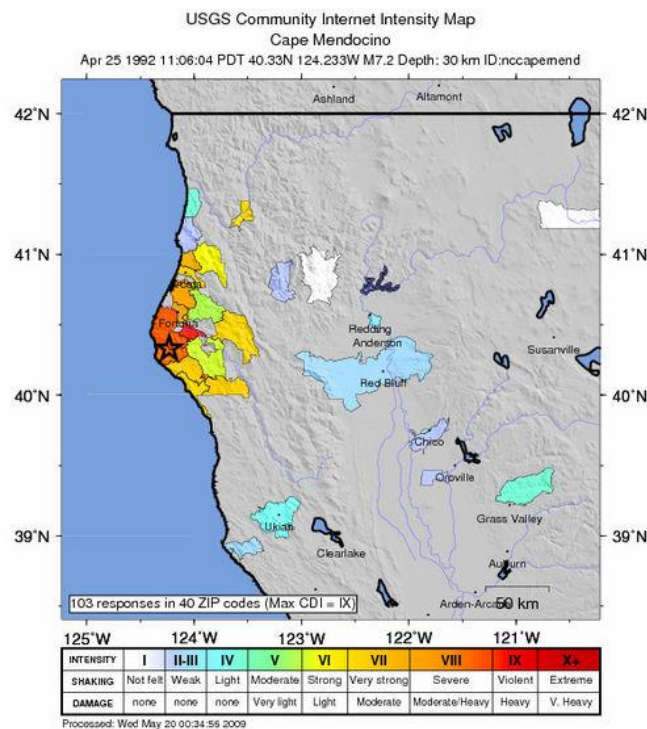
No se pudieron obtener registros de sismos ocurridos en Guatemala, por ello se analizaron registros de; Estados Unidos, El Salvador y Nicaragua, países con sismicidad similar a la del país.

##### **3.2.1.1. Cape Mendocino - California**

El 25 de abril de 1992 a las 11:06 am PDT, un fuerte terremoto sacudió el norte de California, con una magnitud de 7,2. El terremoto fue localizado a unos 50 kilómetros al sur-suroeste de Eureka. 95 personas resultaron heridas y se produjeron daños de consideración en el suroeste del condado de Humboldt. La estimación preliminar de los daños causados por este terremoto, y 2 fuertes réplicas, ascendieron a 66 millones de dólares en pérdidas.

La intensidad máxima observada, VIII, se vivió en Ferndale, Honeydew, Petrolia, Dell Río y Escocia. Los derrumbes y desprendimientos de rocas ocurrido en el área Honeydew-Petrolia. El sismo se sintió en gran parte del norte de California y por el sur hasta San Francisco y el sureste de Carson City y Reno, Nevada. También se consideró en muchas áreas del sur de Oregón.

Figura 29. **Mapa de intensidad sismo Cape Mendocino**



Fuente: USGS. [http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/states/events/1992\\_04\\_25\\_26.php](http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/states/events/1992_04_25_26.php).

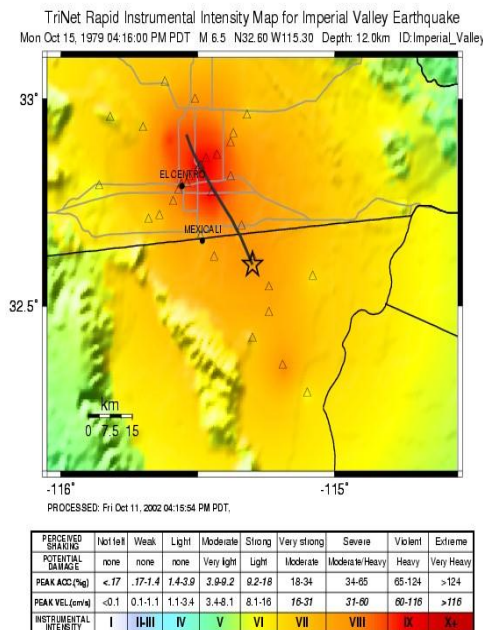
Consulta: 10 de diciembre de 2012.

### 3.2.1.2. **Imperial Valley – Frontera México California**

Este gran terremoto hirió a 91 personas y causó un estimado de 30 millones de dólares en daños a la propiedad en la zona de Imperial Valley. Se

destruyeron 2 casas y 11 edificios comerciales y dañaron 1 565 casas y 440 edificios comerciales. El daño más grave, MM intensidad IX, fue el edificio de Servicios del Condado de Imperial en El Centro, que tuvo que ser demolido. La intensidad de este terremoto en El Centro, Brawley, Calexico y Mexicali y en México, fue alrededor de MM VII, que es la máxima intensidad asignada a cualquier lugar, excepto el edificio de Servicios del Condado Imperial.

Figura 30. **Mapa de intensidad sismo Imperial Valley**



Fuente: USGS. [http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/states/events/1979\\_10\\_15.php](http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/states/events/1979_10_15.php).

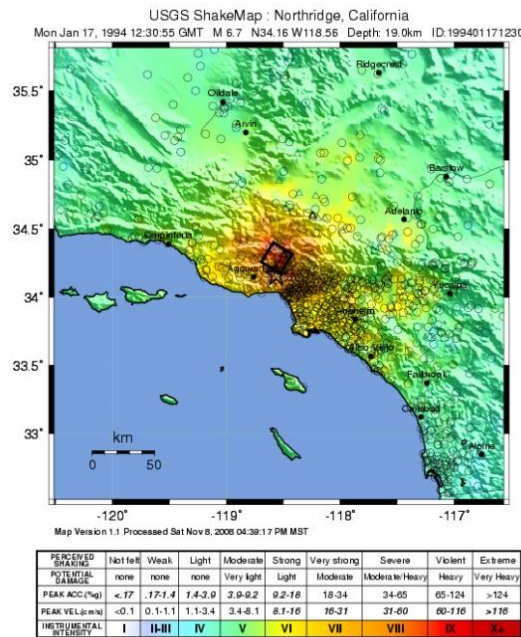
Consulta: 10 de diciembre de 2012.

### 3.2.1.3. Northridge – California

Murieron 60, más de 7 000 heridos, 20 000 personas sin hogar y más de 40 000 edificios dañados en Los Ángeles, Ventura, Orange y San Bernardino.

Daño grave en el Valle de San Fernando: las intensidades máximas de IX Mm se observaron cerca de Northridge

Figura 31. Mapa de intensidad sismo Northridge



Fuente: USGS. [http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/states/events/1994\\_01\\_17.php](http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/states/events/1994_01_17.php).

Consulta: 10 de diciembre de 2012.

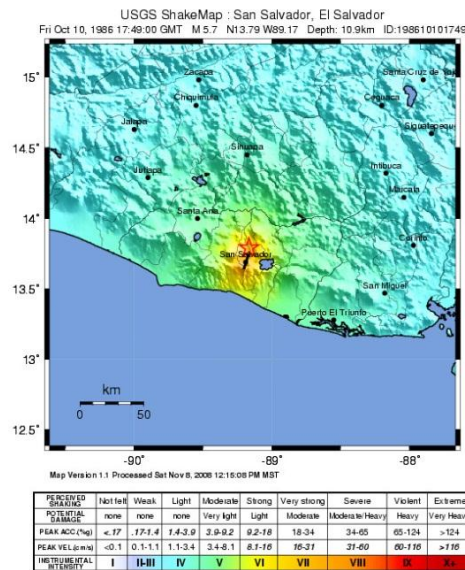
Las estimaciones preliminares de daños son entre 13 y 20 millones de dólares. Se sintió en gran parte del sur de California y tan lejos como Turlock, California, Las Vegas, Nevada; Richfield, Utah y Ensenada, México. La aceleración máxima registrada supera la aceleración de la gravedad en varios sitios en el área con el mayor valor de 1,8 veces la gravedad, registradas en Tarzana, a unos 7 kilómetros al sur del epicentro. Una elevación máxima de unos 15 centímetros se produjo en las montañas de Santa Susana y desprendimiento de rocas ocurrido en muchas zonas de montaña, bloqueando

algunas carreteras. Algunas grietas del suelo se observaron en las colinas de Granada y en Potrero Canyon. Ocurrió licuefacción en Simi Valley y en algunas otras partes de la cuenca de Los Ángeles.

### 3.2.1.4. San Salvador – El Salvador

El terremoto de 1986 en San Salvador afectó a El Salvador el 10 de octubre, ocurriendo a las 17:49:24 UTC (11:49:24 hora local), causando daños considerables a la ciudad capital, San Salvador y sus alrededores, incluyendo Honduras y Guatemala.

Figura 32. Mapa de intensidades sismo San Salvador



Fuente: USGS. <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/shakemap/atlas/shake/198610101749/>.

Consulta: 10 de diciembre de 2012.



Entre 1 000 y 1 500 personas se cree que murieron y más de 10 000 personas resultaron heridas. 200 000 personas se quedaron sin hogar tras el terremoto y de una semana de réplicas de menor importancia.

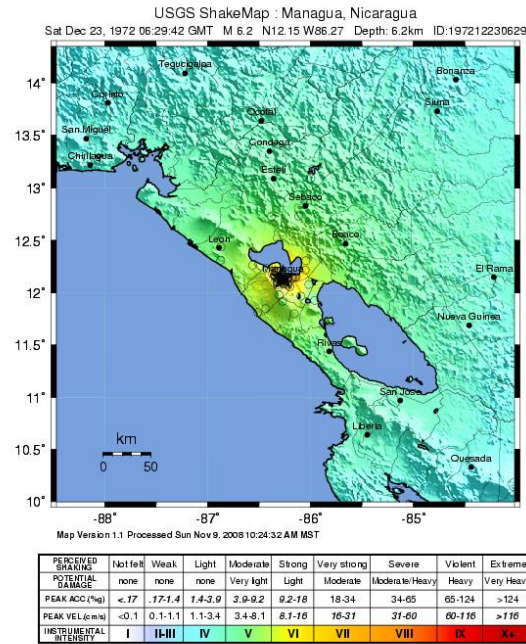
A pesar de ser un evento de magnitud moderada, el terremoto fue un evento poco profundo justo debajo de San Salvador, y esto llevó a la destrucción de muchas estructuras, incluyendo el hospital de niños de la ciudad, un mercado de varios niveles un sótano que durante el día está lleno de personas, muchos edificios de apartamentos y restaurantes.

#### **3.2.1.5. Managua – Nicaragua**

A las 12:29 am, hora local el sábado, 23 de diciembre 1972, un terremoto de magnitud 6,2 ocurrió a una profundidad de unos 5 kilómetros por debajo del centro de Managua, capital de Nicaragua. En menos de una hora después del sismo principal, 2 réplicas, una de magnitud 5,0 y el otra 5,2, ocurrieron. El sismo principal causó grandes daños y una multitud de muertos y heridos. Aproximadamente 5 000 de los 400 000 residentes de Managua murieron, mientras 20 000 resultaron heridos y unos 250 000 quedaron sin hogar.

Los efectos geológicos del terremoto, incluyen fallas superficiales, deslizamientos y hundimientos locales de tierra. Por mucho, el más importante de estos efectos fueron las fallas superficiales. Al menos 4 fallas principales se han identificado con los acontecimientos de diciembre de 1972, y todas muestran movimiento lateral izquierdo, tendencia en dirección noreste. Datos de las réplicas, indican que al menos una de las fallas se extiende desde la superficie hasta una profundidad de 8 a 10 kilómetros, y se extiende al menos 6 kilómetros al noreste de la ciudad debajo de Managua.

Figura 33. **Mapa de intensidad sismo Managua**



Fuente: USGS. <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/shakemap/atlas/shake/197212230629/>.

Consulta: 10 de diciembre de 2012.

La tabla XII resume parámetros importantes de cada uno de los sismos analizados.

Tabla XIII. **Sismos analizados**

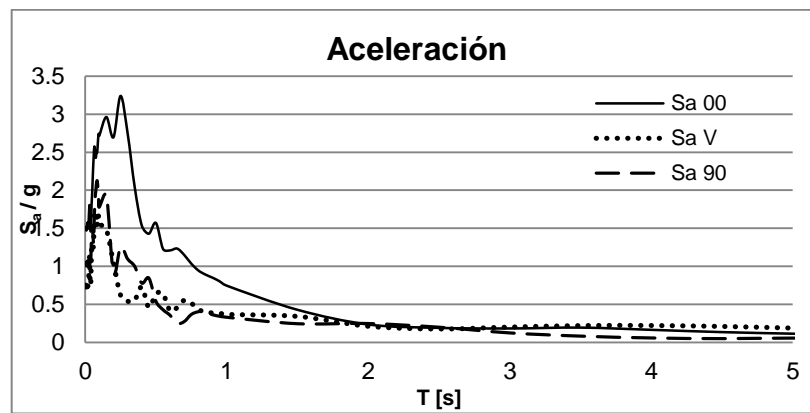
Registro	País	Magnitud	PGA <sub>x</sub>	PGA <sub>y</sub>	PGA <sub>z</sub>
Cape Mendocino	E.E.U.U.	7,2	1,50	1,04	0,75
Imperial Valley	E.E.U.U.	6,5	0,59	0,78	0,42
Northridge	E.E.U.U.	6,7	0,31	0,34	0,55
San Salvador	El Salvador	5,7	0,41	0,61	0,48
Managua	Nicaragua	6,2	0,34	0,42	0,38

Fuente: elaboración propia.

### 3.2.2. Análisis

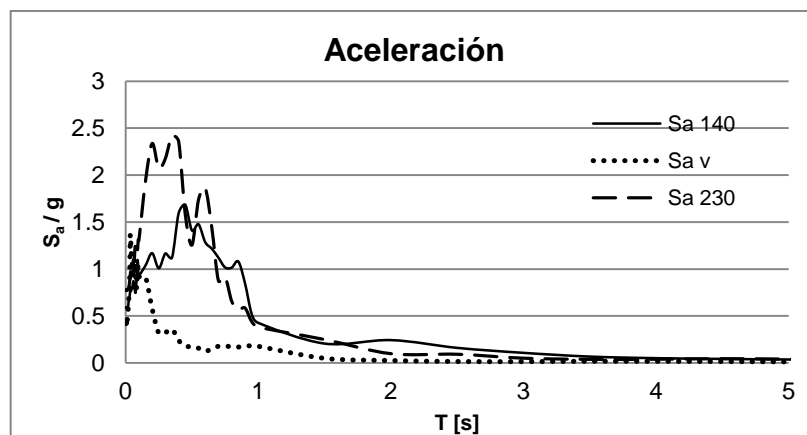
Se calcularon los espectros de respuesta de los sismos mencionados anteriormente, por medio del método descrito en el capítulo 1.

Figura 34. **Espectro de respuesta sismo Cape Mendocino**



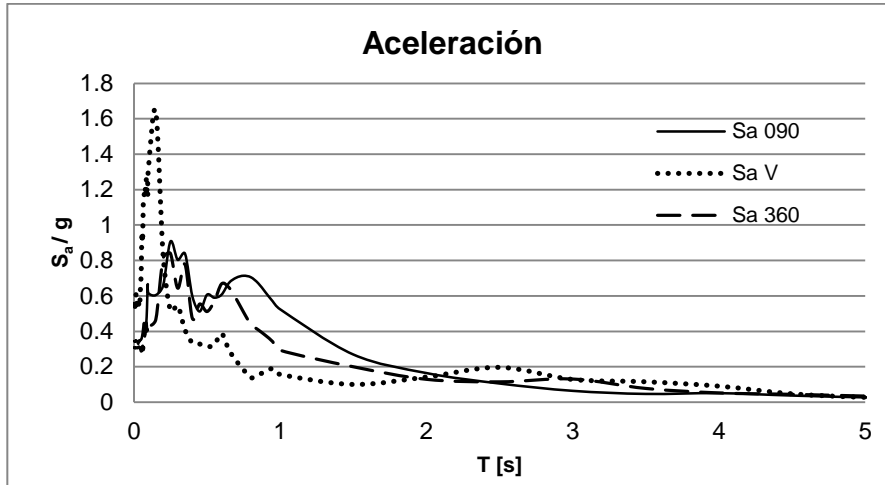
Fuente: elaboración propia.

Figura 35. **Espectro de respuesta sismo Imperial Valley**



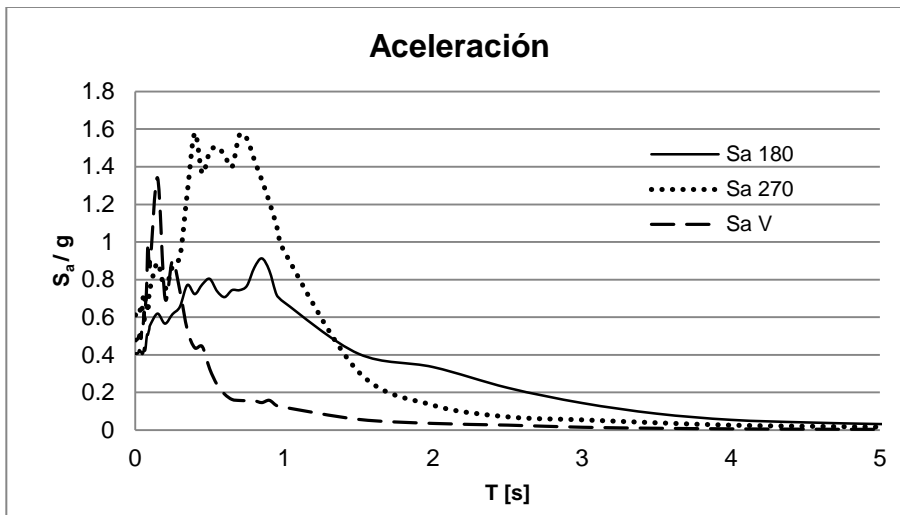
Fuente: elaboración propia.

Figura 36. **Espectro de respuesta sismo Northridge**



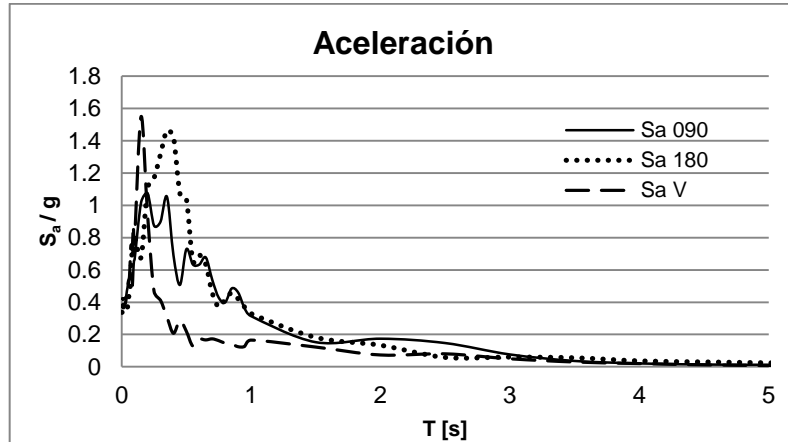
Fuente: elaboración propia.

Figura 37. **Espectro de respuesta sismo San Salvador**



Fuente: elaboración propia.

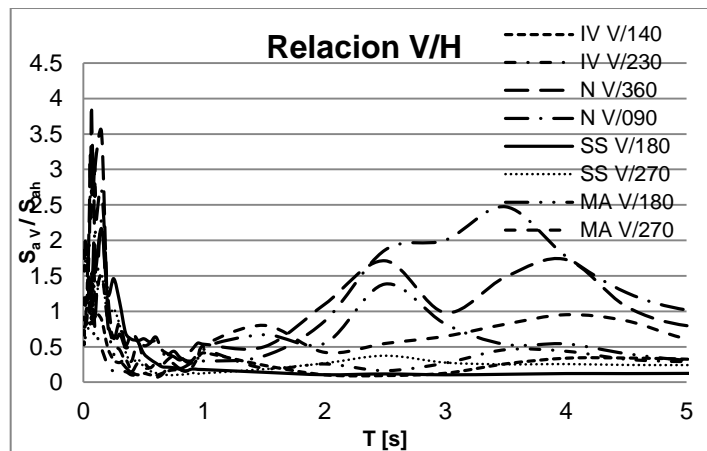
Figura 38. **Espectro de respuesta sismo Managua**



Fuente: elaboración propia.

Se calcularon los cocientes espectrales de los registros, para conocer una relación entre las aceleraciones verticales y horizontales como se muestra en la figura 39.

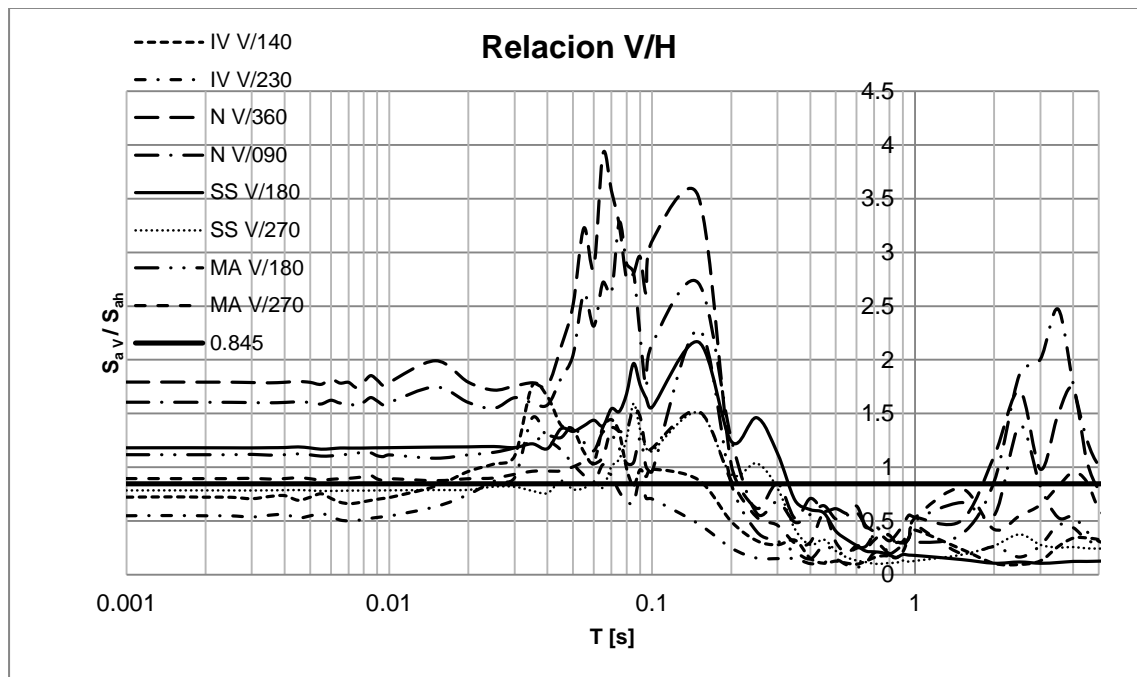
Figura 39. **Cocientes espectrales**



Fuente: elaboración propia.

Se observa que para un rango de períodos cortos, la relación V/H es muy grande, luego tienen un descenso que se mantiene para la mayoría de los registros estudiados. Los registros de Northridge, son los que presentan un aumento considerable de la relación V/H para períodos mayores a 2 segundos, seguidos por Managua

Figura 40. Promedio cocientes espectrales



Fuente: elaboración propia.

El intervalo de períodos para los cuales el cociente espectral es grande, está aproximadamente entre 0,03 a 0,3 segundos como se muestra en la figura 40, para estructuras que posean un período de vibración comprendido en este intervalo, las aceleraciones verticales generadas por el sismo son críticas

La relación V/H promedio es 0,845, según figura 40, es decir las aceleraciones verticales según los registros analizados en promedio, son de 84,5 por ciento de las aceleraciones horizontales mucho mayor al 15 y 20 por ciento sugerido AGIES y ASCE 7-10 respectivamente.





## CONCLUSIONES

1. Al considerar la carga vertical del sismo, como se describe en la normativa nacional vigente, los resultados del análisis no varían de forma significativa.
2. Las derivas del modelo estudiado, no cambiaron al considerar el 15 por ciento de incremento de carga muerta como efecto de la componente vertical del sismo.
3. La carga axial en columnas, tuvo una variación de  $\pm 10$  por ciento, esto podría inducir fallas en columnas que estén diseñadas cercanas al límite.
4. Se observó que para estructuras con períodos pequeños, las relaciones V/H pueden alcanzar valores mayores a 1, mientras que para estructuras con períodos medios, 1 y 2,5 segundos aproximadamente, los valores eran menores y para valores mayores a 2,5 segundos tenían un incremento nuevamente.
5. La componente vertical del sismo, es subestimada al representarla como un incremento de 15 por ciento de carga gravitacional, al compararla con el cociente espectral V/H medio calculado, 84,5 por ciento, este valor también pasa al coeficiente propuesto por otros estudios, 66 por ciento.



## RECOMENDACIONES

1. Realizar un estudio en el que se analicen los modelos, usando registros tiempo historia para conocer la respuesta dinámica de la estructura.
2. Realizar un estudio en el que se consideren efectos del tipo de suelo sobre la atenuación de las ondas verticales.
3. Dada el aumento de la relación V/H para sitios cercanos a la falla, evaluar la posibilidad de implementar en la norma de AGIES un factor que este en función a la cercanía a la falla que modifique el 15 por ciento de incremento de carga muerta, que representa las vibraciones verticales.



## BIBLIOGRAFÍA

1. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica. *Normas de seguridad estructural de edificios y obras de infraestructura para la República de Guatemala*. Guatemala: AGIES, 2010. 172 p.
2. BOZORGNIA, Youself, et al. "Characteristics of free-field vertical ground motion during the Northridge earthquake". *Earthquake Spectra*. Vol. 11, No. 4, p. 515 – 525.
3. CHOPRA, Anil K. *Earthquake dynamics of structures A primer*. 2a ed. Estados Unidos; Earthquake Engineering Research Institute, 2005. 129 p. ISBN 1-932884-07-6.
4. CLOUGH, Ray W. *Dynamics of structures*. 3a ed. Estados Unidos; Computers & Structures, 2003. 752 p.
5. COLLIER, C. J; ELNASHAI, A. S. "A procedure for combining vertical and horizontal seismic action effects". *Journal of Earthquake Engineering*. Vol 5; No. 4, p. 521 – 539.
6. COMPUTER AND STRUCTURES, (2005), "*Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS, and SAFE*", Berkeley, California: *Computer and structures*, Vol. 1. 433 p.
7. DATTA, Tuchar Kanti. *Seismic analysis of structures*. UK. John Wiley & Sons, 2010. 473 p. ISBN 978-0-470-82461.

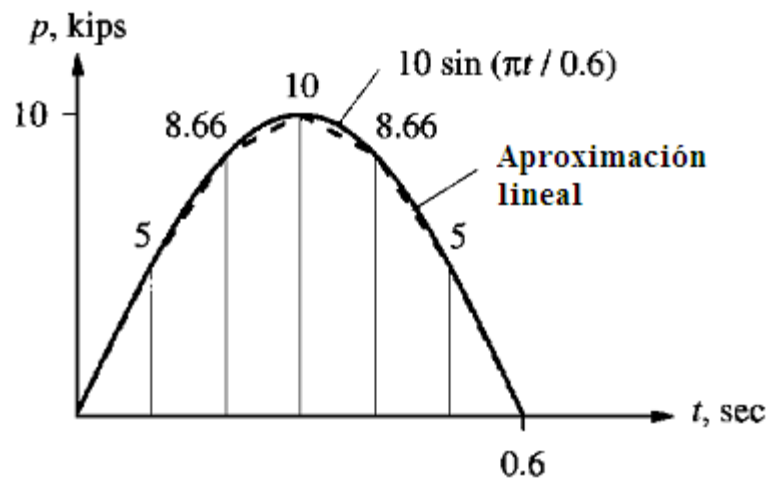
8. DI SARNO, Luigi. *Fundamental of earthquake engineering*. UK. John Wiley & Sons, 2008. 347 p. ISBN 968-0-470-02483-6.
9. MARTÍNEZ BLANCO, Claudio Patricio. Amplificación de la respuesta vertical de estructuras sísmicamente aisladas. Universidad de los Andes, Facultad de ingeniería y Ciencias aplicadas, 2011. 73 p.

## APÉNDICE

### Ejemplo de cálculo de espectro de respuesta

Se calculará el espectro de respuesta de una función senoidal usando el método por segmentos descrito en el capítulo 1.

Figura A-1 Función analizada



Fuente: Anil K. Chopra, *Dynamic of structures theory and application to earthquake engineering*, p. 160

Se usará un amortiguamiento de 5 por ciento, con un intervalo de tiempo de 0,1 segundos, los períodos fundamentales usados son 0,1, 0,2 ....0,8, 0,9, 1, 2, 3 y 4.

$T = 0,1 \text{ s}$

$w = 62,831$

$w_d = 62,753$

**Tabla A-I** Resumen método de segmentos  $T = 0,1 \text{ s}$

<b>t</b>	<b>p</b>	<b>a</b>	<b><math>\Delta t</math></b>	<b>A0</b>	<b>A1</b>	<b>A2</b>	<b>A3</b>	<b>x(t)</b>	<b>x'(t)</b>	<b>x''(t)</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,1	5	50	0,1	-2,02E-05	1,27E-02	2,02E-05	-2,01E-04	1,26E-03	3,42E-03	4,98
0,2	8,662	36,62	0,1	1,25E-03	9,28E-03	1,05E-05	-9,28E-05	2,19E-03	5,00E-03	8,64
0,3	10	13,38	0,1	2,19E-03	3,39E-03	-1,18E-06	2,56E-05	2,53E-03	4,57E-03	9,97
0,4	8,6602	-13,398	0,1	2,54E-03	-3,39E-03	-1,18E-05	1,26E-04	2,19E-03	2,42E-03	8,64
0,5	5	-36,602	0,1	2,21E-03	-9,27E-03	-1,87E-05	1,85E-04	1,27E-03	-7,37E-04	5,00
0,6	0	-50	0,1	1,29E-03	-1,27E-02	-2,01E-05	1,89E-04	4,37E-06	-3,96E-03	0,0172

Fuente: elaboración propia.

$T = 0,2 \text{ s}$

$w = 31,415$

$w_d = 31,377$

**Tabla A-II** Resumen método de segmentos  $T = 0,2 \text{ s}$

<b>t</b>	<b>p</b>	<b>a</b>	<b><math>\Delta t</math></b>	<b>A0</b>	<b>A1</b>	<b>A2</b>	<b>A3</b>	<b>x(t)</b>	<b>x'(t)</b>	<b>x''(t)</b>
0	0	0	0	-0,00016	0,05066	0,00016	-0,00161	0,00476	0,09395	4,69956
0,1	5	50	0,1	0,00495	0,03710	-0,00019	0,00180	0,00882	-0,01146	8,70849
0,2	8,662	36,62	0,1	0,00873	0,01356	0,00009	-0,00079	0,01001	0,03493	9,87868
0,3	10	13,38	0,1	0,01018	-0,01358	-0,00017	0,00154	0,00896	-0,05502	8,84802
0,4	8,6602	-13,398	0,1	0,00889	-0,03709	0,00007	-0,00057	0,00512	-0,02176	5,05370
0,5	5	-36,602	0,1	0,00523	-0,05066	-0,00011	0,00092	0,00026	-0,07535	0,25228
0,6	0	-50	0,1	-0,00016	0,05066	0,00016	-0,00161	0,00476	0,09395	4,69956

Fuente: elaboración propia.



$$T = 0,3 \text{ s}$$

$$w = 20,9439$$

$$w_d = 20,918$$

**Tabla A-III** Resumen método de segmentos  $T= 0,3 \text{ s}$

<b>t</b>	<b>p</b>	<b>a</b>	<b><math>\Delta t</math></b>	<b>A0</b>	<b>A1</b>	<b>A2</b>	<b>A3</b>	<b>x(t)</b>	<b>x'(t)</b>	<b>x''(t)</b>
0	0	0	0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
0,1	5	50	0,1	-0,00054	0,11399	0,00054	-0,00542	0,00638	0,16063	2,79651
0,2	8,662	36,62	0,1	0,01100	0,08348	-0,00462	0,00346	0,02412	0,12164	10,58079
0,3	10	13,38	0,1	0,01960	0,03050	0,00452	0,00458	0,02421	-0,08795	10,61768
0,4	8,6602	-13,398	0,1	0,02294	-0,03054	0,00126	-0,00268	0,01723	-0,02324	7,55726
0,5	5	-36,602	0,1	0,02014	-0,08344	-0,00291	0,00273	0,01524	-0,06507	6,68366
0,6	0	-50	0,1	0,01194	-0,11399	0,00329	0,00250	0,00102	-0,19178	0,44873

Fuente: elaboración propia.

$$T = 0,4 \text{ s}$$

$$w = 15,7079$$

$$w_d = 15,688$$

**Tabla A-IV** Resumen método de segmentos  $T= 0.4 \text{ s}$

<b>t</b>	<b>p</b>	<b>a</b>	<b><math>\Delta t</math></b>	<b>A0</b>	<b>A1</b>	<b>A2</b>	<b>A3</b>	<b>x(t)</b>	<b>x'(t)</b>	<b>x''(t)</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,1	5	50	0,1	-0,00129	0,20264	0,00129	-0,01285	0,00709	0,19289	1,75050
0,2	8,662	36,62	0,1	0,01932	0,14842	-0,01222	0,00222	0,03619	0,32419	8,93038
0,3	10	13,38	0,1	0,03476	0,05423	0,00143	0,01728	0,05616	0,02140	13,85719
0,4	8,6602	-13,398	0,1	0,04087	-0,05430	0,01529	0,00559	0,04064	-0,27993	10,02769
0,5	5	-36,602	0,1	0,03604	-0,14834	0,00460	-0,00816	0,01368	-0,20935	3,37422
0,6	0	-50	0,1	0,02155	-0,20264	-0,00788	-0,00082	0,00052	-0,08778	0,12726

Fuente: elaboración propia.

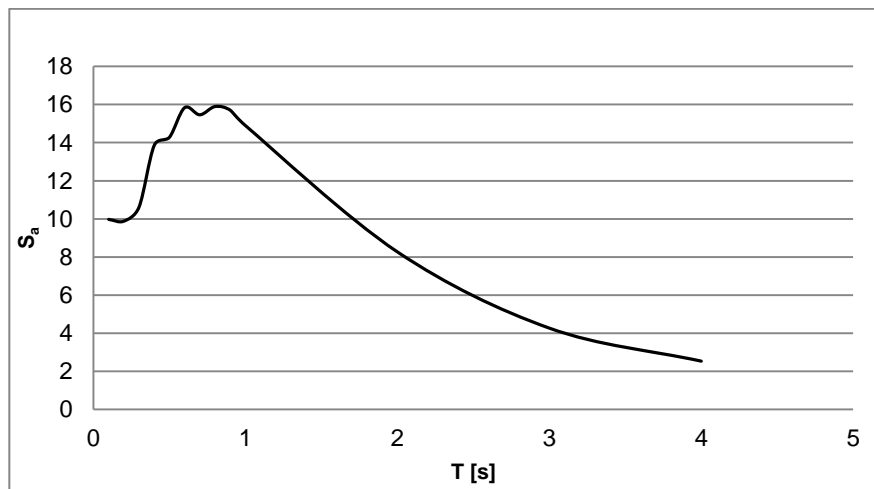
El proceso se debe repetir para cada uno de los períodos que se desee. En la tabla A-V se resumen los valores máximos de respuesta analizados para este ejemplo

**Tabla A-V** Resumen método

Periodo [s]	A max	Periodo [s]	A max
0,10	9,97473022	0,70	15,4606276
0,20	9,87867759	0,80	15,8942151
0,30	10,6176759	0,90	15,705878
0,40	13,8571854	1,0	14,896591
0,50	14,2806322	2,0	8,26797636
0,60	15,8342471	3,0	4,26767937

Fuente: elaboración propia.

**Figura A-2** Espectro de respuesta



Fuente: elaboración propia.