



UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE CIENCIAS MATEMÁTICAS Y FÍSICAS

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TRABAJO DE TITULACIÓN

PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

NÚCLEO ESTRUCTURANTE:

ESTRUCTURAS

TEMA:

**IMPORTANCIA DEL ACELEROGRAFO Y MODELAMIENTO DE UN
EDIFICIO DE 4 PISOS USANDO EL ESPECTRO DE DISEÑO**

AUTOR

WELLINGTON ISRAEL QUIMIZ PEÑA

TUTOR

ING. PEDRO ANDRADE

2015 - 2016

GUAYAQUIL–ECUADOR

AGRADECIMIENTO

Le agradezco a Dios a mis padres a mis hermanos por darme su ayuda incondicional ya que sin esta jamás hubiera sido posible terminar mi carrera, también le doy gracias a mis familiares y amigos que de una u otra forma me brindaron de su ayuda haciendo que fuera posible alcanzar este objetivo igualmente a los que no pudieron ser mencionados pero que formaron parte de este logro les doy mis más sinceros agradecimientos.

DEDICATORIA

A Dios, a mi familia que con mucha dedicación, esfuerzo y paciencia supieron, motivarme a comenzar, desarrollar y finalmente culminar esta carrera con éxito.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Eduardo Santos Baquerizo, M. Sc.
DECANO

Ing. Pedro Andrade
TUTOR

Ing. John Galarza
VOCAL

Ing. Douglas Iturburu
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

**Art. XI del Reglamento Interno de Graduación de la Facultad de Ciencias
Matemáticas y Físicas de la Universidad de Guayaquil.**

La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en este trabajo de titulación, corresponde exclusivamente al autor.

WELLINGTON ISRAEL QUIMIZ PEÑA

CI: 0926738949

OBJETIVO GENERAL

Hacer un análisis, sobre los dispositivos de medición de sismos y la importancia de instrumentar las edificaciones con dichos dispositivos en especial con los acelerógrafos, dado que estos sirven para la obtención de registros durante las aceleraciones producidas por los sismos. Se verá cómo se puede transformar la información obtenida por los acelerógrafos en datos que permitirán conocer el tipo de sismo que afectara a las estructuras y así diseñarla para que soporte el sismo esperado.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Conocer los conceptos básicos de sismología.
- ✓ Conocer los principales tipos de ondas que se generan después que se ha producido el sismo.
- ✓ Descripción del funcionamiento de los acelerógrafos.
- ✓ Importancia de instrumentar los edificios con acelerógrafos.
- ✓ Aplicación del espectro de diseño.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los últimos años a nivel mundial se han desarrollado eventos catastróficos para la humanidad entre ellos están los producidos por los terremotos , estos no solo son una amenaza sino que producen graves daños a las diferentes tipos de estructuras creadas por el hombre poniendo en riesgo muchas vidas humanas por esta razón es necesario entender y analizar mediante estudios e instrumentación todo lo concerniente con las aceleraciones sísmicas.

El actual desarrollo de dispositivos tecnológicos y la constante evolución de las ciencias aplicadas al estudio de los sismos , como por ejemplo la sismología, ciencia que estudia los terremotos , hacen posible desarrollar nuevas y mejores teorías para evaluar y minimizar los daños producidos por los sismos .

Para nuestro estudio de las ondas sísmicas que pueden actuar sobre todo en la base de las edificaciones y viviendas usaremos los acelerógrafos, estos instrumentos miden las aceleraciones del terreno producidas usualmente por un sismo en función del tiempo, de aquí obtenemos los acelerogramas que son los registro de los diferentes tipos de aceleraciones del suelo.

ÍNDICE

Capítulo 1

Introducción.....	1
1.1 Sismología.....	2
1.2 Origen de los sismos.....	2
1.2.1 Teorías antiguas.....	2
1.2.2 Teorías modernas.....	3
1.3 Elasticidad.....	5
1.4 Tectónica de placas.....	6
1.4.1 Márgenes divergentes.....	7
1.4.2 Márgenes convergentes.....	8
1.4.3 Márgenes conservatorios.....	11

Capítulo 2

2.1 Fallas.....	12
2.2 Notación geométrica.....	15
2.3 Ondas sísmicas.....	16
2.3.1 Ondas de cuerpo.....	16
2.3.2 Ondas de superficie.....	19
2.4 Magnitud.....	21

2.4.1 Magnitud local (ML).....	22
2.4.2 Magnitud de ondas de cuerpo (mb).....	22
2.4.3 Magnitud de ondas de superficie (Ms).....	23
2.4.4 Magnitud de momento sísmico (Mw).....	24
2.5 Intensidad.....	26

Capítulo 3

3.1 Acelerógrafos.....	28
3.2 Acelerógrafos digitales de movimiento fuerte.....	29
3.3 Parámetros del acelerograma.....	31
3.4 Tipos de temblores según el acelerograma.....	33
3.5 Excitación sísmica.....	36
3.6 Ecuacion del movimiento.....	38
3.7 Concepto de estectro de respuesta.....	40
3.7.1 Espectro de respuesta de deformacion.....	40
3.7.2 Espectro de respuesta de pseudo-velocidad.....	43
3.7.3 Espectro de respuesta de pseudo-aceleracion.....	45
3.8 Ejemplos sobre la construccion de la rerspuesta espectral.....	48

Capítulo 4

4.1 Espectro de diseño.....	54
4.2 Modelamiento de un edificio de 4 pisos usando el espectro de diseño.....	61
4.3 Conclusiones.....	103
4.4 Recomendaciones.....	105

Anexos

Bibliografía

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1 Evolución de un margen divergente.....	8
Fig. 2 Zona de subducción donde el suelo oceánico se hunde y se desplaza en el Interior terrestre.....	10
Fig. 2.1 Tipos principales del desplazamiento de una falla, a) Falla normal, b) Falla de reversa c) Falla lateral izquierda, d) Falla lateral derecha.....	13
Fig. 2.2 Notación usada para describir la ubicación del sismo.....	15
Fig. 2.3 Deformación producidas por ondas de cuerpo a) ondas-P y b) ondas-.....	17
Fig. 2.4 Deformación producida por las ondas de superficie a) ondas Rayleigh; y b) ondas love.....	20
Fig. 3.1 Acelerograma de las tres componentes de un sismo (registrados a 20 km del epicentro del sismo de San Fernando, 1971 (México).....	31
Fig. 3.2 Acelerograma del sismo de Port Hueneme ocurrido en Marzo de 1958.....	33
Fig. 3.3 Acelerograma del temblor de “El Centro” Mayo de 1940.....	34
Fig. 3.4 Acelerograma del temblor de México del 19 de Sep. De 1985.	35
Fig. 3.5 Componente norte-sur de la aceleracion horizontal del terreno registrada en la subestacion del distrito de riego del Nalle Imperial, en El Centro, California durante el sismo del valle Imperial el 18 de Mayo de 1940. La velocidad y el desplazamiento del suelo se calcularon mediante la integracion	

de la aceleracion.....	37
Fig. 3.6 Sistema de un solo grado de libertad.....	39
Fig. 3.7 (a) Aceleración del terreno , (b) respuesta de deformacion de los tres sistemas de 1 GDL con $\zeta=2\%$ y $T_n= 0.5 , 1$ y 2 segundos , (c) estectro de respuesta de respuesta de deformacion para $\zeta=2\%$	42
Fig. 3.8 (a) Estectro de respuesta de deformacion para $\zeta=2\%$ repetido por comodidad da la fig. 3.7 (c). (b) espectro de respuesta de pseudo-velocidad.....	46
Fig. 3.9 Espectro de respuesta de seudo-aceleracion.....	48
Fig.3.10 (a) Oscilador simple sin amortiguamiento sometido a la fuerza $F(t)$. (b) Funcion de la fuerza, $F(t)=F_0 \sin \omega t$ ($0 \leq t \leq t_d$). (c) Diagrama libre.....	49
Fig. 3.11Espectro de respuesta debido a un pulso senosoidal.....	53
Fig. 4.1 Espectro elastico de diseño para la ciudad de Guayaquil.....	59
Fig. 4.2 Espectro inelastico de diseño para la ciudad de Guayaquil.....	60
Fig. 4.3 Corte de losa	62
Fig. 4.4 Vista en planta del edificio.....	64
Fig. 4.5 Área del paño que se va a calcular.....	65
Fig. A1 Elección de las unidades correspondientes.....	66
Fig. A2 Seleccionamos un nuevo modelo.....	66
Fig. 3 Selección del modelo 3D frame.....	67

Fig. A4 Creación de la malla en 3D.....	68
Fig. A5 Malla en 3D que representa el edificio a ser analizado.....	68
Fig. A6 1 Modificación del hormigón a usar, con un $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$	69
Fig. A6 2 Creación del hormigón a usar con un $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$	69
Fig. A7 Creación de las secciones.....	70
Fig. A8 1 Procedimiento para definir las columnas y vigas.....	71
Fig. A8 2 Procedimiento para definir las columnas.....	72
Fig. A9 Sección de vigas definidas.....	73
Fig. A10 Inercia agrietada de la viga con respecto al eje 2.....	74
Fig. A11 1 Creacion de losa.....	75
Fig. A11. 2 Definimos el tipo de losa.....	75
Fig. A12 Empotramiento de la base del edificio.....	76
Fig. A13 Asignacion de las columnas para el 1er y 2do piso.....	77
Fig. A14 Asignacion de las vigas para el 1er y 2do piso.....	77
Fig. A15 Asignacion de losas.....	78
Fig. A16 Asignacion de longitud efectiva a las vigas y columnas.....	79
Fig. A17 Creacion de cargas para asignar al modelo 3D.....	79
Fig. A18 Asignacion de diafragmas en la losa de cada piso.....	80
Fig. A19 Espectro inelastico de diseño.....	81
Fig. A20 Selección de las masas a usar para el analisis dinamico.....	82

Fig. A21 asignacion de cargas.....	82
Fig. A22 Discretizacion de secciones.....	83
Fig. A23 Discretizacion de las cargas asignadas.....	84
Fig. A24 Discretizacion de los elementos areas.....	84
Fig. A25 Modificacion del caso de analisis modal.....	85
Fig. A26 Definimos las cargas sismicas tanto para el sismo en X como para el sismo en Y	86
Fig. A27 Cargas sismicas.....	87
Fig. A28 Definicion de los desplazamientos.....	88
Fig. A29 Alineacion de los ejes de las vigas.....	89
Fig. A30 Selección del tipo de analisis.....	89
Fig. A31 Selección de los casos de Analisis.....	90
Fig. A32 Desplazamiento en Y producido por el sismo en Y.....	90
Fig. A33 1 Desplazamiento en X producido por el sismo en X.....	92
Fig. A33 2 Desplazamiento en X producido por el sismo en X.....	93
Fig. A34 1 Desplazamiento en Y producido por el sismo en Y.....	94
Fig. A34 2 Desplazamiento en Y producido por el sismo en Y.....	95
Fig. A35 Diagrama de fuerzas axial producidas por el sismo en X.....	97
Fig. A36 Diagrama de fuerza cortante producidos por el sismo en X.....	98

Fig. A37 Diagrama de momento flectores producidos por el sismo en X.....	99
Fig. A38 Diagrama de fuerzas axiales producidos por el sismo en Y.....	100
Fig. A39 Diagrama de fuerzas cortantes producidos por el sismo en Y.....	101
Fig. A40 Diagrama de momentos flectores producidos por el sismo en Y.....	102

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1	44
Tabla 3.2.....	47
Tabla 4 A. Clasificación de los perfiles de suelos.....	54
Tabla 4 B. Clasificación de los perfiles de suelos.....	56
Tabla 4.1 Cálculo del periodo T_c (s).....	57
Tabla 4.2 Cálculo de la aceleración (g) en función de T_c (seg).....	58
Tabla 4.3 Valores numéricos para graficar el espectro elástico de diseño.	58
Tabla 4.4 Valores numéricos para graficar el espectro inelástico de diseño.....	60
Tabla 4.5 Cálculo de las derivas de entrepiso.....	96
Tabla A1 Escala de Intensidad Mercalli Modificada (MM).....	106

RESUMEN

El capítulo uno comienza con una breve introducción de las diferentes ciencias que se ven involucradas con el estudio de los sismos estas son las encargadas de estudiar el origen, ubicación, orientación, mecanismos, causa y los efectos que producen los terremotos, en lo concerniente a el origen de los sismos empezaremos por las teorías más antiguas y terminaremos por las teorías modernas como la del modelo de revote elástico propuesta por Reid la cual indica que los terremotos son el resultado de un proceso de deformación elástica y acumulación de esfuerzos en una zona de la corteza que se mantienen hasta que se supera la resistencia del material, se definen seguidamente todos los términos que interviene en el modelo de Reid.

Como los sismos se generan en las capas de la tierra se expondrá el concepto de tectónica de placas ya que dependiendo del movimiento estas pueden chocar, separarse o rozarse y dar forma a las cordilleras, estas variaciones de las placas pueden ser: márgenes convergentes, divergentes, o conservatorios respectivamente. El capítulo dos trata sobre los efectos que producen los sismos en los suelos comenzando por las fallas aquí se explica que existen cuatro tipos de fallas pero que generalmente los terremotos son una combinación de estas cuatro, para mayor facilidad se procede a dar una notación geométrica de la ubicación del sismo con esto es posible señalar como viajan las ondas a través de los suelos, las ondas que se originan en el hipocentro se las conoce como ondas P y ondas S y las que están a punto de llegar a la superficie como ondas Love y ondas Rayleigh, seguido se presenta una forma de medir los terremotos esta son la magnitud que es una medida cuantitativa que mide la energía liberada en el foco del

sismo se trataran 4 tipos de magnitudes: Magnitud Local (ML), Magnitud de ondas de cuerpo (mb), Magnitud de ondas de superficie (ms) y por último tenemos la Magnitud de momento Sísmico que se diferencia de las tres primeras por no necesitar de ninguna amplitud de la onda sísmica, para ser estudiada, sino que esta se evalúa por medio de la geometría de la falla. Otra medida es la intensidad que es una forma cualitativa de evaluar los sismos esta nos provee una herramienta más que todo intuitiva, es decir en base a la observación de la severidad de daños, que ha causado el terremoto en las edificaciones y estructuras la escala de intensidades más usadas es la escala de Mercalli Modificada la cual tiene su origen en Europa en los años 1902.

En el capítulo tres entramos ya en el estudio de lo que son los diferentes tipos de dispositivos que van a medir las aceleraciones producidas por los sismos entre ellos se encuentran los acelerógrafos. Se señalan las unidades de medida que se usan, el gal o cm/s^2 se muestran los diferentes tipos de acelerógrafos sus componentes la diferencia que tiene con el sismógrafo. Un acelerógrafo funciona por dos sistemas que pueden activar el mismo, uno de activación externa y otro mediante un parámetro interno esto significa que el instrumento solo se activara para determinada aceleración del sismo esto último hacen que se pierdan los datos de cuando comienza el sismo.

Los datos que se obtienen del acelerógrafo se conocen como acelerogramas esta grafica no solo sirve tener la respuesta espectral de la aceleración del suelo sino que también que podemos obtener los desplazamientos y velocidades mediante integración. Además mediante el análisis del acelerograma ya se puede tener una clasificación de los sismos más rigurosa esta clasificación se debe a Newmark y Rosenblueth En la página 25 nos encontramos con la ecuación del movimiento para un sistema de un solo grado

de libertad La solución de esta ecuación permitirá obtener la respuesta espectral de deformación asimismo se aclara porque es más fácil trabajar con la respuesta de pseudo-velocidad, pseudo-aceleración y se da un ejemplo de la construcción de una respuesta espectral para una función sinusoidal. Por ultimo en el capítulo 4 tenemos el diseño de un espectro de diseño, este se ha calculado usando la norma ecuatoriana de la construcción NEC 15, y después se muestra el uso de este espectro mediante un ejemplo como es el modelamiento de un edificio de cuatro piso usando el espectro mencionado anteriormente. Aquí se muestran todos los pasos que hay que seguir para modelar el edificio mediante gráficas y notas.

CAPITULO 1

Introducción

Los desastres producidos por los terremotos en el pasado han ocasionado la pérdida de muchas vidas humanas debido a la falla de las estructuras, como edificios, puentes, presas, carreteras, esto ha llevado a buscar la forma de estudiar analizar e interpretar estos fenómenos, ya que de esta manera es posible buscar la forma de mitigar los estragos que causan dichos eventos sísmicos.

Entonces es de vital importancia obtener la información producida durante un evento sísmico, por lo tanto se hace necesario y de carácter obligatorio, instrumentar los diferentes tipos de estructuras que pueden ser afectadas por los seísmos. La colocación de aparatos para el registro de datos sísmicos se conoce como instrumentación sísmica, los objetivos de este tipo de instrumentación sísmica son el de la medición de los periodos de vibración de la edificación al verse sometida a movimientos sísmicos, la identificación de efectos de sitio causados por la amplificación de las ondas sísmicas debido a los estratos de suelo subyacentes, la aceleración, tiempo de duración, medir la disipación que sufren las ondas sísmicas al viajar desde el lugar donde ocurre la liberación de energía o foco hasta la superficie donde se encuentra ubicada la edificación.

Pero antes de entrar en materia será necesario definir algunos términos y ramas que se encargan de estudiar lo concerniente a los sismos. Algunas de estas ramas son de reciente creación como la sismología y la tectónica de placas.

1.1 Sismología

Es la ciencia que se encarga de estudiar todo lo concerniente a los sismos la fuente que los produce la ubicación, orientación, mecanismo, tamaño, las ondas elásticas que generan el modo de propagación, dispersión, amplitud, frecuencia y el medio físico que recorren las ondas.

La palabra sismo proviene del vocablo griego *seiein* = mover, de esta manera llamamos sismo a cualquier movimiento de suelo, otra definición para los diferentes tipos de movimiento de suelo dependen de la intensidad del movimiento del terreno, estos se denominan, temblor cuando se trata de un sismo pequeño, por lo general local. Y terremoto cuando se trata de un sismo grande llamado a veces también macro sismo.

1.2 ORIGEN DE LOS SISMOS

1.2.1 Teorías antiguas

Los pueblos antiguos que profesaban una religión politeísta los atribuían a alguno de sus dioses: Poseidón en la mitología griega, Neptuno en la romana, etc. Creían que la cólera de estos dioses era la causa de estos terremotos. Los japoneses creían que en el centro de la tierra vivía un enorme bagre (pez gato), cuyas sacudidas causaban los terremotos por otra parte sin tener en cuenta las creencias y leyendas populares, los

sabios de la antigüedad trataron de dar una explicación científica a estos fenómenos de acuerdo los conocimientos de su época.

Anaxímenes (siglo v a.J.C) atribuyo los terremotos al hundimiento de cavernas subterráneas, originadas por las aguas que penetran en la tierra. Otros filósofos y sabios entre ellos Anaxágoras y Demócrito (siglo v a.J.C.) posiblemente impresionados por las erupciones volcánicas de las regiones mediterráneas, creyeron que en el interior de la tierra existía agua, fuego y aire, que cuando encontraban una salida al exterior producían las erupciones volcánicas y los terremotos.

En los escritos de los sabios y filósofos del renacimiento, que se preocuparon por el estudio de los problemas de la corteza terrestre, entre los que se encuentran los matemáticos descartes y Leibniz, volvemos a encontrar el idea de que los terremotos se producen por el derrumbamiento de grandes cuevas y por la influencia del fuego existente en el centro de la tierra.

1.2.2 Teorías modernas

Se puede considerar que el planteamiento moderno comienza a principios del siglo pasado, cuando se comienza a vincular los terremotos con las fallas geológicas observadas en el terreno. Es von Humboldt uno de los primeros defensores de esta teoría que no es compartida por Robert Mallet en su estudio del terremoto de Nápoles de 1875, trabajo que se considera el inicio de la sismología moderna, ni por Lyell (1868), quien describió la deformación y el fallamiento producidos por los terremotos.

De todas maneras la relación entre los terremotos y las fallas fue abriéndose paso con los años, mucho de esto se debe a los trabajos realizados por Gilbert (1884), de esta manera para finales del XIX ya era comúnmente aceptado que, los sismos se produjeran por el movimiento relativo de las dos partes de una fractura de la corteza terrestre.

Fue Reid que en 1911 propuso el primer modelo mecánico para expresar este proceso, partiendo del estudio de la falla de San Andrés (california) ocurrido durante el terremoto de S. Francisco de 1906. De acuerdo con esta teoría conocida como “modelo de rebote elástico” los sismos son el resultado de un proceso de deformación elástica y acumulación de esfuerzos en una zona de la corteza que se mantienen hasta que se supera la resistencia del material, lo que sucede cuando los esfuerzos de cizalla alcanzan valores próximos a 1000 bares. En este momento la falla experimenta una dislocación. Los esfuerzos se relajan total o parcialmente y la energía elástica acumulada se libera bruscamente. Las rocas deformadas por el esfuerzo “rebotan” a ambos lados de la falla y la deformación elástica desaparece. Por lo tanto el terreno próximo a la falla sufre un desplazamiento, que en el caso de la falla de San Andrés en el terremoto de 1906 alcanzo en algunas zonas un valor de 6 metros. Parte de la energía liberada se disipa en fenómenos no elásticos en la zona de ruptura y parte se propaga en formas de ondas sísmicas que hacen vibrar el terreno. Entonces la generación de un sismo se puede dividir en dos etapas: la primera será la de una acumulación lenta de energía elástica y la segunda de una relajación súbita, por lo tanto la primera puede prolongarse durante muchos años y la segunda durara únicamente decenas de segundos.

En seguida definiremos que son los esfuerzos y como se producen, después veremos que es la energía elástica

1.3 Elasticidad

Cuando se aplica una fuerza a un cuerpo en reposo, cada punto de este cambia de lugar respecto al cual se encontraba antes de aplicársele dicha fuerza a este cambio de posición se le llama desplazamiento. Si todos los puntos del cuerpo se desplazan de la misma manera, este no cambia de forma pero si cada punto lo hace de forma diferente, el material se deforma.

Si al dejar de aplicar la fuerza al material este vuelve a su forma original decimos que este es elástico, y si no recupera su forma original decimos que es plástico. Un material totalmente plástico no puede almacenar energía elástica: por lo tanto, los sismos se deben al comportamiento elástico de la tierra.

Cuando se aplican fuerzas perpendiculares de igual magnitud y de sentido opuesto a todas las caras de un cubo este se deformará a compresión. Este es el tipo de esfuerzo que corresponde a la presión hidrostática, esta es la presión que sentimos cuando buceamos, y la que constantemente ejerce sobre nosotros la atmósfera terrestre.

Ahora si aplicamos fuerzas de la misma magnitud, pero ahora en dirección paralela a las caras del cubo la deformación del cubo será completamente distinta el cubo sufrirá una deformación en cizalla o corte. Un ejemplo de este tipo de esfuerzos es el que generan las tijeras etc.

Si se aplica un esfuerzo a un material elástico, este se deformara, de tal manera que la deformación será proporcional al esfuerzo, esto es a mayor esfuerzo mayor deformación, esta relación se conoce como la ley de Hook. La deformación de un cuerpo dependerá de la rigidez que este posea esto es un cuerpo de elevada rigidez se deformara menos que uno de baja rigidez al aplicar a ambos el mismo esfuerzo.

1.4 Tectónica de placas

Ahora hablaremos de la zona donde se generan los sismos (capa sísmica genética). Esta se encuentra por lo general a una profundidad aproximada de 30 a 40 km medida desde la superficie de la tierra hacia el interior, esta se conoce como esferosfera esta posee suficiente rigidez para que se puedan producir fallas frágiles, esta representa la parte superficial de la litosfera la cual se extiende aproximadamente hasta unos 100km de profundidad esta comprende la corteza y parte superior del manto donde ya empieza a ser sísmico el desplazamiento. La parte restante del manto situada después de la litosfera de una profundidad de 200km se llama astenosfera.

La corteza y el manto se hallan separada por la discontinuidad de Mohorovicic (conocida como discontinuidad de “Moho”) en esta parte la velocidad de las ondas sísmicas se incrementa bruscamente. La corteza terrestre se encuentra formada por una serie de 14 placas, estas involucran la corteza y parte del manto, cada una de estas placas posee movimiento independiente una de otra. Esta serie de placas conforman la litosfera, la cual se desliza, lentamente sobre la astenosfera. La astenosfera constituye una parte del manto que se encuentra parcialmente fundida. La parte de material fundida

constituye tan solo 1% esta pequeña parte de material fundido (magma) permite que la litosfera se deslice sobre la astenosfera. De esta forma la teoría de la tectónica de placas nos da una explicación plausible que explica el desplazamiento de grandes bloques semirrígidos sobre la faz de la tierra.

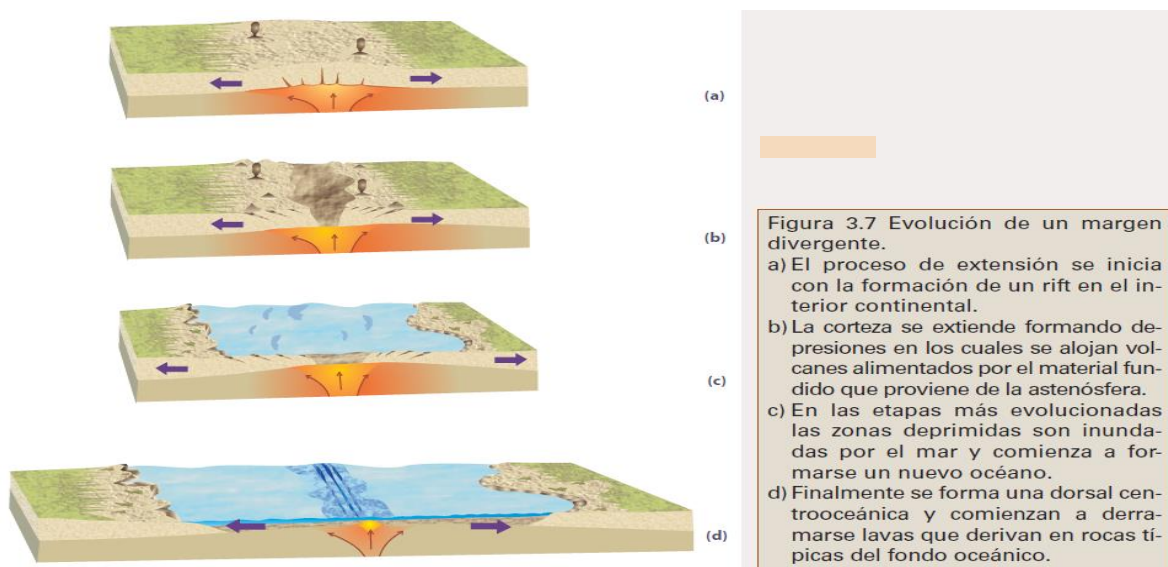
Dependiendo del movimiento las placas pueden separarse, chocar o rozarse de costado, cuando dos placas chocan entre sí pueden levantarse grandes cordilleras. Un ejemplo de esto es la cadena andina que se levanta a lo largo de la costa pacífica del continente americano, producto de que la placa oceánica del pacífico se hunde bajo la placa sudamericana.

1.4.1 Márgenes divergentes

Cuando dos placas se separan una de otra se conoce como márgenes divergentes, un margen divergente nace dentro de una placa única que comienza a experimentar fenómenos de estiramiento y fractura formando un rift. Los rift se ubican donde la corteza continental, empieza a romperse en el interior de una placa. Con el tiempo se pueden llegar a individualizarse dos placas si el proceso persiste. Este proceso genera un sistema de grietas en la parte superior de la corteza continental que en profundidad se asocian al estiramiento y adelgazamiento horizontal de la misma. El adelgazamiento de la corteza, ocurre producto de la extensión producida en un sistema de rift, este hecho hace que se formen las dorsales centro oceánicas a partir de la cual dos placas divergen, un ejemplo de esto es lo que ha ocurrido en el Mar Rojo hace tan solo unos 5 millones de años. La creación de una nueva corteza es el resultado natural de la tectónica de

placas, al separarse una placa oceánica de otra el espacio que queda entre ellas es rellenado por material proveniente del manto, roca fundida (magma). La actividad sísmica que se genera en este proceso tectónico es de moderada magnitud y se desarrolla a unas profundidades hipocéntricas inferiores a los 70 km.

Fig. 1: Evolución de un margen divergente



Fuente: De la tierra y los planetas rocosos Una introducción a la tectónica.

1.4.2 Márgenes convergentes

Ya que la superficie de la tierra no aumenta, es necesario que ocurran procesos de destrucción de litosfera que compensen el material creado en las dorsales oceánicas. Estos procesos de compensación ocurren en los márgenes convergentes, es en estas zonas donde ocurren los encuentros entre dos placas. En una de estas placas correspondiente a la litosfera oceánica, se puede producir un fenómeno de subducción ya que la placa oceánica se introduce por debajo de aquella con la que se encuentra, que a su vez puede ser una placa de tipo oceánica o continental. La placa buzan

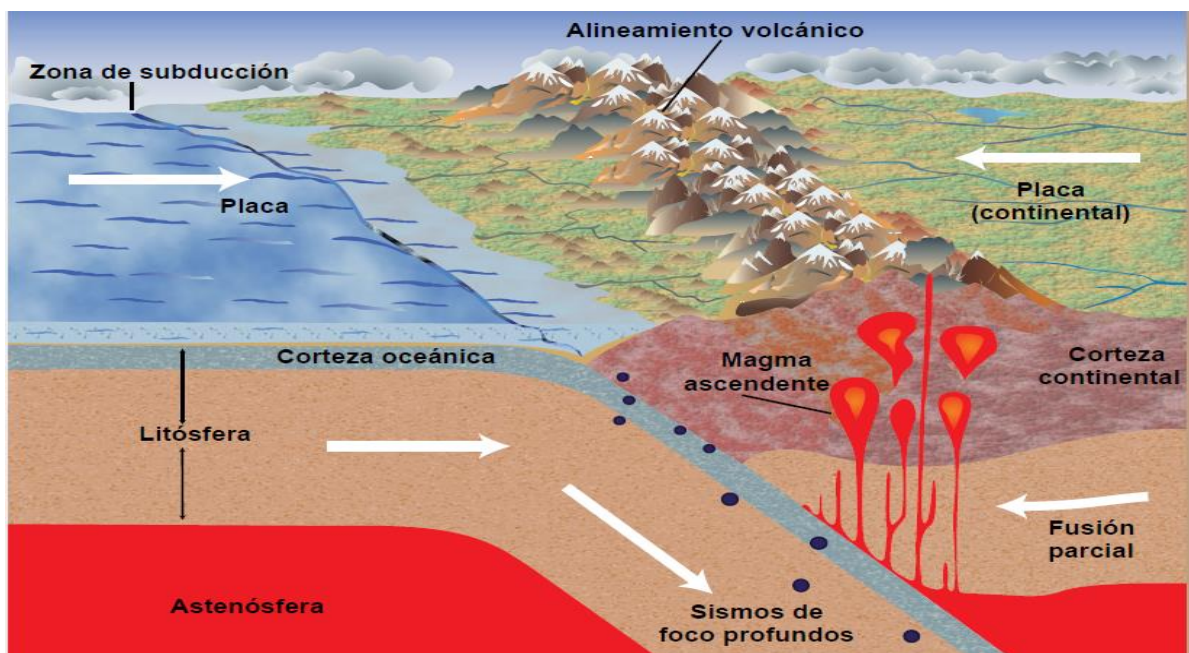
introduce en la astenosfera y parte el manto superior hasta que las elevadas presiones y las altas temperaturas hacen que sea absorbida. La zona del fondo oceánico donde comienza la subducción se le conoce como trinchera y en muchas ocasiones va acompañada de una línea paralela de volcanes situados en el interior del continente (un ejemplo de este es el que sucede en el sur del Perú) si la convergencia es con una placa continental, o por un arco de islas si es con una oceánica.

Es aquí en este lugar donde ocurren los terremotos, esto sucede cuando las áreas de ambas placas se aproximan a la línea de encuentro, como en partes de la placa buzante que conserva suficiente rigidez para soportar grandes esfuerzos. Esta variedad de fuentes sísmicas ocasiona que la profundidad de los terremotos asociados varíe desde unos pocos kilómetros cerca de las costas y de 600-700km, dentro del continente. Las magnitudes pueden ser muy altas, y los mecanismos de tipo normal e inverso. Como ejemplo de este tipo de bordes lo constituyen la subducción de la placa de Nazca bajo la placa de América del Sur.

El proceso de subducción está relacionado con la generación de terremotos y volcanismo, además es uno de los principales mecanismos de formación de montañas. Dependiendo de la velocidad e inclinación con la que las placas se hunden por debajo de otras, se originarán nuevas cadenas montañosas de diferentes proporciones. Cabe señalar que no siempre la subducción genera una actividad sísmica tan importante, como el que ocurre en las islas Marianas el fenómeno tiene características diferentes: el ángulo de buzamiento es mayor y los terremotos no alcanzan magnitudes tan notables.

Cabe decir que cuando dos placas actuantes son continentales, sucederá un tipo de convergencia diferente. Esto sucede ya que las características de las placas son similares, ninguna de ellas se superpone a la otra y no se puede dar la subducción sino la colisión entre estas. Un ejemplo de esto es el que sucede entre una placa Indo-Australiana y la placa de Euro Asia, que dio origen a la cadena del Himalaya y que continua generando gran actividad sísmica. En esta zona suceden sismos superficiales que pueden estar acompañados de otros de profundidad intermedia (70-200) km y pueden producirse terremotos tan importantes como el de Assam, India ocurrido en 1897.

Fig. 2: Zona de subducción donde el suelo oceánico se hunde y se desplaza en el interior terrestre.



Fuente: De la tierra y los planetas rocosos Una introducción a la tectónica.

1.4.3 Márgenes conservatorios

Las placas aparte de chocar también pueden moverse lateralmente una con respecto a la otra, a estos se le conoce como márgenes de deslizamiento o fractura ya que son causadas por fallas de desgarre. En este proceso no existe destrucción ni creación de material, y el deslizamiento relativo de las placas es horizontal y paralelo a la falla. Los sismos que se producen en esta zona son superficiales (15-20) km y pueden alcanzar elevada magnitud. Ejemplos importantes de estas son la falla de San Andrés (California) límite entre las placas del pacifico y de américa del norte, y la falla de Motagua (donde se originó el terremoto de Guatemala de 1976), esta indica la separación de esta última placa y la del Caribe.

El 95% de los terremotos de origen tectónico ocurre en los bordes mencionados el resto ocurre en el interior de las placas. Algunas veces estos sismos intraplaca como los terremotos de Nuevo Madrid (Missouri 1811-1812), Charleston (Carolina del Sur 1886) o Pekín (1980) pueden alcanzar una elevada magnitud. Aunque no existe una teoría unificada se cree que estos terremotos, -en especial los que ocurren en la zona más interna de las placas (mid-plate earthquakes)- suceden en zonas de fragilidad (interior de la placa) producto de los esfuerzos que se liberan en los bordes de la placa y que son transmitidos el interior de esta.

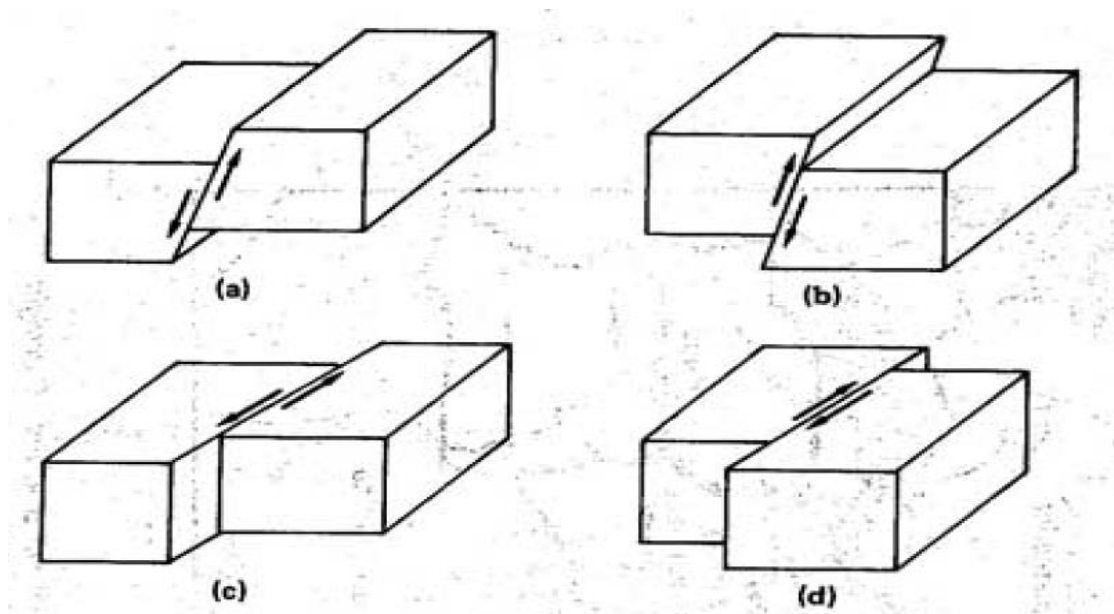
CAPITULO 2

2.1 Fallas

Las fallas se producen cuando suceden deslizamientos recíprocos de las capas de roca en plano determinado. Dependiendo la dirección en que se produzcan los desplazamientos, se clasifican de la siguiente forma:

- 1. Deslizamiento en inclinación.** El deslizamiento ocurre en una dirección vertical, y ocurren dos tipos de falla:
 - a) Falla normal.** La capa superior de roca se desliza hacia abajo (fig. 2-1a).
 - b) Falla de reversa.** La capa superior de roca se desliza hacia arriba (Fig. 2-1b).
- 2. Deslizamiento horizontal.** El deslizamiento ocurre en una dirección horizontal, y ocurren dos tipos de falla:
 - a) Falla lateral izquierda.** Vista desde una capa de la roca, la otra capa se desplaza hacia la izquierda (Fig. 2-1c).
 - b) Falla lateral derecha.** Vista desde una capa de la roca, la otra capa se desplaza hacia la derecha (Fig. 2-1d).

Fig. 2.1 Tipos principales del desplazamiento de una falla, a) Falla normal, b) Falla de reversa c) Falla lateral izquierda, d) Falla lateral derecha.



Fuente: Diseño de estructuras sísmo resistentes.

Las fallas reales son, casi siempre una combinación de los cuatro tipos de deslizamiento. Se llama falla sísmica a las fallas que emergen a la superficie de la tierra a causa de un sismo, estas fallas no se forman por sismos profundos. Un ejemplo conocido es el de la falla de San Andrés, de 300 km de largo y un desplazamiento horizontal de 6.4 m, esta se produjo por el terremoto de San Francisco en 1906. ($M = 8.3$, donde M es la magnitud en la escala de Richter).

Por lo general, la longitud y la anchura de una falla son comparables cuando esta ha sido creada por un sismo relativamente pequeño $M < 6$ sin embargo estos sismos rara vez crean fallas sísmicas. Cuando las magnitudes de los temblores son altas, asimismo las fallas son de mayor longitud. Más que consecuencias, las fallas mismas son la causa de

los sismos. Para la ingeniería sísmica son de importancia dos tipos de fallas, las fallas activas y las fallas capaces. Una definición para falla activa sísmica, es cuando hay registros de que esta ha sido causante de por lo menos un terremoto en un tiempo determinado. Este tiempo está sujeto en función del concepto y finalidad del estudio, aunque suele extenderse a los 10000 o 35000 últimos años. Las fallas activas se clasifican en función de la velocidad del desplazamiento medio ocurrido en el cuaternario, y pueden ser de tres tipos: 1) si en los últimos 1000 años el desplazamiento ha sido mayor a 1 m, 2) si esta entre 10cm y 1 m, y 3) si es menor a 10 cm.

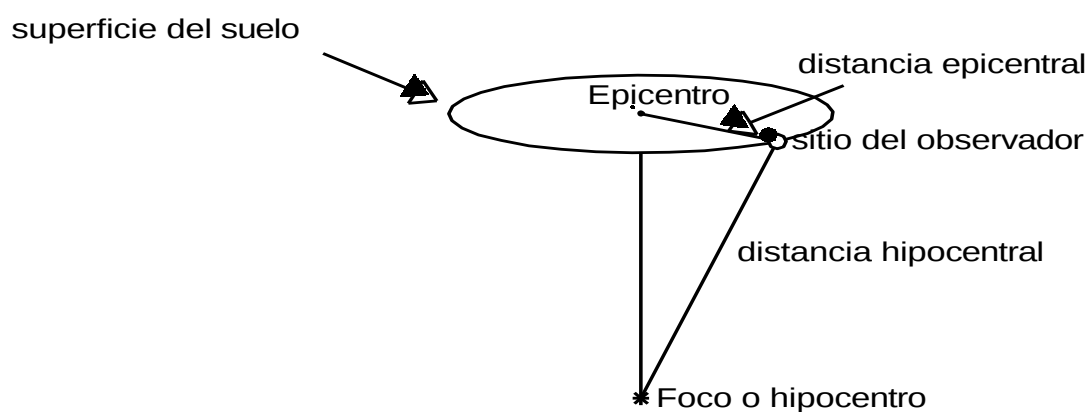
Igualmente el concepto de falla capaz muchas veces se lo identifica con el de falla activa con la acotación de que genera deformaciones permanentes en la superficie o cerca de esta. Las deformaciones producidas por una falla capaz son de suma importancia en el diseño de estructuras críticas, tales como, edificios, centrales eléctricas, grandes presas, por ultimo tenemos las fallas potencialmente activas, las que no presentan variación de actividad en el campo de esfuerzos actual.

Sin embargo por sus características o por su condición de haber sufrido ruptura en una etapa de esfuerzo anterior, se pueden convertir en fallas activas. Estas observaciones indican que el conocimiento de la geometría de la falla más el análisis de la fuerzas que actúan sobre esta o sea el mecanismo del terremoto sean fundamentales en la ingeniería sísmica.

2.2 Notación geométrica

Para describir la ubicación de un terremoto es necesario usar cierta terminología. Los sismos son el resultado de la ruptura de la roca, y aunque la ruptura puede involucrar miles de kilómetros cuadrados, esta debe empezar en alguna parte. El punto donde comienza la ruptura y se origina la primer onda sísmica se conoce como foco o hipocentro, del sismo (figura 2-2) desde el foco la ruptura se propaga al otro lado de la falla a velocidades de 2 a 3 km/s (1.2 a 1.9 millas/s). La distancia desde el foco hacia cualquier punto de la superficie del suelo se conoce como distancia hipo centra (distancia focal). El punto de la superficie del suelo que se encuentra directamente arriba del foco se llama epicentro. La distancia sobre la superficie del suelo entre el observador y el sitio del epicentro se conoce como distancia epicentral.

Fig. 2.2: Notación usada para describir la ubicación del sismo



Fuente: Geotechnical earthquake engineering Steven L. Kramer.

2.3 Ondas sísmicas

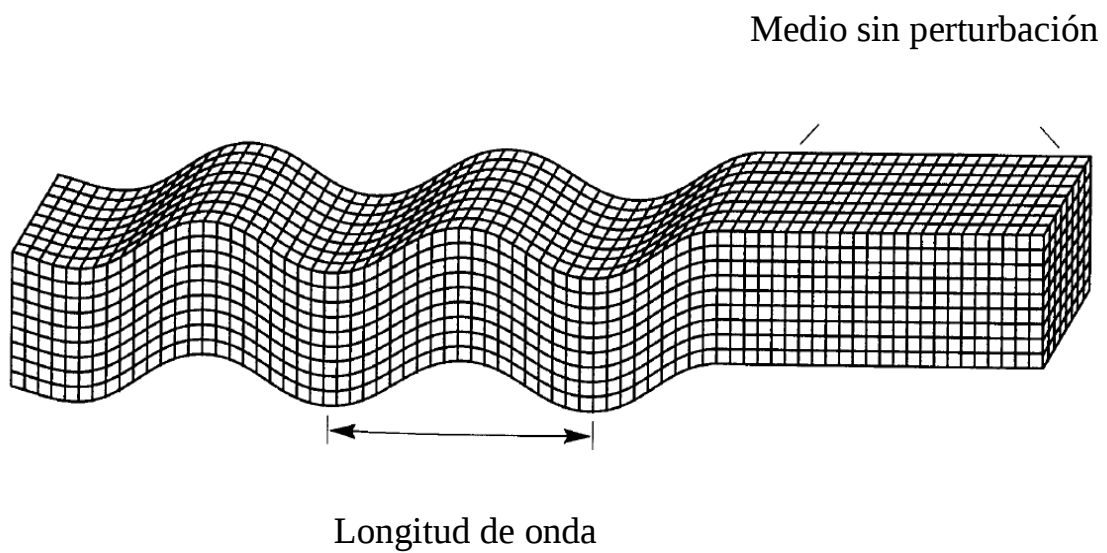
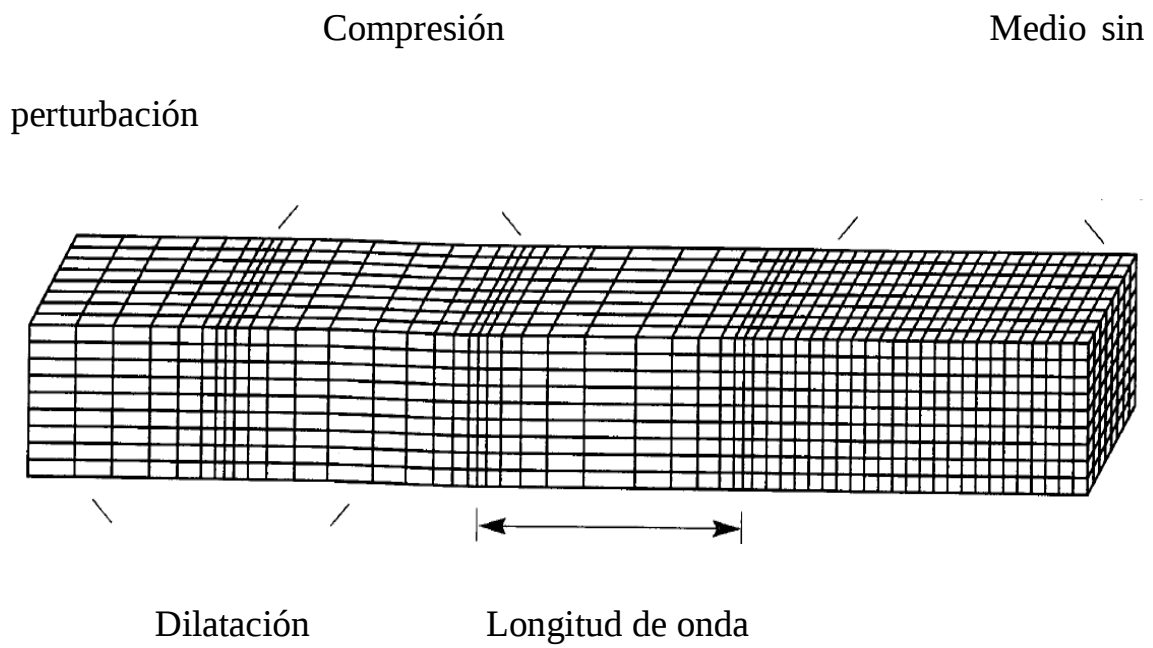
El movimiento de un punto en la superficie del suelo es el resultado de la acción de las ondas generadas en el foco del sismo. Dos clases de ondas sísmicas viajan desde los focos en el cuerpo terrestre, estas son: **las ondas de cuerpo y las ondas de superficie.**

2.3.1 Ondas de cuerpo

Se dividen a su vez en dos clases de ondas, la primera es una serie de ondas longitudinales de igual dirección que la propagación, esta origina efectos de dilatación y compresión, el comportamiento de estas cuando se propagan es semejante al de las esferas con centro en el origen del sismo (foco). La segunda es otra serie de ondas transversales o de cizalla (corte), normales a la dirección de las ondas longitudinales. Estas ondas únicamente provocan deformaciones transversales, perpendiculares a la dirección de propagación. A las ondas longitudinales también se las conoce como ondas primarias y las transversales como secundarias, nombradas así por ser, las primera y las segundas en llegar, respectivamente a una estación dada.

Las ondas P o longitudinales provocan deformaciones volumétricas en los cuerpos en que se propagan, estos cuerpos pueden ser tanto solidos como gaseosos, por otro lado las ondas S o transversales por su efecto de cizalla o corte solo afectan en cambio de formas mas no de volumen y no pueden propagarse en medios líquidos ni gaseosos.

Fig. 2.3: Deformación producidas por ondas de cuerpo a) ondas-P y b) ondas-S.



Fuente: Geotechnical earthquake engineering Steven L. Kramer.

La velocidad de propagación de las ondas P, v_p y de las ondas S, v_s se definen por las siguientes formulas:

$$V_p = \left[\frac{E}{\rho} \frac{1-V}{(1-V)(1-2V)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-1)$$

$$V_s = \left[\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+V)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-$$

2)

Donde:

E = módulo de Young

G = módulo de cortante

P = densidad de masa

v = relación de Poisson

La velocidad de las ondas longitudinales es sensiblemente mayor que las de las transversales $V_p > V_s$ si tomamos la relación de Poisson para el globo terrestre aproximadamente de 0.25, e igualando las ecuaciones (2-1) y (2-2) y reemplazando el valor de la relación de Poisson igual a 0,25 tendremos que $V_p = \sqrt{3} V_s$.

2.3.2 Ondas de superficie

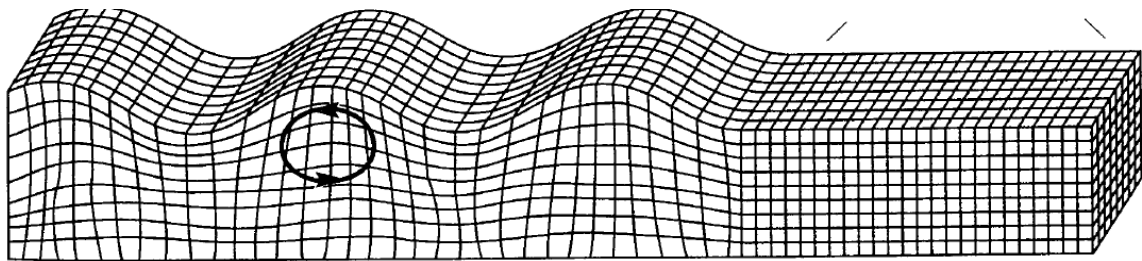
La tierra constituye un medio finito, el límite es la superficie del suelo. Cuando las ondas generadas en el foco alcanzan la superficie estas comienzan a verse afectadas por esta discontinuidad y es aquí donde aparecen las ondas de superficie, estas son de dos tipos: **las ondas Rayleigh y las ondas love**, las cuales llevan el nombre de sus respectivos descubridores. Las ondas Rayleigh se propagan por la superficie de discontinuidad y producen oscilaciones elípticas en dichas partículas, estas actúan en un plano normal a la superficie del suelo y a su vez actúa en la dirección de propagación. El efecto que producen estas ondas es de compresión, dilatación y cizalla.

Las ondas Love también originan oscilaciones elípticas, solo que estas se encuentran contenidas en un plano tangente a la superficie del suelo y sus ejes coinciden con la dirección de propagación. Esta onda se genera, producto de los cambios de las velocidades de las ondas transversales afectadas por la superficie de discontinuidad. Las ondas superficiales forman la principal componente de los movimientos de suelo producidos por sismos lejanos y los efectos que ocasionan sobre las estructuras pueden ser importantes. Un ejemplo de estas son las ondas Rayleigh que son **peligrosas** para las tuberías enterradas a pocas profundidades.

Fig. 2.4 deformación producida por las ondas de superficie a) ondas Rayleigh; y b) ondas love

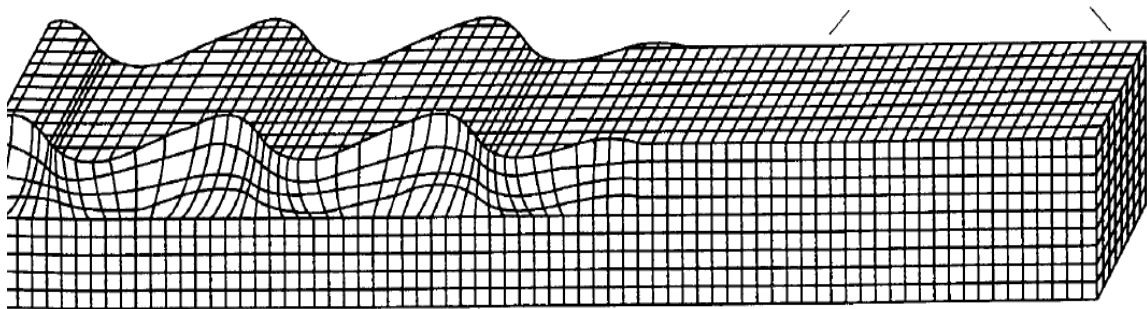
a) **Longitud de onda**

—| Medio sin perturbación



b) **Longitud de onda**

—| Medio sin perturbación



Fuente: Geotechnical earthquake engineering Steven L. Kramer.

Las discontinuidades del medio en el que viajan la serie de ondas, ocasionan que estas sufran reflexiones y refracciones. Cuando se trata de medios no homogéneos, la transmisión de las ondas se dificulta mucho, ya que su velocidad está dada en función de la densidad del medio en que se propagan, esto ocasiona que no viajen en línea recta.

Cuando el medio en que viajan las ondas tiene superficies de separación en las zonas con diferentes densidades, la serie de ondas sufrirán reflexiones y refracciones, igual a los principios de la propagación de luz de Schnell y Huygens dado que la tierra no es homogénea ni isotrópica, esto implica que la densidad y el modulo elástico varían con la profundidad, por lo tanto existirá una gran complicación al examinar los datos de ondas sísmicas. Investigadores como Gutemberg asumen que el núcleo ocupa aproximadamente la mitad del radio terrestre unos 3500 km y posee una rigidez muy reducida que no permite la propagación de ondas.

2.4 Magnitud

La magnitud mide la energía liberada en el foco por el sismo. Esta se encuentra en función de la máxima amplitud de las ondas de cuerpo y de superficie. Los primeros intentos por definir una escala de magnitud fueron hechos en Japón por Wadati y en California por Richter en 1930. Muchas de estas escalas son dependientes de la frecuencia ya que esta se relaciona con la amplitud de las ondas sísmicas. Igualmente se proponen las escalas que relacionan los parámetros de los efectos del sismo en el sitio. Estas no dependen de la amplitud de las ondas sísmicas y por lo tanto son independiente de la frecuencia, las escalas más comunes para medir la magnitud son las siguientes:

2.4.1 Magnitud Local (ML)

Mide la máxima amplitud de la onda sísmica A (en micrones 10^{-6}m) registrada por un sismógrafo Wood Anderson ubicado a una distancia de 100 km del epicentro del sismo. El sismógrafo Wood Anderson posee un periodo natural de 0.8 segundos, un amortiguamiento crítico de 0.8 y un factor de amplificación de 2800. La magnitud M_L relaciona A de la siguiente forma:

$$M_L = \log(A) - \log(A_0) \quad (2-3)$$

Donde A_0 es un factor de calibración que depende de la distancia. La escala de Richter se calibra asumiendo que la magnitud $M_L = 3$, corresponde a una medida tomada a una distancia de 100 km del epicentro con una amplitud máxima de $A = 1.0\text{mm}$ el termino $\log A_0 = -3$ para la distancia $D = 100\text{ km}$. Un sismo con una magnitud $M_L = 5.5$ puede causar daños significativos, mientras que un sismo de $M_L = 2$ normalmente es percibido por la gente.

2.4.2 Magnitud de ondas de cuerpo (mb)

Mide la amplitud de las ondas P con un periodo aproximado de 1 segundo y con longitudes de onda menores a 10-km. Esta escala es apropiada para los sismos profundos donde hay pocas ondas de superficie. Además, (mb) puede medir eventos

distantes, por ejemplo eventos con distancias epicentrales mayores a 600km. Además las ondas P no se ven afectadas por la profundidad donde se origina el foco. La magnitud (m_b) relaciona la amplitud (A) y el periodo (T) de las ondas P de la siguiente manera:

$$m_b = \log\left(\frac{A}{T}\right) + \sigma(\Delta) \quad (2-4)$$

En donde $\sigma(\Delta)$ es función de la distancia epicentral Δ (en grados). Por ejemplo, para $\Delta = 45^\circ$ implica que $\sigma = 6.8$.

2.4.3 Magnitud de ondas de superficie (m_s)

Esta mide la amplitud de las ondas (Rayleigh, Love) con un periodo de 20 segundos y longitudes de ondas aproximadas de 60 km, las cuales son comunes para sismos muy distantes, por ejemplo donde el epicentro se localiza a más de 2000 km. La magnitud M_s es usada para sismos grandes. Sin embargo este no puede usarse para describir sismos profundos, o relativamente pequeños. La relación entre la amplitud (A), periodo (T) y distancia Δ esta dada por:

$$M_s = \log\left(\frac{A}{T}\right) + 1.66 \log(\Delta) + 3.30 \quad (2-5)$$

Donde Δ está dado en grados la amplitud del sismo en micras y el periodo en segundos la ecuación 2-5 solo se puede usar para $\Delta > 15^\circ$.

2.4.4 Magnitud de momento sísmico (m_w)

Este explica el mecanismo de cizalla que tiene lugar donde se origina el sismo, y no necesita de ninguna amplitud de ondas sísmicas. La magnitud del momento sísmico está definida en función del momento sísmico M_0 , Esta mide la extensión de la deformación en el origen del sismo y se puede evaluar de la siguiente forma:

$$M_0 = G A \Delta u \quad (2-6)$$

Donde G es el módulo de cortante del material donde ocurre la falla, A es el área de ruptura de la falla y Δu es el desplazamiento entre los lados opuestos de la falla. El módulo de corte G puede asumirse de 32000 MPa en la corteza y de 75000 MPa en el manto, M_w está dado por:

$$M_w = 0.67 \log (M_0) - 10.70 \quad (2-7)$$

Donde M_0 está dado en ergs (dinas-cm)

La magnitud de local (Richter) M_l presenta fuertes limitaciones, ya que solo fue desarrollada para cuantificar los sismos desarrollados en California a una distancia epicentral menores a los 600 km, por lo tanto solo sirve para uso local o regional sin embargo las escalas m_b , M_s y M_w se consideran escalas de uso universal. La ecuación

(2-7) indica que la magnitud es una función lineal del logaritmo de la energía liberada (medida por M_0) esto indica que un incremento de un grado en M corresponde a un evento que libera $32(=10^{1.5})$ veces más energía, por lo cual es muy importante la determinación precisa de la magnitud esto es de errores de un décimo, y así poder determinar con exactitud la destructividad de un sismo, en especial para los estudios de riesgo sísmico. Los sismos con magnitudes menores a 3 son sismos que difícilmente perciben las personas, sismos de magnitud < 5 pocas veces producen daños excepto cuando estos son superficiales y se encuentra cerca del epicentro. Los de magnitud 5 y 7 se los considera ciertamente de magnitud intermedia estos afectan áreas relativamente pequeñas. Los sismos de magnitud > 7 son grandes sismos y no existe un límite superior en la escala de Richter.

Para la ingeniería no es tan importante la magnitud de un sismo como sí lo son los efectos que ocasiona en los sitios donde hay o se van a construir edificaciones, es decir la severidad o destructividad de la sacudida sísmica que sufre determinado lugar. Esta característica se la conoce como intensidad, esto indica que para un mismo sismo aunque tenga una sola magnitud, tendrá diferentes intensidades según la profundidad donde se registre. Esto quiere decir que la intensidad de un sismo decrece a medida que nos alejamos de la zona epicentral, y que para una misma distancia epicentral serán de mayor intensidad los sismos de mayor magnitud.

2.5 Intensidad

Igual que la magnitud la intensidad no tiene una escala universalmente aceptada. Las escalas más exactas son las de tipo instrumental, estas usan la aceleración máxima del terreno para poder hallar la magnitud en el sitio de interés. Sin embargo no siempre se cuenta con instrumentos necesarios para medir la magnitud en los diferentes lugares donde se interesa conocer, entonces se recurre a escalas de tipo cualitativo estas se basan en la severidad de los daños ocurridos en las estructuras, la fuerza con la que lo percibe la persona y en los cambios producidos en la superficie del suelo. La escala de intensidades más usada es la escala de Mercalli Modificada (MM), esta escala es de uso común en los Estados Unidos y originalmente fue propuesta en Europa en 1902 y modificada en 1931 por Wood y Newman en base a las condiciones constructivas existentes entonces tanto en California y Estados Unidos. Ya que los efectos varían en función de la distancia al epicentro, la naturaleza del suelo y otras causas, un sismo tendrá diferentes valores de MM. En el anexo se muestra la versión más reciente de la escala de Mercalli. Charles Richter explica que:

La magnitud se puede comparar con la energía salida en kilowatts, de una planta de transmisión. Entonces, la intensidad local en la escala de Mercalli es comparable con la intensidad de señal en un receptor en una localidad dada; es decir la calidad de la señal. Generalmente decaerá con la distancia desde la fuente, aunque también depende de las condiciones locales y de la trayectoria desde la fuente a ese punto. Se da intensidades del I al XII de las cuales las intensidades correspondientes del IV o inferiores no corresponden a daño estructural y una intensidad de X corresponde a una destrucción

generalizada. Entonces en nuestros sistemas actuales de medición se halla una paradoja, la magnitud que se base en la instrumentación objetiva y en las matemáticas no aporta con información local sobre el movimiento del suelo que es el de gran interés para los diseñadores. Y la escala MM que se basa directamente en los efectos que sufren los edificios se apoya en comparaciones subjetivas, esto indica que la información consiste en observaciones.

CAPITULO 3

3.1 Acelerografos

De los muchos aparatos que se usan para medir sismos se encuentran los sismógrafos que registran velocidades o desplazamientos y estos datos a su vez se usan para determinar los epicentros y mecanismos focales. Pero para fines de ingeniería el instrumento más importante es el acelerógrafo este da la variación de aceleraciones con respecto al tiempo del lugar donde se encuentran ubicados. La elección de la aceleración que se expresa en gales ($\frac{cm}{s^2}$) o en valores de la aceleración de la gravedad g se debe a que es más fácil obtener datos de velocidades y desplazamientos a partir de los registros de integración numérica que lo contrario (diferenciación) y derivar para obtener aceleraciones a partir de los desplazamientos o velocidades. Siendo más útil para la ingeniería los registros de la aceleración ya que con estos es posible estimar las fuerzas de inercia que se generan en la base de la estructura.

Los acelerógrafos registran un amplio margen de frecuencias entre ellos los periodos propios de la estructura. Algunas de estas frecuencias no se registran con los sismógrafos clásicos. Un acelerógrafo cuenta con tres sensores que detectan el movimiento de dos componentes horizontales (esto es en las direcciones N-S y E-W) y una componente vertical: un sistema de discriminación de señales y una memoria de registro. Durante el sismo, los movimientos del suelo son transformados en una serie de impulsos eléctricos, estos son primeramente amplificados y después pasan al sistema de discriminación, esto significa que la señal debe cumplir condiciones previamente

establecidas, para que se pueda activar y de esta forma se obtengan los acelerogramas. Ya que al obtener la información mediante este proceso se puede perturbar la señal original es obligatorio corregir el acelerograma eliminando los errores introducidos por las bajas frecuencias durante la conversión de la señal en digital y las distorsiones en las altas frecuencias debidas a la respuesta del transductor. De estos dos el más grave es el primero cuando se quiere integrar la señal para conseguir la historia temporal de la velocidad y el desplazamiento.

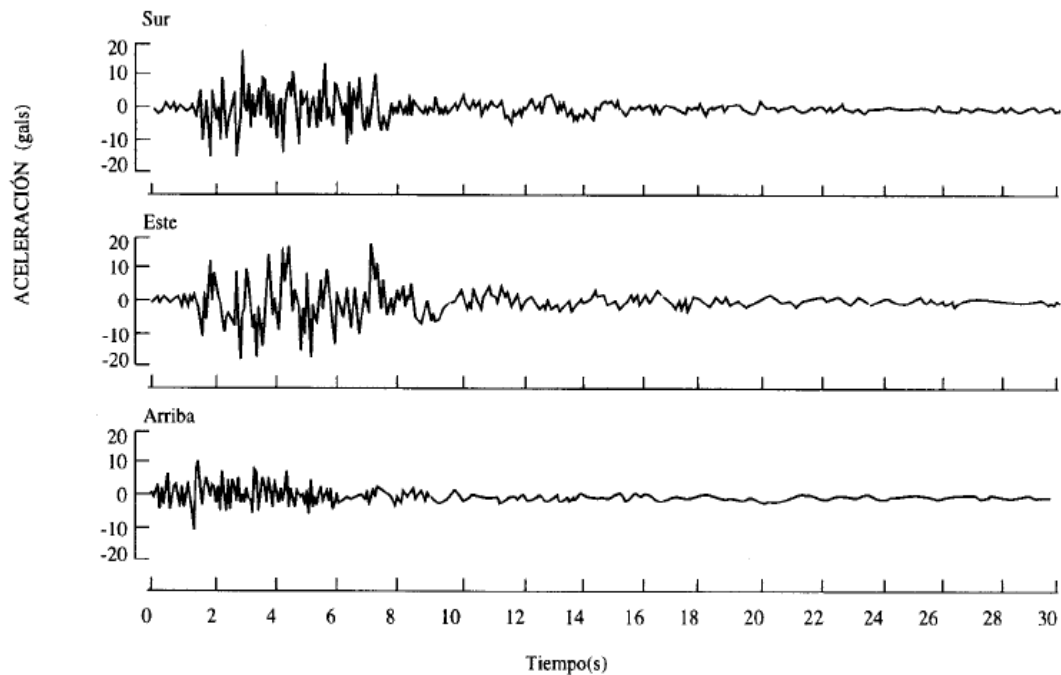
3.2 Acelerógrafos digitales de movimiento fuerte.

A fin de definir los conceptos relacionados con el tema usaremos las siguientes definiciones, el movimiento sísmico generalmente está dividido en dos tipos: movimiento débil, relacionado con las bajas amplitudes y el movimiento fuerte, asociado con las altas amplitudes. Generalmente son más frecuentes los movimientos débiles, pero estos no proporcionan la misma información que cuando sucede un movimiento fuerte, esto se debe a su poca duración lo que origina que las estructuras se vean sometidas a sollicitaciones pequeñas. Por otra parte los movimientos fuertes son menos recurrentes pero de una mayor duración y aceleraciones más altas. A Este tipo de movimiento se lo asocia con los daños estructurales en los diversos tipos de construcciones por lo tanto son importante para analizar el comportamiento y la respuesta dinámica de las edificaciones. Teniendo en cuenta los motivos mencionados arriba se diseñaron los acelerógrafos de movimiento fuerte, estos pueden registrar aceleraciones menores a 0.1% de la aceleración de la gravedad y superiores al 100% de la gravedad. Los primeros tipos de acelerógrafos fueron instrumentos análogos con

dispositivos ópticos que transformaban la señal para registrar las vibraciones sobre película o papel fotográfico de forma analógica esto es mediante un trazo que representa la aceleración en función del tiempo. Los acelerógrafos de última generación llamados digitales, funcionan bajo el mismo principio, con la excepción de que el sensor produce un voltaje proporcional a la aceleración y mediante un convertidor electrónico A/D (analógico digital) convierten la señal eléctrica y la registra en forma digital directamente en estado sólido para su posterior procesamiento electrónico, el registro en forma digital, en cinta magnética o en memoria de estado sólido posee la ventaja que facilita el procesamiento directo de esta forma se hace innecesario los procesos de digitalización óptica necesaria para los registros en película fotográfica, después de que se han procesado los registros digitales se obtienen los trazos analógicos o acelerogramas.

El acelerógrafo posee dos sistemas separados de señales de tiempo uno que puede ser activado por una fuente exterior y que permite mediante enlace de radio percibir y registrar la señal de tiempo absoluto o tiempo estándar y la otra interna que se basa en los registros de marcas de tiempo.

Fig. 3.1: acelerograma de las tres componentes de un sismo (registrados a 20 km del epicentro del sismo de San Fernando, 1971 (México)).



Fuente: Diseño sísmico de edificios Bazán/Meli.

3.3 Parámetros del acelerograma.

Una vez corregido el acelerograma, la información obtenida es de mucha importancia para los ingenieros estos datos son el valor máximo registrado y la duración del movimiento a el primero se lo denomina aceleración máxima $a_{\max}$ por lo general sucede en las componentes horizontales de ser así la aceleración máxima vertical suele ser $2/3$ de la aceleración máxima horizontal, aunque en algunas ocasiones el valor máximo se ha obtenido en la componente vertical. La aceleración máxima es muy usada en ingeniería sísmica ya que establece el límite de las altas frecuencias en los espectros

de respuestas y esto ayuda a definir el sismo principal de diseño. Sin embargo debe ser usado con criterio ya que no refleja realmente las aceleraciones presentes durante la sacudida sísmica sino tan solo las asociadas a uno o dos impulsos también hay que ver que las aceleraciones máximas estén asociadas a frecuencias muy elevadas por lo que los espectros de respuesta diseñados con estas se ajustan a las altas frecuencias pero fallan para periodos superiores a un segundo. Para atenuar estos problemas actualmente también se consideran la velocidad máxima V_{max} , y el desplazamiento máximo d_{max} , obtenidos en sus graficas correspondientes. Igualmente se tiene que tomar en cuenta que para distancias epicentrales cortas a_{max} no representa el tamaño del terremoto ya que para sismos pequeños ($M_l < 5$) pueden generar aceleraciones máximas en el origen del sismo próximas a $0.6g$.

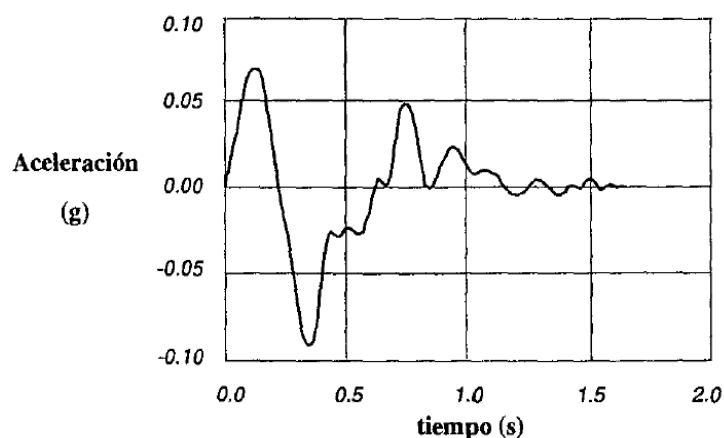
Otro factor de importancia es la duración de los acelerogramas estos suelen definirse como el tiempo transcurrido entre el primero y el último de los pulsos de registro que superan el valor de $0.05g$ (duración acotada) y está relacionado directamente con la fuente, la energía total liberada y las características del medio. La duración puede llegar a ser un factor más importante que la aceleración máxima, al momento de ocasionar daños, ya que el tiempo al que una estructura va estar sometida a una carga sísmica puede dañarla más que el valor máximo de la aceleración máxima ya que al soportar mayor tiempo la estructura una carga sísmica el valor de la rigidez se verá afectado en edificaciones de hormigón armado, por último la duración también puede causar presiones de poros acumulativas que generan licuefacción en los suelos granulares saturados.

3.4 Tipos de temblores según el acelerograma

Newmark y Rosenblueth, clasifican los temblores de la siguiente manera, según su acelerograma:

Tipo 1- prácticamente el acelerograma consiste en un pulso único, en la fig. 3.2 se puede ver el registro acelerografico para este tipo de sismo, este tipo de registro solo se obtienen a distancias muy cercanas del epicentro, sobre terreno firme y solamente durante sismos superficiales, si estas condiciones no se cumplen, el movimiento de las ondas cambia debido a las reflexiones y difracciones. Ejemplo de este tipo de sismos son los ocurridos en Agadir en 1960, Libia en 1963, Skopio en 1963 y San Salvador en 1965. Por lo general este tipo de registros se obtiene en temblores de magnitud de (5.4 a 6.2) con un foco superficial menor a los 30km y el sismo se siente como un pulso en una dirección, esto es más fuerte en una dirección que en la opuesta con cortos periodos de vibración.

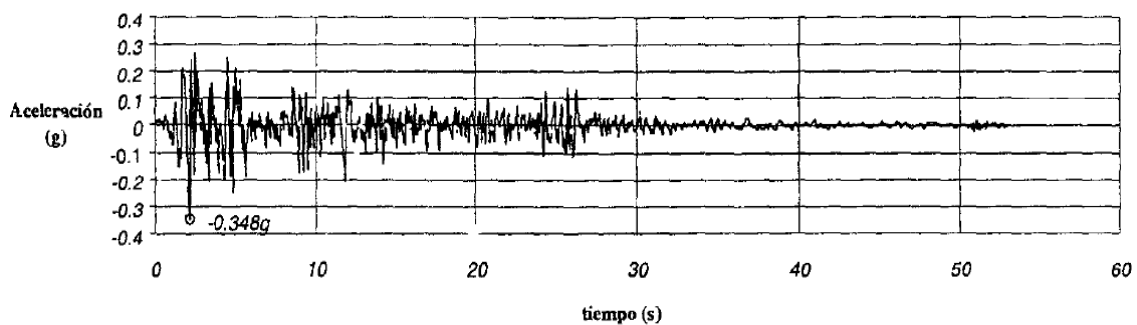
Fig. 3.2: Acelerograma del sismo de Port Hueneme ocurrido en Marzo de 1958



Fuente Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico Luis E García Reyes.

Tipo 2- Este tipo de temblores excitan un amplio rango de periodos de vibración entre un mínimo de 0.05 a 0.5 segundos a un máximo de 2.5 a 6 segundos Fig.3.3. Por lo general tiene un movimiento muy irregular de duración moderada, y al igual que los del tipo 1 solo acurren en terreno firme, se los asocia con distancias focales moderadas. La mayoría de estos sismos se originan en el Anillo Circumpacífico.

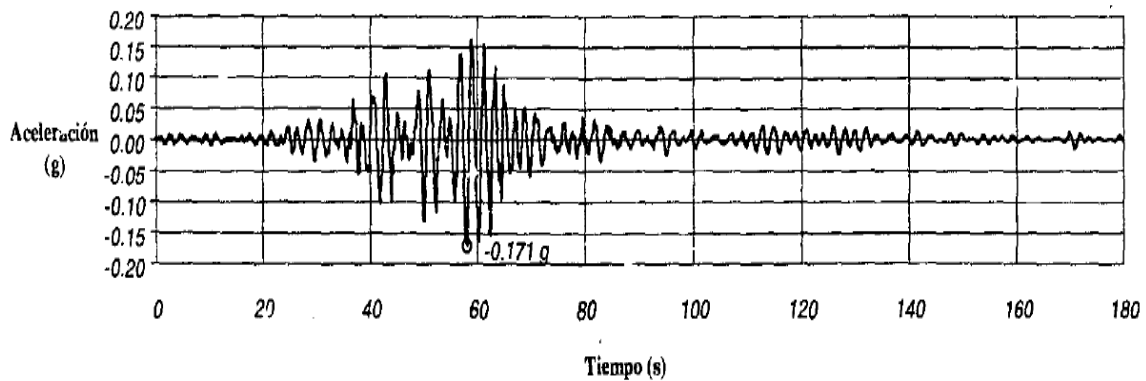
Fig. 3.3: Acelerograma del temblor de “El Centro” Mayo de 1940.



Fuente Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico Luis E García Reyes.

Tipo 3- ocurren cuando los terremotos son de larga duración y manifiestan periodos de vibración muy definidos. La fig.3.3 muestra un acelerograma registrado en un suelo blando del sismo ocurrido en la ciudad de México el Septiembre de 1985, este es un ejemplo clásico de este tipo de sismos. Este es el resultado de los sismos de tipo anteriores que se ven filtrados a través de estratos de suelo blando es aquí que al viajar de un estrato a otro estrato que las ondas sísmicas sufren reflexiones consecutivas.

Fig. 3.4: Acelerograma del temblor de México del 19 de Sep. De 1985.



Fuente Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico Luis E García Reyes.

Tipo 4- por último tenemos los movimientos de suelos en los cuales ocurren deformaciones permanentes a gran escala. En los suelos donde ocurren este tipo de temblores se puede presentar el fenómeno de licuefacción o grandes desplazamientos de masas de suelos. Un ejemplo de este tipo de terremotos son los ocurridos en Alaska en 1964 y el de Nigata en la ciudad de Japón ocurrido el mismo año.

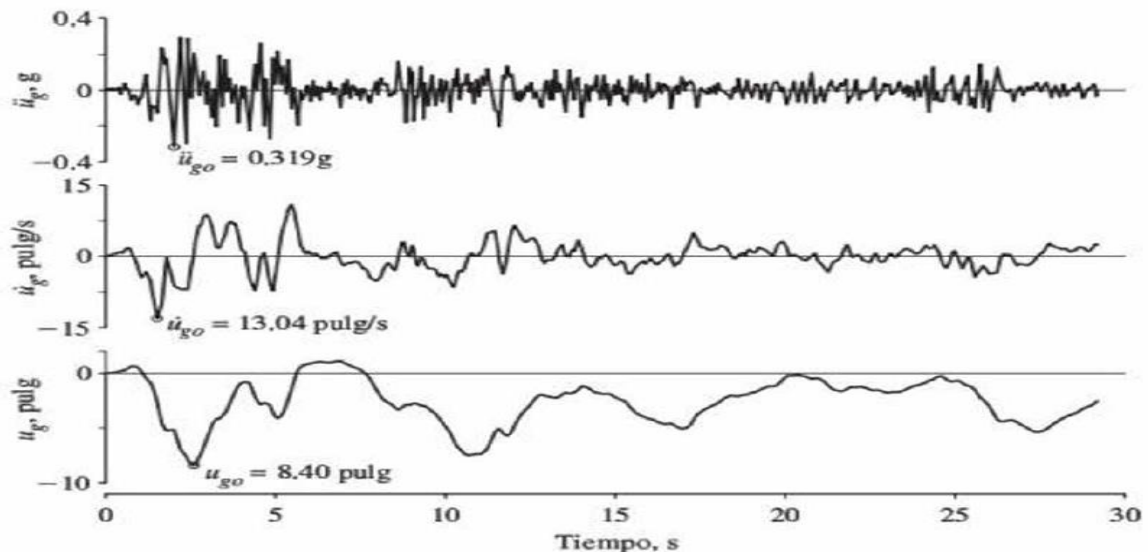
Las clasificaciones dadas arriba fueron declaradas por Newmark y Rosenblueth hace más de 42 años y actualmente siguen estando en vigencia, estos manifestaban que las técnicas analíticas existentes eran suficientes para estudiar los tres primeros tipos de registros a excepción de que para el primer tipo de sismo hicieron falta registros, y con respecto al cuarto tipo Rosenblueth y Newmark indicaban que los conocimientos del momento no eran suficientes para la construcción de estructuras sobre suelos que sufrieran las deformaciones del cuarto tipo, en la actualidad esto sigue siendo válido.

3.5 Excitación sísmica

El acelerógrafo se compone de un elemento básico, este es el transductor o dicho en su forma más simple un sistema de un grado de libertad (masa, resorte, amortiguador), entonces el elemento transductor se caracteriza por su frecuencia natural f_n y su fracción de amortiguamiento viscoso ζ ; para los acelerógrafos analógicos modernos $f_n=25$ Hz y $\zeta=60\%$ y en los acelerógrafos digitales modernos $f_n=50$ Hz y $\zeta=70\%$. Estos parámetros del transductor permiten que el instrumento digital haga un registro, sin exceso de distorsión de las funciones de aceleración-tiempo con frecuencias muy bajas de hasta, por ejemplo 30Hz. En los instrumentos analógicos es exacto en un intervalo de frecuencias más estrecho, como por ejemplo de hasta 15Hz.

La aceleración del suelo se define mediante valores numéricos en instantes de tiempo discretos, estos instantes de tiempo deben quedar muy espaciados para poder describir con precisión la variación tan irregular de la aceleración en el tiempo. Generalmente este intervalo de tiempo se elige entre $\frac{1}{100}$ y $\frac{1}{50}$ de segundo con lo que se necesitara entre 1500 y 3000 ordenadas para describir el movimiento del terreno del a fig. 3.5.

Fig. 3.5: Componente norte-sur de la aceleracion horizontal del tereno registrada en la subestacion del distrito de riego del Nalle Imperial, en El Centro, California durante el sismo del valle Imperial el 18 de Mayo de 1940. La velocidad y el desplazamiento del suelo se calcularon mediante la integracion de la aceleracion.



Fuente: Dinámica de estructuras de Anil K. chopra.

En el primer diagrama de la fig.3.5 se muestra la variación de la aceleración vs el tiempo del terremoto ocurrido en El Centro, se puede observar que la aceleración máxima del terreno es $\ddot{u}_g$ es de 0.319g, el segundo diagrama muestra la velocidad del terreno que se obtiene al integrar la función de la aceleración- tiempo el valor de la velocidad máxima del terreno es $\dot{u}_g$ es de 13.04 pulg/s y por último tenemos el tercer diagrama que representa el desplazamiento que ha sufrido el suelo, esta curva se obtiene igualmente de integrar la función de la velocidad, el valor máximo de desplazamiento del suelo es u_g es de 8.40 pulg. Ya que los acelerógrafos analógicos no registran la parte inicial (cuando se activa el instrumento) de la función de la aceleración-tiempo esto quiere decir que se desconoce la línea base o lo mismo el valor inicial de la aceleración igual a 0 se vuelve muy difícil determinar la velocidad y el desplazamiento.

En cambio los acelerografos digitales superan este problema y a que se les provee de una memoria corta de almacenamiento de tal forma que se puede medir el valor de inicio de la aceleracion.

3.6 Ecuacion del movimiento

La ecuacion del movimiento de un sistema lineal de 1GDL fig. 3.6 . Sometido a una celeracion del terreno $U''_g(t)$ será

$$U'' + 2\zeta\omega_n U' + \omega_n^2 U = -U''_g(t) \quad (3.1)$$

Donde:

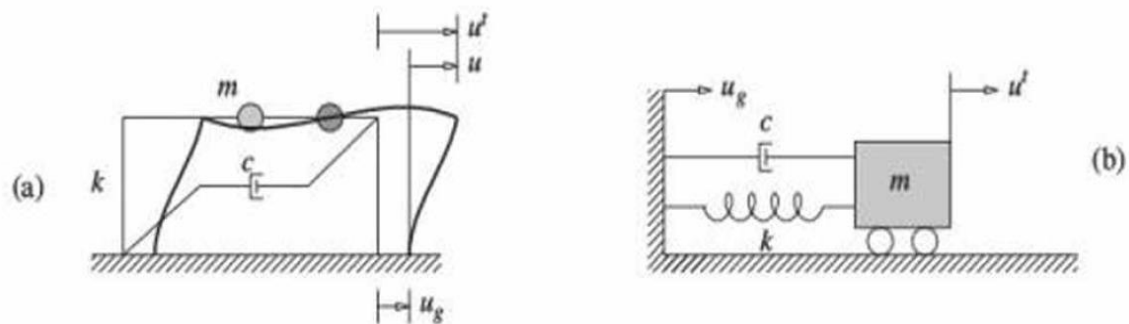
$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ y}$$

$$\zeta = \frac{c}{2m\omega_n}$$

Se notara que para cada fuerza externa $U''_g(t)$ la solucion del sistema en este caso la respuesta de deformacion $U(t)$ serán funcion de la frecuencia natural ω_n o del periodo natural T_n del sistema y de su fraccion de amortiguamiento ζ , o lo que es lo mismo $U=u(t,T_n,\zeta)$ esto significa que si dos o mas sistemas que tengan los mismos valores de

Tn y γ tendran la misma respuesta a la deformacion $U(t)$ aunque uno de ellos sea mas grande o mas rigido que el otro. Genaralmente la aceleracion del suelo durante el sismo varia irregularmente, haciendo casi imposible encontrar una solucion analitica de la ecuacion del movimiento, haciendo necesario el uso de metodos numericos para determinar la respuesta estructural.

Fig. 3.6: sistema de un solo grado de libertad.



Fuente: Dinámica de estructuras de Anil K. chopra.

Durante el movimiento de suelo se producen deformaciones o desplazamientos de las masas estas junto con las fuerzas internas se relacionan linealmente, y son de gran interes en la ingenieria estructural, primeramente las fuerzas internas son los momentos de flexión y los esfuerzos cortantes que actuan an las vigas y columnas, y segundo es necesario conocer los desplazamientos de la masa y asi se podra dar una separación adecuada entre edificios con el fin de evitar que se golpeen entre si durante el sismo.

3.7 Concepto de espectro de respuesta

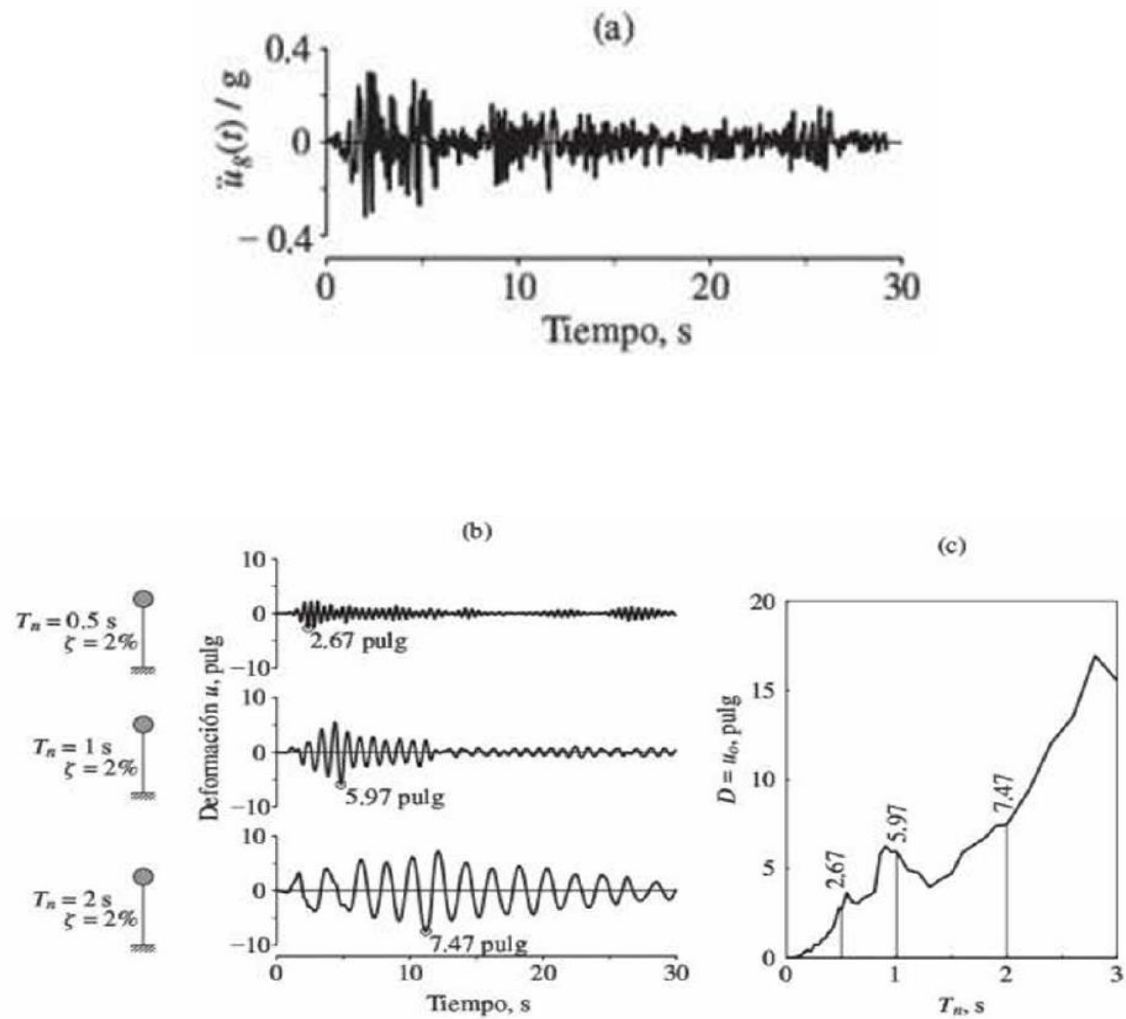
Uno de los precursores que jugó un papel importante en la aceptación del concepto de espectro de respuesta del sismo fue G. W. Housner este concepto que fue iniciado por M. A. Biot en 1932 este se considera como un medio práctico para estudiar los movimientos de suelo y sus consecuencias sobre las estructuras actualmente es un concepto central de la ingeniería sísmica. La gráfica de un valor máximo de una cantidad de respuesta que está en función del período de vibración natural T_n del sistema o de un parámetro relacionado como la frecuencia circular ω_n o la frecuencia cíclica f_n se le denomina espectro de respuesta para dicho valor. Es opción personal si la respuesta máxima se grafica en función de f_n o T_n , por lo general los ingenieros prefieren usar el período natural en lugar de la frecuencia natural, ya que el concepto de período de vibración es más familiar y por ende resulta más práctico.

3.7.1 Espectro de respuesta de deformación

En la fig. 3.7 se muestra un procedimiento para determinar el espectro de respuesta de deformación este se ha construido para el sismo El Centro y se muestra en la parte (a) de la figura 3.7, por otro lado en la parte (b) se muestra la variación en el tiempo de la deformación provocada por el sismo en el terreno en tres sistemas de 1GDL. El valor máximo de deformación $D=U$ se determina para cada sistema a partir de la historia de deformación y casi siempre, el valor pico se produce durante el sismo, pero también puede ocurrir un valor pico durante la fase de vibración libre o sea después de que el

temblor ha terminado. Para la parte (a) la deformacion maxima $D=2.76$ pulg para un sistema con un periodo natural $T_n=0.5s$ y una fraccion de amortiguamiento $\zeta=2\%$, para la parte $D= 5.97$ pulg para un sistema con un $T_n=1s$ y $\zeta=2\%$ y por ultimo un $D=7.47$ pulg para un sistema con $T_n=2s$ y $\zeta=2\%$. El valor de D determinado para cada sistema será un punto de la curva de el estectro de respuesta de deformacion los tres valores de D se identifican en la figura 3.7 parte c. igualmente los demas puntos de la curva se encuentran para un intervalo de T_n manteniendo constante el amortiguamiento $\zeta=2\%$ el espectro terminado se muestra en la figura 3.7 parte c. igualmente se vera mas adelante que el espectro de respuesta completo incluye todas las curvas de espectro para varios valores de amortiguamiento.

Fig. 3.7: (a) Aceleración del terreno , (b) respuesta de deformacion de los tres sistemas de 1 GDL con $\zeta=2\%$ y $T_n= 0.5, 1$ y 2 segundos , (c) espectro de respuesta de respuesta de deformacion para $\zeta=2\%$.



Fuente: Dinámica de estructuras de Anil K. chopra.

3.7.2 Espectro de respuesta de pseudo-velocidad

Si se relaciona la deformacion maxima $D=U=$ con una cantidad V para un sistema de un grado de libertad y una frecuencia natural ω_n debido al movimiento sismico del suelo tendremos:

$$V = \omega_n D = \frac{2\pi}{T_n} D \quad (3.2)$$

La cantidad V tiene unidades de velocidad , esta se relaciona con el valor máximo de la energia de deformacion E_{so} que almacena el sistema durante el sismo, mediante la ecuacion :

$$E_{so} = \frac{mV^2}{2} \quad (3.3)$$

La relación puede deducirse a partir de la ecuacion de energia de deformacion y la ecuacion (3.2) de la siguiente forma:

$$E_{so} = \frac{kU_0^2}{2} = \frac{kD^2}{2} = \frac{k(\frac{V}{\omega_n})^2}{2} = \frac{mV^2}{2} \text{ como se queria demostrar}$$

De aquí se puede ver que el lado derecho de la ecuacion (3.3) es la energia cinetica de la masa estructural m con una velocidad T a la cual llamaremos pseudo-velocidad

maxima. Aquí el prefijo pseudo se lo usa ya que V no es igual a la velocidad maxima relativa $\dot{U}_0$ sin embargo posee las unidades correctas.

La curva que representa el espectro de respuesta de pseudo-velocidad es funcion del periodo de vibracion natural T_n , o de la frecuencia de vibracion natural f_n , del sistema, para el movimiento de suelo de la figura 3.7 (a), podemos calcular la pseudo-velocidad maxima V del sistema con periodo natural T_n a partir de la ecuacion (3.2) y la deformacion maxima D del mismo sistema, cuyos datos se encuentran en la figura 3.7 (c) que se ha vuelto a reproducir en la figura 3.8 (a) como ejemplo hallaremos la pseudo velocidad para los siguientes periodos naturales y los desplazamientos obtenidos en la Parte (c) de figura 3.7 , cabe acotar que estos resultados son calculados para un amortiguamiento $\zeta=2\%$.

Tabla 3.1

T_n	D	$\omega = \frac{2\pi}{T_n}$	$V=\omega T_n$
0,50	2,67	12,57	33,55
1,00	5,97	6,28	37,51
2,00	7,47	3,14	23,47

Fuente: Autor

Los valores obtenidos de pseudo-velocidad maxima se muestran en la figura 3.8 (b), para terminar de construir la curva en cuestion solamente hay que repetir los calculos para un intervalo de valores T_n , manteniendo la fraccion de amortiguamiento $\zeta=2\%$ constante.

3.7.3 Espectro de respuesta de pseudo-aceleracion

Nuevamente tomamos una constante A para un sistema de 1GDL con frecuencia natural ω_n se encuentra relacionado con su deformacion maxima $D=U_0$ debido a un movimiento sismico, tendremos la siguiente relación:

$$A = \omega_n^2 D = \left(\frac{2\pi}{T_n}\right)^2 D \quad (3.4)$$

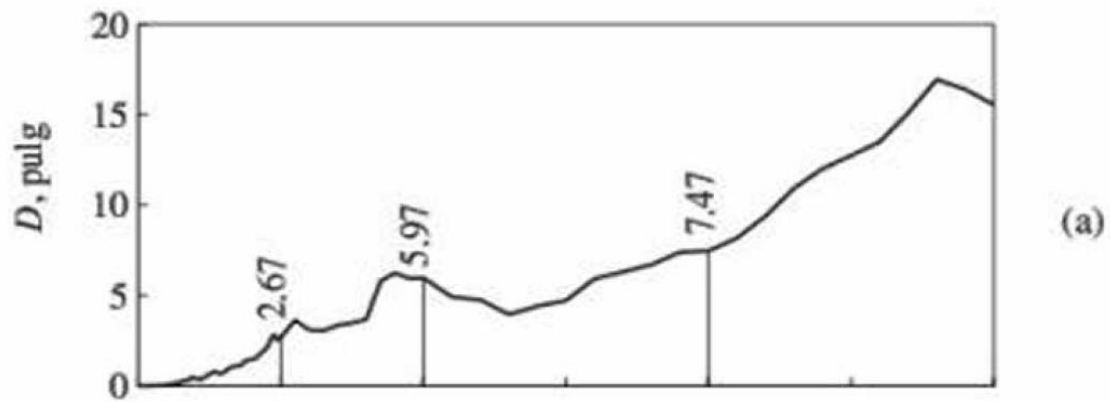
Donde la cantidad A viene dada en unidades de aceleracion y se relaciona con el valor máximo del cortante basal V_{bo} (o con el valor de la maxima fuerza estatica equivalente f_{so}).

$$V_{bo} = f_{sa} = mA \quad (3.5)$$

Donde el valor máximo de $A(t)$ en funcion del tiempo de respuesta maxima se indica mediante A , entonces la fuerza cortante basal maxima puede escribirse de la siguiente forma.

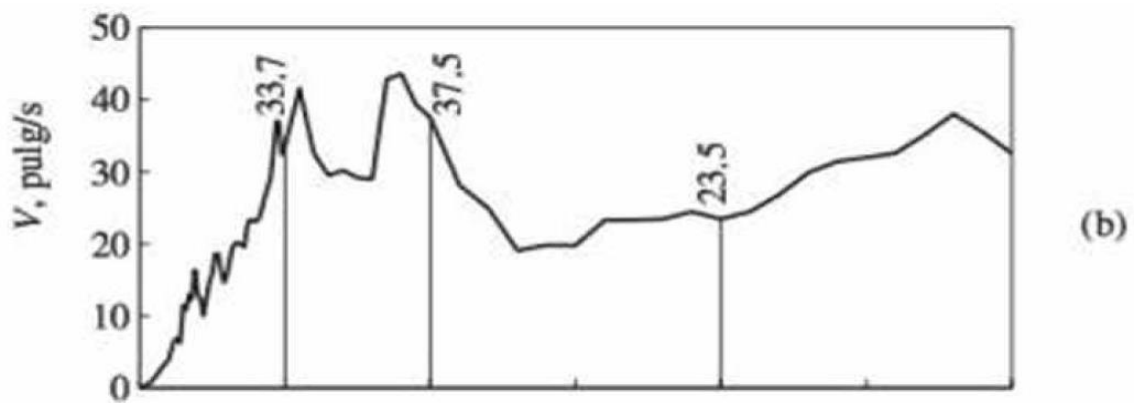
$$V_{bo} = \frac{A}{g} w \quad (3.6)$$

Fig. 3.8: (a) espectro de respuesta de deformacion para $\zeta=2\%$ repetido por comodidad da la fig. 3.7 (c). (b) espectro de respuesta de pseudo-velocidad.



Fuente: Dinámica de estructuras de Anil K. Chopra.

Fig. 3.8: (a) espectro de respuesta de deformacion para $\zeta=2\%$ repetido por comodidad da la fig. 3.7 (c). (b) espectro de respuesta de pseudo-velocidad.



Fuente: Dinámica de estructuras de Anil K. Chopra.

Donde g es la aceleración de la gravedad y w es el peso de la estructura. La relación, A/g se puede considerar como el coeficiente sísmico o el coeficiente de fuerza

lateral. Los codigos de construccion usan este coeficiente que al multiplicarlo por el peso de la estructura dara el valor del cortante basal.

La curva del espectro de pseudo-aceleracion maxima es funcion del periodo de vibracion natural T_n o de la frecuencia de vibracion natural f_n del sistema. Nuevamente para el monimiento de suelo de la figura 3.7 (a) la pseudo-aceleracion maxima A para un sistema con periodo natural T_n y fraccion de amortiguamiento γ se puede determinar a partir de la ecuacion 3.4 donde los valores obtenidos de deformacion maxima D del sistema, se encuentran en el espectro de la figura 3.7 (c) como ejemplo se obtendra el espectro de pseudo-aceleracion para los valores dados en la tabla 3.2 con una fraccion de amortiguamiento $\gamma=2\%$.

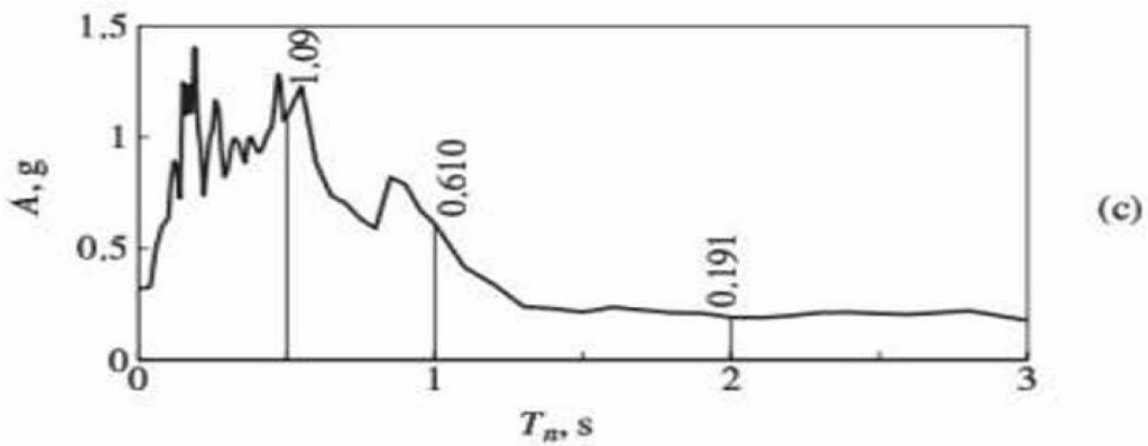
Tabla 3.2

T_n	$\left(\frac{2\pi}{T_n}\right)^2$	D	A	g	Ag
0,50	157,91	2,67	421,63	386,00	1,09
1,00	39,48	5,97	235,69	386,00	0,61
2,00	9,87	7,47	73,73	386,00	0,19

Fuente: Autor.

Igualmente si se quiere obtener los demas puntos de la curva del espectro de respuesta de pseudo-aceleracion se repiten los calculos para un intervalo de valores de T_n , manteniendo la fraccion de amortiguamiento $\gamma=2\%$ la curva terminada se muestra en la grafica 3.8.

Fig. 3.9: Espectro de respuesta de pseudo-aceleracion.



Fuente: Dinamica de estructuras de Anil K. Chopra.

3.8 Ejemplos sobre la construccion de la rerspuesta espectral

Consideremos la fig. 3.9 (a) un oscilador simple sin amortiguamiento sometido a la fuerza sinusoidal de medio ciclo, tal como se muestra en la fig. 3.9 (b) el intervalo del tiempo de duracion del impulso será t_d , se asume que el sistema parte del reposo. La ecuacion diferencial del movimiento se obtiene igualando acero la suma de las fuerzas que se muestran en la fig.3.9 (c).

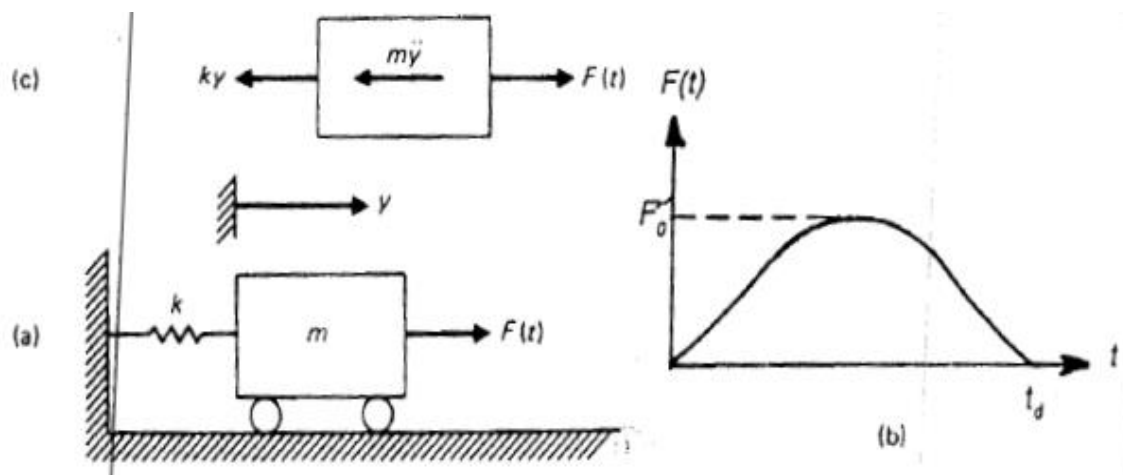
$$my'' + ky = F(t) \quad (3.7)$$

Para

$$F(t) = \begin{cases} F_0 \sin \omega t & \text{para } 0 \leq t \leq t_d \\ 0 & \text{para } t > t_d \end{cases} \quad (3.8)$$

Donde $\omega = \frac{\pi}{t_d}$ (3.9)

Fig.3.10: (a) Oscilador simple sin amortiguamiento sometido a la fuerza $F(t)$. (b) Funcion de la fuerza, $F(t)=F_0 \sin \omega t$ ($0 \leq t \leq t_d$). (c) Diagrama de cuerpo libre.



Fuente: Autor.

La solución de la ecuación 3.7 se obtiene superponiendo la solución homogénea $X_c(t)$ y la solución particular $X_p(t)$ esto es

$$X(t) = X_c(t) + X_p(t) \quad (3.10)$$

Donde:

$$X_c(t) = A \cos \omega_n t + B \operatorname{sen} \omega_n t$$

$$X_p(t) = \left(\frac{F_o}{k - m\omega^2} \right) \operatorname{sen} \omega t$$

Es decir:

$$X(t) = A \cos \omega_n t + B \operatorname{sen} \omega_n t + \left(\frac{F_o}{k - m\omega^2} \right) \operatorname{sen} \omega t \quad (3.11)$$

Donde A y B son constantes y ω_n es la frecuencia natural del sistema

$$\omega_n = \frac{2\pi}{\tau_n} = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (3.12)$$

Aprovechando las condiciones iniciales $X(0) = X'(0) = 0$ derivamos la ecuación 3.11 y determinamos las constantes A y B como sigue:

$$X(0) = A \cos \omega_n(0) + B \operatorname{sen} \omega_n(0) + \left(\frac{F_o}{k - m\omega^2} \right) \operatorname{sen} \omega(0) \quad A=0$$

$$X'(t) = -A \omega_n \operatorname{sen} \omega_n t + B \omega_n \cos \omega_n t + \left(\frac{F_o}{k - m\omega^2} \right) \omega \cos \omega t \quad (3.13)$$

$$X'(0) = -A \omega_n \operatorname{sen} \omega_n(0) + B \omega_n \cos \omega_n(0) + \left(\frac{F_o}{k - m\omega^2} \right) \omega \cos \omega(0)$$

$$B = \left(-\frac{F_o \omega}{\omega_n(k - m\omega^2)} \right)$$

La solucion final es:

$$X(t) = \left(-\frac{F_0 \omega}{\omega_n(k-m\omega^2)} \right) \text{sen } \omega_n t + \left(\frac{F_0}{k-m\omega^2} \right) \text{sen } \omega t$$

$$X(t) = \frac{F_0/k}{1-(\omega/\omega_n)^2} \left\{ \text{sen } \omega t - \frac{\omega}{\omega_n} \text{sen } \omega_n t \right\} \quad 0 \leq t \leq t_0 \quad (3.14)$$

Esta se puede escribir como

$$\frac{X(t)}{\delta_{est}} = \frac{1}{1-\left(\frac{\tau_n}{2t_0}\right)^2} \left\{ \text{sen } \frac{\pi t}{t_0} - \frac{\tau_n}{2t_0} \text{sen } \frac{2\pi t}{\tau_n} \right\} \quad 0 \leq t \leq t_0 \quad (3.15)$$

$$\delta_{est} = \frac{F_0}{k}$$

La solucion dada por la ecuacion 3.15 solo es valida para el intervalo de tiempo comprendido entre $0 \leq t \leq t_0$. Ya que despues de este intervalo la fuerza F_0 deja de actuar y la solucion se expresara como una solucion de vibracion libre:

$$X(t) = A' \cos \omega_n t + B' \text{sen } \omega_n t \quad t > t_0$$

Pra esta ecuacion las constantes A' y B' se determinan vsando los valores de $X(t = t_0)$ y $X'(t = t_0)$ dados en la ecuacion 3.15 con las condiciones iniciales durante $t > t_0$ esto es:

$$X(t) = \alpha \left(\text{sen } \frac{\pi t}{t_0} - \frac{\tau_n}{2t_0} \text{sen } \frac{2\pi t}{\tau_n} \right) \quad \alpha = \frac{\delta_{st}}{1-\left(\frac{\tau_n}{2t_0}\right)^2}$$

$$X(t = 0) = \alpha \left(\text{sen } \frac{\pi t_0}{t_0} - \frac{\tau_n}{2t_0} \text{sen } \frac{2\pi t_0}{\tau_n} \right) = -\alpha \frac{\tau_n}{2t_0} \text{sen } \frac{2\pi t_0}{\tau_n} \quad (A1)$$

$$X'(t) = \alpha \left(\frac{\pi}{t_0} \cos \frac{\pi t}{t_0} - \frac{\tau_n}{2t_0} \frac{2\pi}{\tau_n} \cos \frac{2\pi t}{\tau_n} \right)$$

$$X'(t = 0) = \alpha \left(\frac{\pi}{t_0} \cos \frac{\pi t_0}{t_0} - \frac{\pi}{t_0} \cos \frac{2\pi t_0}{\tau_n} \right) = \alpha \left(\frac{\pi}{t_0} - \frac{\pi}{t_0} \cos \frac{2\pi t_0}{\tau_n} \right) \quad (B1)$$

Igualando las ecuaciones A y B con la funcion y despues con la primera derivada

$$- \alpha \frac{\tau_n}{2t_0} \operatorname{sen} \frac{2\pi t_0}{\tau_n} = A' \cos \omega_n t_0 + B' \operatorname{sen} \omega_n t_0 \quad (C1)$$

$$\alpha \left(\frac{\pi}{t_0} - \frac{\pi}{t_0} \cos \frac{2\pi t_0}{\tau_n} \right) = -A' \omega_n \operatorname{sen} \omega_n t_0 + B' \omega_n \operatorname{sen} \omega_n t_0 \quad (D1)$$

$$A' = \frac{-\alpha \frac{\tau_n}{2t_0} \operatorname{sen} \omega_n t_0 \quad \operatorname{sen} \omega_n t_0}{\frac{\alpha \left(\frac{\pi}{t_0} - \frac{\pi}{t_0} \cos \omega_n t_0 \right) \quad \omega_n \cos \omega_n t_0}{\cos \omega_n t_0 \quad \operatorname{sen} \omega_n t_0}} = -\frac{\alpha \pi}{t_0 \omega_n} \operatorname{sen} \omega_n t_0$$

Sin olvidar $\omega_n = \frac{2\pi}{\tau_n}$

Y reemplazando A' en cualquiera de las ecuaciones C1 o D1 obtendremos B' escogemos C1:

$$- \alpha \frac{\tau_n}{2t_0} \operatorname{sen} \omega_n t_0 = -\frac{\alpha \pi}{\omega_n t_0} \operatorname{sen} \omega_n t_0 \cos \omega_n t_0 + B' \operatorname{sen} \omega_n t_0$$

$$-\frac{\alpha \pi}{\omega_n t_0} + \frac{\alpha \pi}{\omega_n t_0} \cos \omega_n t_0 = B'$$

$$B' = -\frac{\alpha \pi}{\omega_n t_0} (1 - \cos \omega_n t_0)$$

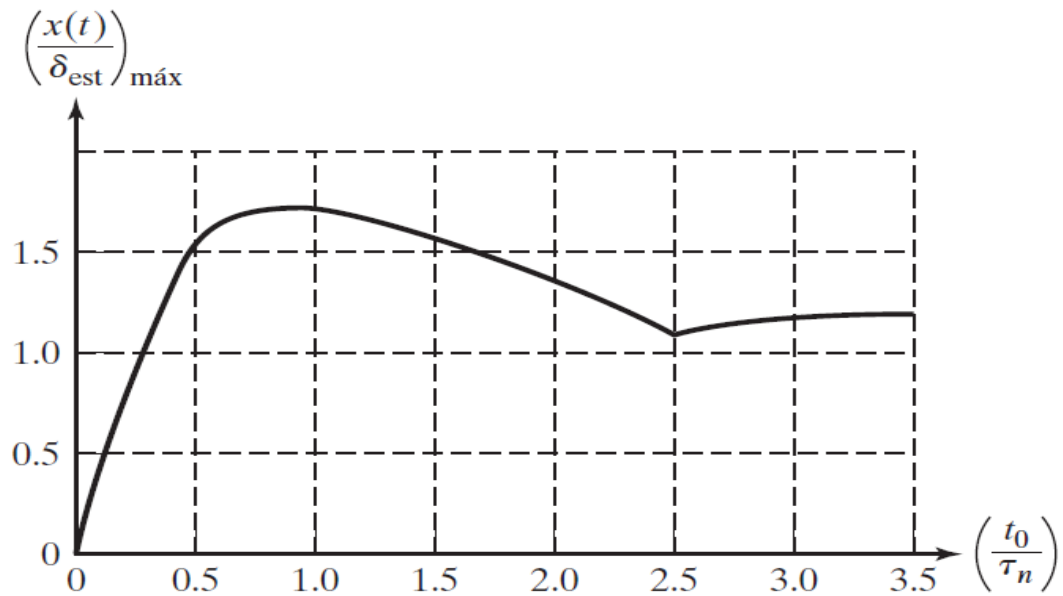
Reemplazando las soluciones de A y B obtendremos la solucion final será:

$$X(t) = -\frac{\alpha \pi}{t_0 \omega_n} \operatorname{sen} \omega_n t_0 \cos \omega_n t - \frac{\alpha \pi}{\omega_n t_0} (1 - \cos \omega_n t_0) \operatorname{sen} \omega_n t$$

$$X(t) = -\frac{\alpha \pi}{t_0 \omega_n} (\sin \omega_n t_0 \cos \omega_n t + \sin \omega_n t - \cos \omega_n t_0 \sin \omega_n t)$$

$$\frac{X(t)}{\delta_{est}} = -\frac{\frac{\tau_n}{t_0}}{2\left(1 - \left(\frac{\tau_n}{2t_0}\right)^2\right)} \left(\sin 2\pi \left(\frac{t_0}{\tau_n} - \frac{t}{\tau_n}\right) + \sin 2\pi \frac{t}{\tau_n} \right) \quad (3.16) \quad t \geq t_0$$

Fig.3.11: espectro de respuesta debido a un pulso senusoidal.



Fuente: Vibraciones mecanicas S. Rao.

Capítulo 4

4.1 Espectro de diseño

Para la construcción del espectro de diseño de la ciudad de Guayaquil hay que considerar primeramente que esta se encuentra en una zona sísmica muy alta con un valor de factor $Z = < 0.50$. Segundo en la NEC 15 se definen seis tipos de perfil de suelos para la ciudad de Guayaquil tomaremos para el ejemplo, el tipo de perfil E.

Tabla 4 A. Clasificación de los perfiles de suelos.

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$V_s \geq 1500 \text{ m/s}$
B	Perfil de roca de rigidez media	$1500 \text{ m/s} > V_s \geq 760 \text{ m/s}$
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$760 \text{ m/s} > V_s \geq 360 \text{ m/s}$

Fuente: NEC 15.

Una vez identificados los valores de Z y el perfil del tipo del suelo que para nuestro caso es el D obtenemos los valores de los coeficientes de perfil de suelo F_a , F_d y F_s , para los modos de vibración distintos al fundamental con procedemos a calcular los coeficientes T_0 y T_c , cabe decir que es en este intervalo donde se produce la meseta o pico del espectro de diseño. Una vez obtenidos los valores de T_0 y T_c , procedemos a calcular las tres ordenadas que forman el espectro elástico, la primera ordenada será F_a para los periodos distintos del fundamental, la segunda ordenada será $\eta Z F_a$, la cual representa el valor pico o meseta, como se mencionó anteriormente esta se encuentra comprendida en el intervalo (T_0, T_c) en donde $\eta = 1.8$ para las provincias de las costas

exceptuando Esmeraldas y por ultimo la segunda ordenada que será multiplicada por $\left(\frac{T_c}{T}\right)^r$ para $T > T_c$ con un valor de $r = 1$. En la tabla 4.3 se muestra el calculo para el espectro elastico de diseño de la ciudad de Guayaquil, y en la figura 4.1 se muestra el espectro elastico de diseño, el cual esta calculado para un amortiguamiento del 5% con respecto al critico esta grafica se obtiene mediante las siguientes ecuaciones validas para los periodos de vibracion estructural T .

$$S_a = \eta Z F_a \quad \text{Para } 0 \leq T \leq T_c \quad 4.0$$

$$S_a = \eta Z F_a \left(\frac{T_c}{T}\right)^r \quad \text{Para } T > T_c \quad 4.1$$

La eleccion del tipo de suelo para este ejenplo se lo va a tomar como un suelo de tipo E.

Tabla 4 B. Clasificacion de los perfiles de suelos.

Tipo de perfil	Descripción	Definición
	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$N \geq 50.0$ $S_u \geq 100 \text{ KPa}$
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$360 \text{ m/s} > V_s \geq 180 \text{ m/s}$
	Perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > N \geq 15.0$ $100 \text{ kPa} > S_u \geq 50 \text{ kPa}$
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$V_s < 180 \text{ m/s}$
	Perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	$IP > 20$ $w \geq 40\%$ $S_u < 50 \text{ kPa}$
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista. Se contemplan las siguientes subclases:	
	F1—Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como; suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc.	
	F2—Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H > 3m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas).	
	F3—Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7.5 m con índice de Plasticidad IP > 75)	
	F4—Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H > 30m)	
	F5—Suelos con contrastes de impedancia α ocurriendo dentro de los primeros 30 m superiores del perfil de subsuelo, incluyendo contactos entre suelos blandos y roca, con variaciones bruscas de velocidades de ondas de corte.	
	F6—Rellenos colocados sin control ingenieril.	

Fuente: NEC 15.

En la tabla 4 A se muestra la clasificacion de los perfiles de suelos, para los tipos A, B y C.. Y en la 4 B para los tipo D, E y F.

NOTA: el autor conoce que para gran parte de la ciudad de Guayaquil se puede tomar el tipo de perfil de suelo como E. Para acotar por ultimo en los suelo tipo E se pide que la velocidad de cortante sea mayor a 180 m/s que vendria a ser la mayor velocidad de todos los tipos de suelo evaluados bajo esta condicion, se sabe que las ondas de cortante se mueven mas rapido en suelos blandos y arcillosos que en los suelos rocosos y ya que la mayor parte de los suelos de la ciudad de Guayaquil son rellenos de mala calidad y otra parte se puede considerar como arcillas, es en estos tipos de suelos donde las ondas de cortante alcanzan una mayor velocidad, lo que da una justificacion razonable de la eleccion del tipo de perfil de suelo E.

Calculo del periodo T_c (seg)

Tipo de suelo	E	E	E
Factor Z	$\geq 0,5$	$\geq 0,5$	$\geq 0,5$

Fa	Fd	Fs	$T_c = 0.55 F_s \frac{F_d}{F_a} \text{ (s)}$
0,85	1,50	2,00	1,941

Tabla 4.1 Calculo del periodo T_c (s).

Fuente: NEC 15. Autor

Calculo de la aceleracion (g) en funcion de Tc (s).

z (g)	Fa	z*Fa (g)
0,50	0,85	0,425
z*Fa(g)	η	$\eta*z*Fa(g)$
0,425	1,80	0,765

$\eta*z*Fa(g)$	Tc(s)
0,765	1,941

Tabla 4.2 Calculo de la aceleracion (g) en funcion de Tc (s).

Fuente NEC 15. Autor

Valores numericos del espectro de diseño para la ciudad de Guayaquil.

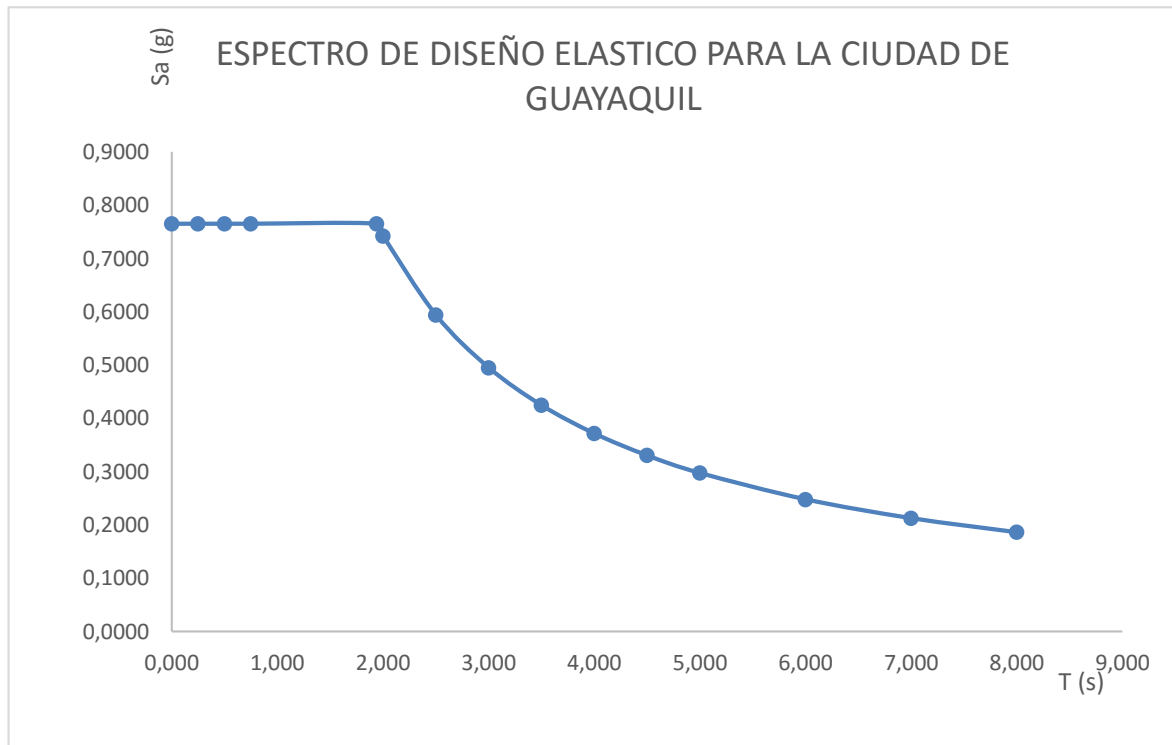
Tabla 4.3 Valores numericos para graficar el espectro elastico de diseño.

T (s)	$\eta * z * Fa * \left(\frac{Tc}{T}\right)^r$	r
0,000	0,7650	1
0,25	0,7650	
0,50	0,7650	
0,75	0,7650	
1,94	0,7650	
2,00	0,7425	
2,50	0,5940	
3,00	0,4950	
3,50	0,4243	
4,00	0,3713	
4,50	0,3300	
5,00	0,2970	
6,00	0,2475	
7,00	0,2121	
8,00	0,1856	

Fuente: NEC. 15 Autor.

En la figura 4.1 se muestra la grafica del espectro elastico de diseño para un periodo de 8 seg notese que el valor maximmo de la aceleracion es de 0,7650 g.

Fig. 4.1 Espectro elastico de diseño para la ciudad de Guayaquil.



Fuente: NEC 15. Autor.

Para el diseño sísmico las ordenadas del espectro elástico se dividen por R de esta forma el espectro se convierte de elástico a inelástico, en la tabla 4.4 se muestran los valores numéricos del espectro inelástico. **Notese la similitud de los datos con respecto al espectro del programa SAP 2000 vs. 17**, que actualmente trae incorporado el espectro de la Norma Ecuatoriana De La Construcción NEC 15.

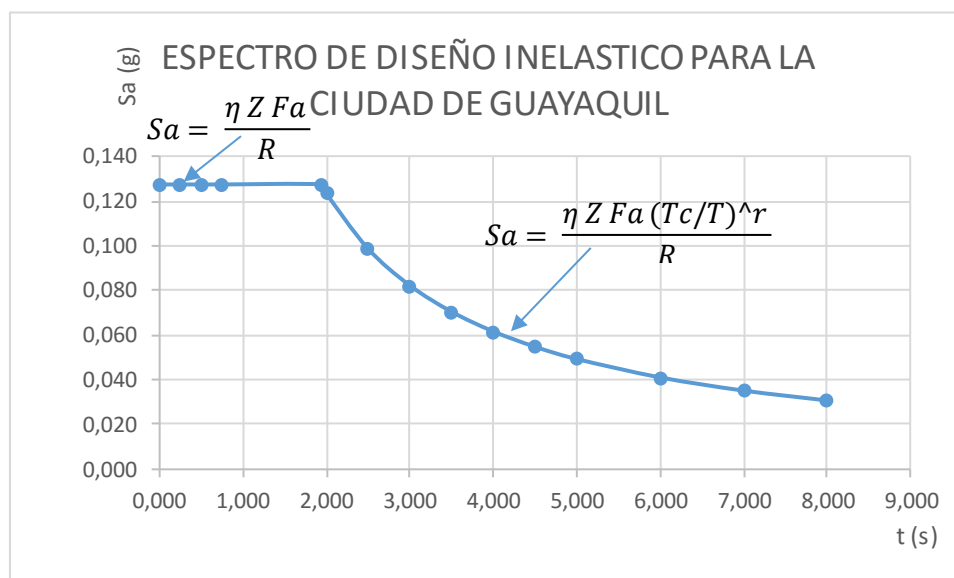
Tabla 4.4 Valores numericos para graficar el espectro

inelastico de diseño.

T (s)	$\eta * z * Fa * \left(\frac{Tc}{T}\right)^r$
0,000	0,128
0,250	0,128
0,500	0,128
0,750	0,128
1,941	0,128
2,000	0,124
2,500	0,099
3,000	0,083
3,500	0,071
4,000	0,062
4,500	0,055
5,000	0,050
6,000	0,041
7,000	0,035
8,000	0,031

Fuente: NEC. 15 Autor.

Fig. 4.2 Espectro inelastico de diseño para la ciudad de Guayaquil.



Fuente: NEC 15. Autor.

4.2 Modelamiento de un edificio de 4 pisos usando el espectro de diseño.

Como ejemplo modelaremos un edificio de 4 pisos en SAP 2000 V.17 usando el espectro de la figura 4.1. El edificio es de tipo multifamiliar de hormigón armado, consta de cuatro pisos, la altura entre pisos es igual a 3.00 m los datos que se van a usar son los siguientes:

$$E_c = 15000\sqrt{f'_c}$$

$$f'_c = 280 \text{ Kg/cm}^2$$

$$f'_y = 4200 \text{ Kg/cm}^2$$

Columnas C1 primer y segundo piso

Peralte bruto = 40 cm

Ancho = 40 cm

Columnas C2 tercer y cuarto piso

Peralte bruto = 30 cm

Ancho = 30 cm

Vigas V1 primer y segundo piso

Peralte bruto = 40 cm

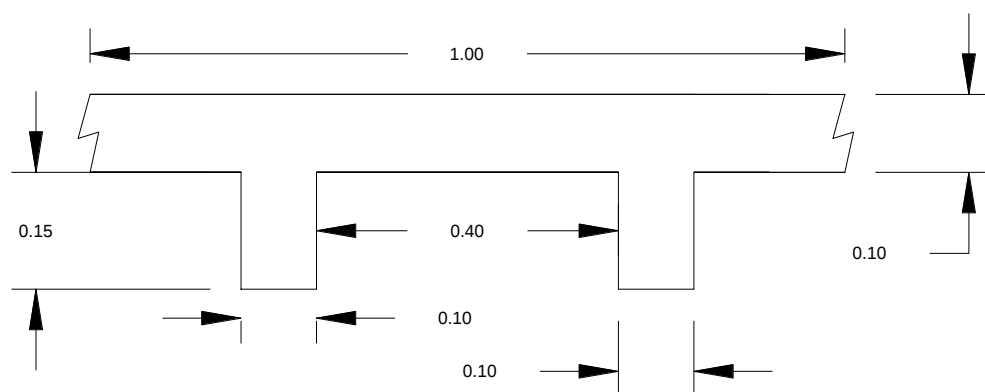
Ancho = 25 cm

Vigas V2 tercer y cuarto piso

Peralte bruto = 30 cm

Ancho = 20 cm

Fig. 4.3 Corte de losa



Fuente. Autor.

Peso por carga muerta por m²

$$V_{ha} = V_t - V_{blo}$$

V_{ha} = volumen de hormigón

V_t = volumen total

V_{blo} = volumen de los bloques (cajo netas)

$$V_t = 1 \times 1 \times 0.25 = 0.25 \text{ m}$$

$$V_{blo} = 0.8 \times 1 \times 0.15 = 0.12 \text{ m}$$

$$V_{ha} = 0.13 \text{ m}$$

$$\text{Peso de hormigón} = 0.13\text{m} \cdot 2.4\text{T/m}^3 = 0.312 \text{ T/m}^2$$

$$\text{Peso de los bloques} = 0.12\text{m} \cdot 0.85 \text{ T/m}^3 = 0.102 \text{ T/m}^2$$

$$\text{Peso de la losa} = 0.414 \text{ T/m}^2$$

$$\text{Peso de la losa} = 0.414 \text{ T/m}^2$$

$$\text{Peso de enlucido e} = 0.015\text{m} \cdot 2\text{T/m}^3 = 0.030 \text{ T/m}^2$$

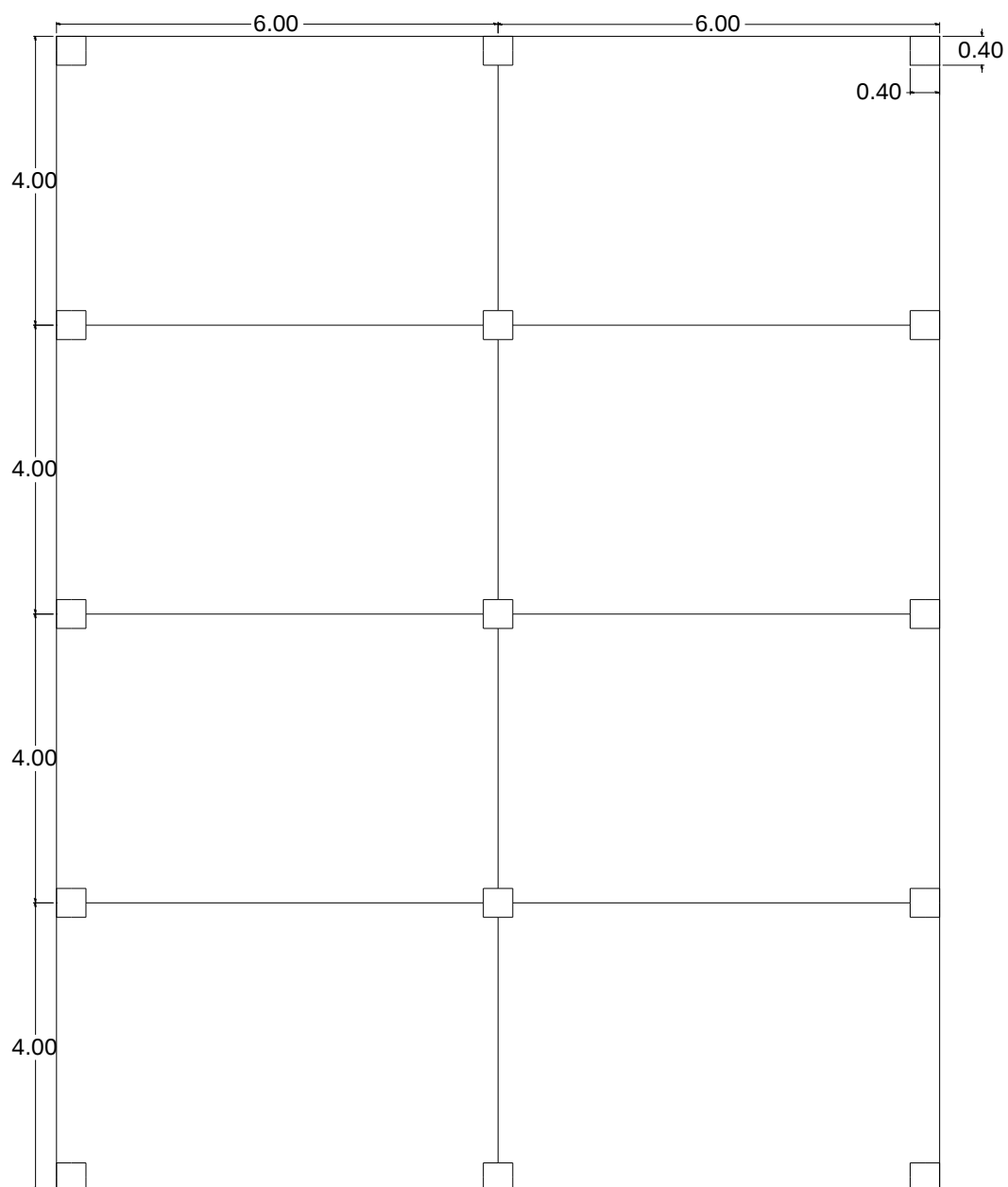
$$\text{Peso de cerámica} = 0.020 \text{ T/m}^2$$

$$\text{Peso de cielo raso} = 0.020 \text{ T/m}^2$$

$$\text{Peso propio paredes} = 0.200 \text{ T/m}^2$$

$$\text{Peso total} = 0.684 \text{ T/m}^2 \sim 0.7 \text{ T/m}^2$$

Fig. 4.4 vista en planta del edificio.



Fuente: Autor.

Metrado de cargas

$$Q_m = 0.7 \text{ T/m}^2$$

$$q_s = Q_m * \frac{s}{3}$$

$$q_l = q_s \left(3 - \frac{m^2}{2} \right) \text{ donde } m = \frac{s}{l}$$

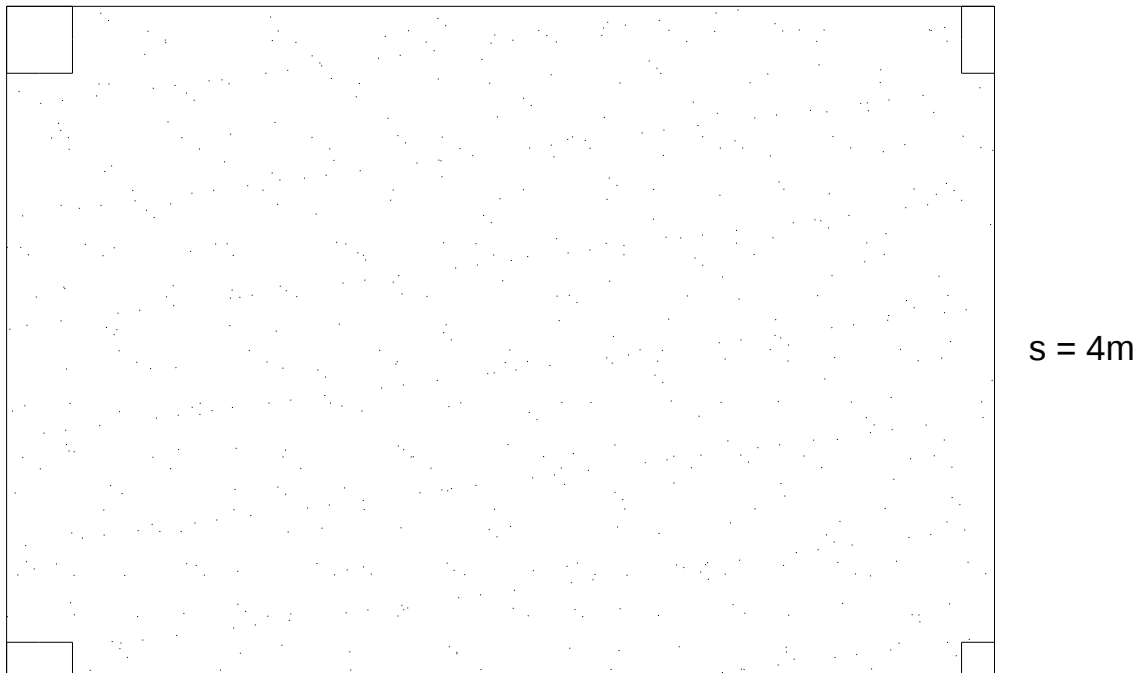
Metrado de cargas para el 1 2 y 3 piso

$$q_s = 700 \text{ kg/m}^2 * 4/3 \text{ m} = 933.33 \text{ kg/m} = 0.93 \text{ T/m}$$

$$q_l = 933.33 * \left(3 - \frac{0.66^2}{2} \right) = 2592.58 \text{ kg/m} = 2.59 \text{ T/m} \quad \text{donde } m = 4/6 = 0.66$$

Fig. 4.5 área del paño que se va a calcular.

$$L = 6 \text{ m}$$



Fuente: Autor.

Metrado de cargas para el 4 piso

En el último piso descontamos el peso propio de las paredes quedando $Q_m = 500 \text{ kg/m}^2$

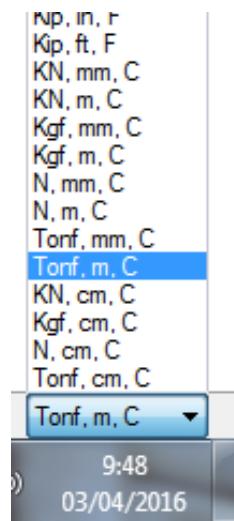
$$q_s = 500 \text{ kg/m}^2 * 4/3 \text{ m} = 666.67 \text{ kg/m} = 0.67 \text{ T/m}$$

$$q_l = 666.67 * \left(3 - \frac{0.66^2}{2} \right) = 1851.85 \text{ kg/m} = 1.85 \text{ T/m} \quad \text{donde } m = 4/6 = 0.66.$$

4.3 Didáctica e inteligencia del SAP 2000 V. 17 para la modelación espacial del edificio de 4 pisos.

Primero usamos las unidades correspondientes seleccionando la viñeta que se encuentra en la parte derecha inferior de la ventana y escogemos las unidades Ton.m.c.

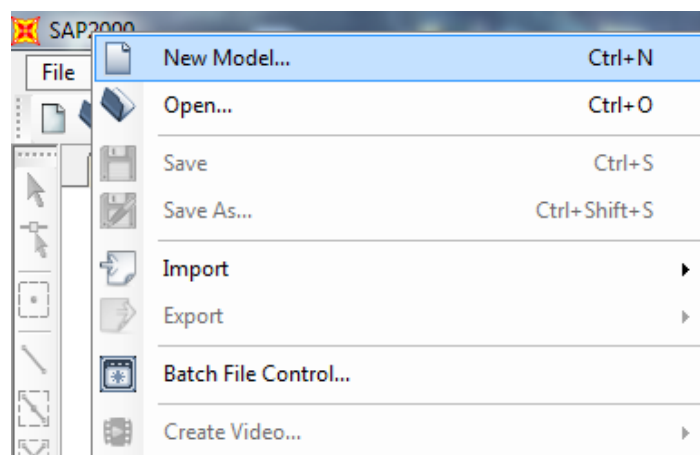
Fig. A1: Elección de las unidades correspondientes.



Fuente Autor

Luego vamos a la opción File y seleccionamos el comando New Model.

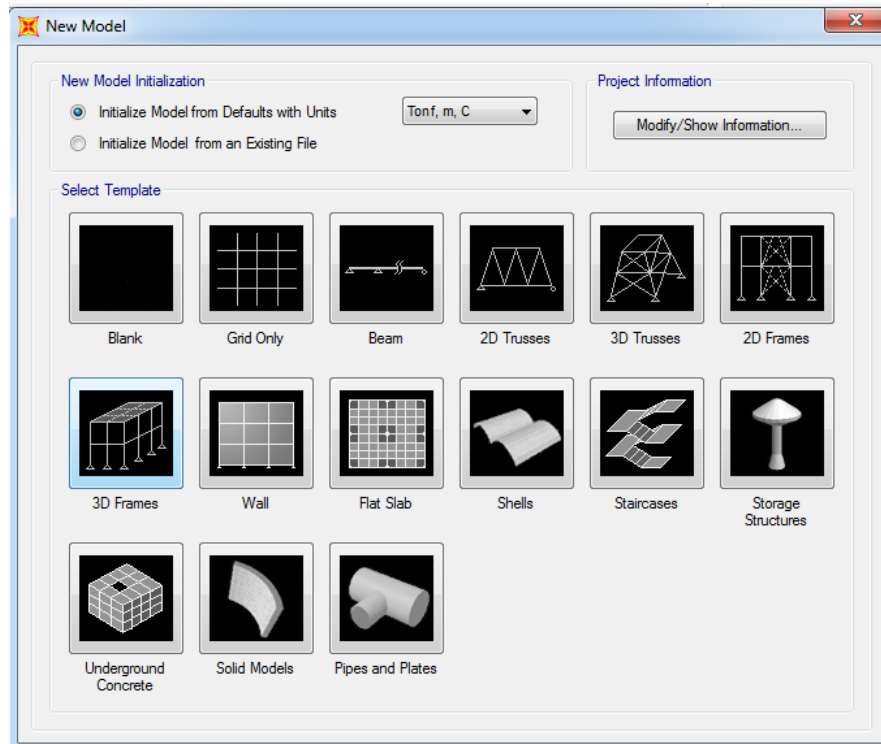
Fig. A2: Seleccionamos un nuevo modelo.



Fuente: Autor

Seleccionamos la opción que se muestra en el cuadro de la figura A3, esta tiene escrito en la parte inferior 3D Frame.

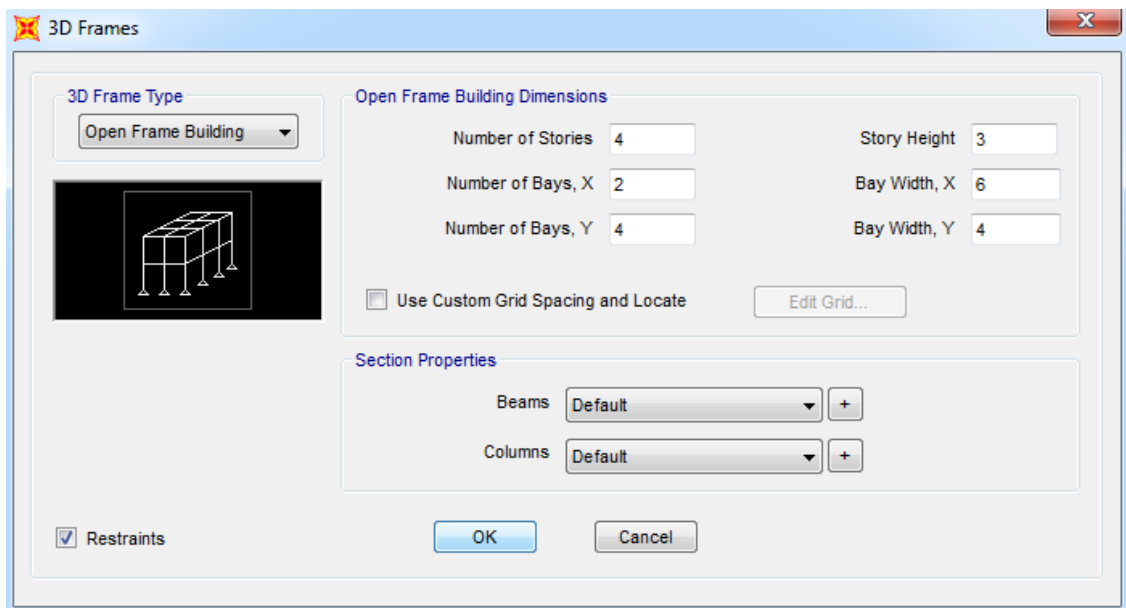
Fig.A3: Selección del modelo 3D frame.



Fuente: Autor.

A continuación aparecerá el cuadro que aparece en la figura A4 lo llenamos con los datos que se ven en la figura A4.

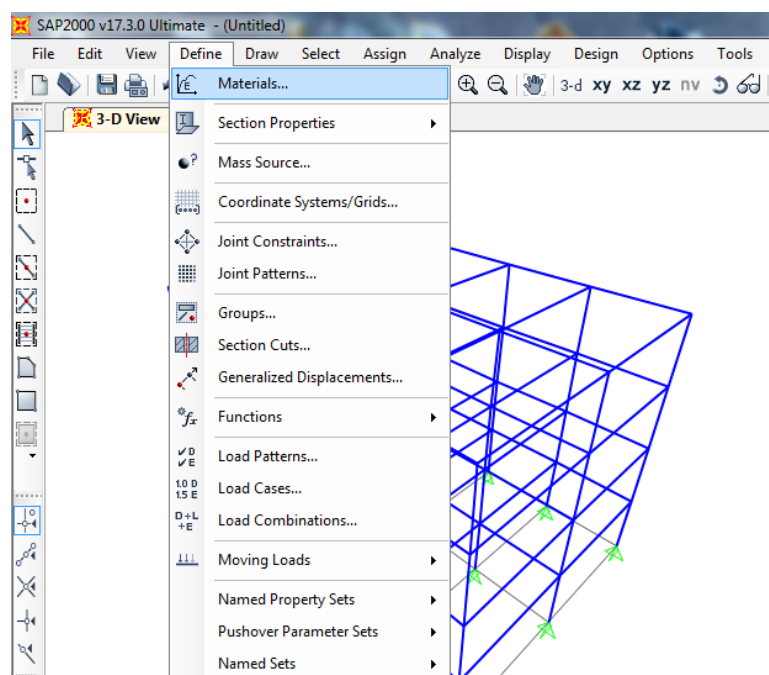
Fig.A4: Creación de la malla en 3D.



Fuente: Autor.

Seguido aparecerá la malla en 3D a continuación pasamos a crear materiales y secciones

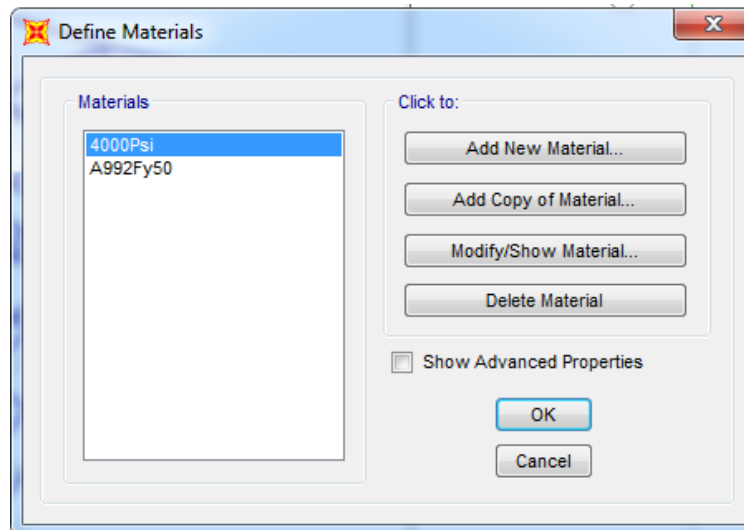
Fig. A5: Malla en 3D que representa el edificio a ser analizado.



Fuente: Autor.

Para crear los materiales vamos a la opción Define Materials, se tomara el modulo elástico del hormigón como $15000\sqrt{f'c}$, con su correspondiente $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$.

Fig. A6 1: Modificación del hormigón a usar, con un $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$.



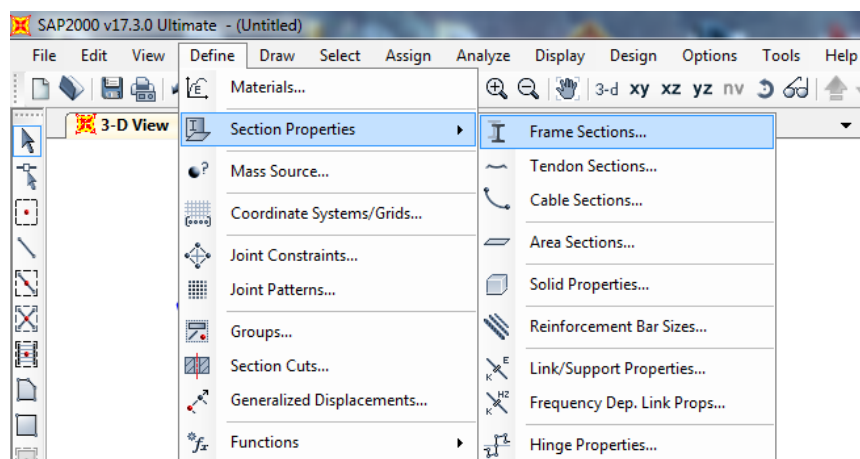
Fuente: Autor.

Fig.A6 2: Creación del hormigón a usar con un $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$.

Fuente: Autor.

Luego se procederá a definir las propiedades de las secciones de las columnas, vigas y de las losas aligeradas para eso vamos a la opción Define- Section Properties-Frame Sections

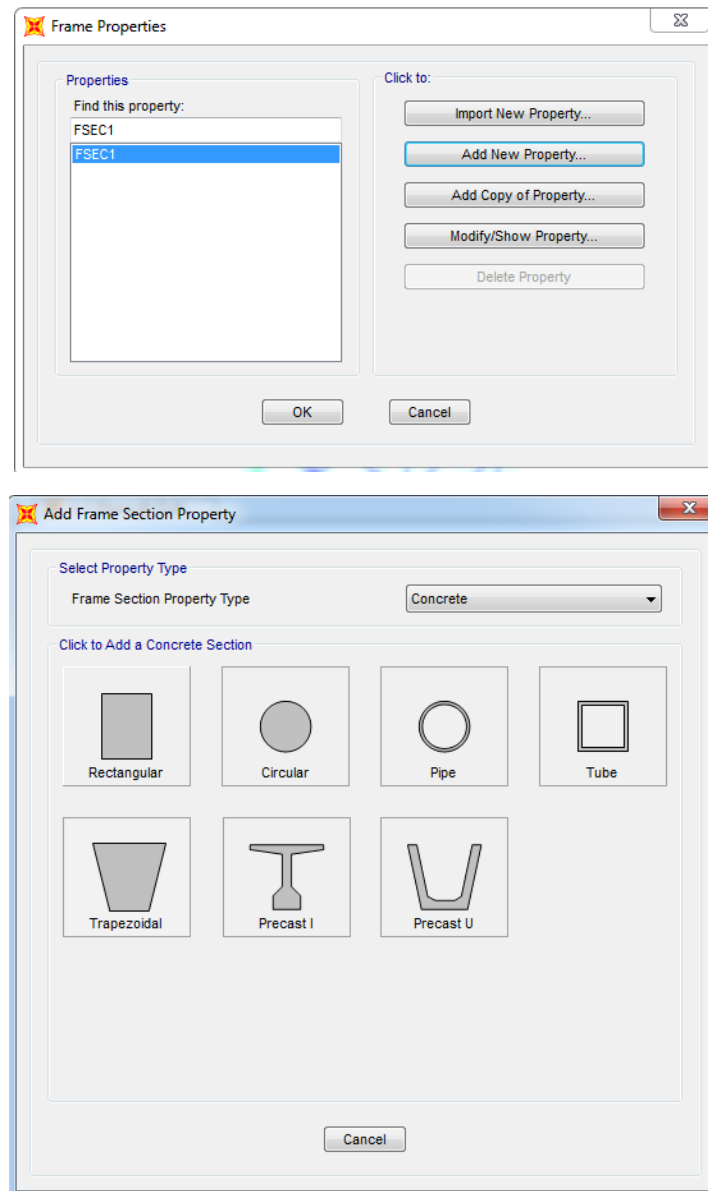
Fig. A7: Creación de las secciones.



Fuente: Autor.

A continuación se muestra la secuencia de los pasos en las fig A8 Primero aparecera el cuadro superior Frame Properties y de ahí damos click en la sentencia Add New Property seguido aparecera el cuadro de abajo y escogemos la opción concreto luego damos clic en el cuadro que tiene en la parte inferior, como nombre rectangular.

Fig. A8 1: Procedimiento para definir las columnas y vigas.



Fuente: Autor.

Se procede a llenar los datos que se encuentran en los cuadros de la figura A8 2 para las columnas. del primer y segundo nivel las sección será de 40*40 cm y para el tercer y cuarto piso se tomara una sección de 30*30 cm. No hay que olvidar que se tomara una sección agrietada para las columnas sera del 0,8 de la inercia de la sección de la columna, tanto en el eje 2 como en eje 3.

Fig. A8 2: Procedimiento para definir las columnas.

The dialog box is titled 'Section Properties' and contains the following fields and buttons:

- Section Name:** COL 40*40
- Display Color:** Yellow
- Section Notes:** Modify/Show Notes...
- Dimensions:**
 - Depth (t3): 0,40
 - Width (t2): 0,40
- Material:** CONC 280
- Property Modifiers:** Set Modifiers...
- Concrete Reinforcement...** button
- Section:** A diagram showing a square section with a grid of reinforcement bars (8 bars in total, 4 on each side).
- Properties:**
 - Section Properties...
 - Time Dependent Properties...
- OK** and **Cancel** buttons at the bottom.

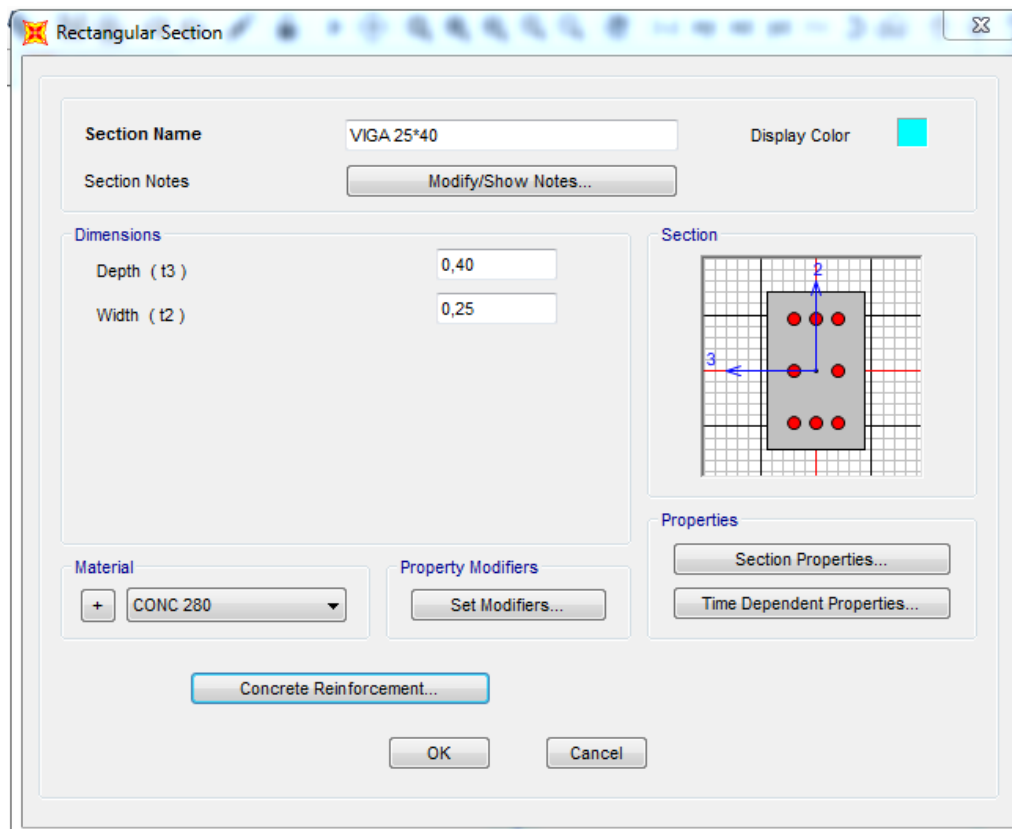
The dialog box is titled 'Frame Property/Stiffness Modification Factors' and contains the following fields and buttons:

- Property/Stiffness Modifiers for Analysis:**
 - Cross-section (axial) Area: 1
 - Shear Area in 2 direction: 1
 - Shear Area in 3 direction: 1
 - Torsional Constant: 1
 - Moment of Inertia about 2 axis: 0,8
 - Moment of Inertia about 3 axis: 0,8
 - Mass: 1
 - Weight: 1
- OK** and **Cancel** buttons at the bottom.

Fuente: Autor.

A continuacion se muestra el cuadro para crear las vigas, el primer y segundo piso se tomara la seccion de 25*40 cm y para las del tercer y cuarto piso se tomara una seccion de 20*30 cm. Al igual que con las columnas, para la vigas se tomara una inercia agrietada el 0,5 de la seccion de las vigas, acotando que solo se tomara para el eje 2.

Fig. A9: Sección de vigas definidas.



Rectangular Section

Section Name: VIGA 25*40 Display Color: ■

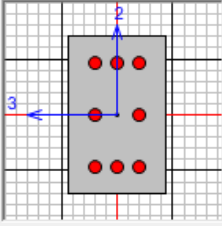
Section Notes: Modify/Show Notes...

Dimensions

Depth (t3): 0,40

Width (t2): 0,25

Section



Material

+ CONC 280

Property Modifiers

Set Modifiers...

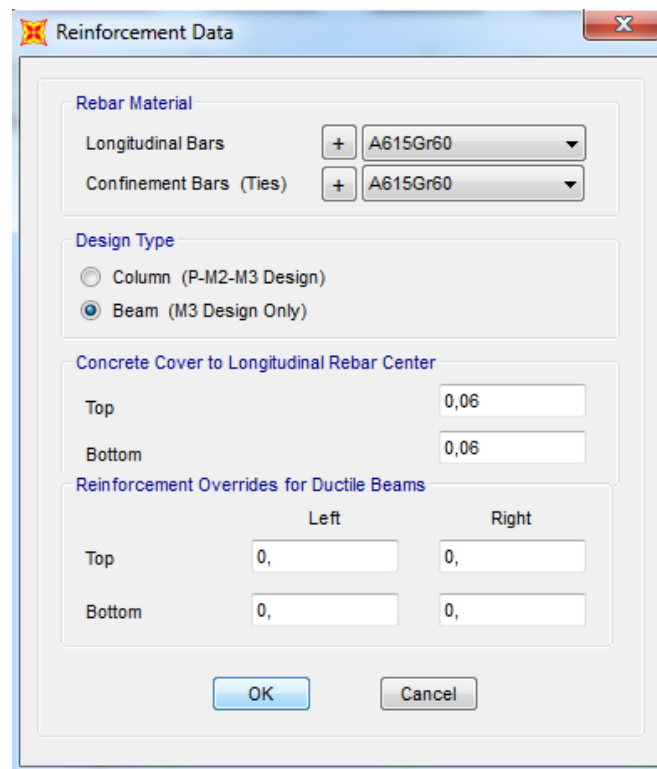
Properties

Section Properties...

Time Dependent Properties...

Concrete Reinforcement...

OK Cancel



Reinforcement Data

Rebar Material

Longitudinal Bars: + A615Gr60

Confinement Bars (Ties): + A615Gr60

Design Type

☐ Column (P-M2-M3 Design)

☒ Beam (M3 Design Only)

Concrete Cover to Longitudinal Rebar Center

Top: 0,06

Bottom: 0,06

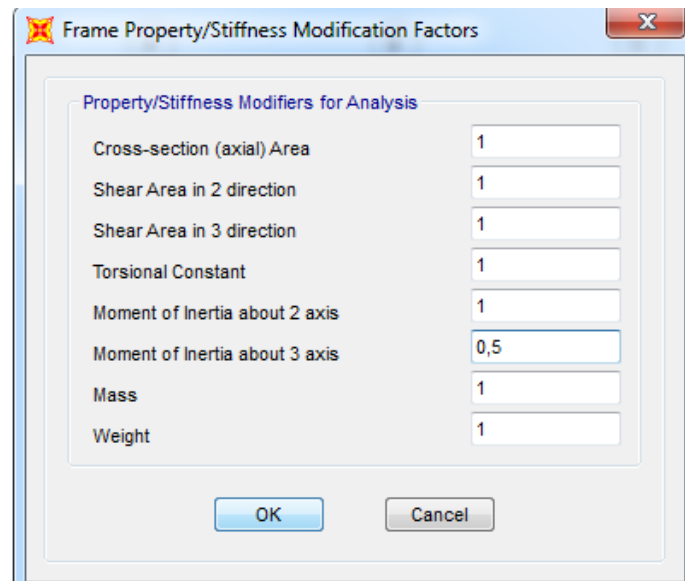
Reinforcement Overrides for Ductile Beams

	Left	Right
Top	0,	0,
Bottom	0,	0,

OK Cancel

Fuente: Autor

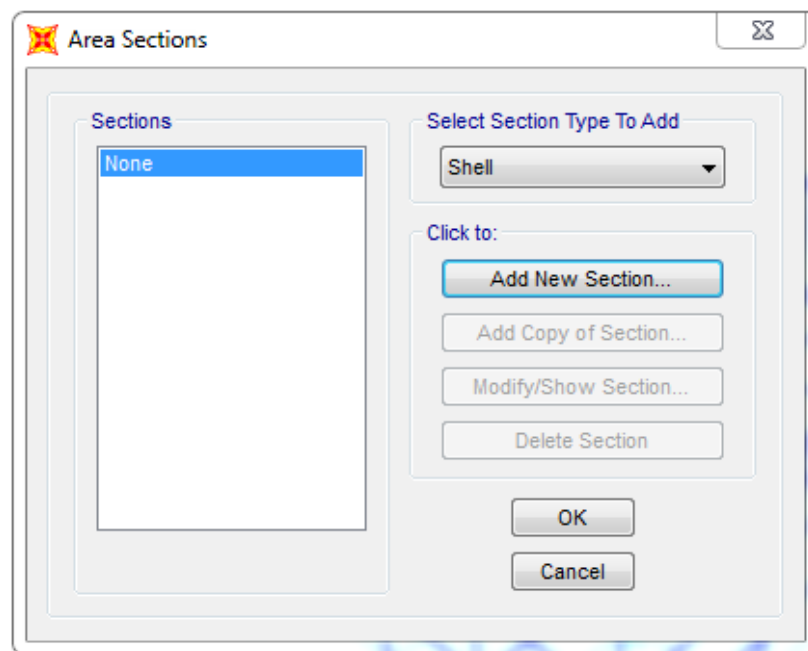
Fig. A10: Inercia agrietada de la viga con respecto al eje 2



Fuente: Autor.

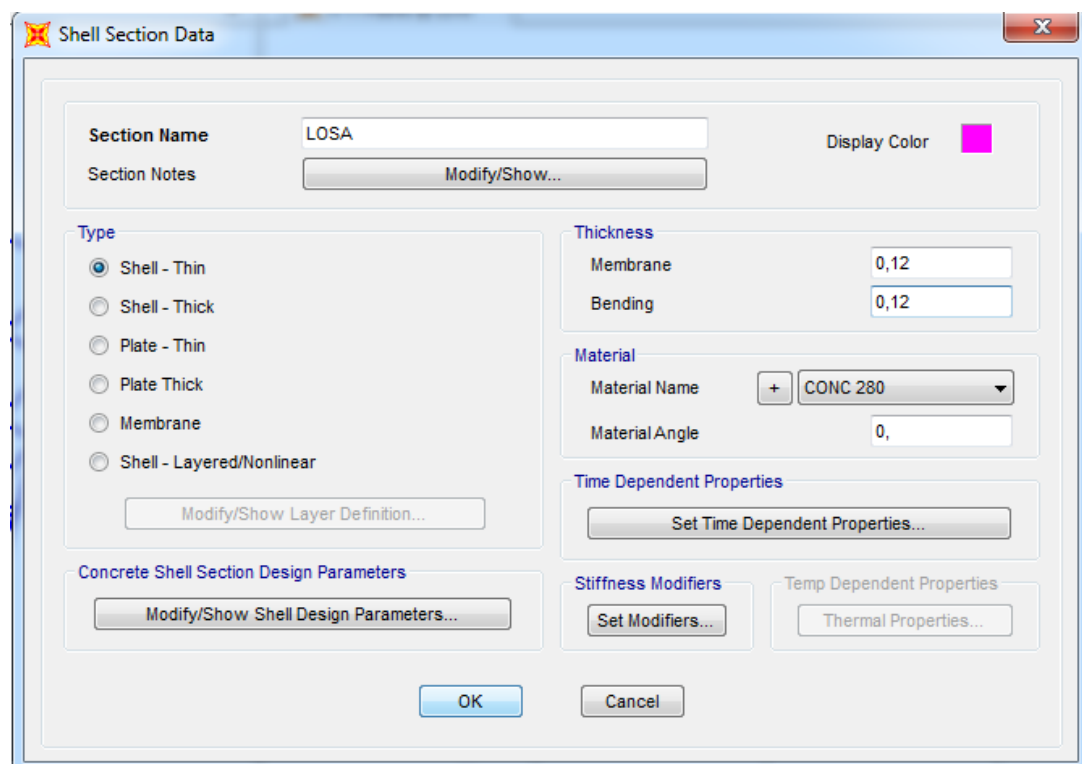
Ahora se definiran las losas para nuestro caso el espesor de la losa es de 25 cm sin embargo para ingresar el valor al programa SAP 2000 vs. 17 vamos a tomar un valor de espesor equivalente este valor será de 12 cm esto se debe a que nuestra losa es aligerada y no tenemos un valor uniforme de hormigón si no que este también cuenta con los bloques y estos no se toman en cuenta para resistir ni momento ni compresion. Escogemos la opcion Define- Section Properties- Área Sections.

Fig. A11. 1: Creacion de losa.



Fuente: Autor.

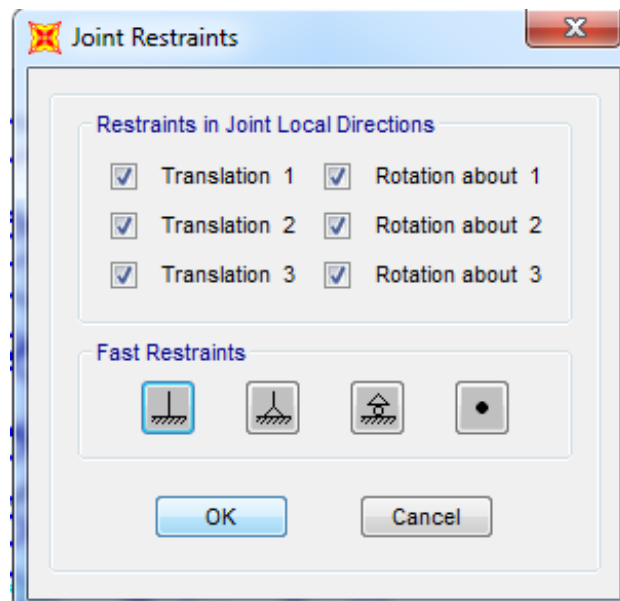
Fig. A11. 2: Definimos el tipo de losa.



Fuente: Autor

A cotinuacion procedemos a empotrar la base, para esto nos vamos a la base de la estructura y seleccionamos todos los apoyos y escogemos la opcion Assign- Joint- Restraints

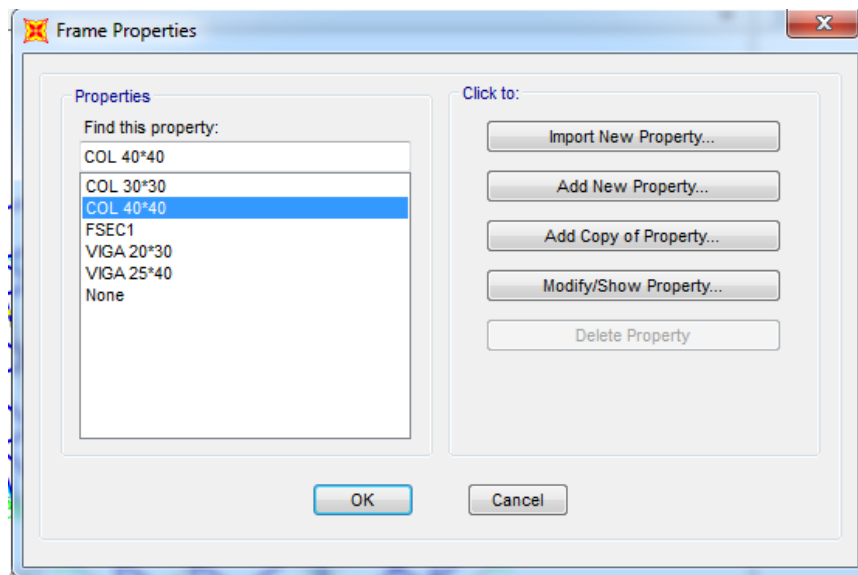
Fig. A12: Empotramiento de la base del edificio.



Fuente: Autor

Procedemos a asignar las columnas, vigas, y losa al modelo tridimensional primero empesaremos con las columnas seleccionando las columnas de los dos primeros pisos, luego escogemos la opcion Assign- Frame-Frame Sections. Y le asignamos la seccion que le corresponde para las columnas, igualmente lo hacemos de la misma forma para las vigas.

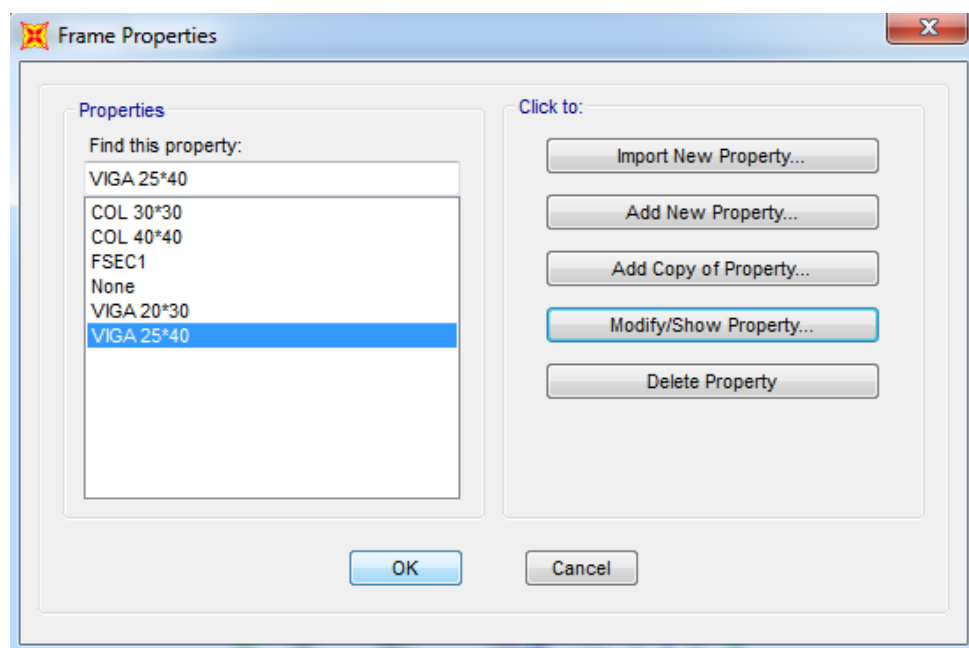
Fig.A13: Asignacion de las columnas para el 1er y 2do piso.



Fuente. Autor.

Asimismo seleccionamos las vigas de los dos primeros pisos y nos vamos a la opción, Assign- Frame-Frame Sections y le asignamos la sección correspondiente. Este procedimiento para asignar las secciones tanto de columnas como de vigas al primer y segundo piso es el mismo para los pisos tres y cuatro.

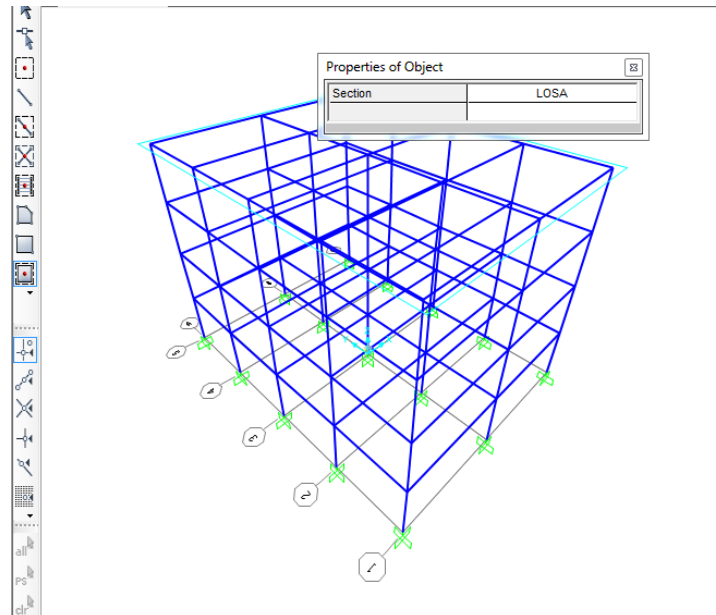
Fig. A14: Asignacion de las vigas para el 1er y 2do piso.



Fuente: Autor.

Para asignar las losas usamos la herramienta Properties of Object y señalamos toda el area correspondiente a la losa con la flecha esto se hace para todos los pisos.

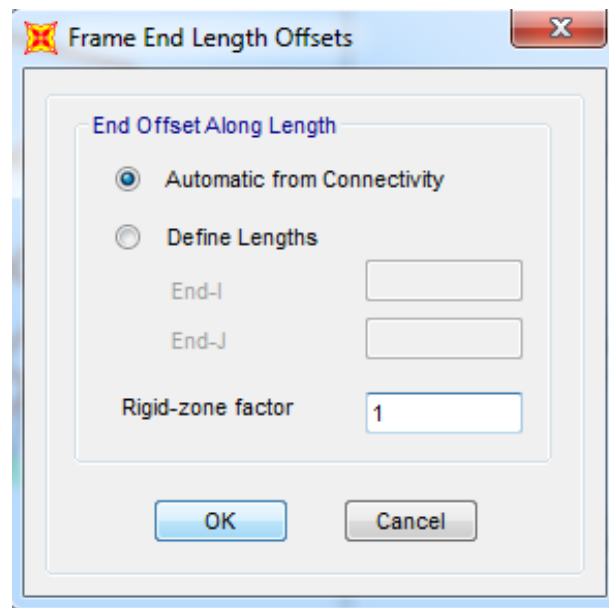
Fig. A15: Asignacion de losas.



Fuente.Autor.

Ahora seleccionamos toda la estructura y le asignamos una longitud efectiva y un factor de rigidez igual a uno, tanto a los elementos vigas como a las columnas, para esto nos vamos al comando Assign-Frame-End (Length) Offsets.. y llenamos con los datos que se ven en la fig A16.

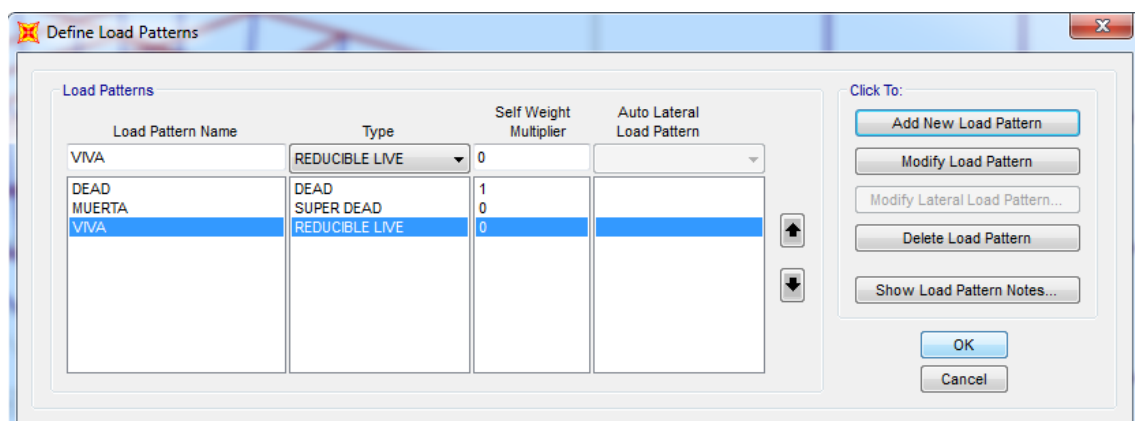
Fig. A16: Asignacion de longitud efevtiva a las vigas y columnas.



Fuente: Autor.

Ahora procedemos a crear las cargas superimpuesta y viva, luego se creara el espectro de diseño para esto nos vamos a la opcion Define- Load Patters y aparecera un cuadro en el cual aparece por defecto la carga muerta (DEAD) seguido creamos las cargas superimpuestas que corresponden al peso de la losa, paredes,mampostería etc y despues creamos la carga viva.

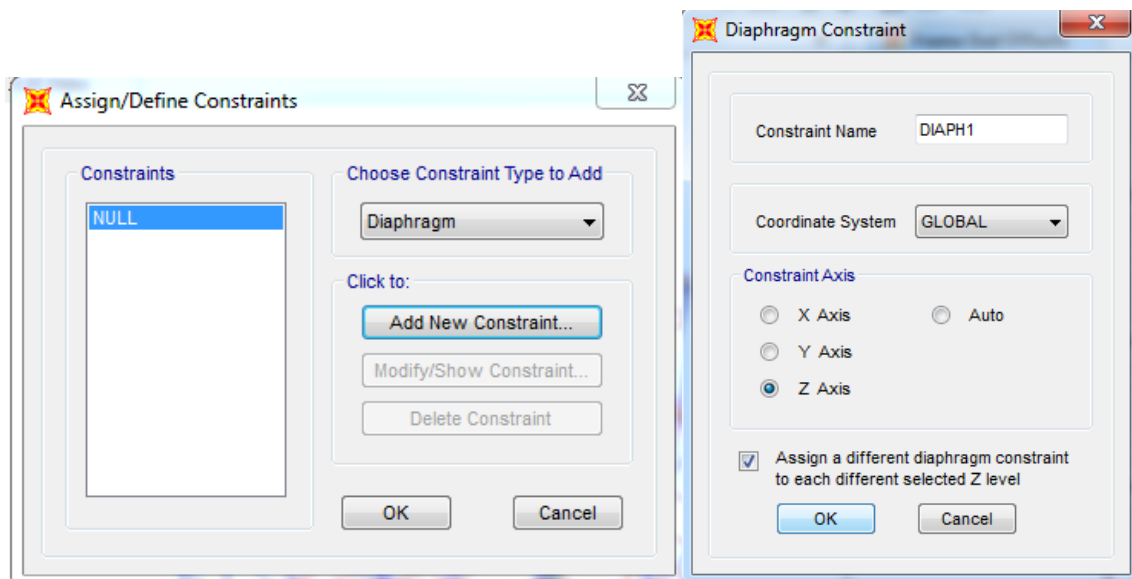
Fig. A17: Creacion de cargas para asignar al modelo 3D.



Fuente: Autor

Ahora asignamos los diafragmas para esto seleccionamos todas las losas y luego nos vamos a la sentencia Assign-Joint-Constraints.. Luego escogemos la opcion Diaphragm y señalamos la sentencia Assign a different diaphragm constraint to each different selected z level. Con esto nos aseguramos de que cada piso tenga asignado su propio diafragma.

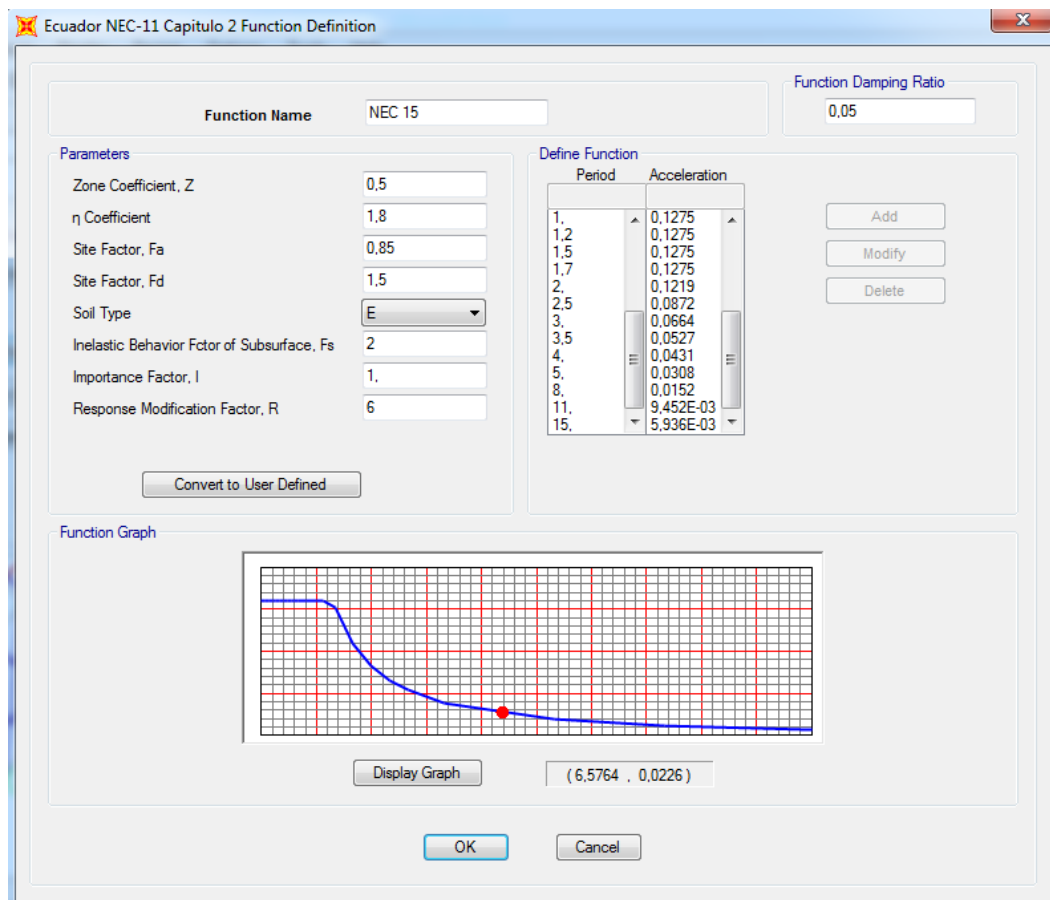
Fig. A18: Asignacion de diafragmas en la losa de cada piso.



Fuente: Autor.

Para definir el espectro nos vamos a la opcion Define-Funtions-Response Spectrum. Y escogemos la opcion choose Funtion Type to Add a diferencia de las anteriores versiones al SAP 2000 vs 17, esta nos da la posibilidad de escoger el espectro elastico de diseño, escogemos Ecuador capitulo 2 (NEC 15).

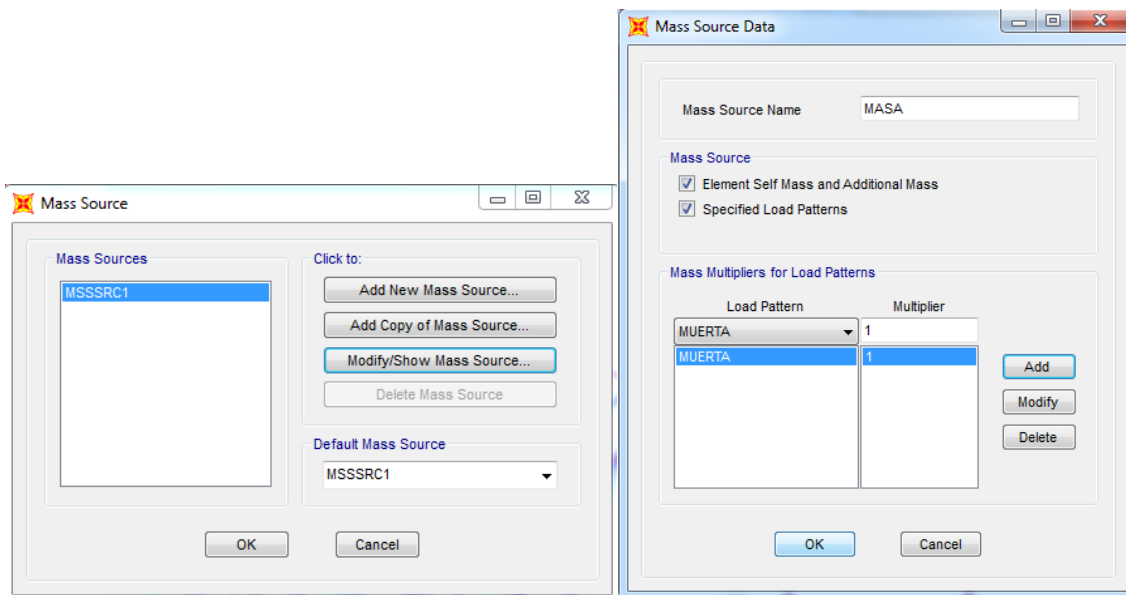
Fig A19: Espectro inelastico de diseño.



Fuente:Autor.

Definimos las masas, escogemos la opcion Define-Mass Source.

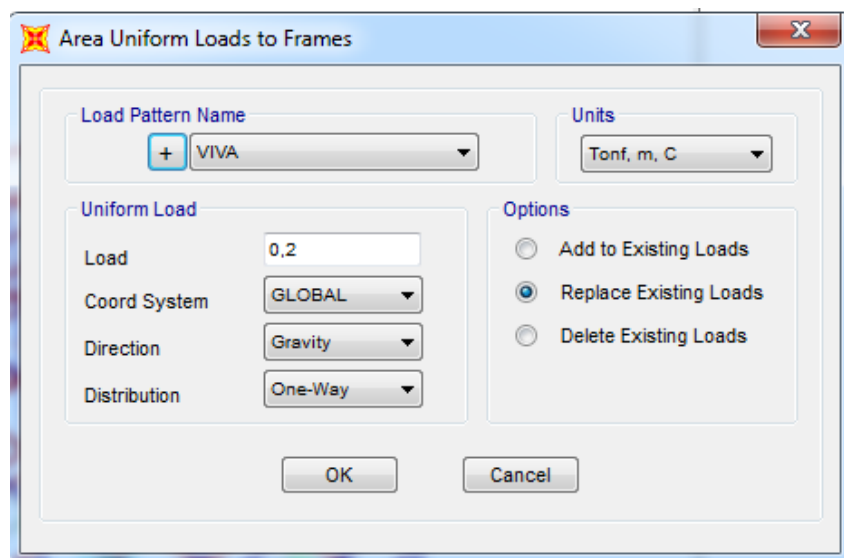
Fig. A20: Selección de las masas a usar para el analisis dinamico.



Fuente: Autor

Procedemos a asignar las cargas a las losas, para esto nos vamos a la opcion Assign – Área loads- Uniform to Frame (Shell) sin olvidar que la asignacion de la carga es en una sola dirección.

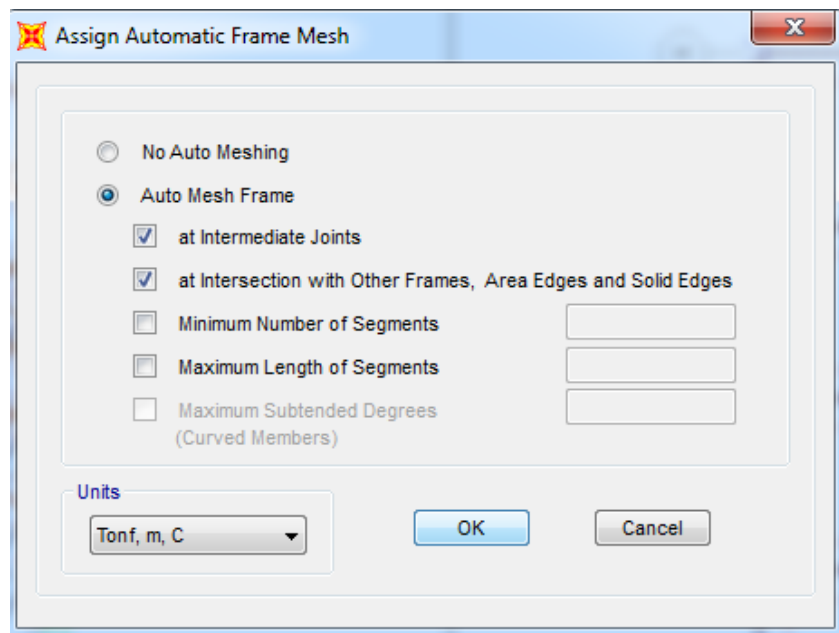
Fig. A21: asignacion de cargas.



Fuente: Autor.

Discretizamos las secciones que fueron asignadas, tanto vigas como columnas para un mejor calculo para esto vamos a la sentencia Assign-Frame- Automatic Frame Mesh y le asignamos los valores que se encuentran en la figura A23.

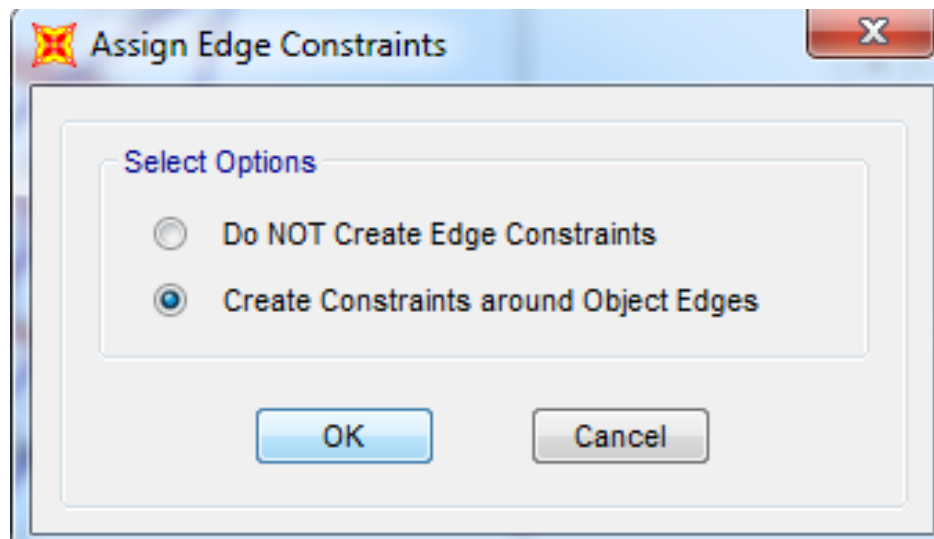
Fig. A22: Discretizacion de secciones.



Fuente: Autor

Igual que con las secciones, Ahora discretizamos las cargas que fueron asignadas en las areas para esto volvemos a la opcion Assign- Área- Generate Edge Constraints.

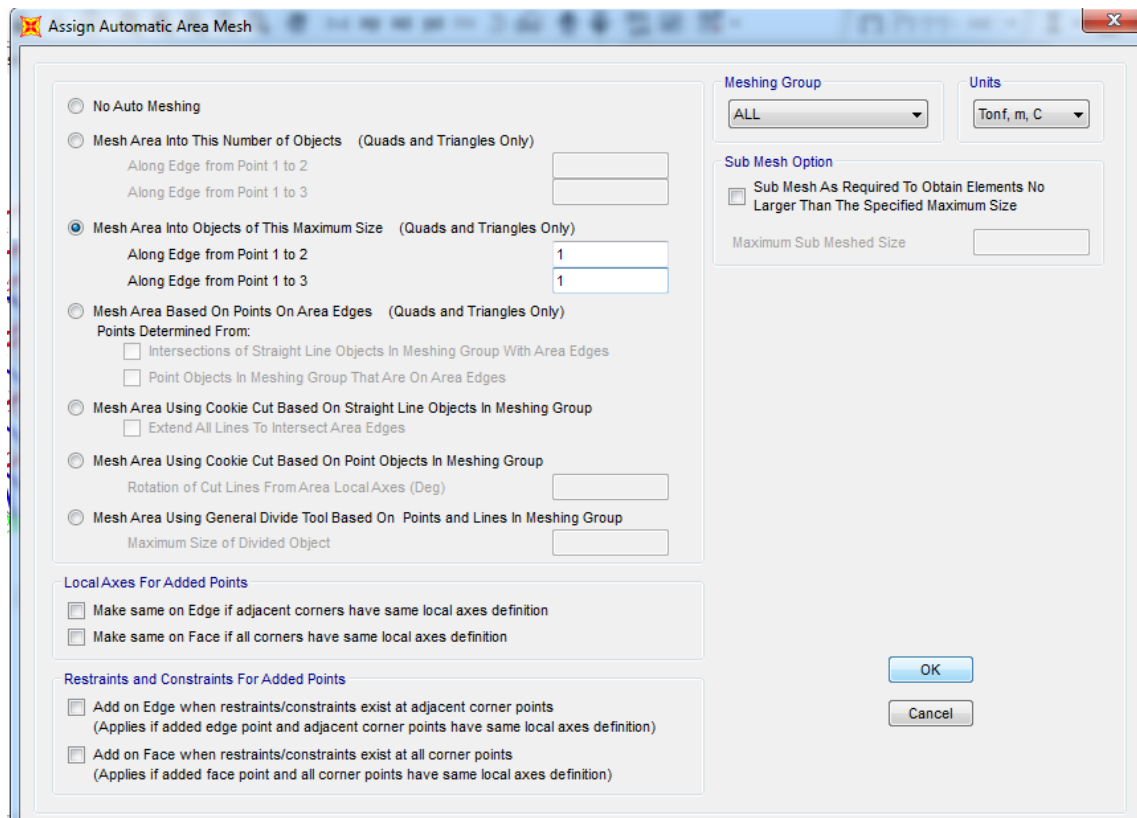
Fig.A23: discretizacion de las cargas asignadas.



Fuente Autor.

Procedemos a dividir los paños de cada losa en paños de dimensiones de 1*1. Vamos a la sentencia Assign-Area-Automatic Área Mesh.. Y llenamos los datos de la tabla.

Fig. A24: Discretizacion de los elementos areas.



Fuente: Autor.

Ahora definimos los tipos de analisis a los que va estar sometido la estructura. Para esto nos vamos a la opcion Define- Load Cases, e seleccionamos la sentencia Add new load case, escogemos el modal y lo modificamos escogemos el numero modos igual a 8 . El Número de modos que se deben considerar en el análisis según la NEC 15 son 2 casos: El primero consiste en todos los modos de vibración que contribuyan significativamente a la respuesta total de la estructura, mediante los varios períodos de vibración. El segundo caso consiste en todos los modos que involucren la participación de una masa modal acumulada de al menos el 90% de la masa total de la estructura, en cada una de las direcciones horizontales principales consideradas.

Fig. A25: Modificacion del caso de analisis modal.

Load Case Data - Modal

Load Case Name
 MODAL [Set Def Name] [Modify/Show...]

Load Case Type
 Modal [Design...]

Stiffness to Use
☒ Zero Initial Conditions - Unstressed State
☐ Stiffness at End of Nonlinear Case [v]
 Important Note: Loads from the Nonlinear Case are NOT included in the current case

Type of Modes
☒ Eigen Vectors
☐ Ritz Vectors

Mass Source
 MASA

Number of Modes
 Maximum Number of Modes: 8
 Minimum Number of Modes: 1

Loads Applied
☐ Show Advanced Load Parameters

Other Parameters
 Frequency Shift (Center): 0,
 Cutoff Frequency (Radius): 0,
 Convergence Tolerance: 1,000E-09
☒ Allow Automatic Frequency Shifting

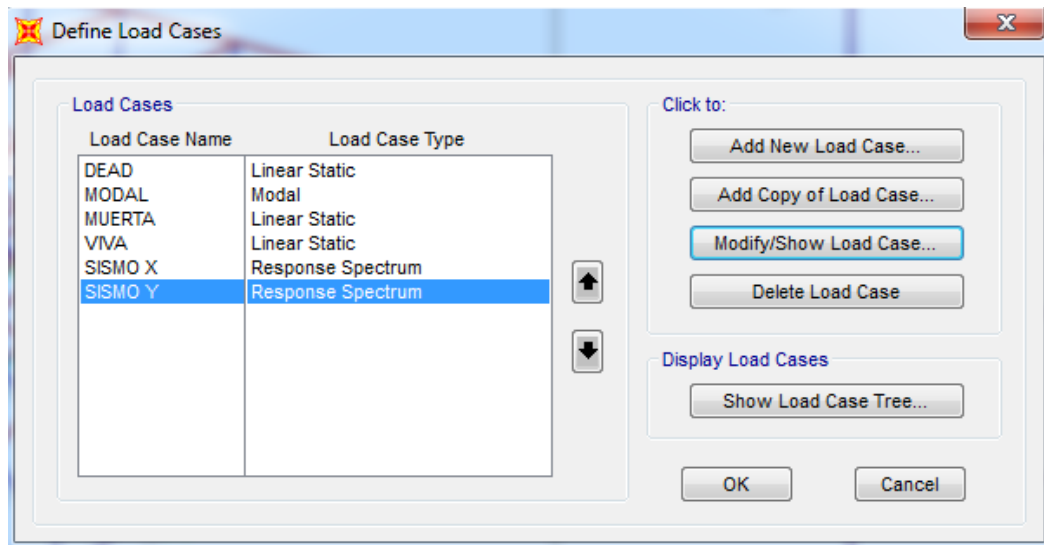
[OK] [Cancel]

Fuente: Autor.

Luego aderimos dos casos, uno es el sismo en X y el otro es el sismo en Y haciendo uso del espectro de diseño usamos la combinación modal SRSS (raiz cuadrada de la

suma de los cuadrados) que nos permite hacer la NEC 15, el factor de escala es igual $I \cdot 9.81 / \phi_p \phi_E$ por ser un edificio sin irregularidades en planta y en elevación tomamos los coeficientes $\phi_p \phi_E$ igual a uno y como el edificio será de uso de vivienda el coeficiente I , también será de uno.

Fig. A26: Definimos las cargas sísmicas tanto para el sismo en X como para el sismo en Y.



Fuente: Autor.

Fig. A27: Cargas sismicas.

Load Case Data - Response Spectrum

Load Case Name: SISMO X **Set Def Name** **Modify/Show...**

Load Case Type: Response Spectrum **Design..**

Modal Combination:

- ☒ CQC GMC f1 1, GMC f2 0, Periodic + Rigid Type SRSS
- ☐ SRSS
- ☐ Absolute
- ☐ GMC
- ☐ NRC 10 Percent
- ☐ Double Sum

Directional Combination:

- ☒ SRSS
- ☐ CQC3
- ☐ Absolute

Scale Factor:

Mass Source: Previous (MASA)

Modal Load Case:

Use Modes from this Modal Load Case: MODAL

- ☒ Standard - Acceleration Loading
- ☐ Advanced - Displacement Inertia Loading

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor	Coord Sys	Angle
Accel	U1	NEC 15	9.81	GLOBAL	0
Accel	U1	NEC 15	9.81	GLOBAL	0

☒ Show Advanced Load Parameters **Add** **Modify** **Delete**

Other Parameters

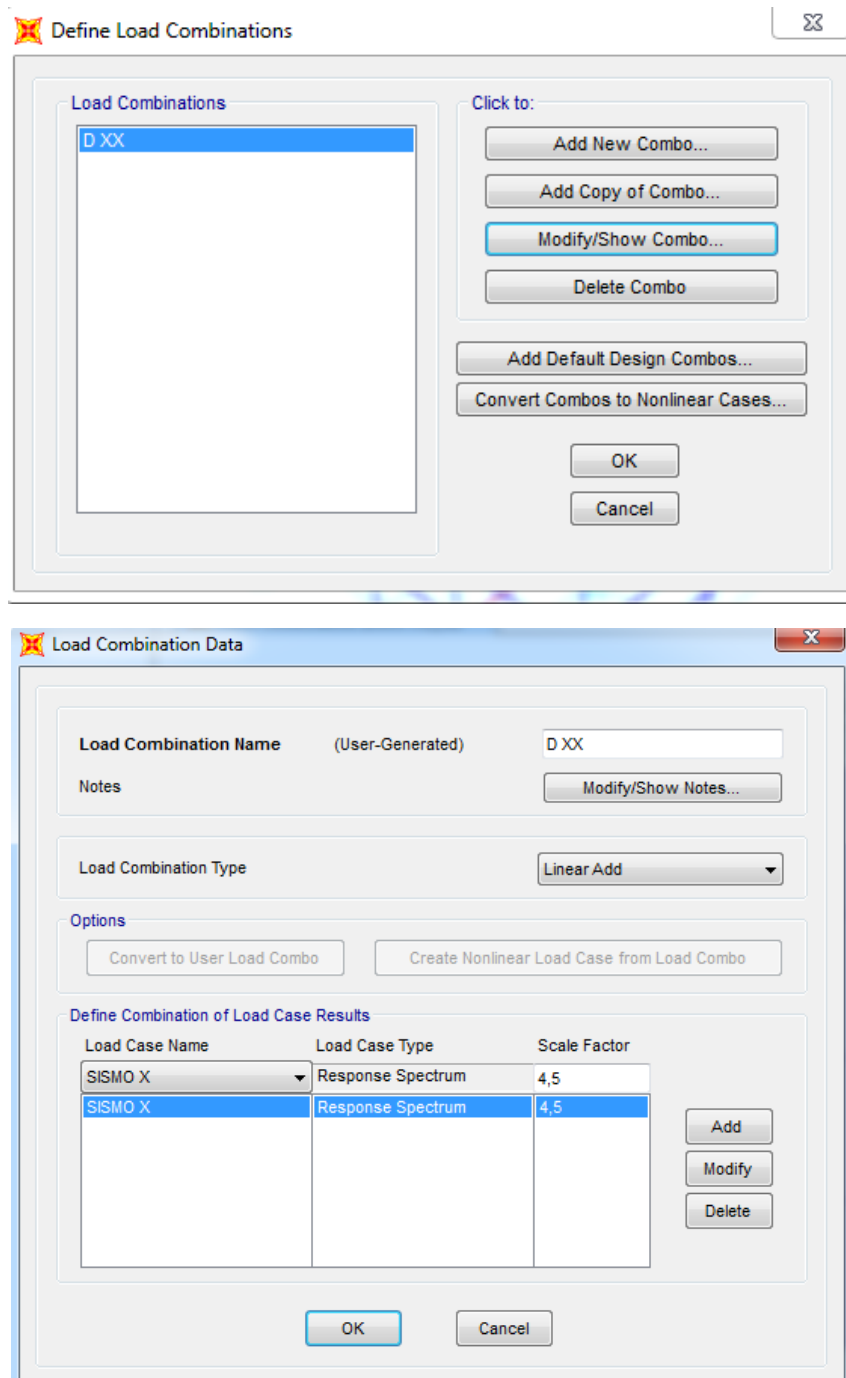
Modal Damping: Constant at 0.05 **Modify/Show...**

OK **Cancel**

Fuente: Autor.

Procedemos a efectuar las combinaciones para obtener los desplazamientos para esto nos vamos a la sentencia Define- Load Combinations, Add View Combo.. tomando en cuenta que el factor de escal será igual a 0,75 de R para nuestro caso R será igual a 8 por ser un portico especial sismo resistentes, de hormigón armado con vigas descolgadas.

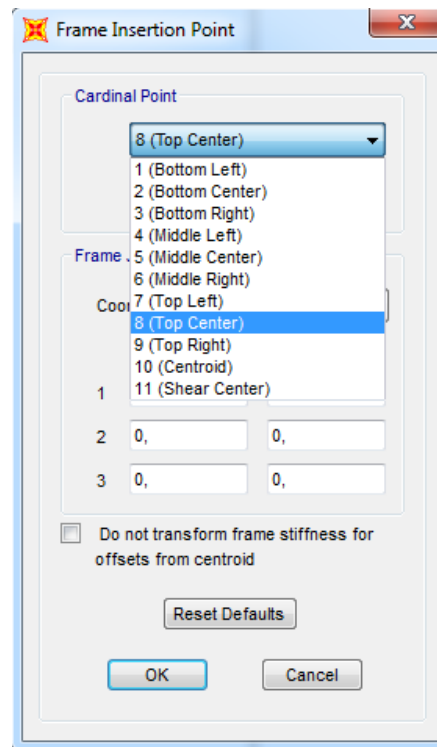
Fig. A28: Definicion de los desplazamientos.



Fuente: Autor.

Por ultimo antes de correr el analisis procedemos a verificar que los ejes de las vigas esten alineados para esto seleccionamos todas las vigas y luego nos vamos a la sentencia Assign-Frame-Insertion point y escogemos la sentencia 8 (Top Center).

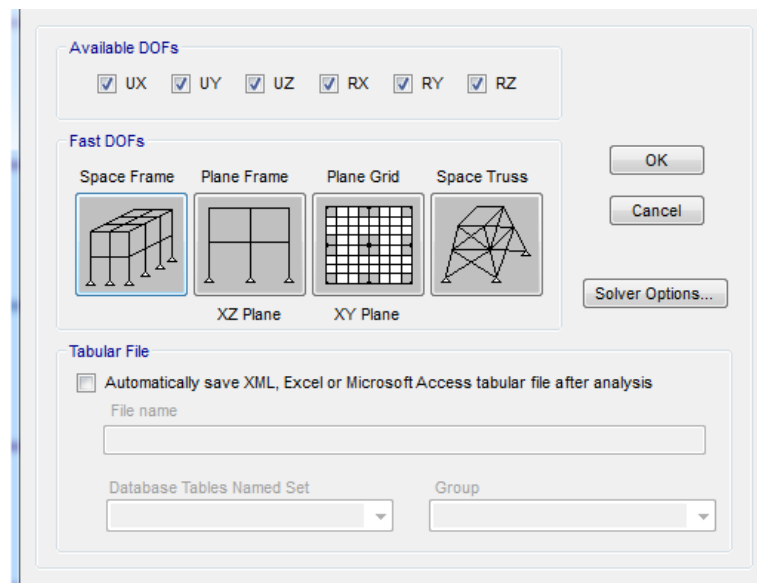
Fig. A29: Alineacion de los ejes de las vigas.



Fuente: Autor

A continuacion verificamos los grados de libertad para el analisis y escogemos la opcion Space Frame. Para esto nos vamos a la sentencia Display-Analysis Options.

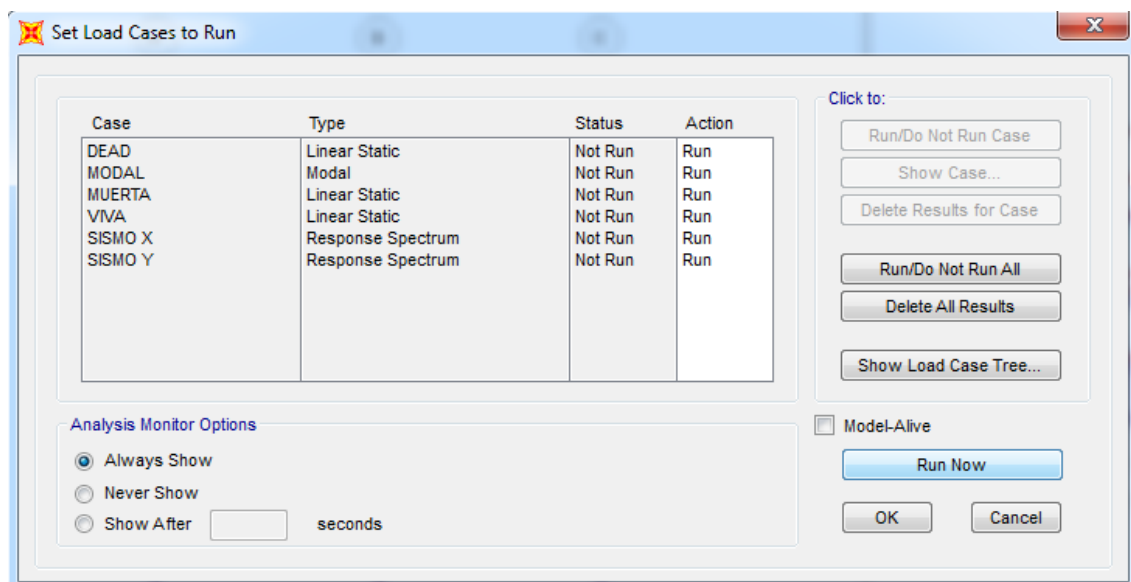
Fig. A30 Selección del tipo de análisis.



Fuente: Autor.

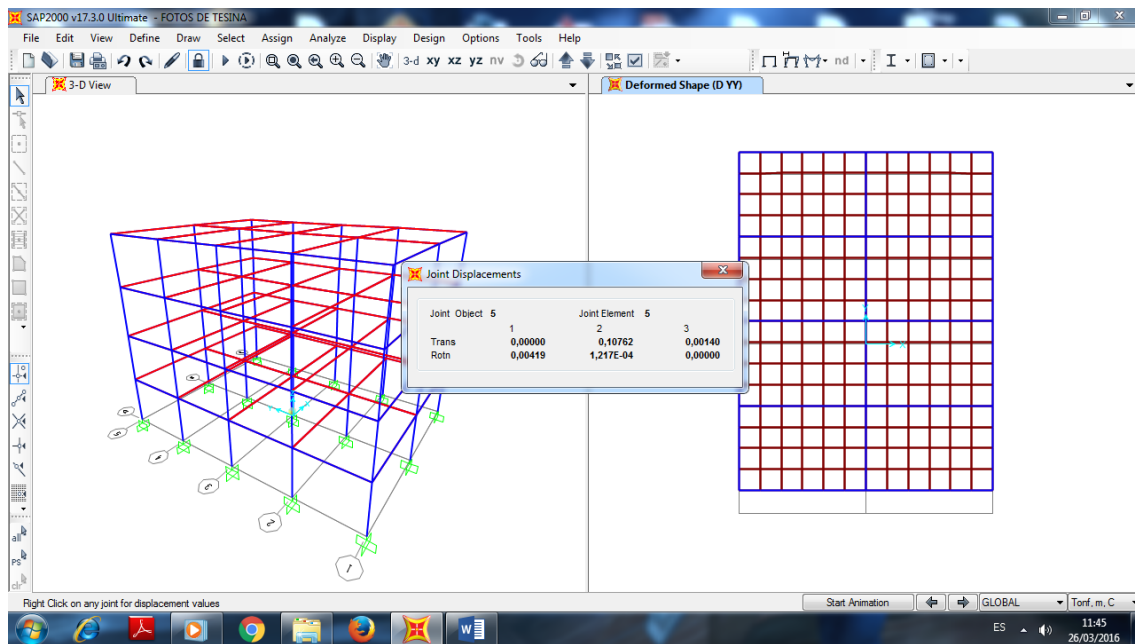
Ahora abtivamos la opcion Display-Set Load cases to Rum.Y damos click en la opcion Rum Now, como el archivo no fue guardado se procedera a guardarlo.

Fig. A31: Selección de los casos de Analisis.



Fuente: Autor.

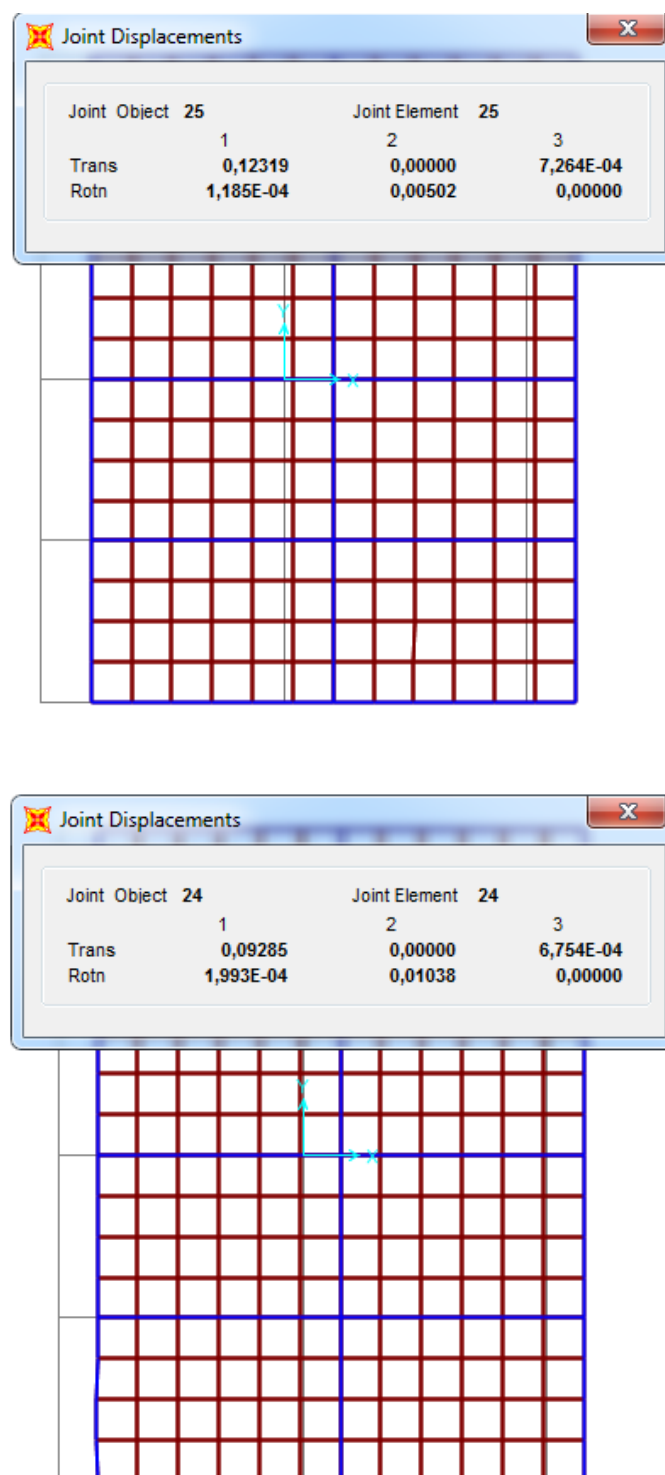
Fig. A32: Desplazamiento en Y producido por el sismo en Y.



Fuente: Autor.

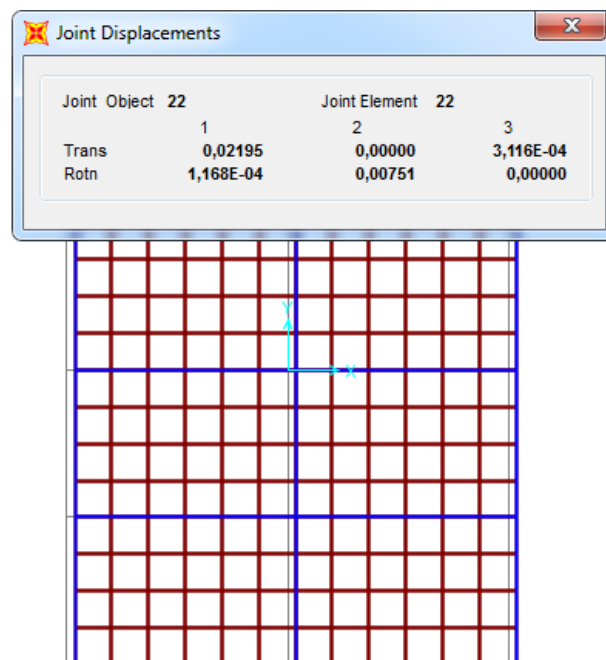
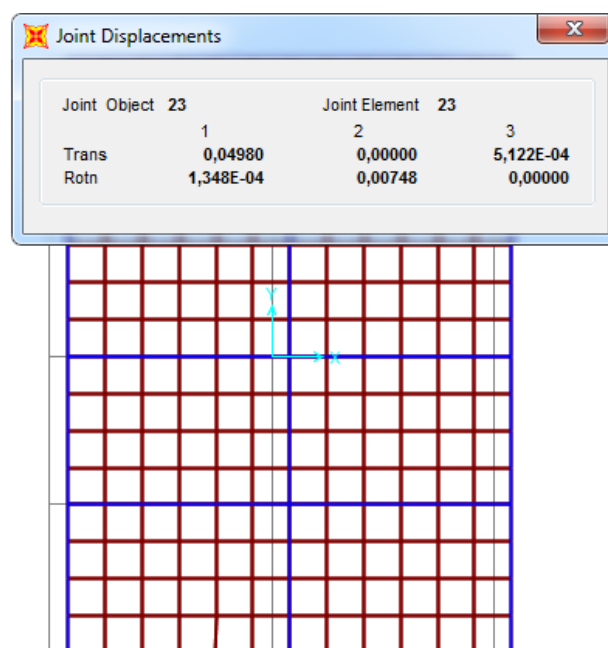
A continuación se muestran las graficas con las desplazamientos tanto en X como en Y, estos valores son los que mas nos interesan cuando trabajamos con el analisis dinamico y con el espectro de diseño puesto que con la informacion obtenida se pueden calcular las derivas permisibles que van a dominar el diseño, el valor máximo permitido en edificaciones es del 20/1000. Los valores que se muestran son respectivamente los desplazamientos pertenecientes a todos los pisos de la edificación producidas por el sismo en X y la segunda por un sismo en Y.

Fig. A33 1: Desplazamiento en X producido por el sismo en X.



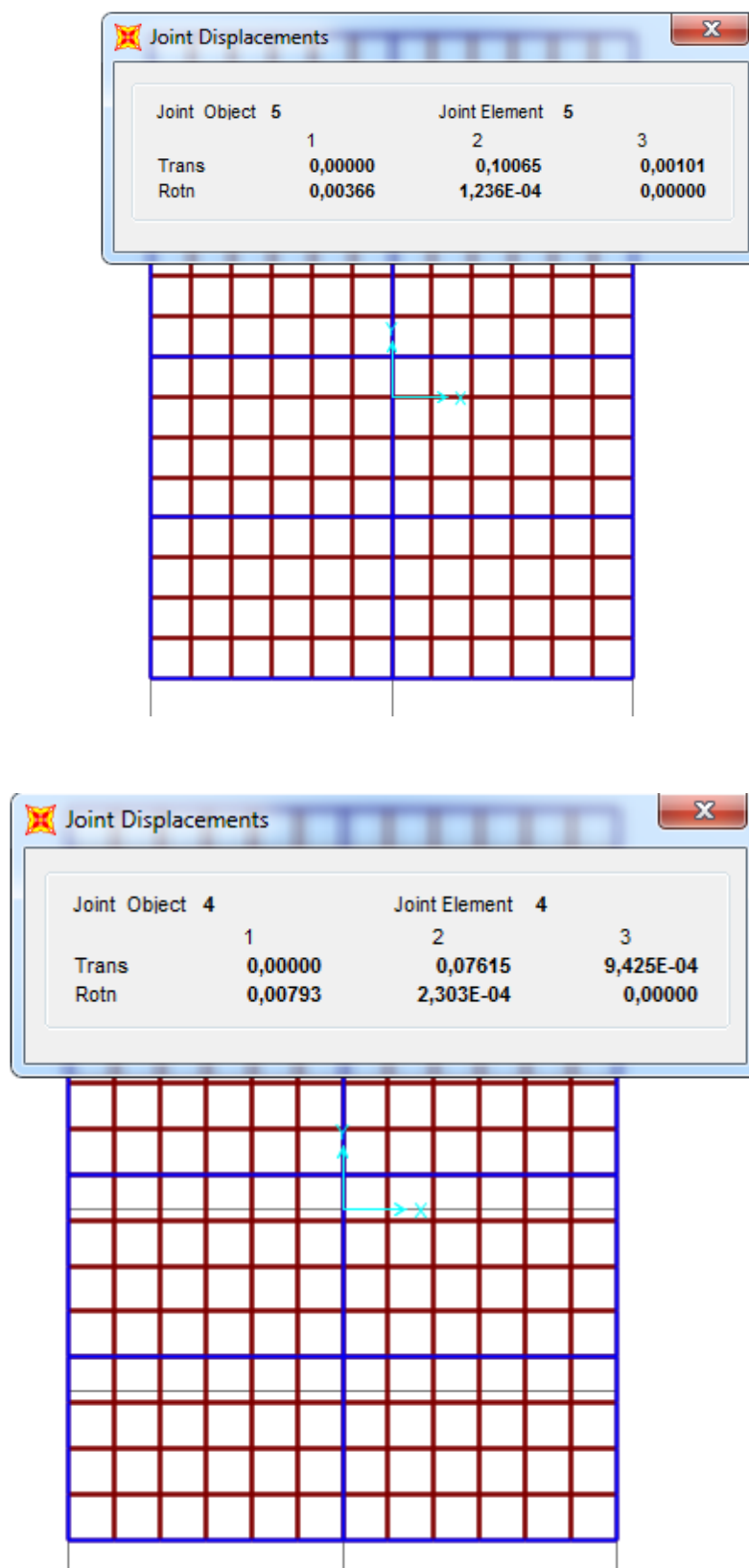
Fuente: Autor.

Fig. A33 2: Desplazamiento en X producido por el sismo en X.



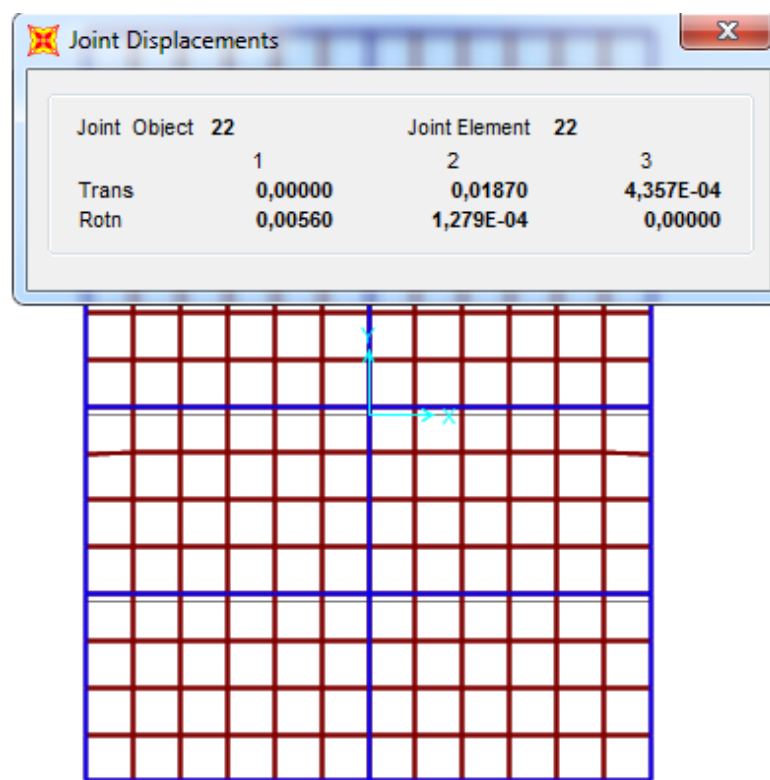
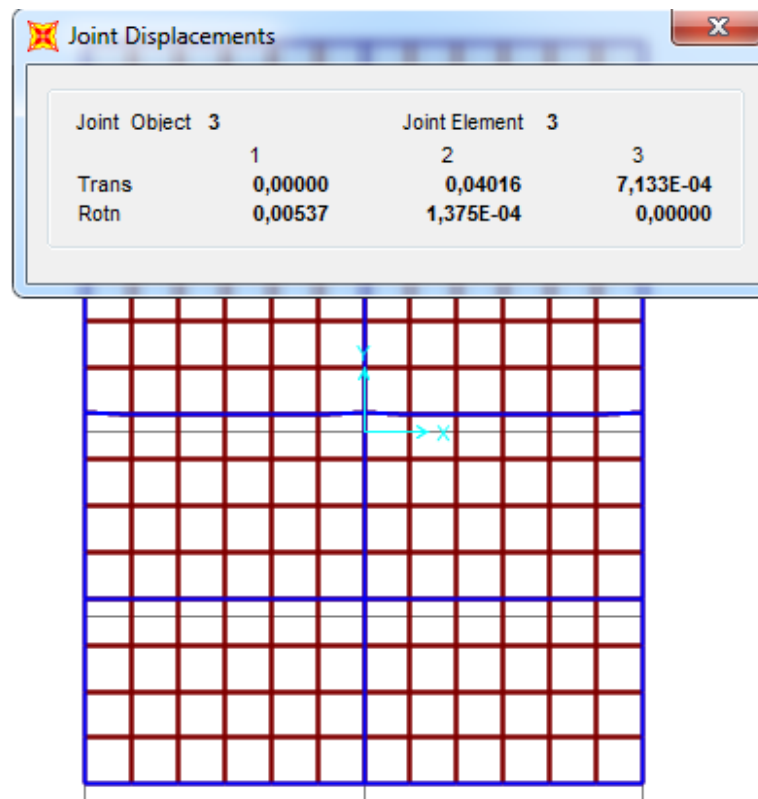
Fuente: Autor.

Fig. A34 1: Desplazamiento en Y producido por el sismo en Y.



Fuente: Autor.

Fig. A34 2: Desplazamiento en Y producido por el sismo en Y.



Fuente: Autor.

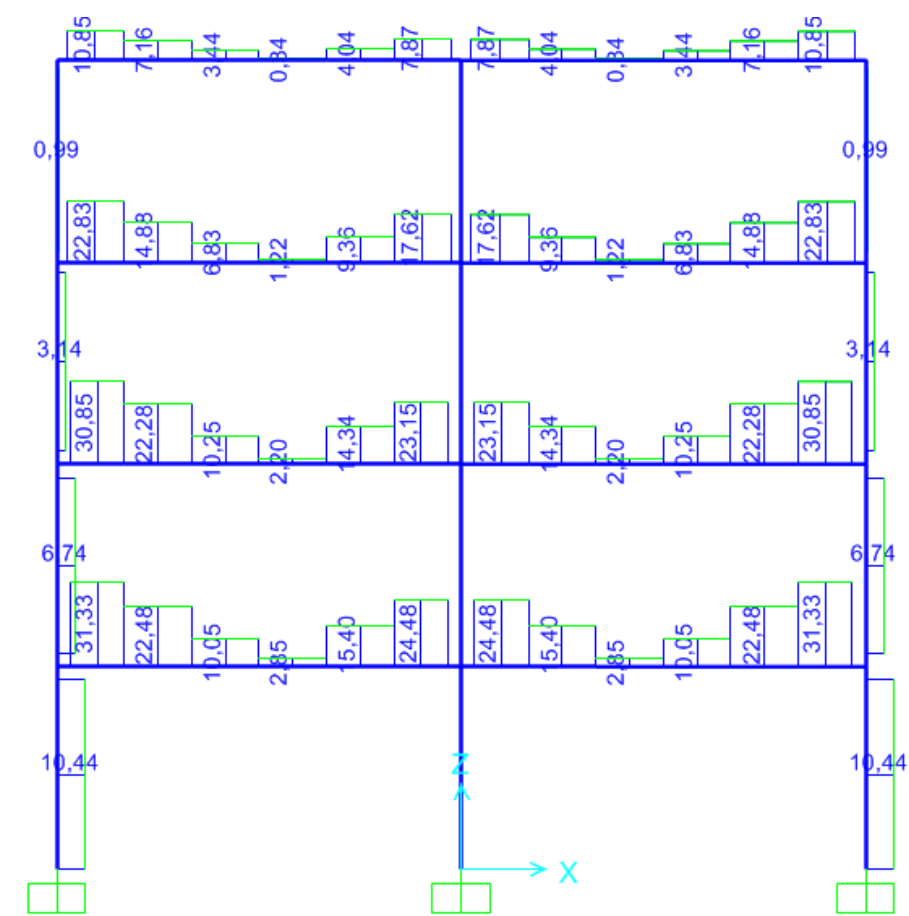
Tabla 4.5 Calculo de las derivas de entrepiso.

Sentido	Desplazamiento (m)	H Entrepiso (m)	Deriva	Deriva $\leq$ (20/1000)
D X	0,1232	3,00	0,0101	OK
D X	0,0929	3,00	0,0144	OK
D X	0,0498	3,00	0,0093	OK
D X	0,0220	3,00	0,0073	OK
D Y	0,1007	3,00	0,0082	OK
D Y	0,0762	3,00	0,0120	OK
D Y	0,0402	3,00	0,0072	OK
D Y	0,0187	3,00	0,0062	OK

Fuente: Autor.

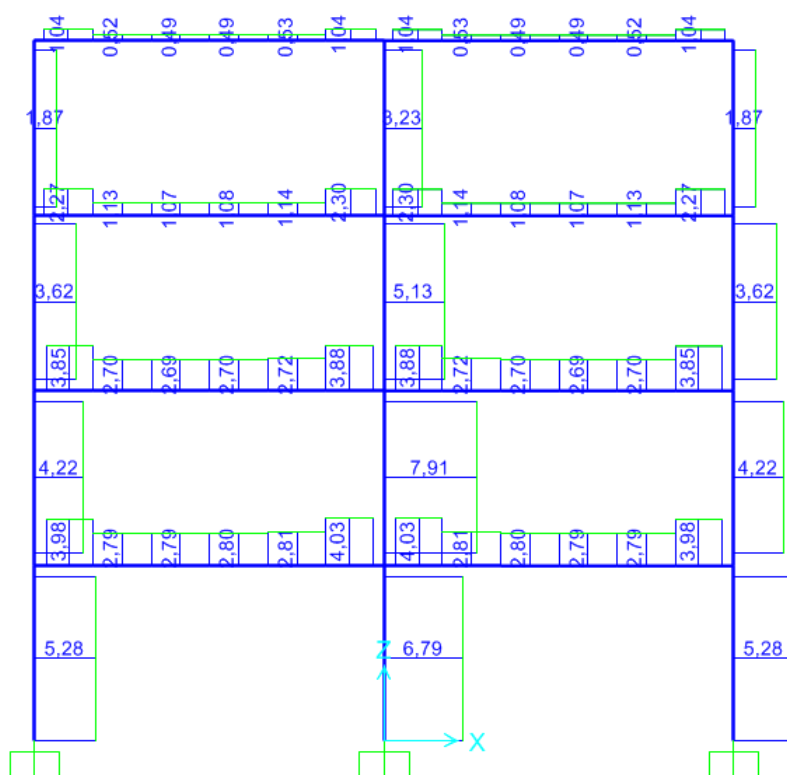
Y por ultimo se muestran los diagramas de fuerza axial, cortante y momento flector máximo de los porticos producidos por el sismo en la dirección X y en la dirección Y, respectivamente.

Fig. A35: Diagrama de fuerzas axial producidas por el sismo en X..



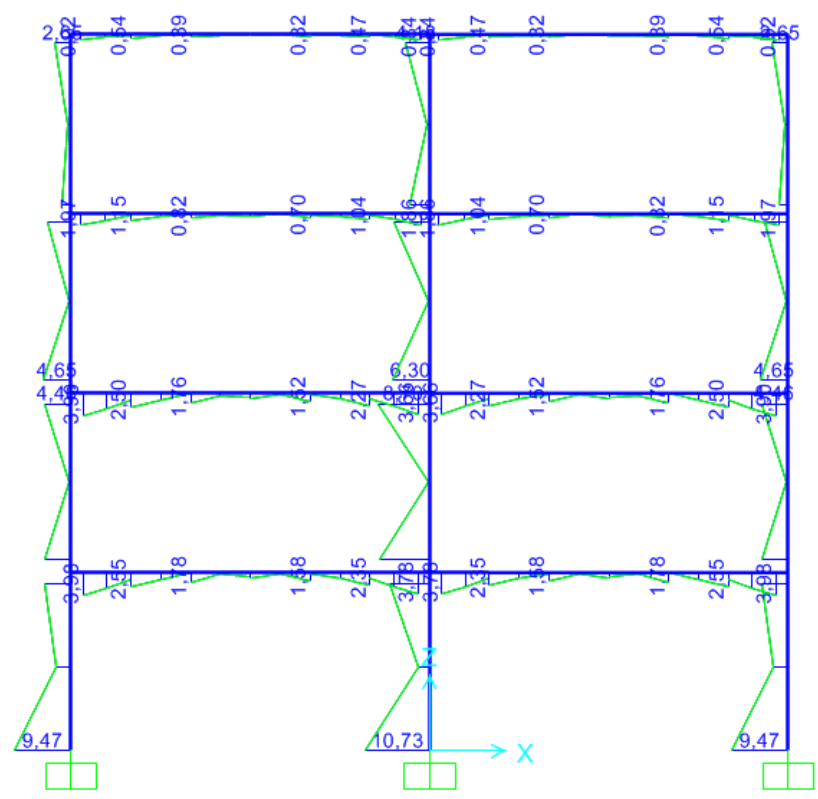
Fuente: Autor.

Fig. A36: Diagrama de fuerza cortante producidos por el sismo en X.



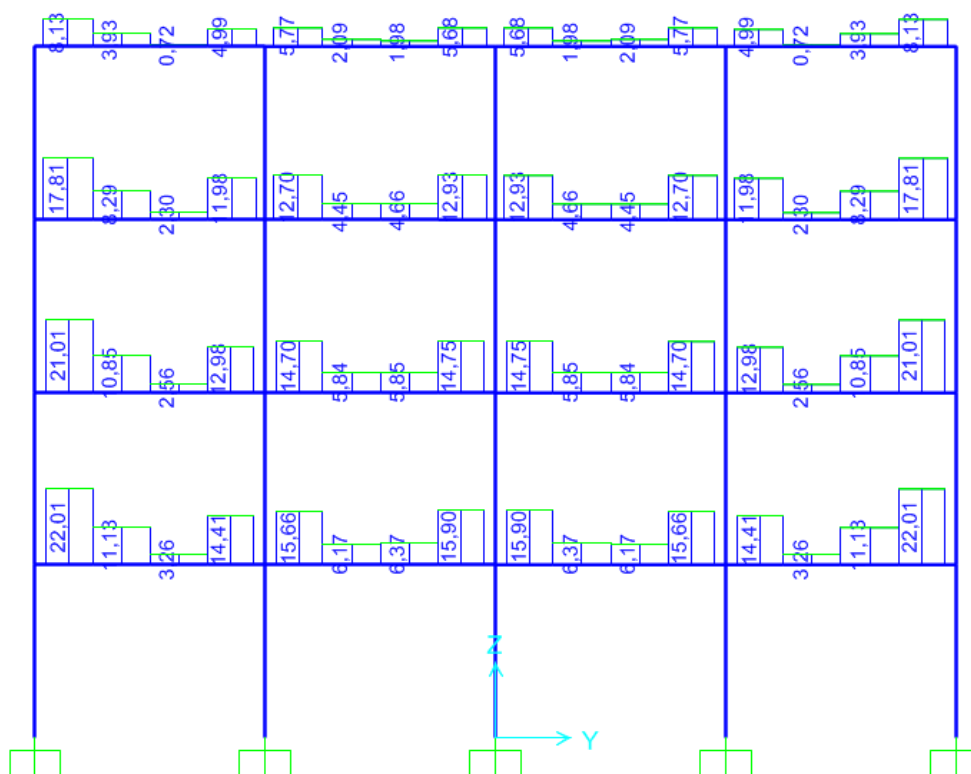
Fuente: Autor.

Fig. A37: Diagrama de momento flectores producidos por el sismo en X.



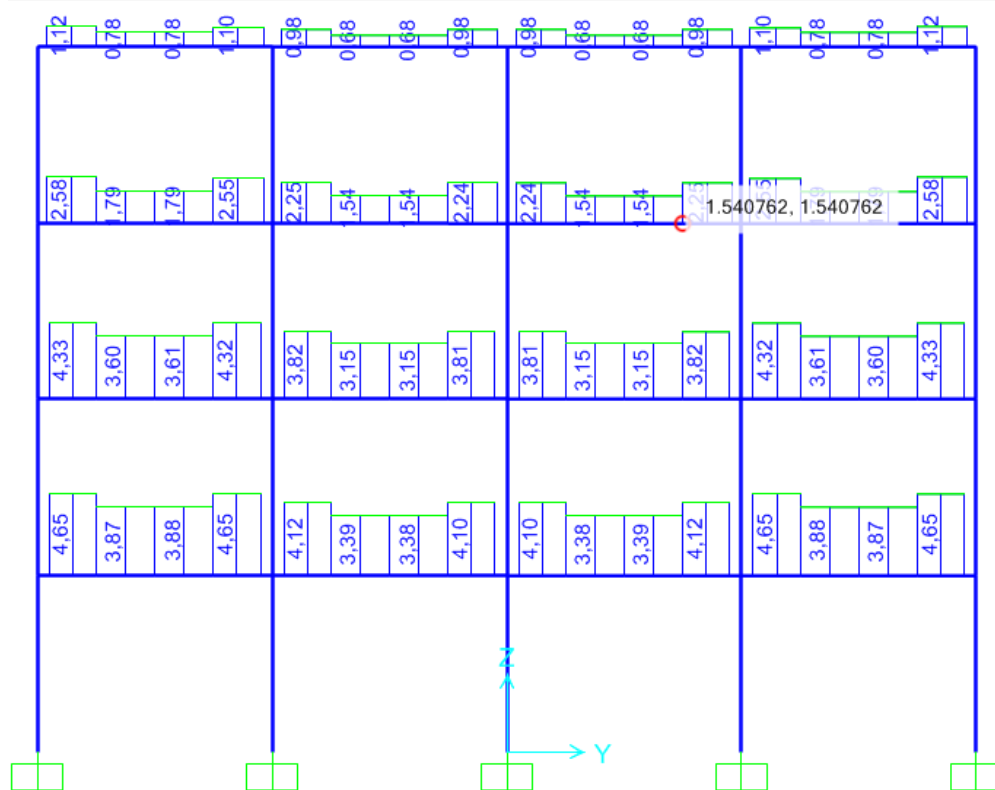
Fuente: Autor.

Fig. A38: Diagrama de fuerzas axiales producidos por el sismo en Y.



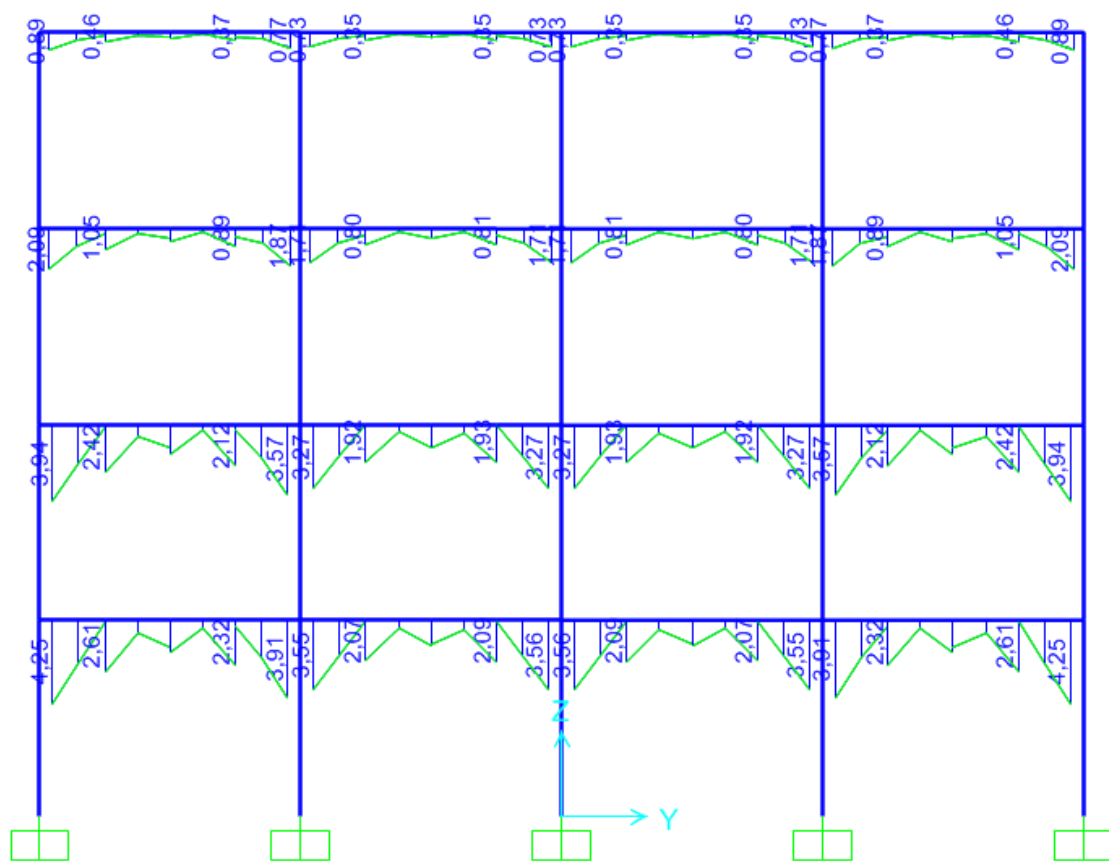
Fuente: Autor.

Fig. A39: Diagrama de fuerzas cortantes producidos por el sismo en Y.



Fuente: Autor.

Fig. A40: Diagrama de momentos flectores producidos por el sismo en Y..



Fuente: Autor.

4.3 CONCLUSIONES

Como se pudo ver para diseñar una estructura antisísmica es necesario entender la información que se produce durante un evento sísmico, ya que de esta manera se puede medir las aceleraciones, periodos, frecuencias, tiempo de duración y las fuerzas que actúan en la estructura, y dado que la edificación posee una masa (m) entonces se podrá obtener la fuerza de inercia que entran a la estructura así como los desplazamientos. Con los datos obtenidos, se podrá modelar una estructura más cercana a la realidad y debido a lo mencionado anteriormente se podrá obtener un diseño antisísmico más eficiente.

La precisión de los cálculos va a depender de la cantidad de información que se disponga y de la mejora de los métodos y programas para recopilar la mayor cantidad de datos ya que con estos se pueden desarrollar espectros de diseño cada vez más fiables. El objetivo es diseñar una estructura capaz de disipar la energía que entra a esta, permitiendo de esta manera que los daños en la estructura sean mínimos o en su defecto que si el terremoto es demasiado fuerte de oportunidad a que la gente pueda evacuar el edificio y así minimizar las pérdidas humanas. Igualmente el espectro de diseño no solo sirve para realizar el análisis modal espectral sino que su valor pico es parte del coeficiente que se usa para el análisis estático.

Por último se puede ver en el ejemplo, como se ha transformado la información de los acelerógrafos, para obtener el espectro de diseño. La aplicación de este espectro

permite generar las fuerzas sismicas en las direcciones X y Y, que se aplican sobre la edificación al mismo tiempo la inercia de estas fuerzas en la estructura es analizada por el programa SAP 2000 vs. 17 y permite obtener datos como los desplazamientos y de esta forma controlar las derivas de entrepisos, que es la forma actual a la que tienden los códigos, y normas para el diseño sísmico, en la edificación del ejemplo se ve como el programa SAP 2000 vs. 17 ya tiene incorporada esta información en especial la del espectro del NEC 15.

4.4 RECOMENDACIONES

Ya que la exactitud en los calculos de los espectros va a depender de la informacion que se tenga se recomienda tener instrumentado no solo las edificaciones en estudio sino sus alrededores ya que de esta forma se mejorara los resultados y obciones de analisis en especial seria bueno instrumentar los edificios con acelerografos digitales de moviento fuerte ya que la obtencion de datos es mucho mas facill.

Anexo A

Tabla A1 Escala de Intensidad Mercalli Modificada (MM).

<i>Grado</i>	<i>Descripción</i>	<i>Grado</i>	<i>Descripción</i>
I	No es sentido por las personas, registrado por los instrumentos sísmográficos.		
II	Sentido sólo por pocas personas en reposo, especialmente en los pisos superiores, objetos suspendidos pueden oscilar.		
III	Sentido en el interior de las edificaciones, especialmente en pisos superiores, pero muchos pueden no reconocerlo como temblor, vibración semejante a la producida por el paso de un vehículo liviano, objetos suspendidos oscilan.		
IV	Objetos suspendidos oscilan visiblemente, vibración semejante a la producida por el paso de un vehículo pesado, vehículos estacionados se bambolean, cristalería y vidrios suenan, puertas y paredes de madera crujen.		
V	Sentido aun en el exterior de los edificios, permite estimar la dirección de las ondas, personas dormidas se despiertan, el contenido líquido de recipientes y tanques es perturbado y se puede derramar, objetos inestables son desplazados, las puertas giran y se abren o cierran, relojes de péndulo se paran.		
VI	Sentido por todas las personas, muchos sufren pánico y corren hacia el exterior, se tiene dificultad en caminar establemente, vidrios y vajilla se quiebran, libros y objetos son lanzados de los anaqueles y estantes, los muebles son desplazados o volcados, el revoque y enlucido de mortero de baja calidad y mampostería tipo D se fisuran, campanas pequeñas tañen.		
VII	Se tiene dificultad en mantenerse parado, percibido por los conductores de vehículos en marcha, muebles se rompen, daños y colapso de mampostería tipo D, algunas grietas en mampostería tipo C, las chimeneas se fracturan a nivel de hecho, caída del revoque de mortero, tejas, cornisas y parapetos sin anclaje, algunas grietas en mampostería de calidad media, campanas grandes tañen, ondas en embalses y depósitos de agua.		
VIII	La conducción de vehículos se dificulta, daños de consideración y colapso parcial de mampostería tipo C, algún daño en mampostería tipo B; algún daño en mampostería tipo A; caída del revoque de mortero y de algunas paredes de mampostería, caída de chimeneas de fábricas, monumentos y tanques elevados, algunas ramas de árboles se quiebran, cambio en el flujo o temperatura de pozos de agua, grietas en terreno húmedo y en taludes inclinados.	IX	Pánico general, construcciones de mampostería tipo D totalmente destruidas, daño severo y aun colapso de mampostería tipo C, daño de consideración en mampostería tipo B, daño a fundaciones, daños y colapso de estructuras aporticadas, daños en ensambles y depósitos de agua, ruptura de tubería cerrada, grietas significativas visibles en el terreno.
		X	La mayoría de las construcciones de mampostería y a base de pórticos destruidas, algunas construcciones de madera de buena calidad dañadas, puentes destruidos, daño severo a represas, diques y terraplenes, grandes deslizamientos de tierra, el agua se rebalsa en los bordes de ríos, lagos y embalses, rieles de ferrocarril deformados ligeramente.
		XI	Los rieles de ferrocarril deformados severamente, ruptura de tuberías enterradas que quedan fuera de servicio.
		XII	Destrucción total, grandes masas de roca desplazadas, las líneas de visión óptica distorsionadas, objetos lanzados al aire.
Definición de los tipos de mampostería			
		<i>Tipo A:</i>	buena calidad de ejecución, mortero y diseño, reforzada y confinada empleando varillas de acero, diseñada para resistir cargas laterales de sismo.
		<i>Tipo B:</i>	buena calidad de ejecución, reforzada, pero no diseñada específicamente para resistir cargas laterales de sismo.
		<i>Tipo C:</i>	calidad de ejecución media, sin refuerzo y no diseñada para resistir cargas laterales.
		<i>Tipo D:</i>	materiales de baja resistencia, tal como adobe, baja calidad de ejecución débil para resistir cargas laterales.
		El rango de intensidades MM I a VI no es relevante en términos de riesgo sísmico. El 90% del daño ocasionado por los terremotos corresponde a eventos con intensidad grado VII a IX, expresado en la escala Mercalli Modificada.	

Fuente: Diseño sísmico de edificios Bazan y Meli Limusa Noriega Editore

Anexo B

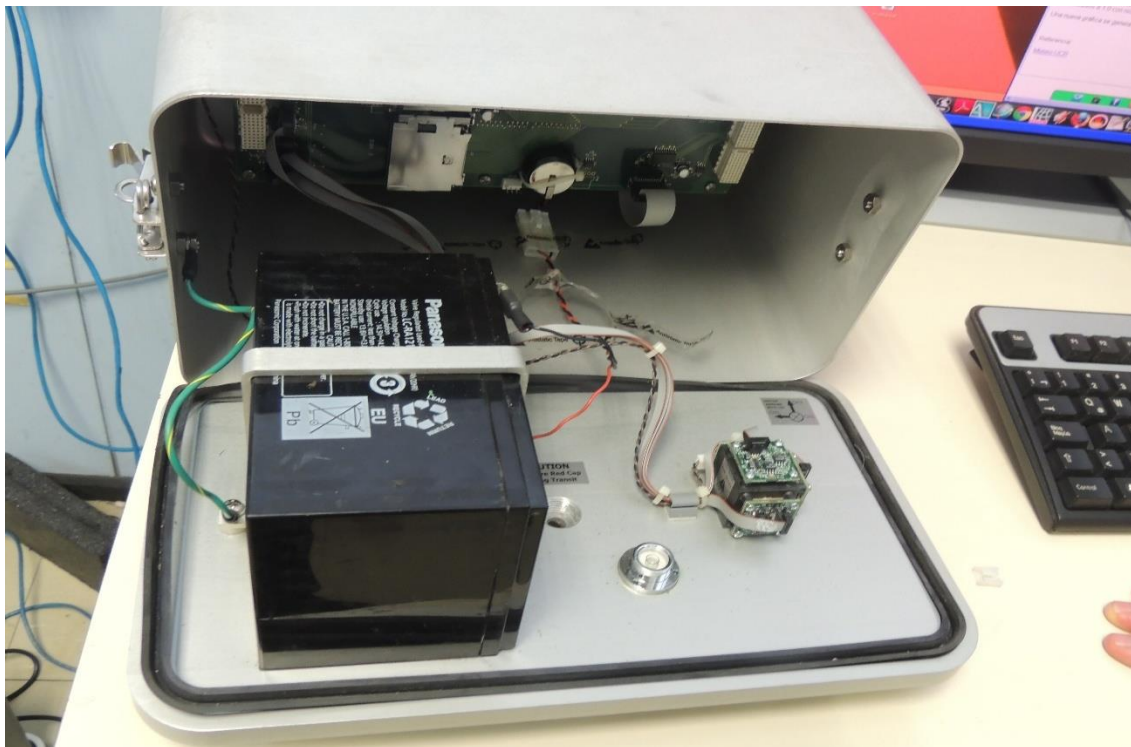
Tipos de acelerografos

Fig. B1 Acelerografo modelo Etna, kinematics



Fuente: <http://es.slideshare.net/mobile/guestac6b8d/planeamiento-174023>

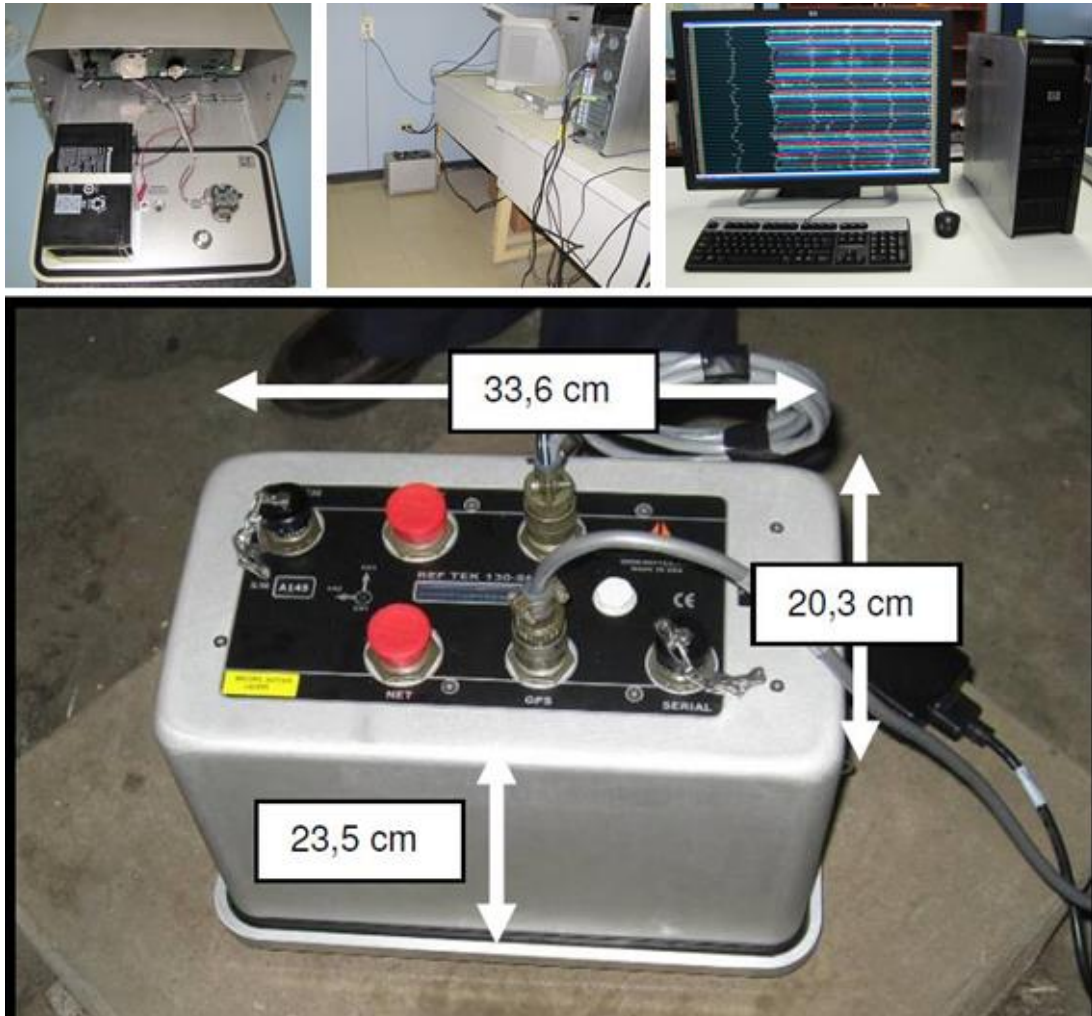
Fig. B2



Fuente: https://commons.m.wikimedia.org/wiki/File:Aceler%C3%B3grafo_del_Laboratorio_de_Ingenier%C3%ADa_S%C3%ADsmica_de_la_Universidad_de_Costa_Rica.JPG (foto

Anexo B

Fig. B3 Tipos de acelerografos.



Fuente: http://www.lis.ucr.ac.cr/clase_index/tv/inicio/acelerografo.html

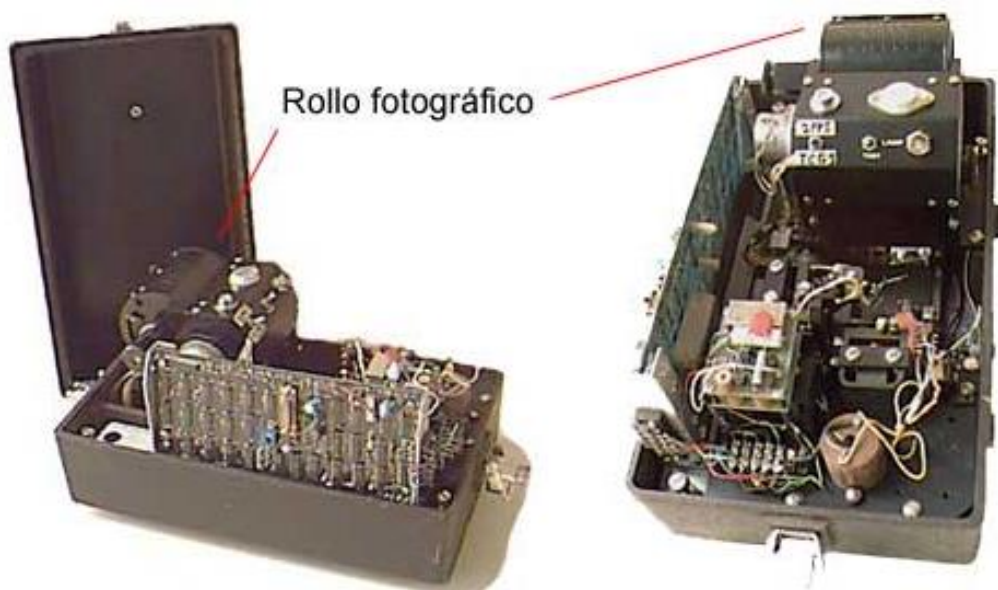
Anexo C

Fig. C1 Registro de los acelerografos o acelerogramas.



Fuente: <http://www.enteratelorca.com/lorca-pide-a-ign-que-instale-mas->

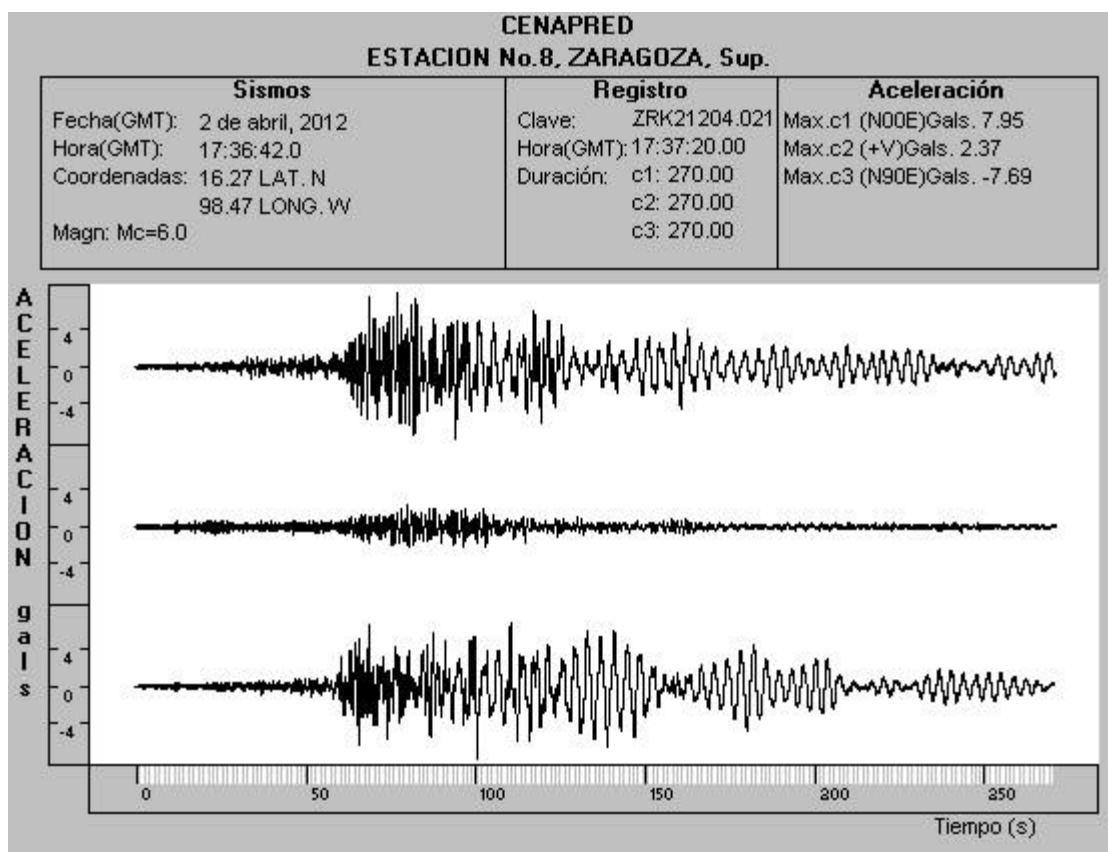
Fig. C2 acelerografos-para-aumentar-el-conocimiento-de-los-terremotos./



Fuente: http://www.lis.ucr.ac.cr/clase_index/tv/inicio/acelerografo.html

Anexo C

Fig. C3



Fuente: http://www.cenapred.unam.mx:8080/boletinSismico/sismo/imageves/accel/ZRK2120402_173720.00.gif

Bibliografia

Dinámica de Estructuras de Anil K. Chopra cuarta edición editorial Pearson Educación

Dynamics of structures Ray W. Clough. Joseph Penzien. Third Edition Computers y structures. Inc.

Dinámica Estructural Teoría y Cálculo Mario Paz Editorial Reverte, S. A. 1992

Dinámica Estructural Aplicada Al Diseño Sísmico por Luis Enrique García Reyes

Conceptos Básicos de Sismología Para Ingenieros Miguel Herraiz Sarachaga CISMID
1997

Dinámica de Suelos Y Estructuras Aplicadas a la Ingeniería Sísmica Rafael Colindres
Selva Editorial Limusa

Elementos de Ingeniería Sísmica Aurel A. Beles Mihail D. Ifrim A. García yague
Ediciones Omega, S. A.

Geotechnical Earthquake Engineering Steven L. Kramer Prentice Hall (civil engineering and engineering mechanics series)

Ciencias de la Tierra una Introduccion a la Geologia Fisica Edward J. Tarbuck
Frederick K. Lutgens Pearson Prentice Hall

De la Tierra y los Planetas Rocosos Una Introduccion a la Tectonica dr. Andres
Folguera Lic. Mauro G. Spagnudo

Diseño Sismico de Edificios Bazan y Meli Limusa Noriega Editores



Presidencia
de la República
del Ecuador



Plan Nacional
de Ciencia y Tecnología
Innovación y saberes



REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA		
FICHA DE REGISTRO DE TESIS		
TÍTULO Y SUBTÍTULO	IMPORTANCIA DEL ACELEROGRAFO Y MODELAMIENTO DE UN EDIFICIO DE 4 PISOS USANDO EL ESPECTRO DE DISEÑO	
AUTOR/ES: WELLINGTON ISRAEL QUIMIZ PEÑA	REVISORES: ING. PEDRO ANDRADE ING DOUGLAS ITURBURO ING. JOHN GALARZA	
INSTITUCIÓN: Universidad de Guayaquil	FACULTAD: De Ciencias Matemáticas y Físicas	
CARRERA: Ingeniería civil		
FECHA DE PUBLICACIÓN: 2015-2016	Nº DE PÁGS: 105	
ÁREAS TEMÁTICAS: ESTRUCTURAS IMPORTANCIA DEL ACELEROGRAFO		
PALABRAS CLAVE: <ACELEROGRAFO-MODELAMIENTO> <EDIFICIO 4 NIVELES-ESPECTRO DE DISEÑO>		
RESUMEN: El capítulo uno comienza con una breve introducción de las diferentes ciencias que se ven involucradas con el estudio de los sismos estas son las encargadas de estudiar el origen, ubicación, orientación, mecanismos, causa y los efectos que producen los terremotos, en lo concerniente a el origen de los sismos empezaremos por las teorías más antiguas y terminaremos por las teorías modernas como la del modelo de revote elástico propuesta por Reid la cual indica que los terremotos son el resultado de un proceso de deformación elástica y acumulación de esfuerzos en una zona de la corteza que se mantienen hasta que se supera la resistencia del material, se definen seguidamente todos los términos que interviene en el modelo de Reid. Como los sismos se generan en las capas de la tierra se expondrá el concepto de tectónica de placas ya que dependiendo del movimiento estas pueden chocar, separarse o rozarse y dar forma a las cordilleras, estas variaciones de las placas pueden ser: márgenes convergentes, divergentes, o conservatorios respectivamente. El capítulo dos trata sobre los efectos que producen los sismos en los suelos comenzando por las fallas aquí se explica que existen cuatro tipos de fallas pero que generalmente los terremotos son una combinación de estas cuatro, para mayor facilidad se procede a dar una notación geométrica de la ubicación del sismo con esto es posible señalar como viajan las ondas a través de los suelos, las ondas que se originan en el hipocentro se las conoce como ondas P y ondas S y las que están a punto de llegar a la superficie como ondas love y ondas Rayleigh,		
N. DE REGISTRO (en base de datos):	Nº. DE CLASIFICACIÓN:	
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):		
ADJUNTOS PDF:	☒ SI	☐ NO
CONTACTOS CON AUTOR/ES:	Teléfono: 0-939111051	E-mail: wellingtonquimiz@hotmail.co
CONTACTO EN LA INSTITUCIÓN:	Nombre: FACULTAD DE CIENCIAS MATEMATICAS Y FISICAS Teléfono: 2-283348	

Quito: Av. Whymper E7-37 y Alpillana, edificio Delfos, teléfonos (593-2) 2505660/ 1: y en la
Av. 9 de octubre 624 y Carrión, edificio Prometeo, teléfonos: 2569898/9, Fax: (593 2) 250-9054