

# MASTER UNIVERSITARIO EN ARQUITECTURA AVANZADA, PAISAJE, URBANISMO Y DISEÑO.

Línea de Tecnología Avanzada para la Arquitectura y el Urbanismo

## MASTER

A rquitectura avanzada

P aisaje

U rbanismo

D iseño



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR DE  
ARQUITECTURA

## arquitectura sismorresistente análisis en modelos arquitectónicos de mediana altura y su respuesta frente a esfuerzos sísmicos



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

AUTOR:

Santiago Santacruz Ochoa

TUTORES:

Begoña Serrano Lanzarote

Adolfo Alonso Durá

Ernesto Fenollosa Former

2017

*“Cada nueva situación requiere una nueva arquitectura.”*

*Jean Nouvel*

# arquitectura sismorresistente

análisis en modelos arquitectónicos de mediana altura y su respuesta frente a esfuerzos sísmicos.

AUTOR:

Santiago Santacruz Ochoa

TUTORES:

Begoña Serrano Lanzarote

Adolfo Alonso Durá

Ernesto Fenollosa Forner



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR DE  
ARQUITECTURA

MASTER

A rquitectura avanzada  
P aísaje  
U rbanismo  
D iseño

ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA (ETSA)

MASTER UNIVERSITARIO EN ARQUITECTURA AVANZADA,  
PAISAJE, URBANISMO Y DISEÑO.

Línea de Tecnología Avanzada para la Arquitectura y el Urbanismo.  
Curso académico 2015 - 2016



# Agradecimientos

---

A Dios, que guía mi camino.

A mi familia, Melissa y Amelia, que son la razón de mi vida, por su amor y compañía en un año lleno de nuevas experiencias, inolvidable, les amo.

A mis Padres; Diana y Ramiro, por inculcarme los valores y haber hecho de mí la persona que soy, a pesar de la distancia, siempre están conmigo.

A mis hermanos; Ramiro y Sebastián, por apoyarme siempre en mis estudios y en mi vida, por los consejos y los grandes momentos compartidos.

A mis abuelos, Luis y Blanca, el mas grande ejemplo de unión y fortaleza, porque siempre los llevo en mi corazón, gracias por todas sus oraciones.

A mis amigos, que se encuentran en diferentes lugares, por estar presentes, siempre gracias.

Mi agradecimiento especial a Adolfo Alonso, Begoña Serrano y Ernesto Fenollosa, por guiarme en el desarrollo de este trabajo, por su tiempo, sus consejos y enseñanzas.

A todos Ustedes. Muchas gracias.

# Resumen

Surge como necesidad evaluar el papel que juegan los arquitectos como responsables del diseño y construcción de las edificaciones que resultan vulnerables ante la fuerza de un terremoto. Si bien las construcciones han evolucionado, así como las normativas de cada territorio se van actualizando, han sucedido eventos imprevisibles que han demostrado que aún no estamos preparados para los fenómenos de grande magnitud que la naturaleza presenta.

Un ejemplo de ello es el terremoto de magnitud 7.8 ocurrido en abril de 2016 en Ecuador, donde cerca de 700 personas fallecieron, y más de 35000 resultaron afectados directamente. Eventos así nos motivan a buscar y contribuir desde el ámbito arquitectónico soluciones que eviten un resultado tan devastador para la sociedad.

Esta investigación proyecta el estudio de los conocimientos fundamentales que rigen la sismo resistencia, haciendo énfasis en los conceptos de diseño estructural y todos sus elementos, tales como cimentaciones, columnas, vigas, losas, forjados, muros, etc. Es importante evaluar la respuesta ante un sismo de todas las partes anteriormente descritas, revisar su comportamiento y respuesta tanto como

elemento aislado como en conjunto.

Se hace énfasis en describir los principios básicos del diseño sismorresistente así como sus elementos a considerar como rigidez, escala, altura, distribución de masas, etc. Se considera también la acción y respuesta de las edificaciones ante una acción sísmica.

Es necesario examinar la respuesta de las edificaciones en las zonas sísmicas predominantes, por lo que se ha tomado como referencia el terremoto producido en Ecuador en el año 2016, el cual debido a su magnitud y ubicación presenta datos reales para realizar una evaluación.

De esta manera se ha levantado un modelo que contiene las características mas comunes de una edificación de mediana altura típica de la zona en donde se presentó el sismo de Ecuador. El calculo lineal y no lineal de esta estructura presenta los resultados que nos indican la vulnerabilidad, fragilidad y respuesta ante un esfuerzo sísmico. El análisis Push-over, así como el estudio de respuesta en el tiempo, permite comprender con claridad el comportamiento estructural antes y después del paso del terremoto.

La bibliografía como parte fundamental de la investigación presenta ejemplos con datos obtenidos de diversos terremotos ocurridos a lo largo de la historia en las zonas sísmicas por excelencia en países como Japón, Chile, México, Haití, Venezuela, Ecuador, entre otros, definiendo las consecuencias marcadas en cada situación y el avance de la tecnología en cada territorio para contrarrestar este fenómeno natural.

## Palabras clave.

Arquitectura sismorresistente, estructuras sismorresistentes, diseño sismorresistente, terremotos y arquitectura, sísmico, análisis estructural, riesgo sísmico Ecuador.



# Abstract

It is necessary to evaluate the role of architects as responsible for the design and construction of buildings that are vulnerable to the force of an earthquake. Although the constructions have evolved, as the regulations of each territory are updated, unforeseeable events have happened that have shown that we are not yet ready for the phenomena of great magnitude that nature presents.

An example of this is the magnitude 7.8 earthquake that occurred in April 2016 in Ecuador, where about 700 people died, and more than 35,000 were directly affected. Events like this motivate us to seek and contribute from the architectural field solutions that avoid such a devastating result for society.

This research projects the study of the fundamental knowledge that govern the earthquake resistance, emphasizing the concepts of structural design and all its elements, such as foundations, columns, beams, slabs, walls, etc. It is important to evaluate the response to an earthquake of all the parts described above, to review its behavior and response both as an isolated element and as a whole.

Emphasis is placed on describing the basic principles of seismic design as well as its elements

to be considered as rigidity, scale, height, mass distribution, etc. It also considers the action and response of buildings to a seismic action.

It is necessary to examine the response of the buildings in the prevailing seismic zones, so that the earthquake produced in Ecuador in 2016 has been taken as a reference, which due to its magnitude and location presents real data for an evaluation.

In this way a model has been built containing the most common features of a medium height building typical of the area where the Ecuador earthquake occurred. The linear and nonlinear calculation of this structure presents the results that indicate the vulnerability, fragility and response to a seismic effort. The Push-over analysis, as well as the study of response in time, allows a clear understanding of the structural behavior before and after the earthquake.

The bibliography as a fundamental part of the research presents examples with data obtained from several earthquakes that have occurred throughout history in seismic zones par excellence in countries such as Japan, Chile, Mexico, Haiti, Venezuela, Ecuador, among others, defining the consequences

marked in each situation and the advance of technology in each territory to counteract this natural phenomenon.

## Keywords.

Seismic resistant architecture, seismic resistant structures, seismic resistant design, earthquakes and architecture, seismic, structural analysis, seismic risk Ecuador

# Índice

## CAPITULO I: Introducción

1.1	Introducción	11
1.2	Objetivos	13
1.3	Justificación	14
1.4	Metodología	15

## CAPITULO II: Origen de los sismos

2.1	Origen de los sismos	17
2.1.1	Naturaleza	17
2.1.2	Foco o hipocentro	17
2.1.3	Epicentro	17
2.2	Sismos, características y tipos de movimientos	17
2.2.1	Movimientos verticales	17
2.2.2	Movimientos horizontales	18
2.2.3	Movimientos ondulatorios	18
2.2.4	Propagación de los sismos	18
2.2.5	Distribución geográfica de un sismo	19
2.2.6	Duración e intensidad	19
2.3	Elementos y efectos de los terremotos	21
2.3.1	Motivos de origen	22
2.3.2	Placas	23
2.3.3	Tectónica de placas	23
2.4	Estructura y sismos	25
2.4.1	Límites de las placas	25
2.4.2	Fallas	27
2.4.2.1	Terremotos y fallas	28
2.4.2.2	Tipos de fallas	28
2.4.3	Propagación y ruptura	29

## CAPITULO III: Arquitectura sismorresistente

3.1	Arquitectura sismorresistente	32
3.2	Estructuras sismorresistentes y antisísmicas	32
3.2.1	Principio básico del diseño sismorresistente	33
3.2.2	Características de las estructuras sismorresistentes	33
3.2.3	Recomendaciones sobre estructuración	34
3.3	Elementos a considerar en el diseño	35
3.3.1	Escala y regularidad estructural	35
3.3.2	Rigidez	36
3.3.3	Distribución y concentración de masas	36
3.3.4	Pesos concentrados	36
3.3.5	Planta libre	37
3.3.6	Resistencia perimetral	37
3.4	Efectos sísmicos en los edificios	38
3.4.1	Acción sísmica	38
3.4.2	Respuesta de los edificios a la acción sísmica	39
3.5	Componentes a considerar en el diseño	40
3.5.1	Planta	40
3.5.1.1	Longitud en planta	40
3.5.1.2	Extensión en planta	41
3.5.1.2	Forma de la planta	42
3.5.2	Esquinas	42
3.5.3	Configuración vertical	43
3.5.4	Simetría	44
3.5.5	Rigidez torsional	44
3.5.6	Altura y esbeltez	45
3.5.7	Densidad estructural	46
3.5.8	Columna corta	47
3.5.9	Separación entre estructuras adyacentes	49



# Indice

## CAPITULO IV: Estructuras sismorresistentes

4.1	Estructuras sismoresistentes .....	51
4.1.1	Teoría del cálculo de estructuras sismorresistentes .....	51
4.1.2	Elementos estructurales sismorresistentes .....	54
4.1.3	Efecto sísmico en los elementos estructurales .....	54
4.2	Principal problema estructural frente a un sismo .....	56
	Planta libre .....	56

## CAPITULO V; Ubicación, contexto y enfoque

5.1	Terremotos en Ecuador .....	60
5.2	Zonas sísmicas en Ecuador .....	61
5.3	Terremoto de 2016 .....	62
5.3.1	Datos generales .....	62
5.3.2	Sucesos .....	63
5.3.3	Resumen de evaluación e intensidad .....	63
5.3.4	Datos de aceleración .....	64
5.3.5	Efectos en las construcciones afectadas .....	65
5.3.6	Daños en estructuras .....	68
5.3.7	Análisis fotográfico .....	71

## CAPITULO VI: Cálculo estructural

6.1	Caso de estudio .....	73
6.1.1	Análisis fotográfico .....	74
6.1.2	Características .....	75
6.2	Estructura .....	77
6.2.1	Características estructurales .....	80
6.3	Modelo de cálculo .....	82
6.3.1	Datos del modelo .....	83
6.3.2	Combinaciones .....	84
6.3.4	Comportamiento lineal .....	84
6.3.5	Vulnerabilidad sísmica .....	88
6.3.6	Comportamiento no lineal .....	88
6.3.7	Análisis frente al sismo (Método Pushover) .....	88
6.3.8	Analisis no lineal en el tiempo .....	91
6.3.9	Analisis no lineal del modelo (estudio deformación) .....	91
	Conclusiones .....	98
	Bibliografía .....	100
	Anexos .....	104



rescatista busca sobrevivientes entre los escombros de los edificios colapsados durante el terremoto de abril de 2016 en Ecuador.  
fuente: <http://www.eitb.eus/es/noticias/internacional/fotos/detalle/3992484/galeria-fotos-terremoto-ecuador/>; edición: autor

# CAPITULO I

# 1.1 Introducción

Los terremotos han estado presentes a lo largo de la historia de la humanidad, en varias ocasiones la cantidad de víctimas mortales como las pérdidas materiales han sido incontables, Al ser un fenómeno natural, nunca se sabe cuando se puede producir, ni lo catastrófico que puede llegar a ser.

Se podría relacionar a un fenómeno natural de grandes magnitudes de una manera directa con la arquitectura, remarcando que esta última juega un papel importante como responsable de la seguridad de las viviendas, debido a que casi nadie muere por un terremoto, sino por edificaciones que no han resistido y se han derrumbado sobre las personas que las habitaban.

Se ha demostrado que la zona comprendida dentro del cinturón de fuego del Pacífico es la región sísmica más activa del planeta, en donde se han producido los terremotos más devastadores en la historia de la humanidad.

Cuando hablamos de la destrucción y la fuerza de un terremoto, tenemos que tener en cuenta mucho más que su intensidad (medida en grados). Su capacidad de destrucción está en función de muchos

elementos: por ejemplo dónde y cómo se construye o la cercanía de su epicentro a zonas urbanas muy pobladas.

Algunas investigaciones indican que un terremoto en sí mismo no es extremadamente destructivo. Los sismos o temblores apenas producen víctimas por sí solos, desde luego muchas menos que los huracanes, inundaciones o incluso que una erupción volcánica, son los diseños arquitectónicos y las construcciones humanas, conjuntamente con todos sus elementos las que provocan la mayoría de los fallecidos.

Cuando un puente se quiebra, o un edificio se viene abajo, una fachada se cae o simplemente una ventana se desprende, pueden presentarse efectos lamentables. Hay que tener en cuenta el crecimiento de la población y de las ciudades, ya que al aumentar la concentración de la población y sobre todo de las ciudades en el planeta, aumentan los riesgos en un caso eventual de que un sismo se presente.

En algunos países, los terremotos que han ocurrido, presentaron magnitudes muy altas, en donde se ve un gran poder destructivo, sin embargo gracias a la preparación que se tiene, en muchos casos los efectos no son excesivamente devastadores.

Esta preparación se ha venido construyendo a lo largo del tiempo y de diversos eventos que han logrado crear una conciencia en la población, en donde aceptar el vivir en una zona sísmica es fundamental para estar siempre alerta ante lo que se pueda presentar.

Los sismos han estado directamente relacionados con la vida de sus habitantes, en Chile por ejemplo, durante el siglo XX los sismos provocaron cambios significativos tanto en la cultura técnica como en la material. Es por eso que este país es uno de los más conocedores sobre el tema, en donde las normas se han ido actualizando con el pasar del tiempo debido a que diferentes sismos de grandes magnitudes se hicieron presentes.

De la misma manera ha sucedido al otro lado del pacífico en donde Japón, gracias a los estudios e investigaciones sobre este efecto y su capacidad de desarrollo en tecnología ha propuesto nuevos proyectos arquitectónicos que pueden responder de mejor manera ante fenómenos naturales.

Es importante destacar que con el paso del tiempo, las construcciones han ido evolucionado, la tecnología ha jugado un papel primordial para que esto suceda,

pero también han ocurrido eventos imprevisibles que han demostrado que no ha sido suficiente y que aún no estamos totalmente preparados para los fenómenos de grande magnitud que presenta la naturaleza.

Es indudable que Arquitectos, Ingenieros y demás profesionales ligados a la construcción, juegan un papel fundamental al momento de diseñar, planificar y ejecutar una obra y comparten cierta responsabilidad en el momento que se presenta un terremoto poniendo a prueba todos los parámetros previos, sobre todo la resistencia de la estructura ante este evento.

Hay que tener claro que muchos de los lugares más poblados del planeta son zonas sísmicas, por lo que la conclusión es clara, si construimos bien, los efectos de los terremotos serán menores. Eso explican las diferentes consecuencias de los últimos terremotos de Japón, Chile, Ecuador o Haití; este último dejó mas de 200000 fallecidos, entre otras razones porque su epicentro estuvo muy cerca de la capital del país, Puerto Príncipe, algo que también sucedió en la ciudad española de Lorca en el 2011.

Ecuador, por otra parte es un país que si bien

tiene una normativa adecuada para enfrentar un fenómeno sísmico, presenta deficiencias al momento de ejecutar un proyecto, siendo uno de sus mayores problemas la falta de conciencia de las personas responsables, tanto de los organismos de control, como de los responsables de la construcción.

El terremoto de abril de 2016, es un ejemplo que demuestra que el país no se encuentra preparado para responder satisfactoriamente frente a un movimiento telurico de gran magnitud.

Cerca de 700 fallecidos, más de 30000 personas sin hogar, y alrededor de 7000 edificaciones destruidas, son cifras de consideración que demuestran la vulnerabilidad de las construcciones en la zona afectada y que demuestra que Ecuador ha tomado muy a la ligera el hecho de encontrarse ubicado en el anillo de fuego del pacífico, en donde la placa de Nazca se encuentra en un proceso de subducción constante frente a la placa Sudamericana.

Es necesario analizar los principales problemas estructurales de estas edificaciones en su mayoría de mediana altura, para determinar las posibles causas de su fracaso y proponer que en próximos eventos la respuesta de las construcciones sea adecuada

y resistente frente a la magnitud del sismo que se presente.

Con los conocimientos adquiridos y las herramientas de cálculo disponibles, se pretende analizar un modelo tipo de una edificación afectada y que produjo su colapso definitivo en el terremoto de Ecuador de abril de 2016, para lo cual se cuenta con los datos necesarios.



## 1.2 Objetivos

---

### Objetivo general

Analizar los efectos y la respuesta que se produce en la estructura de una edificación tipo de mediana altura que colapsó y se encontraba localizada en la zona afectada por el terremoto ocurrido el 16 abril de 2016 en Ecuador. Investigar así los principales problemas de las estructuras y el grado de vulnerabilidad que presentan ante un evento de gran magnitud.

### Objetivos específicos

- Analizar la situación del territorio ecuatoriano desde el punto de vista sísmico.
- Identificar las características constructivas y estructurales de las viviendas sismorresistentes.
- Investigar la relación y los efectos producidos entre estructura y los movimientos sísmicos de origen tectónico así como los principales problemas estructurales frente a un sismo.
- Analizar las causas que pueden provocar el colapso estructural así como la capacidad sismorresistente de los edificios y que son responsabilidad directa del diseño arquitectónico.

## 1.3 Justificación

Es necesario afrontar la realidad en la que Ecuador vive, éste es un país que se encuentra en una zona sísmica por excelencia, en donde a lo largo de su historia, se han presentado diversos terremotos de grandes magnitudes provocando incontables víctimas mortales, y millonarias pérdidas materiales, su ubicación geográfica en la costa del pacífico, dentro del anillo de fuego en donde se encuentran las placas tectónicas de nazca y sudamericana es considerada por los profesionales en la región sísmica más activa del mundo.

Si bien en la norma Ecuatoriana de la construcción (NEC-SE-DS) referente a cargas sísmicas y diseño sismorresistente, se especifica claramente todo lo que se debe hacer al momento del diseño, planificación y ejecución de una obra, la realidad es muy diferente, al momento de construir un edificio, en la mayoría de los casos se lo realiza sin tomar consideración de todo lo que se estipula en la norma, los principales problemas se verifican en el diseño, los materiales y la ejecución en obra, pero también por la falta de seguimiento y control del profesional a cargo y además de las entidades habilitantes que emiten un permiso de construcción.

En otros casos la realidad es aún peor, debido a que sin permisos y sin la necesidad de un profesional se

ejecutan irresponsablemente obras de una manera netamente artesanal y que no tienen ninguna consideración que demanda el construir en un lugar altamente sísmico.

Es lamentable pero muy real ver que los seres humanos tenemos mala memoria, y a corto plazo nos olvidamos de los daños y las pérdidas que nos dejan fenómenos naturales como un terremoto, en Ecuador esa falta de consideración nos ha pasado factura, y a día de hoy nuevamente todos preguntamos si este país estaba preparado para sobrellevar un sismo de estas características, lamentablemente si podríamos coincidir en que la respuesta es no.

Es importante aprender de la historia y saber que desde el ámbito de la Arquitectura se puede aportar con el fin de mejorar a futuro.

Esta investigación se justifica tomando como ejemplo a un edificio de mediana altura, para luego analizarlo estructuralmente con el fin de asignarle además de sus cargas (propias y de uso), la acción sísmica con los datos del terremoto ocurrido en el país en abril del año 2016 y ver cual es su respuesta, cuales sus fallas, en donde se encuentran las deficiencias que provocaron el colapso de su estructura y que se debe cambiar para mejorar una edificación de este tipo.



## 1.4 Metodología

Es de vital importancia a la hora de desarrollar un buen trabajo de fin de master, establecer una metodología clara y que presente una organización adecuada, es por ello que desde el inicio, se propone realizar una buena programación.

Para elaborar el proyecto de investigación, se ha desarrollado la siguiente metodología por etapas:

**Etapas 1.** Una primera etapa en donde se establece la investigación sobre el origen de los sismos, las causas y sus efectos, sus principales características como duración e intensidad especificando el estudio de la tectónica de placas. Para finalizar, se enuncian los diferentes tipos de fallas y los principales elementos que se encuentran al presentarse un sismo para su estudio.

**Etapas 2.** Establece el estudio sobre arquitectura sismorresistente, en donde a partir de diferentes análisis realizados a lo largo de la historia, se ha podido obtener de alguna manera, la respuesta de los edificios a la acción sísmica, se define un diseño sismorresistente que considera las recomendaciones para proponer una estructura que responda adecuadamente ante un posible fenómeno telúrico. Se establecen elementos a considerar a la

hora de diseñar un proyecto y se enfatiza en las recomendaciones sobre estructuración.

**Etapas 3.** En esta etapa se analiza el comportamiento de las estructuras sismorresistentes, sabiendo que todos los elementos que la componen y que se encuentra situada en zonas altamente sísmicas, deben ser calculadas y dimensionadas para que puedan responder favorablemente frente a los efectos de las acciones gravitatorias. Por último se realiza un apartado que se refiere específicamente al problema de planta débil o piso blando, uno de los mayores problemas de diseño estructural como respuesta ante un terremoto.

**Etapas 4.** Se realiza el estudio del lugar, su ubicación, contexto y enfoque. Ecuador por su ubicación geográfica, y como primer afectado del terremoto que azotó el país en abril de 2016, es propicio para analizar algunas de las edificaciones afectadas. Se analizará los antecedentes históricos frente a terremotos, así como la peligrosidad y los factores que propician un escenario sísmico.

**Etapas 5.** Se ejecuta el modelo para luego calcularlo, para lo cual se cuenta con los datos reales de diferentes estaciones que contienen suficientes

parámetros como la aceleración del terremoto suscitado en Ecuador en abril de 2016. Estos resultados definirán los principales problemas que presentan las estructuras y podrían identificar con mayor exactitud el lugar en donde se encuentran ubicados los puntos débiles que producen el colapso de la estructura.

Se establecen las conclusiones que resumen el trabajo de investigación. Los resultados obtenidos como análisis de un caso real servirán como información base para una posible mejora de los diseños estructurales así como conocer un poco más la situación constructiva en una zona del Ecuador.



niño observa los escombros de los edificios colapsados durante el terremoto de abril de 2016 en Ecuador.  
fuente: <http://www.pbs.org/newshour/tag/central-america/>; edición: autor

## CAPITULO II

## 2.1 Origen de los sismos

Los sismos que se producen cada año se calculan por millones, quienes están encargados de observarlos, reconocerlos y denotarlos registran anualmente más de treinta mil. Por suerte, muy pocos de ellos alcanzan la categoría final de terremotos, y es también conocido que la mayoría ocurren en el fondo de los océanos.

Hablamos de terremotos, movimientos sísmicos o sismos a los desplazamientos bruscos y repentinos del suelo, y que presentan una intensidad sumamente variable, que oscilan entre los movimientos leves que solo registran los aparatos mas sensibles, y las fuertes que devastan las ciudades produciendo cantidad de damnificados y lamentablemente fallecidos.

A los terremotos se los puede definir como movimientos violentos de la superficie terrestre. Ocurre en forma de sacudidas y vibraciones fuertes. Así la sacudida principal dura varios segundos, máximo uno o dos minutos, previo a esto también se pueden registrar movimientos de menor intensidad.

Existe una ciencia que estudia los terremotos, trata de la descripción física (duración, velocidad, intensidad, propagación, efectos, etc.), Marca también, la relación que hay entre un terremoto y la

naturaleza de los terrenos en donde se produce.

Un terremoto es un fenómeno adverso que no se puede predecir, es un hecho simple y aislado, de donde el sismólogo para poder estudiarlo, necesita conocer la naturaleza física de un movimiento sísmico, todas las diversas vibraciones de las capas terrestres y los elementos que componen un sismo, es decir, el lugar en donde se produce, la hora, dirección, la duración, la intensidad, el carácter, el numero de sacudidas, las causas y sus efectos.

### 2.1.1 Naturaleza

El movimiento sísmico se da por las mismas leyes del movimiento físico de los cuerpos y es el resultado de las vibraciones y ondulaciones de los estratos terrestres; tanto las unas como las otras producen sacudidas que posteriormente toman el nombre de ondas sísmicas.

### 2.1.2 Foco o hipocentro

Se llama así al punto específico en la profundidad de la Tierra desde donde se libera la energía de un terremoto. Se lo conoce como superficial cuando ocurre cerca a la corteza (hasta 70 Km de profundidad), de la misma manera se lo denomina intermedio cuando ocurre entre los 70 y 300 km de

profundidad, y profundo cuando supera los 300 km, tomemos en cuenta que el centro de la Tierra está a 6370 km de profundidad.

### 2.1.3 Epicentro

Se llama así al punto de la superficie de la Tierra directamente sobre el hipocentro. Es decir, que se refiere a la localización de la superficie terrestre donde la intensidad del terremoto se produce con mayor intensidad.

El punto que se encuentra en el interior de la corteza donde se produce el choque y de donde se propagan las ondas sísmicas se llama hipocentro o centro sísmico; el punto situado sobre la superficie terrestre en dirección vertical al centro se llama epicentro.

Todo el espacio que lo rodea y donde los efectos de la sacudida han sido captados se llama zona epicentral. Las vibraciones longitudinales y transversales que llegan a este lugar originan ondas superficiales que irradiando del epicentro se propagan paralelamente a la superficie de la tierra, de la misma manera que las ondas del mar.

## 2.2 Sismos, características y tipos de movimientos

**2.2.1 Movimientos verticales:** Se transmiten de

abajo arriba, es decir que el lugar de la tierra sacudido se encuentra sobre la vertical sísmica, en el epicentro. Los efectos de estos movimientos son extraordinarios.

**2.2.2 Movimientos horizontales:** Son relativamente comunes y el movimiento sísmico tiene una dirección determinada. Los edificios derrumbados son una muestra de esa dirección.

**2.2.3 Movimientos ondulatorios:** Se denominan así cuando la superficie del suelo se mueve asimilando la manera que produce el movimiento del mar.

Es difícil que cuando se presenta un terremoto presente un solo tipo de movimiento sísmico; por lo general se combinan unos con otros. Los terremotos no son hechos aislados, sino que son el resultado de distintas series de movimientos muy variables que pueden crecer y decrecer en fuerza, intensidad y frecuencia.

Cuando se produce un terremoto se forma el denominado período sísmico que no es más que la presencia de tres categorías de movimientos, el primero o fase inicial, que son los movimientos preliminares, la fase máxima, en donde se enfocan

los movimientos principales o más fuertes, y la fase final en donde los movimientos son cada vez menos intensos y que se repiten en un tiempo más o menos largo.

**2.2.4 Propagación de los sismos**

Toda la energía liberada por un sismo se disipa principalmente en forma de calor y una menor parte se propaga desde la zona de ruptura mediante ondas de varios tipos que producen vibración en la corteza terrestre. Estas ondas se desplazan desde el foco a través del medio sólido de la tierra y se denominan ondas de cuerpo, que al alcanzar la superficie de la corteza terrestre originan ondas de superficie, las mismas viajan por esta zona y su amplitud tiende a cero conforme aumenta la profundidad.

*“Las ondas de cuerpo son de dos tipos: P (también llamadas primarias, longitudinales, compresionales o dilatacionales), que se propaga en la misma dirección de su propia vibración y S (secundarias, transversales, de cortante, o equivoluminales), y se propagan en una dirección perpendicular a su vibración. En cuanto a las ondas de superficie, hay de muchas clases, pero las de mayor interés para la ingeniería sísmica son las ondas L (Love) y ondas R (Rayleigh). Como observamos en la (FIGURA 1).*

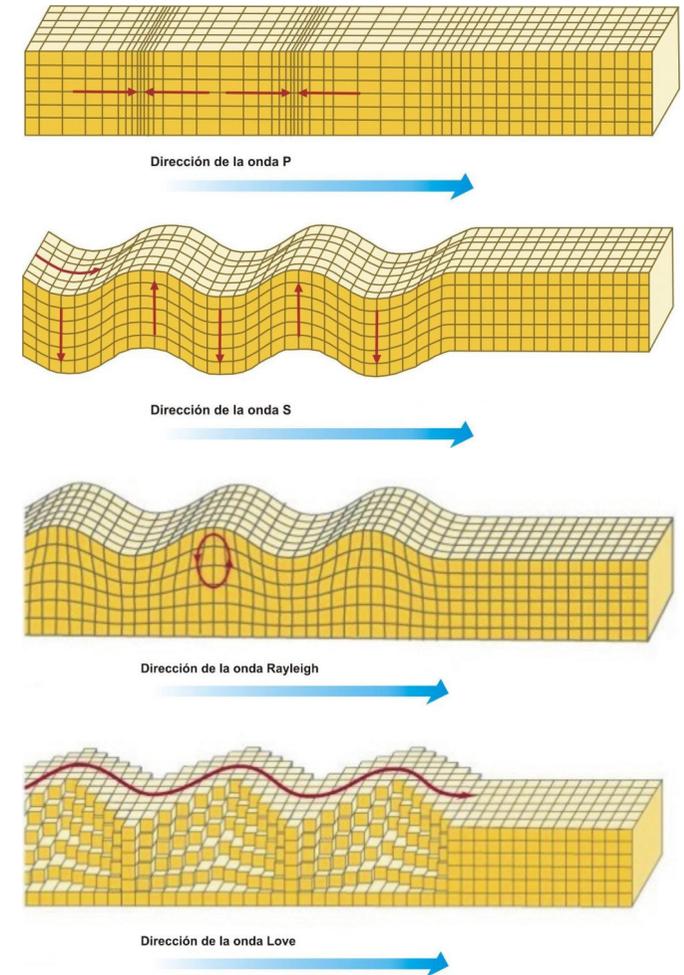


FIGURA 1. Movimiento de las ondas.  
 Fuente: <http://ncarquitectura.com/que-es-un-terremoto/>

*Las ondas de cuerpo se propagan a grandes distancias y su amplitud se atenúa poco a poco, las ondas P son las primeras en llegar, seguidas por las S, por lo que a medida que nos alejamos del epicentro crece la diferencia de tiempo de llegada de los dos tipos de ondas".* (Bazán y Meli, 2001; Rosenblueth, 1991; Sauter, 1989; Wakabayashi y Martinez, 1988).

### 2.2.5 Distribución geográfica de los sismos

De acuerdo a estudios realizados, los terremotos se concentran a lo largo de tres cinturones sísmicos:

- El 85% de la energía se libera en el Cinturón de Fuego del Pacífico en Sur América, Japón, Filipinas y varias cadenas de islas volcánicas. Casi todos los sismos de foco intermedio y profundo, se originan tierra adentro de las fosas oceánicas. La mayor sismicidad es de tipo tectónico, asociada las superficies de Wadati-Benioff.
- El 10% de la energía liberada en los terremotos se da a lo largo de la zona mediterránea-trans-asiática, con zonas de elevada sismicidad como Italia, Grecia, Irán y China. Se deben a compresión de las placas africana e índica sobre la placa Eurasiática.
- El 5% de la energía liberada en los terremotos se

produce en el sistema de las dorsales oceánicas, por movimientos a lo largo de las fallas de transformación. Generalmente son de foco superficial y ninguno es de intensidad importante.

### 2.2.6 Duración e intensidad

Casi siempre un terremoto comienza por vibraciones de pequeña amplitud, pero muchas veces los movimientos son aislados y el terremoto o sismo esta representado por un solo movimiento del suelo.

Así en la mayoría de los casos el fenómeno natural se prolonga por un tiempo considerable antes de que todo vuelva a la normalidad. La duración de un movimiento sísmico es igual al tiempo durante el cual la superficie de la tierra, en el lugar donde se advierte la sacudida, es puesta en movimiento por las ondas sísmicas.

Sin embargo, se debe distinguir una duración total del movimiento sísmico y una duración sensible. La total comprende el paso de todas las ondas sísmicas, pero de estas solo se advierten las más intensas, puesto que las otras son sensibles únicamente para los lectores que las perciben.

Estos terremotos sensibles, rara vez tienen una

duración mayor de algunos segundos, cuando este dura de 30 a 40 segundos el efecto es mayor pudiendo producir una catástrofe. Por ejemplo el terremoto de Andalucía en el año de 1844, duro 20 segundos; en Cantabria, en 1905, duro 40 segundos con pequeños intervalos.

La escala de intensidades más usada es la de Mercalli Modificada, una de cuyas versiones más recientes es:

Grado	Descripción
1.	No es sentido por las personas, registrado por los instrumentos sismográficos.
2.	Sentido solo por pocas personas en reposo, especialmente en los pisos superiores, objetos suspendidos pueden oscilar.
3.	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.
4.	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.
5.	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.*
6. *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.*
  7. *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.*
  8. *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.*
  9. *Pánico general, construcciones de mampostería tipo C, daño severo y aun colapso de 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.*

10. *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.*
11. *Los rieles de ferrocarril deformados severamente, ruptura de tuberías enterradas que quedan fuera de servicio.*
12. *Destrucción total, grandes masas de roca desplazadas, las líneas de visión óptica distorsionadas, objetos lanzados al aire.*

#### **Definición de los tipos de mampostería.**

*Tipo A: buena calidad de ejecución, mortero y diseño, reforzada y confinada empleando varillas de acero, diseñada para resistir cargas laterales de sismo.*

*Tipo B: buena calidad de ejecución, reforzada, pero no diseñada específicamente para resistir cargas laterales de sismo.*

*Tipo C: calidad de ejecución media, sin refuerzo y no diseñada para resistir cargas laterales.*

*Tipo D: materiales de baja resistencia, tal como adobe, baja calidad de ejecución débil para resistir cargas laterales.*

La intensidad de una sacudida sísmica se presenta a través de la energía que mueve el suelo. Por otra parte la intensidad de un terremoto se determina por las escalas sísmicas que constan de 10 a 12 grados; estas clasificaciones responden a los efectos que producen los terremotos.

El primer grado corresponde a las sacudidas instrumentales que solo perciben los apartados sísmicos y el de doce grados a las sacudidas desastrosas y catastróficas. Por lo que se puede concluir que los efectos de los terremotos no están íntimamente relacionados con la duración de la sacudida sino con la intensidad.

Existen escalas de intensidad de tipo instrumental que son más precisas. Por ejemplo la intensidad en función de la aceleración máxima del terreno en el sitio de interés, expresada generalmente como fracción de la gravedad, se puede obtener mediante mediciones realizadas por un aparato conocido con el nombre de acelerógrafo.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Los acelerógrafos son grabadores ópticos y mecánicos que requieren un disparador con el fin de no consumir grandes cantidades de papel. Por lo tanto pierden la porción inicial de cada sismo, además contienen sensores dispuestos de manera que registran la aceleración del terreno en tres direcciones ortogonales (dos horizontales y una vertical).



“El número y la calidad de estos aparatos ha aumentado extraordinariamente en los años recientes y ha permitido grandes avances en el conocimiento de las características de la excitación sísmica inducida en las construcciones. Los mismos aparatos colocados en los edificios permiten determinar a respuesta de éstos a la acción sísmica.

Los parámetros más importantes para definir la intensidad del movimiento y sus efectos en las estructuras son la aceleración máxima, expresada generalmente como fracción de la gravedad, la duración de la fase interna del movimiento, y el contenido de frecuencias. Este último se refiere a la rapidez del cambio de dirección del movimiento y es importante en cuanto a definir el tipo de estructura que será más afectado”. (Bazán y Meli, México, 2010, p 21.)

### 2.3 Elementos y efectos de los terremotos.

Se los conoce así a las consecuencias del paso de las ondas sísmicas a través de las capas terrestres y de su llegada a la superficie. Estos efectos pueden ser momentáneos como por ejemplo los maremotos, y permanentes como derrumbamientos de edificios, producción de grietas, fallas o fracturas, cambios hidrográficos, etc.

Estos efectos entre los mas desastrosos se han producido justamente en las áreas densa-mente pobladas. Como ejemplo, en 1923, un terremoto sacudió la isla de Honshu, en Japón. Este fenómeno, tuvo una intensidad que se alargó por 16 segundos, afecto un lugar en donde vivían mas de siete millones de personas y destruyó mas de cuatrocientos cincuenta mil edificios en las ciudades de Tokio y Yokohama, matando mas de ciento cincuenta mil personas.

Se sabe también que los terremotos producen olas sísmicas que pueden ocasionar terribles inundaciones, esto cuando su origen esta cerca o en el mar precisamente. Cuando un terremoto es de intensidad media, se forman grietas en las paredes de las viviendas, se caen las cornisas, pero cuando alcanza su máximo grado, todos los edificios se derrumban como si fuesen naipes aplastando de esta manera a miles de victimas quienes quedan atrapadas entre los escombros.

En el suelo se producen grietas, hendiduras y desniveles; no es raro que durante las sacudidas esas grietas se abran y cierren alternadamente. Los estratos de la superficie terrestre por efecto de los movimientos se desplazan.

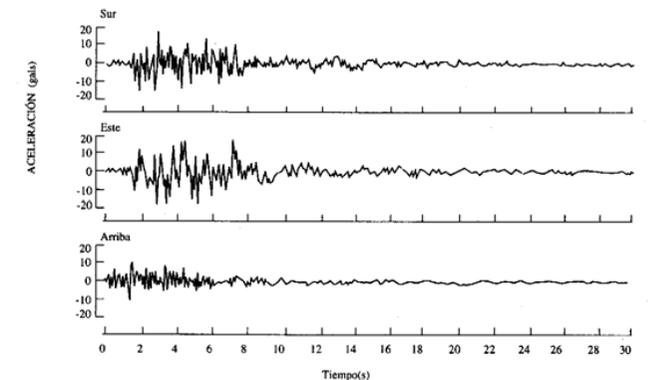


FIGURA 2. Registro de aceleraciones en las tres componentes  
 Fuente: (Bazán y Meli, 2001, p.21)



FIGURA 3. Haiti, 48 horas después del terremoto.  
 Fuente: Boston Globe,

[www.cubadebate.cu/noticias/2010/01/13/terremoto-de-haiti-replicas-satelite-nasa/#.WWI-NYQ1-M8](http://www.cubadebate.cu/noticias/2010/01/13/terremoto-de-haiti-replicas-satelite-nasa/#.WWI-NYQ1-M8)

Algo similar ocurre en los manantiales, quienes al sufrir el efecto sísmico, algunos pueden desaparecer para siempre o brevemente, otros cambian la composición mineral de sus aguas, varían de temperatura o simplemente se secan. Tampoco es extraño que a los sismos acompañe la formación de volcanillos de lodo desaparecen rápidamente.

Claro está que si bien aún no es posible pronosticar cuando se va a producir un terremoto, en las regiones expuestas se presentan previamente algunos fenómenos precursores. Entre estos fenómenos podemos encontrar los ruidos subterráneos, las variaciones de nivel de la marea en el mar, y también del agua de los pozos, existe también un recalentamiento del suelo, las perturbaciones atmosféricas y la agitación que pueden manifestar algunos animales domésticos.

*“Los terremotos son eventos que causan grandes daños en una población y los daños asociados no se deben solo a la sacudida del terreno, sino también a otros fenómenos que acompañan los movimientos sísmicos tales como: maremoto o tsunamis, incendios y conflagraciones, avalanchas y deslizamientos, asentamientos y licuefacción, estos han producido una gran cantidad de muertos, daños en la economía*

*de un país y han destruido una gran cantidad de obras construidas por el hombre, de ahí que el propósito de la ingeniería sismorresistente sea de minimizar o eliminar estos efectos, porque su costo es alto” (Sauter, 1989).*

- Maremotos o Tsunamis

Maremoto o tsunami, es el término que designa las olas marinas generadas por un sismo. Las mismas pueden llegar a tener una altura considerable que causa destrucción y en las regiones costeras. Estas olas no son percibidas por buques en alta mar, pero cuando se aproxima a la costa y disminuye la profundidad del mar, su energía se concentra en un área menor y la altura aumenta progresivamente convirtiéndose en una ola de superficie.

- Incendios y conflagraciones

Uno de los mayores peligros que se afronta después de un terremoto es la amenaza del fuego que si no es controlado a tiempo puede conducir a fuertes incendios. Se denomina conflagración a un gran incendio que se extiende de manera descontrolada por un periodo de tiempo largo.

- Avalanchas y deslizamientos

Los movimientos del terreno pueden desprender

masas de tierra en gran escala de las montañas por la vibración y originar así deslizamientos y avalanchas. Estos efectos geológicos debido a su violencia pueden arrasar campos, destruir edificaciones y sepultar personas.

Asentamientos, subsidencia y fractura del terreno  
Las vibraciones del terreno inducidas por un sismo suelen producir frecuentemente la compactación de depósitos de material granular y trae como consecuencia un asentamiento del terreno que puede ocasionar el colapso en un edificio u obras de ingeniería. Por otra parte, extensas zonas han sufrido subsidencia o descenso del nivel del terreno, debido a la compactación de suelos sin cohesión. Por ello zonas bajas cercanas a la costa han quedado inundadas después de un terremoto. También los terremotos generan desplazamientos a lo largo de una falla superficial que genera una fractura en el terreno y colapsos de rellenos saturados y mal compactados.

### 2.3.1 Motivos de origen

Los motivos que originan los terremotos son muy distintos, lo que ha permitido clasificar los terremotos en tectónicos y volcánicos. Los tectónicos son los más numerosos y la causa que los produce es



el desequilibrio de las capas de la corteza terrestre producido por el fenómeno de la contracción que produce las arrugas o los pliegues.

### 2.3.2 Placas

La corteza de la Tierra está conformada por una docena de placas (FIGURA 4) de aproximadamente 70 km de grosor, cada una con diferentes características físicas y químicas. Estas placas (tectónicas) se están acomodando en un proceso que lleva millones de años y que han ido dando la forma que hoy conocemos a la superficie de nuestro planeta.

Debido a este movimiento de las placas se han originado los continentes y los relieves geográficos en un proceso que está lejos de completarse. Habitualmente estos movimientos son lentos e imperceptibles, pero en algunos casos estas placas chocan entre sí como gigantescos témpanos de tierra sobre un océano de magma presente en las profundidades de la Tierra, impidiendo su desplazamiento.

Es así entonces que una placa comienza a desplazarse sobre o bajo la otra originando los lentos cambios en la topografía. Pero si el desplazamiento es

dificultado, comienza a acumularse una energía de tensión que en algún momento se liberará y una de las placas se moverá bruscamente contra la otra rompiéndola y liberándose entonces una cantidad variable de energía que origina el terremoto.

### 2.3.3 Tectónica de placas

Tiene su origen en dos teorías que la presiden, la teoría de la deriva continental y la teoría de la expansión del fondo oceánico. En la primera se explica el hecho de que los contornos de los continentes ensamblan entre sí como un rompecabezas, sugiriendo de esta manera que los continentes estuvieron unidos en el pasado formando un supercontinente llamado Pangea (significado griego “todas las tierras”) que posteriormente se fragmentó durante el período Pérmico<sup>2</sup>, originando los continentes actuales.

La teoría de expansión del fondo oceánico está sustentada en observaciones geológicas y geofísicas que indican que las cordilleras meso-oceánicas funcionan como centros donde se genera nuevo piso

2 El Pérmico es el último periodo de la era Paleozoica. Abarca desde el final del Carbonífero (hace 299,0 ± 0,8 millones de años) hasta el principio del Triásico (hace 251,0 ± 0,4 millones de años). Debe su nombre a extensas regiones de materiales de este periodo situadas en la región alrededor de la ciudad de Perm, en Rusia.

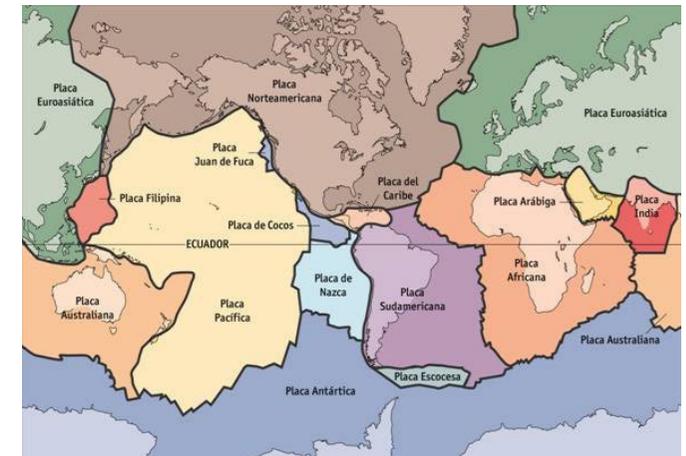


FIGURA 4. La distribución de las placas.

Fuente: [http://descubramosnuestroplaneta.blogspot.com.es/2014\\_12\\_01\\_archive.html](http://descubramosnuestroplaneta.blogspot.com.es/2014_12_01_archive.html)

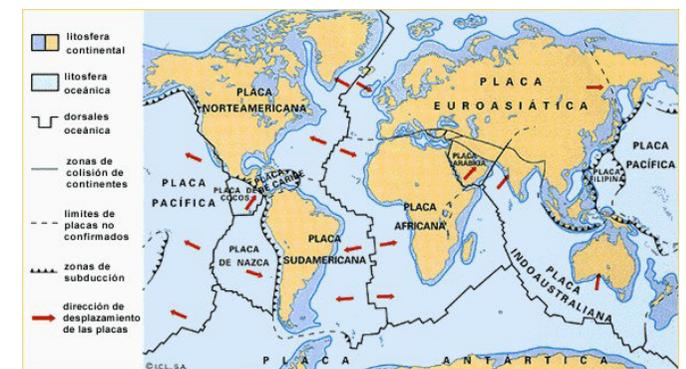


FIGURA 5. Mapa que muestra las placas tectónicas y su dirección de empuje.

Fuente: [http://descubramosnuestroplaneta.blogspot.com.es/2014\\_12\\_01\\_archive.html](http://descubramosnuestroplaneta.blogspot.com.es/2014_12_01_archive.html)

oceánico conforme los continentes se alejan entre sí.

*“La teoría de la tectónica de placas fue forjada principalmente entre los años 50 y 60 y se le considera la gran teoría unificadora de las Ciencias de la Tierra, ya que explica una gran cantidad de observaciones geológicas y geofísicas de una manera coherente y elegante”.*

Entre las placas mas importantes tenemos:

1. Placa Africana
2. Placa Antártica
3. Placa Arábica
4. Placa Australiana
5. Placa de Cocos
6. Placa del Caribe
7. Placa Escocesa(Scotia)
8. Placa Euroasiática
9. Placa Filipina
10. Placa Indo-Australiana
11. Placa Juan de Fuca
12. Placa de Nazca
13. Placa del Pacífico
14. Placa Norteamericana
15. Placa Sudamericana

La placa de Nazca es una placa tectónica oceánica que

se encuentra en el océano Pacífico oriental, junto a la costa occidental de América del Sur, principalmente en las costas de Chile, Perú y Ecuador.

El borde oriental de la placa se encuentra en una zona de subducción bajo la placa Sudamericana, lo que ha dado origen a la cordillera de los Andes y a la fosa chileno-peruana.

Investigaciones realizadas indican que la placa de nazca se desplaza en dirección N 80° E, llegando a tener una velocidad promedio de 11 centímetros por año. Además, la placa sufre un proceso de subducción por debajo de la placa sudamericana, la cual ha sido

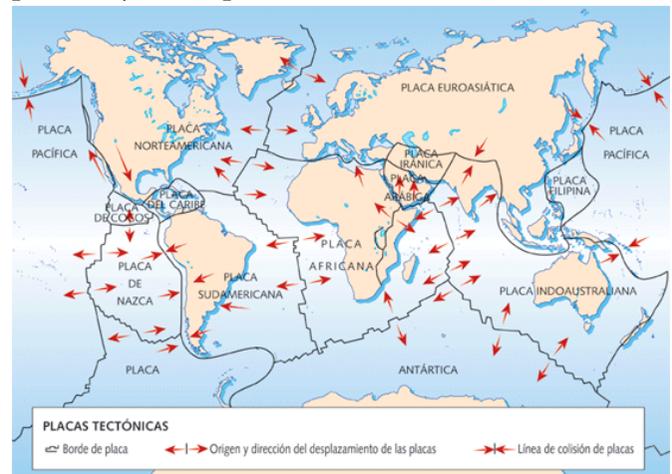


FIGURA 6. Dirección de colisión de las placas.

Fuente: [http://www.profesorenlinea.cl/Ciencias/Placas\\_tectonicas\\_Teoria.htm](http://www.profesorenlinea.cl/Ciencias/Placas_tectonicas_Teoria.htm)

la causa de los sismos mas importantes que han sufrido muchos de los países sudamericanos, sobre todo los situados en la parte oeste del continente.

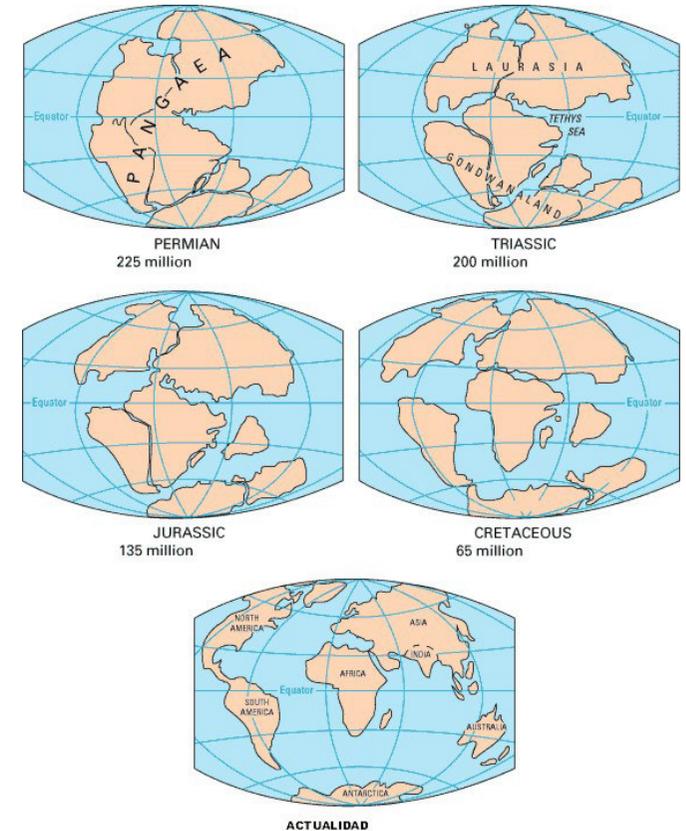


FIGURA 7. La evolución de los continentes (durante millones de años) hasta hoy.

Fuente: [http://www.profesorenlinea.cl/Ciencias/Placas\\_tectonicas\\_Teoria.htm](http://www.profesorenlinea.cl/Ciencias/Placas_tectonicas_Teoria.htm)



## 2.4 Estructuras y sismos

En lo que es interesante desarrollar a profundidad una investigación y en donde mayor importancia para la ingeniería estructural compete son los movimientos sísmicos de origen tectónico.

Los desplazamientos de las placas tectónicas son las que construyen las formaciones montañosas, produciendo movimientos en las fracturas o fallas, elevando o descendiendo largas cantidades de tierra.

El origen del concepto de “tectónica de las placas”, constituye uno de los mayores descubrimientos científicos de este siglo, aunque en principio su finalidad era explicar porque al juntar las costas atlánticas de África, Sudamérica, Norte América, África noroccidental y Asia, encajan perfectamente bien como si se tratase de un gran rompecabezas.

Después de analizar este mecanismo se delimitaron 7 grandes placas que se mueven unas respecto a las otras.

Es por eso que justamente en las zonas donde las placas se separan, chocan o se rozan, se originan acumulaciones de tensiones que son las encargadas de producir los terremotos.

Como consecuencia de estos fenómenos, después de los estudios realizados, se concluye que, al final del período Triásico, hace ciento ochenta millones de años, luego de veinte millones de años a la deriva, el grupo septentrional, conocido como Laurasia empezó a alejarse del grupo meridional, conocido como Gondwana, que abarcaba a Sud América, África, La India, Australia y la Antártida. Este mismo proceso originó la separación paulatina del conjunto Antártida - Australia respecto de Sud América - África, al igual que la India, que al desprenderse inicio su deriva hacia el norte como una enorme balsa que se desplaza en el mar.

La separación entre Sud América y África demanda 65 millones de años a la deriva, dando lugar a la formación del Océano Atlántico y el Océano Índico, que al final del período Cretácico, es decir, hace 135 millones de años, se desarrollaron considerablemente, mientras la India continuaba con su deriva hacia el norte.

Finalmente Australia se separa de la Antártida, a la que se hallaba unida, iniciando su deriva hacia el norte y la India completa su viaje hacia el norte cuando choca contra el sector meridional de Asia, sumergiéndose en parte debajo de ella y provocando

el engrosamiento de las 2 placas, lo que da origen a la formación del Himalaya.

### 2.4.1 Límites de las placas

Son los bordes de una placa y es aquí donde se presenta la mayor actividad tectónica (sismos, formación de montañas, actividad volcánica), ya que es donde se produce la interacción entre placas. Se pueden delimitar tres clases de límites:

#### **Divergentes:**

Son límites en los que las placas se separan unas de otras y, por lo tanto, emerge magma desde regiones más profundas (por ejemplo, la dorsal meso-atlántica formada por la separación de las placas de Eurasia y Norteamérica y las de África y Sudamérica).

#### **Convergentes:**

Son límites en los que una placa choca contra otra, formando una zona de subducción (la placa oceánica se hunde bajo de la placa continental) o un cinturón orogénico (si las placas chocan y se comprimen). Son también conocidos como “bordes activos”.

#### **Transformantes:**

Son límites donde los bordes de las placas se deslizan una con respecto a la otra a lo largo de una falla de

transformación.

En determinadas circunstancias, se forman zonas de límite o borde, donde se unen tres o más placas formando una combinación de los tres tipos de límites.

### 1. Límite divergente o constructivo

En los límites divergentes, las placas se alejan y el vacío que resulta de esta separación es rellenado por material de la corteza, que surge del interior, específicamente del magma de las capas inferiores. Se cree que el surgimiento de bordes divergentes en las uniones de tres placas está relacionado con la formación de puntos calientes. En estos casos, se junta material de la astenósfera cerca de la superficie y la energía cinética es suficiente para hacer pedazos la litósfera. El punto caliente que originó la dorsal mesoatlántica se encuentra actualmente debajo de Islandia, y el material nuevo ensancha la isla algunos centímetros cada siglo. Un ejemplo típico de este tipo de límite son las dorsales oceánicas (por ejemplo, la dorsal mesoatlántica) y en el continente las grietas como el Gran Valle del Rift.

### 2. Límite convergente o destructivo

Las características de los bordes convergentes

dependen del tipo de litosfera de las placas que chocan.

Cuando una placa oceánica (más densa) choca contra una continental (menos densa) la placa oceánica es empujada debajo, formando una zona de subducción. En la superficie, la modificación topográfica consiste en una fosa oceánica en el agua y un grupo de montañas en tierra.

Cuando dos placas continentales colisionan (colisión continental), se forman extensas cordilleras formando un borde de obducción. La cadena del Himalaya es el resultado de la colisión entre la placa Indoaustraliana y la placa Euroasiática.

Cuando dos placas oceánicas chocan, el resultado es un arco de islas (por ejemplo, Japón)

### 3. Límite transformante o conservativo

El movimiento de las placas a lo largo de las fallas de transformación puede causar considerables cambios en la superficie, especialmente cuando esto sucede en las proximidades de un asentamiento humano. Debido a la fricción, las placas no se deslizan en forma continua; sino que se acumula tensión en ambas placas hasta llegar a un nivel de energía

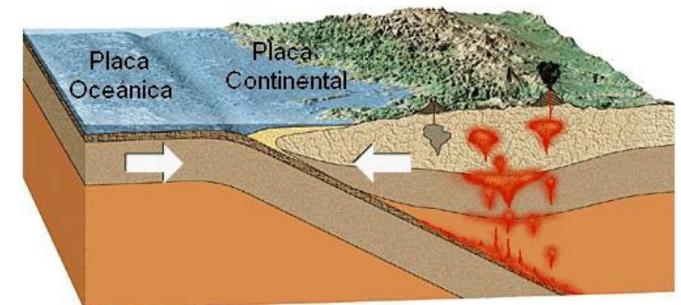


FIGURA 8. Esquema del encuentro de la placa de Nazca (oceánica) con la Sudamericana (continental).

Fuente: [http://www.profesorenlinea.cl/Ciencias/Placas\\_tectonicas\\_Teoria.htm](http://www.profesorenlinea.cl/Ciencias/Placas_tectonicas_Teoria.htm)



FIGURA 9. “La fuerza de las placas”. La falla de San Andrés en California en la costa pacífico de Estados Unidos, de norte a sur con una dimensión de 1.300 kilómetros a lo largo

Fuente: <http://www.ahoranoticias.cl/noticias/mundo/185658-la-falla-de-san-andres-y-el-gran-terremoto-que-esperan-en-california.html>



acumulada que sobrepasa el necesario para producir el movimiento. La energía potencial acumulada es liberada como presión o movimiento en la falla. Debido a la titánica cantidad de energía almacenada, estos movimientos ocasionan terremotos, de mayor o menor intensidad.

Un ejemplo de este tipo de límite es la falla de San Andrés (*FIGURA 9*), ubicada en el Oeste de Norteamérica, que es una de las partes del sistema de fallas producto del roce entre la placa Norteamericana y la del Pacífico.

#### Medición de la velocidad de las placas tectónicas

Vectores de velocidad de las placas tectónicas obtenidos mediante posicionamiento preciso GPS

La velocidad actual de las placas tectónicas se realiza mediante medidas precisas de GPS. La velocidad pasada de las placas se obtiene mediante la restitución de cortes geológicos (en corteza continental) o mediante la medida de la posición de las inversiones del campo magnético terrestre registradas en el fondo oceánico.

#### 2.4.2 Fallas

Denominariamos a una falla como una grieta en

la corteza terrestre en donde generalmente están asociadas con la formación de los límites entre las placas tectónicas de la Tierra.

En una falla activa, las piezas de la corteza terrestre, se mueven con el paso del tiempo, este movimiento puede producir terremotos, por el otro lado, las fallas inactivas son aquellas que en algún momento tuvieron movimiento a lo largo de ellas pero que ya no se desplazan, por esta razón el tipo de movimiento a lo largo de una falla depende del tipo de falla que encontremos, pudiendo definir como los principales a las tres siguientes:

- Falla de transformación
- Falla inversa
- Falla normal

Los lugares o zonas en que las placas ejercen esta fuerza entre ellas se denominan fallas, y son, desde luego, los puntos en que con mas probabilidad se originan fenómenos sísmicos. Sólo el 10% de los terremotos ocurren alejados de los límites de estas placas.

Claro está en que estos pliegues no se producen siempre lentamente como en los casos de elevación

y descenso de las costas. A veces bajo las presiones de las gigantescas fuerzas centrales, del globo, los estratos al doblarse ya sea bajando o subiendo se fracturarán y quebrarán. Zonas enteras de estratos pueden quedar aplastadas y desechas, las capas pueden desligarse las unas sobre las otras, dislocarse y agrietarse. Debido precisamente a estos fenómenos de dislocaciones interna, el estrato conmovido por el choque produce diversas vibraciones, las cuales se propagan de manera instantánea a todas las capas rocosas circundantes y superiores.

Desde el punto de vista interior en donde se ha producido la fractura, parte una sacudida que llega a la superficie de la tierra y origina un estremecimiento del suelo: un terremoto o sismo. Han recibido el nombre de terremotos tectónicos porque están relacionados con la arquitectura del globo, porque originan el relieve terrestre.

Existen también los terremotos volcánicos que como su nombre lo indica son los que provienen de la acción volcánica, preceden a las erupciones, las acompañan, o simplemente son una consecuencia debido al agrietamiento del cono volcánico.

Su causa es la fuerza expansiva de los gases y vapores

que producen explosiones durante la ascensión del magma. Inmediatamente cesa la presión ejercida sobre los gases, se escapan con formidable impulso, conmoviendo el volcán y parte de los terrenos circundantes.

#### 2.4.2.1 Terremotos y fallas.

Se ha demostrado que la Tierra, no es un planeta estático, se ha visto que la corteza terrestre se ha levantado en varias ocasiones, como muestra de ello se han encontrado plataformas de erosión marina, que en la antigüedad se han elevado varios metros por encima del nivel de las mareas más elevadas, demostrando así un movimiento vertical. Por otra parte, los desplazamientos de cerramientos, vías y demás estructuras indican que también es común el movimiento horizontal. Estos movimientos pueden estar asociados con gran cantidad de masa terrestre a las cuales se les denomina fallas.

De ahí que, se conoce como falla a una línea de fractura en donde una sección de la corteza terrestre se ha desplazado en relación a otra. Este desplazamiento puede ser en sentido vertical, horizontal o una combinación entre ellas. De ahí que en la actualidad sabemos que los sismos se deben al rompimiento fuerte y repentino de una falla.

En la corteza terrestre existen fallas preexistentes que se formaron en el pasado lejano, y es aquí en estas zonas de fragilidad en donde normalmente se producen los terremotos. Muchas son de gran extensión pudiendo generar terremotos de grandes magnitudes, uno de los ejemplos más conocidos es la falla de San Andrés, que separa la placa Norteamericana y la placa del Pacífico. Con una extensión cerca de 1300 Km se ubica en gran parte del oeste de California.

Así también existen muchas fallas que al ser pequeñas producen terremotos menos devastadores. Cabe recalcar que la mayoría de fallas son inactivas y se dice que no producen terremotos. Es importante tener claro que la mayoría de las fallas, no son ni rectas ni continuas, por el contrario, se forman en numerosas ramales y fracturas de menor tamaño, que presentan pliegues y desviaciones. La falla de San Andrés antes descrita es un ejemplo de esto, siendo un sistema formado por diversas fallas de grandes extensiones en donde no aparecen fracturas pequeñas.

El movimiento que se produce a lo largo de las fallas, se puede explicar de manera directamente relacionada con la teoría de la tectónica de placas.

Esta teoría explica que grandes masas de la corteza terrestre se están moviendo continuamente de una manera muy lenta. Las placas al ser móviles, se relacionan, y así también interactúan entre sí, y poco a poco se van desgastando y deformando las rocas en sus bordes.

Por esta razón que es aquí en los bordes en donde se producen la mayoría de los terremotos, siendo muy repetitivos. Apenas termina uno, empieza un nuevo proceso en donde el movimiento de las placas deforma las rocas hasta volver a fracturarse nuevamente.

La tectónica de placas considera que la litósfera está dividida en varios grandes segmentos relativamente estables de roca rígida, denominados placas que se extienden por el globo como caparazones curvos sobre una esfera. Existen siete grandes placas como la Placa del Pacífico y varias más chicas como la Placa de Cocos frente al Caribe.

#### 2.4.2.2 Tipos de fallas

**Falla de transformación.** Características

- El movimiento a lo largo de la falla de la grieta es horizontal, el bloque de roca a un lado de la falla se mueve en una dirección, mientras que



el bloque de roca del lado opuesto de la falla se mueve en dirección opuesta.

- Las fallas de transformación no dan origen a precipicios o fallas escarpadas porque los bloques de roca se mueven hacia arriba o abajo en relación al otro.

#### Fallas inversas. Características

- Ocurren en áreas donde las rocas se comprimen unas contra otras (produciéndose fuerzas de compresión), por lo que la corteza rocosa de un área ocupará menos espacio.
- La roca de un lado de la falla asciende con respecto a la roca del lado opuesto.
- El área expuesta de la falla es frecuentemente una saliente. Por lo que es imposible caminar sobre ella.
- También se considera como fallas inversas a las fallas de empuje, y ocurren cuando el ángulo de la falla es muy inclinado.

#### Fallas normales. Características

- Se producen en áreas en donde las rocas se están separando, de manera que la corteza rocosa de un área específica es capaz de ocupar más espacio.
- Las rocas de un lado de la falla normal se hunden

con respecto a las rocas del otro lado.

- Estas fallas normales no producen salientes rocosos.
- Es este tipo de fallas es posible que si se pueda caminar sobre un área expuesta.

#### 2.4.3 Propagación y ruptura

Se sabe que los esfuerzos que provocan el deslizamiento imprevisto a lo largo de las fallas son provocadas en última instancia por el movimiento de las placas terrestres. También está claro que la mayoría de fallas están bloqueadas, a excepción de algunos movimientos breves y abruptos que acompañan a la ruptura de un terremoto. El principal motivo por el que la mayor parte de las fallas están bloqueadas se da debido a la presión de confinamiento ejercida por la corteza suprayacente que es gigantesca. Y es por esta razón que las fracturas en la corteza en esencia, están fuertemente comprimidas.

En resumen, los esfuerzos que provocan la ruptura de la falla superan la resistencia friccional al desplazamiento. Todavía no se conoce con exactitud qué es lo que desencadena completamente la ruptura inicial. Sin embargo, este acontecimiento marca el inicio de un terremoto.

Se debe tomar en cuenta que un terremoto inicia en

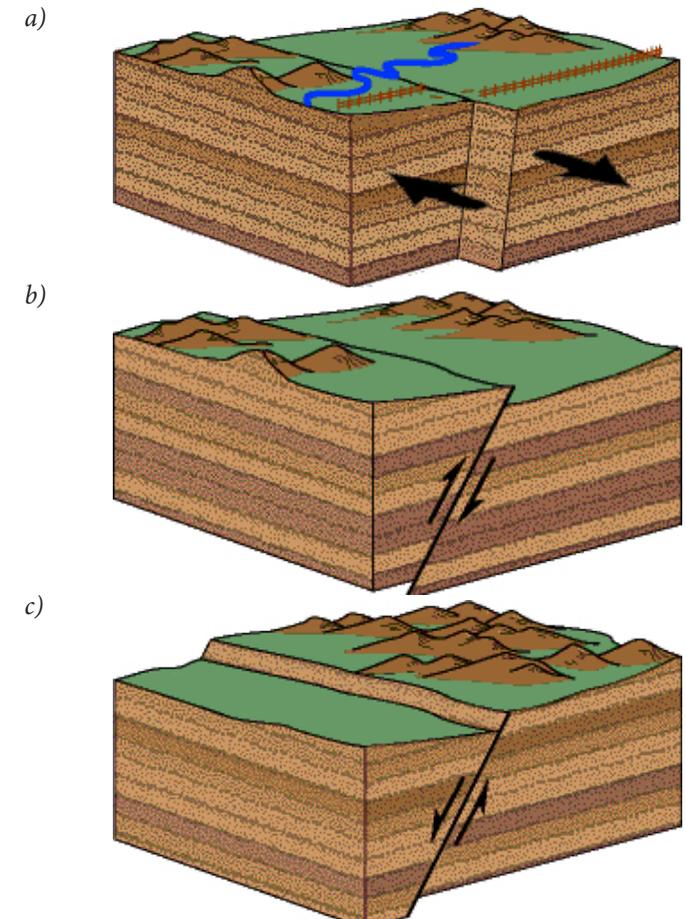


FIGURA 10. Tipos de fallas.

a) Falla de transformación

b) Falla inversa

c) Falla normal

Fuente: <http://bellanaturalezadedios.blogspot.com.es/2012/06/fallas-geologicas.html>

un punto en la profundidad a lo largo de un plano de falla denominado foco. Aunque los terremotos empiezan únicamente en un punto, implican el deslizamiento a lo largo de una superficie extensa de la falla. Es decir, la ruptura inicial empieza en el foco y posteriormente se propaga alejándose del origen, algunas veces en las dos direcciones horizontales a lo largo de la falla, pero casi siempre se da en una sola dirección. A medida que esta zona de ruptura avanza, puede acelerar su velocidad, reducirla o incluso saltar a un segundo segmento que se encuentre cerca

*“Durante los terremotos pequeños, el deslizamiento total se produce a lo largo de una superficie de falla comparativamente pequeña o en un segmento pequeño de una falla mayor. Así, la zona de ruptura puede propagarse rápidamente y la vida del terremoto es corta. Por el contrario, los grandes terremotos implican el deslizamiento a lo largo de un segmento grande de una falla, que algunas veces puede medir varios cientos de kilómetros de longitud, y, por tanto, su duración es más prolongada. Por ejemplo, la propagación de la zona de ruptura a lo largo de una falla de 300 kilómetros de longitud duraría alrededor de 1,5 minutos. Por consiguiente, las fuertes vibraciones que la acompañan producidas por un terremoto grande no sólo serían más fuertes, sino que*

*también durarían más que las vibraciones producidas por un terremoto pequeño”.* (Tarbuk y Lutgens, 2005, p.312)

Después de comprender cómo se propagan las rupturas causadas por los terremotos, deberíamos preguntarnos: ¿Por qué los terremotos se detienen en lugar de continuar a lo largo de toda la falla?. Para responder a esta inquietud, se han realizado pruebas en donde aconsejan que el deslizamiento puede detenerse cuando la ruptura alcanza una sección de la falla en la que las rocas no han sido suficientemente deformadas como para superar la resistencia friccional, lo cual podría suceder en una sección de la falla que haya experimentado recientemente un terremoto. La ruptura puede detenerse si encuentra un desvío suficientemente grande o una discontinuidad a lo largo del plano de la falla.

Con qué frecuencia se producen terremotos?. Se puede decir que continuamente. Es más, se producen literalmente miles de terremotos a diario. Por fortuna, la mayoría de ellos son imperceptibles para las personas, y muchos de ellos ocurren en regiones remotas. Y que únicamente se conoce su existencia debido a los sismógrafos que los detectan.

Foco (Hipocentro). Es el punto al interior de la Tierra desde donde se libera la energía de un terremoto. Cuando ocurre en la corteza de ella (hasta 70km de profundidad) se denomina superficial. Si ocurre entre los 70 y 300 km se lo llama intermedio y si es mayor se lo denomina profundo.

Epicentro. Es el punto de la superficie de la Tierra directamente sobre el hipocentro, desde luego donde la intensidad del terremoto es mayor.

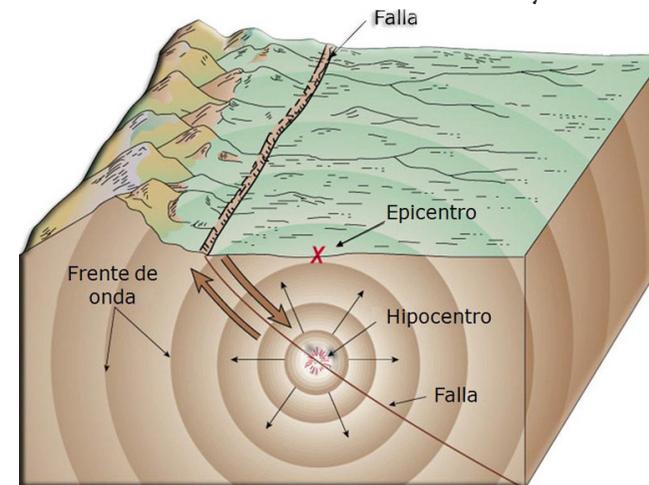


FIGURA 11. Foco y epicentro de un terremoto. El foco es la zona del interior de la Tierra donde se produce el desplazamiento inicial. El epicentro es el punto de la superficie que está directamente encima del foco.

Fuente: <https://cambio-climatico.school.blog/2016/11/29/sismicidad-y-vulcanismo/>



persona recorre en bicicleta por el centro de Portoviejo después del paso del terremoto de abril de 2016 en Ecuador  
fuente: <http://www.larepublica.ec/blog/sociedad/2016/05/04/ecuador-contabiliza-cerca-de-1-200-replicas-del-terremoto-de-abril/#prettyPhoto> ; edición: autor

## CAPITULO III

## 3.1 Arquitectura sismorresistente

Se han realizado muchas investigaciones que se han realizado sobre el tema de la arquitectura sismorresistente que han ido evolucionando con el paso del tiempo con especial énfasis en hacer frente a las graves consecuencias de los terremotos que se han registrado a lo largo del planeta.

Debido al movimiento vibratorio, causado por un terremoto, se produce el daño estructural en las infraestructuras, sabiendo que toda cimentación esta fundamentalmente ligada al apoyo sobre el suelo, es así entonces que como consecuencia del movimiento del suelo, los daños pueden ser originados por mas de una causa, ejemplo de ello es el desplazamiento que puede sufrir la cimentación de una edificación, otra es la pérdida de resistencia del suelo debido a la licue-facción<sup>3</sup>, ejemplo; grietas, movimientos, fallas, avalanchas, etc.

A pesar de todos estos escenarios, el que resulta como principal en lo que se refiere al daño estructural en el diseño sísmico de edificios es aquel debido a la respuesta dinámica de la construcción ante el movimiento del suelo sobre el cual se apoya la fundación.

<sup>3</sup> cambio de estado que ocurre cuando una sustancia pasa del estado gaseoso al líquido, por el aumento de presión.

### 3.2 Estructuras sismorresistentes y antisísmicas.

Existe una diferencia marcada cuando nos referimos a estructuras sismorresistentes y estructuras antisísmicas. Cuando se habla de estructuras sismorresistentes significa que debe resistir los esfuerzos provocados por un sismo, lo cual afecta a toda edificación en zona sísmica y se ajusta estrictamente a cuando suceda un terremoto para que el edificio no colapse, sea cual sea su naturaleza. Así, por ejemplo, en la norma española se aplican reglas y limitaciones a las estructuras de edificios según sus tipos estructurales y, muy importante su configuración geométrica.

Por otro lado, antisísmico significa que está específicamente pensado ya no únicamente para resistir el sismo, sino para mitigar su efecto. Es decir, para que el sismo le afecte lo menos posible. También habrá de ser sismorresistente, pero en tanto su diseño mitiga el efecto del sismo, los esfuerzos provocados por éste serán menores. Esta es la diferencia fundamental: hacer que el efecto del sismo sobre la edificación sea el menor posible.

Podemos decir entonces que el diseño antisísmico se basa fundamentalmente en conseguir que la frecuencia propia del edificio sea baja en relación a

la del sismo, aparte de otras estrategias que permiten que el efecto del sismo se disipe y provoquen menos esfuerzos en la estructura. Estas otras estrategias suponen aligerar el peso propio cuanto sea posible puesto que la fuerza sísmica es proporcional a la masa en movimiento, hacer diseños simétricos en las dos direcciones ortogonales en planta y otros basados en la tipología estructural, donde lo básico es que la estructura resulte dúctil, es decir, que pueda deformarse considerablemente sin que los esfuerzos en ella aumenten con el fin de evitar posibles desplomes de la edificación.

En general, para diseñar una construcción sismorresistente, se deben considerar diversos factores, primero la frecuencia con la que se producen sismos en el lugar donde esta edificación se emplazará y la estabilidad del terreno, para que en base a ello se puedan definir los detalles constructivos y los materiales que se utilizarán.

*“Aunque parezca un tanto contradictorio, debido a que un sismo de gran magnitud puede exigir bastante a una estructura, no es económicamente factible diseñar para que las construcciones puedan resistir grandes terremotos sin daño alguno, pues estos pueden presentarse frecuentemente”.* (Meli, 2010).



Si se toma en cuenta lo anterior se puede decir entonces que el diseño sismorresistente tiene dos objetivos principales: El primero es lograr que cuando se presente algún sismo, la estructura no se derrumbe o presente daños completamente irreparables. El segundo es evitar que se cause pánico y daños en la salud a los habitantes de una construcción cuando se produzca un terremoto.

### 3.2.1 Principio básico del diseño sismorresistente

Se ha establecido el principio fundamental para el diseño estructural, que propone como finalidad promover el cumplimiento del bajo riesgo de colapso de la estructura durante un sismo. Principio, que a su vez, se ha convertido en el principio básico de la arquitectura sismorresistente:

**“Las estructuras sismorresistentes deben diseñarse de tal forma que todos sus elementos resistentes puedan actuar simultáneamente”.**

*“Es decir, deben poder ofrecer toda su capacidad sismo-resistente en forma simultánea. Caso contrario se produce el escalonamiento de la misma, pudiendo llegarse por esta causa al colapso total del edificio.”*

*Las causas que pueden provocar el escalonamiento*

*de la capacidad sismo-resistente de los edificios y que son responsabilidad del diseño arquitectónico son las siguientes:*

1. *Torsión sísmica.*
2. *Columnas cortas.*
3. *Seudo-resonancia.*
4. *Golpeteo.*
5. *Pisos flexibles.*
6. *Cambios bruscos de rigideces en planta y altura”.* (Giuliani, Hugo. 1994).

Desde el punto de vista del diseño estructural, esto se puede lograr en la estableciendo que la rigidez - resistencia sea la misma en todos sus elementos, tanto en fase elástico como en el elastoplástico<sup>4</sup>. En caso contrario es fácil comprender que se producirá la rotura escalonada de los elementos o dispositivos resistentes llevando lógicamente al colapso la estructura resistente.

<sup>4</sup> Comportamiento de un elemento al ser sometido a un esfuerzo de tracción, en donde cierta función homogénea de las tensiones supera su límite entonces al desaparecer la carga quedan deformaciones remanentes y el cuerpo no vuelve exactamente a su forma. Por lo tanto, aparecen deformaciones no reversibles.

Corresponde también, al diseño arquitectónico sismorresistente, compatibilizar sus diversos aspectos: funcional, formal espacial, constructivo, económico, estético, de tal manera que satisfaga las exigencias de este principio.

En síntesis la teoría, metodología o la investigación que sirvan para desarrollar una arquitectura sismorresistente, debe sin ningún inconveniente satisfacer este principio fundamental.

### 3.2.2 Características de estructuras sismorresistentes

La estructura de un edificio ubicado en un área sísmica difiere solo si en su análisis se considera la acción de las cargas que genera el sismo. Por ello es necesario eliminar el concepto erróneo que un edificio es sostenido por una estructura destinada a resistir las cargas gravitatorias a la que se le agrega otra destinada a resistir las cargas sísmicas. La estructura de un edificio, sometida a la acción de un sismo sufre deformaciones, se haya previsto la estructura para resistir un sismo o no. Los movimientos del terreno provocan que el edificio sea arrastrado, es así que se mueve como un péndulo invertido.

Los movimientos del edificio son complejos, dependen del tamaño, las cargas o pesos en

cada piso, características del terreno en donde se realiza la cimentación, geometría del edificio, materiales estructurales y no estructurales usados, etc. Por estos motivos el diseño de una estructura sismorresistente debe arrancar desde el instante en que inicia el proyecto, acompañando la evolución del proyecto, integrarse en el edificio como un elemento fundamental de un organismo vivo. Desde una megaestructura hasta una vivienda unifamiliar se cuenta con elementos estructurales, que necesarios para la estabilidad a cargas gravitatorias, pueden ser usados para asegurar la capacidad resistente a cargas sísmicas.

Toda construcción tiene elementos verticales y horizontales, lineales o planos, que pueden ser integrados en la estructura y que deben ser capaces de absorber cargas sísmicas.

*“Es evidente que la configuración estructural queda en buena parte definida por el proyecto arquitectónico. Es por ello que en esta etapa es esencial la interacción entre el responsable del proyecto arquitectónico y el del proyecto estructural. El segundo debe hacer consciente al primero de las necesidades mínimas de rigidez, resistencia y regularidad que requiere la estructura y de las consecuencias que tienen algunas decisiones*

*arquitectónicas en el comportamiento estructural.*

*Es cierto que la mayoría de las recomendaciones de estructuración para zonas sísmicas tienden a lograr edificios regulares y robustos; por ello limitan también la libertad del uso del espacio interno del edificio. Constituye, por tanto, un reto para los proyectistas conjugar las necesidades arquitectónicas y estructurales y lograr un proyecto a la vez funcional, seguro y estéticamente atractivo”.* (Bazán y Meli, México, 2010, p 175.)

### 3.2.3 Recomendaciones sobre estructuración

Basados en la experiencia obtenida a lo largo del tiempo en varios temblores ocurridos en diversos puntos de la Tierra, existen diversas recomendaciones sobre estructuración, con el fin de mejorar el comportamiento sísmico de las edificaciones, destacando las mas importantes tendríamos:

- a) Poco peso.
- b) Sencillez, simetría y regularidad en planta como en elevación.
- c) Plantas poco alargadas.
- d) Uniformidad en la distribución de resistencia, rigidez y ductilidad.

e) Hiperestaticidad y líneas escalonadas de defensa estructural.

f) Formación de articulaciones plásticas en elementos horizontales antes que en los verticales.

g) Propiedades dinámicas adecuadas al terreno en que se desplantará la estructura.

h) Congruencia entre lo proyectado y lo construido.

*Se recomienda que las estructuras sean ligeras pues las fuerzas debidas al sismo surgen como consecuencia de la inercia de las masas a desplazarse, por lo que, entre menos pesen, menores serán los efectos de los sismos en ellas. Conviene también que sean sencillas, para que los modelos matemáticos sean realistas, pues una estructura muy compleja, mezclando distintos tipos de sistemas estructurales y materiales, no es fácil de modelar; que sean simétricas para reducir efectos de torsión; que no sean muy alargadas ni en planta, ni en elevación: en planta, para reducir la posibilidad de que el movimiento de un extremo del edificio sea diferente al del otro extremo, lo que causaría efectos usualmente no previstos; en elevación, para reducir los efectos de volteo, que encarecen considerablemente las cimentaciones. Se deben evitar remetimientos en elevación, pues los cambios bruscos en masa o rigidez propician amplificaciones dinámicas importantes, que suelen provocar daños graves. Lo mismo puede decirse*



con respecto a cambios en la forma de la planta. Conviene que la resistencia y la rigidez de la estructura estén repartidas uniformemente, sin concentrarse en unos cuantos elementos resistentes, o con variaciones grandes en los claros entre columnas o en las dimensiones de las trabes y de las columnas. Entre mayor hiperestaticidad tiene una estructura, es mayor el número de secciones estructurales que deben fallar antes de que la estructura colapse, asimismo, si se planea que haya elementos que fallen antes que otros, se puede dar la posibilidad de evitar daños grandes a toda la estructura. Estos elementos deben colocarse adecuadamente para que su reparación sea sencilla. El problema de satisfacer esta condición es que se requiere analizar varias etapas del comportamiento, para verificar que los elementos estructurales que van quedando son capaces de soportar el sismo sin colapsar, lo que encarece y complica el cálculo de la estructura.

Se debe buscar una estructuración a base de columnas fuertes-vigas débiles, para propiciar la formación de articulaciones plásticas en las vigas al excederse la resistencia suministrada, ya sea porque se está aprovechando la ductilidad o porque, además de eso, el sismo excede las previsiones de diseño. (Cenapred y Jica, México, 1999, p 120)

### 3.3 Elementos a considerar en el diseño

#### 3.3.1 Escala y regularidad estructural

Cuando hablamos de escala de un edificio, nos referimos a la relación del tamaño del edificio respecto a la dimensión de su estructura y de todos los componentes estructurales que la conforman. Se sabe que una vivienda convencional de baja altura no tiene problemas sísmicos graves debido a su dimensión y su pequeña altura respecto a la cantidad de muros de carga que aumentan el momento de inercia total, esto debido a que los claros son relativamente pequeños.

Las solicitaciones sísmicas son función de la escala del edificio. Las cargas que actúan sobre una vivienda pequeña son resistidas por la estructura de la misma sin grandes inconvenientes. Pero cargas proporcionales en un edificio generan esfuerzos que no son directamente proporcionales, sino superiores. Por lo que se concluye que las fuerzas de inercia, que originan las solicitaciones sísmicas son mas elevadas mientras más masa tiene el edificio.

Es importante describir que para conseguir una regularidad estructural y constructiva en un edificio se requiere provocar la coincidencia del centro de

masas<sup>5</sup> con el centro de rigideces<sup>6</sup>. Para que esto sea posible es extremadamente necesario que los elementos estructurales y constructivos procuren la simetría tridimensional. Por lo que, es necesaria una distribución geométrica tridimensional de las masas de la estructura y de todos sus elementos y componentes resistentes.

Algo similar sucede cuando los edificios son muy largos en donde es muy probable que se presenten grandes diferencias entre la respuesta del edificio al sismo, como a la magnitud y dirección del mismo.

5 Es el centro de las cargas gravitacionales o verticales, y por tanto, su ubicación dependerá de la distribución de las mismas. Toma en cuenta básicamente los entrepisos, muros no estructurales y elementos de fachada no estructurales también. En contexto llamamos así al punto en el que se concentra el peso de un cuerpo, de forma que si el cuerpo se apoyara en ese punto, permanecería en equilibrio

6 Es el punto con respecto al cual el edificio se mueve desplazándose como un todo, es el punto donde se pueden considerar concentradas las rigideces de todos los elementos estructurales portantes (columnas, muros, etc). Si el edificio presenta rotaciones estas serán con respecto a este punto. Existe línea de rigidez en el sentido X y línea de rigidez en el sentido Y, la intersección de ellas representa el centro de rigidez. Las líneas de rigidez representan la línea de acción de la resultante de las rigideces en cada sentido asumiendo que las rigideces de cada pórtico fueran fuerzas.

Es muy difícil que una estructura grande (pudiendo ser esta larga, alta, etc) actúe como un conjunto ante un evento sísmico. Lo cual provoca necesariamente torsiones. De la misma manera si el edificio esta compuesto de cuerpos en diferentes direcciones, las partes responderán diferencialmente. Por lo que se recomienda subdividir los edificios (a través de juntas constructivas) en volúmenes compactos e independientes. Si esto no se puede hacer, se recomienda reducir la proporción de los cuerpos salientes para hacerlos más compactos.

### 3.3.2 Rigidez

La rigidez se confunde con resistencia, pero son dos conceptos diferentes, en tanto la resistencia es la capacidad de carga que puede soportar un elemento estructural antes de colapsar, la rigidez mide la capacidad que un elemento estructural tiene para oponerse a ser deformado.

Se dice que un cuerpo es más rígido cuanto mayor sea la carga que es necesario aplicar para alcanzar una deformación dada. Analíticamente la rigidez de un elemento se expresa mediante el cociente entre la carga y la deformación que esta produce.

En las estructuras modernas de edificios es común

adoptar soluciones con pórticos, que se construyen con vigas y columnas unidas en sus nudos, constituyendo un elemento con continuidad estructural. La unión entre diferentes componentes de una estructura tiene una influencia decisiva en su rigidez, o lo que es lo mismo en su deformabilidad.

Matemáticamente la flexibilidad se define como la inversa de la rigidez, o sea como el cociente entre la deformación y la carga que produce esa deformación. Cuando se requiere un edificio rígido o flexible, es decir poco deformable o más deformable se recurre lógicamente a estructuras rígidas, como lo son los tabiques de hormigón armado, así como alta densidad de muros de mampostería de alta resistencia y espesor.

### 3.3.3 Distribución y concentración de masas

La distribución de las masas debe ser lo mas uniforme posible, en cada planta como en altura. Es conveniente que la variación de las masas piso a piso acompañe a la variación de la rigidez. Si la relación masa-rigidez varia bruscamente de un piso a otro se producen concentraciones de esfuerzos.

Se debe evitar la presencia de masas inútiles, tales como rellenos excesivos en terrazas con jardín, etc.

Es conveniente solucionar la provisión de agua con sistemas que eviten la construcción de una reserva de agua voluminosa en el nivel mas alto del edificio.

### 3.3.4 Pesos concentrados

*“En la mayoría de las actuales normas sismo resistentes el coeficiente sísmico aumenta casi proporcionalmente a la altura del piso respecto del terreno.*

*En consecuencia, en el Diseño Arquitectónico, es muy importante tener en cuenta este principio, tanto para evitar el uso de materiales pesados, contrapisos, tabiques divisorios, revestimientos, etc., en los niveles superiores, como para ubicar los locales destinados a archivos, piletas de natación o equipos pesados en los niveles inferiores. Se consigue así, no sólo reducir las fuerzas sísmicas por el hecho de que el coeficiente sísmico aumenta en los niveles superiores, sino también reducir, naturalmente, los momentos y cortes sísmicos.*

*Se trata de una construcción de seis niveles donde se compara el efecto sísmico provocado por un cierto peso  $P$ , ubicado primero en el quinto nivel y luego en el primer nivel de la misma construcción.*

*Las conclusiones son terminantes. Para el caso  $P$*



ubicado en el quinto nivel, el momento al vuelco resulta 25 veces mayor que para el caso de P ubicado en el primer nivel. Además, el corte sísmico afecta a los niveles del uno al cinco; en cambio, en el segundo caso, sólo al primer nivel y en una relación 5 veces menor.” (Giuliani Hugo, Argentina, 1994, p. 73)

En la (FIGURA 12) se deja perfectamente aclarada la importancia de este último concepto.

### 3.3.5 Planta libre

Este nombre se usa generalmente para describir un edificio cuya planta baja es más débil que las siguientes. Pero puede presentarse el caso de piso flexible en cualquier nivel. En general, como las mayores solicitaciones están en planta baja, una variación brusca de rigidez entre ésta y el piso siguiente produce una variación de esfuerzo que exige especial cálculo en el diseño de la estructura.

Existe piso flexible cuando hay una gran discontinuidad en la rigidez y la resistencia en los elementos verticales de la estructura en un nivel con relación a los otros pisos. En la mayoría de los casos esta discontinuidad se produce debido a que un piso, generalmente la planta baja, es más alto que el resto de los pisos.

También puede haber discontinuidad por un tipo de diseño muy frecuente, en el cual no todas las columnas descargan en el terreno, algunas columnas se interrumpen en pisos superiores. En estos casos, las cargas no son conducidas directamente al suelo y hay un cambio brusco de rigidez y resistencia. Otro caso de piso flexible muy frecuente, pero menos evidente, es el de planta baja libre y pisos superiores con cargas elevadas o muy rígidos.

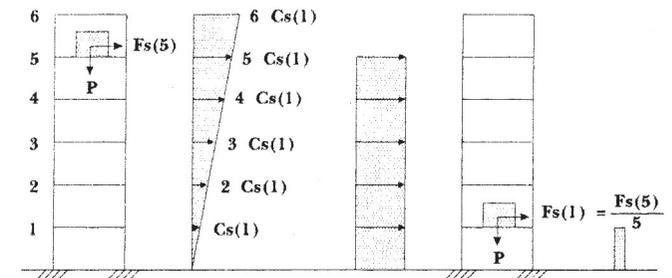
En estos casos, si los vanos se han rellenado con mampostería la estructura funciona como si en los pisos superiores existieran tabiques transmitiendo los cortes a una estructura de columnas.

Estas formas plantean dos problemas. Por un lado tienden a producir variaciones de rigidez y, por tanto, movimientos diferenciales entre las partes del edificio, causando una concentración de esfuerzos en la esquina entrante. El otro problema, y más importante, es la torsión. Esta se produce por a no existir coincidencia entre el centro de masas y el centro de rigidez. Las fuerzas del sismo provocan una rotación que distorsiona el edificio. La magnitud de las solicitaciones que provoca el sismo depende las longitudes y alturas de las alas y sus relaciones alto/ancho.

Para prevenir daños por esquinas interiores conviene separar la planta en dos cuerpos mediante juntas sísmicas, o reforzar la estructura en la zona de la esquina con elementos capaces de absorber los esfuerzos que se producen.

### 3.3.6 Resistencia perimetral

Para resistir los efectos de la torsión en planta es conveniente tener elementos resistentes en el perímetro del edificio, es decir, ubicar elementos resistentes al sismo en las fachadas del edificio.



$$\begin{aligned}
 F_s(5) &= P \cdot 5 \text{ Cs}(1) \\
 F_s(1) &= P \cdot \text{Cs}(1) \quad \text{luego: } \frac{F_s(5)}{F_s(1)} = 5 ; \\
 M_v(5) &= P \cdot 5 \text{ Cs}(1) \cdot 5h = 25 P \cdot \text{Cs}(1) \cdot h \\
 M_v(1) &= P \cdot \text{Cs}(1) \cdot h \quad \text{luego: } \frac{M_v(5)}{M_v(1)} = 25 ;
 \end{aligned}$$

FIGURA 12. Ejercicio de ejemplo

Fuente: Bazán y Meli, 2001

Cuanto más alejado del centro de rigidez de la planta se ubique un elemento, mayor es el brazo de palanca respecto a ese centro, y mayor será el momento resistente que pueda generar. Para este efecto la planta más eficiente es la planta circular, aunque otras formas funcionan satisfactoriamente. Siempre es conveniente colocar elementos resistentes al sismo en el perímetro, ya sean tabiques, pórticos, pórticos con diagonales con capacidad para resistir corte directo y por torsión.

### 3.4 Efectos sísmicos en los edificios

#### 3.4.1 Acción sísmica

Todo movimiento sísmico en el suelo se transmite directamente a los edificios que se encuentran sobre éste. La cimentación o base del edificio tiende a seguir el movimiento del suelo, a la vez, por inercia la masa del edificio se opone a ser desplazada dinámicamente y a seguir el movimiento de su base. (FIGURA 13) Es así que se producen las fuerzas de inercia que atentan contra la seguridad de la estructura.

Como se ha mencionado anteriormente, el movimiento del suelo consta de vibraciones horizontales y verticales, las primeras resultan en general más críticas.

*“La flexibilidad de la estructura ante el efecto de las fuerzas de inercia hace que ésta vibre de forma distinta a la del suelo mismo. Las fuerzas que se inducen en la estructura no son función solamente de la intensidad del movimiento del suelo, sino dependen en forma preponderante de las propiedades de la estructura misma. Por una parte, las fuerzas son proporcionales a la masa del edificio y, por otra, son función de algunas propiedades dinámicas que definen su forma de vibrar.*”

*Una apreciación aproximada de la respuesta sísmica de una estructura se tiene al estudiar un modelo simple que es un sistema de un grado de libertad, constituido por una masa concentrada y un elemento resistente con cierta rigidez lateral y cierto amortiguamiento (FIGURA 14)...*

*... Los movimientos del suelo son amplificados en forma importante por la vibración de la estructura, de manera que las aceleraciones que se presentan en la misma llegan a ser varias veces superiores a las del terreno. El grado de amplificación depende del amortiguamiento propio de la edificación y de la relación entre el período corto, resultan más afectadas las construcciones rígidas y pesadas.*

*Cuando el movimiento del terreno es lento, con*

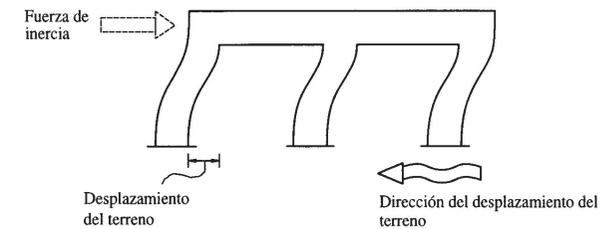


FIGURA 13. Fuerza de inercia generada por la vibración de la estructura

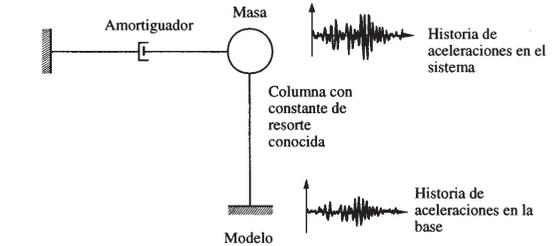


FIGURA 14. Modelo de un sistema de un grado de libertad

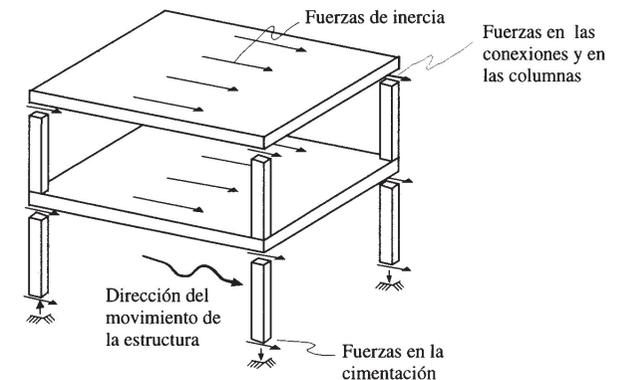


FIGURA 15. Flujo de fuerzas en la estructura debido a la vibración

Fuente imágenes 13,14,15: Bazán y Meli, 2001. pg 28



períodos dominantes largos, es en las estructuras altas y flexibles donde se amplifican las vibraciones y se generan aceleraciones más elevadas y por ende fuerzas de inercia mayores.

Las fuerzas de inercia que se generan por la vibración en los lugares donde se encuentran las masas del edificio se transmiten a través de la estructura por trayectorias que dependen de la configuración estructural. Estas fuerzas generan esfuerzos y deformaciones que pueden poner en peligro la estabilidad de la construcción. La (FIGURA 15) muestra esquemáticamente el flujo de fuerzas en una estructura típica. Se observa que pueden resultar críticas las fuerzas en las uniones entre los elementos estructurales, las fuerzas cortantes en las columnas y la transmisión de dichas fuerzas a la cimentación” (Bazán y Meli, México, 2010, p29.)

### 3.4.2 Respuesta de los edificios a la acción sísmica

La intensidad de la vibración inducida en un edificio depende tanto de las características del movimiento del terreno como de las propiedades dinámicas de la estructura.

“Para sismos moderados la estructura se mantiene, normalmente, dentro de su intervalo de comportamiento elástico lineal y su respuesta puede

calcularse con buena aproximación en los métodos de análisis dinámico de sistemas lineales.

Las características esenciales de la respuesta se llegan a estimar con aceptable precisión al modelar la estructura mediante un sistema de un grado de libertad con periodo igual al fundamental de la estructura. La (FIGURA 16) ilustra algunos aspectos del problema. Si se someten varios sistemas de un grado de libertad con diferentes periodos a cierta ley de movimientos del terreno, cada uno responde de manera diferente; la amplitud de su respuesta depende esencialmente de la relación entre el periodo del sistema y el periodo dominante del movimiento del suelo. Se aprecia en el ejemplo que mientras más cercana a la unidad sea esta relación, mayor es la amplitud de respuesta.

Una estructura real es un sistema más complejo que el de un grado de libertad y su respuesta es más difícil de estimar.

La (FIGURA 17) muestra las aceleraciones medidas en distintos puntos de un edificio de la ciudad de México sometido a un sismo de intensidad moderada, así como en el terreno adyacente y en el subsuelo. El conjunto de mediciones permite apreciar cómo el movimiento es casi imperceptible en los depósitos

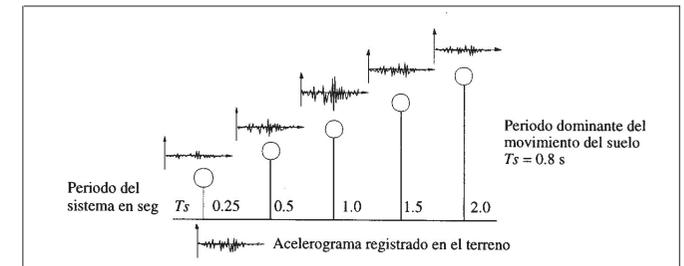


FIGURA 16. Ampliación del movimiento del terreno en sistemas con distinto periodo fundamental de vibración

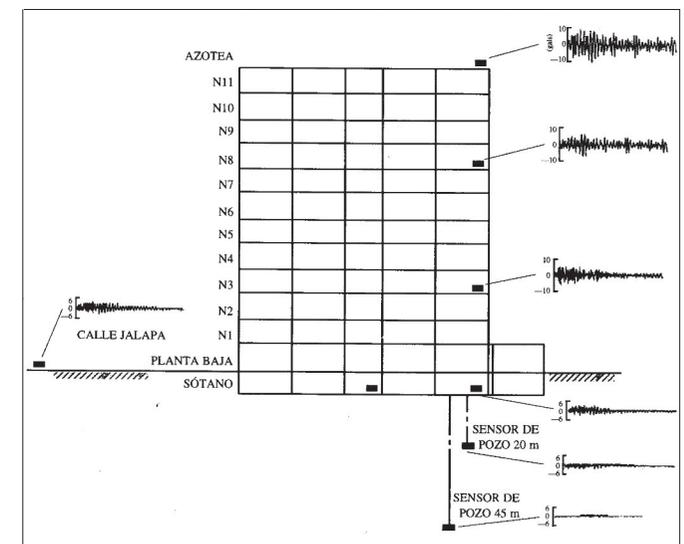


FIGURA 17. Registros de aceleraciones en un edificio de la ciudad de México para un sismo moderado (28 de octubre de 1993)

Fuente imágenes 13,14,15: Bazán y Meli, 2001. pg 31

firμες profundas y crece en intensidad dentro de los estratos de arcilla (20m de profundidad), y más aún en la superficie. El registro obtenido en el sótano del edificio resulta prácticamente igual al medido en el terreno libre, lo que indica que, en este caso, la presencia del edificio no altera significativamente el movimiento del terreno. Los registros obtenidos en el edificio van creciendo en intensidad con la altura, hasta que en la azotea la aceleración máxima es 2.5 veces mayor que la máxima registrada en el sótano. De los comentarios sobre la respuesta de sistemas de un grado de libertad se desprende que esta amplificación entre la azotea y el sótano depende principalmente de la relación entre el periodo fundamental del edificio y el periodo dominante del suelo.

A medida que la intensidad de la excitación aplicada al edificio aumenta, se generan cambios en las propiedades dinámicas del mismo, las que alteran su respuesta. En términos generales, el comportamiento deja de ser lineal, la rigidez tiende a bajar y el amortiguamiento tiende a aumentar.

La magnitud de estas modificaciones es muy distinta para diferentes tipos de sistemas y de materiales. En términos generales, el comportamiento deja de ser lineal, la rigidez tiende a bajar y el amortiguamiento tiende a aumentar.

La magnitud de estas modificaciones es muy distinta para diferentes tipos de sistemas y de materiales. El acero, por ejemplo, mantiene su comportamiento lineal hasta niveles muy altos de esfuerzos, correspondientes a la fluencia. El concreto tiene una reducción significativa en su rigidez cuando los esfuerzos de compresión exceden a 50 por ciento de la resistencia, pero sobre todo, la rigidez de estructuras de este material se ve disminuida por el agrietamiento de las secciones que están sujetas a momentos flexionantes elevados.

Una fuente importante de cambio en las propiedades dinámicas de las construcciones es el efecto de elementos no estructurales, o sea de los recubrimientos y paredes divisorias que para niveles bajos de sollicitación pueden contribuir significativamente a la rigidez, pero que después se agrietan o se separan de la estructura principal". (Bazán y Meli, México, 2010, p30.)

### 3.5 Componentes a considerar en el diseño

#### 3.5.1 Planta

##### 3.5.1.1 Longitud en planta

Es de conocimiento que la longitud en planta influye directamente en la estructura de una edificación ante la transmisión de ondas que se producen

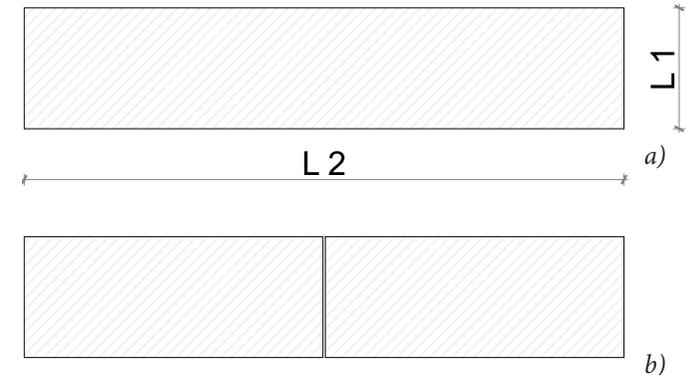


FIGURA 18. a) Relación de longitud en planta L1 - L2  
b) Junta intermedia como solución

fuelle: autor



FIGURA 19. Edificios colapsados en respuesta al movimiento sísmico en donde su planta longitudinal influye  
fuelle: www.ryokoo.wordpress.com



en el terreno debido a un movimiento sísmico. En donde a mayor longitud en planta, empeora el comportamiento estructural, debido a que la respuesta de la estructura ante estas ondas puede diferir considerablemente de un punto de apoyo a otro de la misma edificación. Es decir, los edificios largos son más propensos a tener problemas debido a las componentes torsionales del movimiento del suelo.

Debido a estos movimientos es recomendable que la diferencia entre las longitudes (en planta) sea  $L2 / L1 \leq 2.3$ .

Una solución a este problema es insertar juntas totales, de manera que cada una de las estructuras separadas sea una estructura corta, por lo que estas juntas deben ser diseñadas con el fin de que no se produzcan choques entre las partes separadas a consecuencia del movimiento independiente.

### 3.5.1.2 Extensión en planta

Es fácil visualizar como un riesgo sísmico las fuerzas de vuelco en un edificio, pero los edificios con gran desarrollo en planta presentan otros problemas para su análisis. Cuando la planta es muy grande, aunque sea simétrica el edificio no responderá como una

unidad. Al calcular las fuerzas sísmicas, se supone que la estructura vibra como un sistema en el que todos los puntos de una planta en el mismo nivel y en el mismo lapso tienen el mismo desplazamiento, la misma velocidad y la misma aceleración, con idéntica amplitud.

Pero la propagación de las ondas sísmicas no es instantánea y su velocidad de propagación depende de la naturaleza del terreno y de las características de la estructura, por ello las bases del edificio a todo lo largo de este vibran asincrónicamente con diferentes aceleraciones, provocando esfuerzos longitudinales de tracción, compresión y desplazamientos longitudinales.

Un aumento de la longitud del edificio incrementa los esfuerzos en un nivel que funciona como un diafragma de distribución horizontal. La rigidez del piso puede ser insuficiente para redistribuir la carga horizontal originada por un sismo.

Los esfuerzos causados por variaciones de temperatura, por asentamiento preexistentes o provocados por sismos son mayores en edificios con grandes dimensiones en planta.

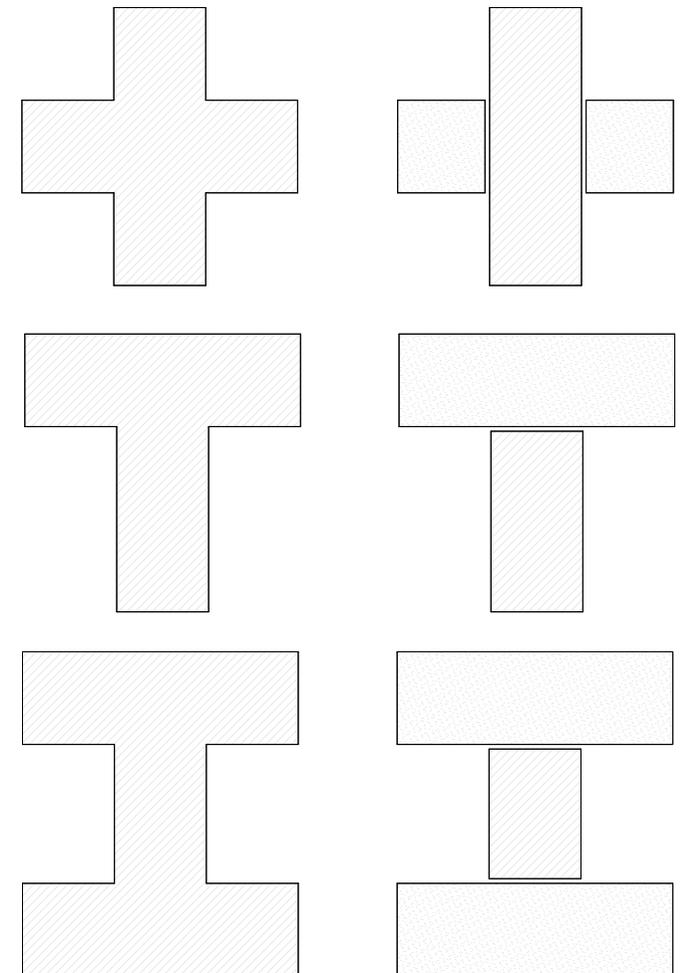


FIGURA 20. Plantas de forma irregular y su posible solución  
 fuente: autor

La solución para este tipo de edificios es diseñar una planta con suficientes elementos sismo resistentes para acortar las luces del diafragma.

### 3.5.1.3 Forma de la planta

Es indiscutible que la forma de la planta influye directamente en la estructura de una edificación ante la concentración de esfuerzos que se producen en un movimiento sísmico. Entre los lugares mas vulnerables se encuentran los ángulos de quiebre entre partes de la estructura, el problema en estos vértices se puede resolver colocando juntas<sup>7</sup> apropiadas con lo que cada parte del edificio reaccione por separado y no en conjunto, disminuyendo una posible fractura en las uniones. Es de infinita necesidad resolver estas juntas a detalle, diseñándolas para evitar que en un posible movimiento telurico las estructuras se choquen entre sí.

Otra recomendación, indica que es preferible no concentrar elementos rígidos y resistentes, tales como

<sup>7</sup> Junta que permite una independencia de dos macizos adyacentes, de forma que el movimiento de uno se produce de manera independiente del otro.

Una junta estructural bien diseñada favorece un movimiento suficiente de las partes oscilantes que permiten que la estructura permanezca intacta por el terremoto

muros de corte, en la zona central de las plantas, porque son menos efectivos para resistir torsión, si bien los muros ubicados en la zona central tienen un comportamiento aceptable, las columnas estarán sujetas a un cortante por torsión mayor que aquel proporcionado por la ubicación de los muros en la periferia. No es nada recomendable colocar escaleras y elevadores en las partes externas del edificio, sobre todo las que poseen un peso considerable ya que tienden a actuar aisladamente ante sismos, con concentraciones de fuerzas y torsiones difíciles de predecir sin llevar a cabo un análisis complicado.

### 3.5.2 Esquinas

Las esquinas de los edificios resistentes plantean problemas especiales, son elementos que requieren mucho cuidado en el diseño estructural, por definición la esquina es el lugar donde se concentra mucho el esfuerzo durante un sismo y tiende a liberarse. Las esquinas exteriores pueden sufrir concentraciones de esfuerzos si el movimiento sísmico tiene dirección diagonal respecto a la planta, aunque el resto de los elementos esté menos solicitado. Esto conduce a dos problemas principales. El primero es que existan discontinuidades estructurales en las esquinas de tal manera que el esfuerzo sea fácilmente liberado por esa parte.

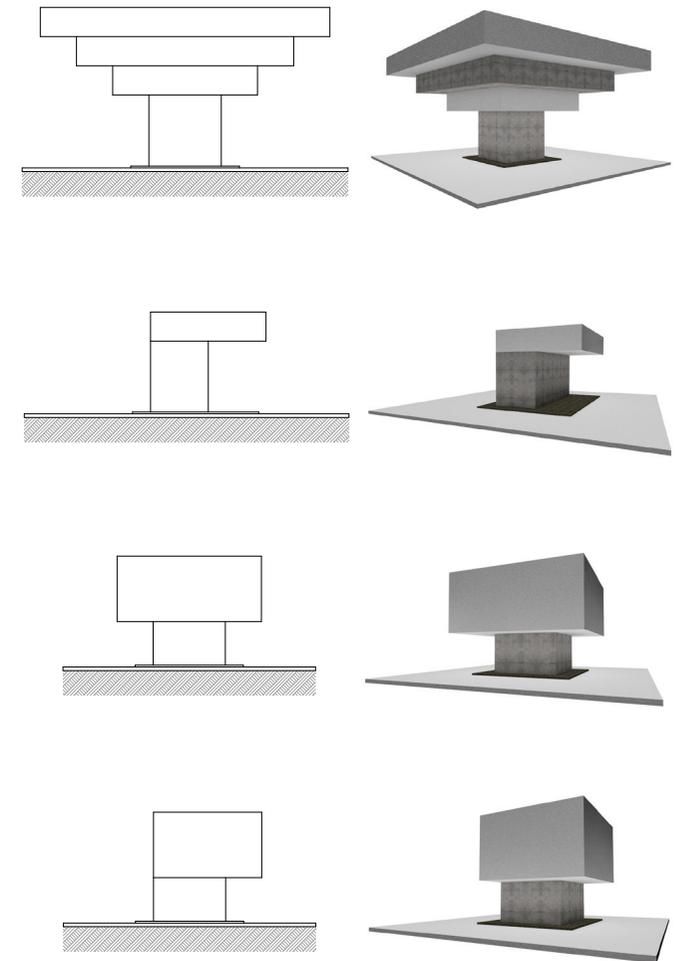


FIGURA 21. Problemas de configuración vertical  
fuente: autor



Como ejemplo práctico podemos tomar una caja de cartón y aplastarla, esta tenderá a abrirse por los bordes de las esquinas. El segundo problema es el que se presenta en edificios con esquinas interiores.

La esquina interior o entrante es una característica muy común de la configuración general de un edificio, que en planta tiene forma de L, H, U, T o planta en cruz. Aquí los esfuerzos tienden a concentrarse en demasía, y es común ver a éstas fracturadas. Por eso lo recomendable es estructurar este tipo de edificios (con esquinas interiores) con juntas constructivas de tal manera que las esquinas exteriores y siempre procurar que en las esquinas exteriores y siempre procurar que en las esquinas existan elementos estructurales que garanticen la transmisión de los momentos sísmicos, o si no es así, reforzarlas. También es importante tener presente que en las esquinas el periodo sísmico se expresa en varios centímetros de movimiento diferencial, por lo cual es indicado reforzar los acabados para no sufrir daños que requieran reparación constante.

### 3.5.3 Configuración vertical

Para hablar de una correcta configuración vertical es fundamental tener presente las características de uniformidad y continuidad en el planteamiento de

la estructura. Formas complejas con variaciones a lo alto constituyen dan como resultado una fuente de riesgo similar al problema que encontramos en la forma de la planta anteriormente explicada.

Se considera un problema en una configuración vertical cuando se plantean cambios excesivos bruscos de rigidez y masa entre pisos consecutivos, produciendo fuertes concentraciones de esfuerzos (FIGURAS 21 y 22). Se debe evitar en lo posible, los escalonamientos y tratar de que los cambios de un nivel a otro sean lo más suaves posibles, sobre todo en edificios en donde puede existir concentración de mucha cantidad de personas, como hospitales u oficinas.

Las reducciones bruscas de un nivel a otro, tiende a amplificar la vibración en la parte superior y son particularmente críticas. EL comportamiento de un edificio ante un sismo es similar a una viga en volado, donde el aumento de la altura implica un cambio período de la estructura que incide en el nivel de la respuesta y magnitud de las fuerzas. La sencillez, regularidad y simetría que se busca en planta también es importante en la elevación del edificio, para evitar que se produzcan concentraciones de esfuerzos en ciertos pisos o amplificaciones de la



FIGURA 22. Edificio colapsado debido al cambio de rigidez y masa entre pisos consecutivos

fuentes: <http://www.mediospublicos.ec/noticias/actualidad/manabi-antes-y-despues>

vibración en las partes superiores del edificio.

### 3.5.4 Simetría

Con el término simetría describimos una propiedad geométrica de la configuración del edificio. Un edificio es simétrico respecto a dos ejes en planta si su geometría es idéntica en cualquiera de los lados de los ejes. Este edificio será perfectamente simétrico. La simetría puede existir respecto a un eje solamente. También existe simetría en elevación, aunque es más significativa desde el punto de vista dinámico la simetría en planta. La simetría en altura no es perfecta por que todo edificio tiene un extremo fijo al terreno y libre el otro.

La falta de simetría tiende a producir excentricidad entre el centro de masa y el centro de rigidez, y por lo tanto provocará torsión en planta. A medida que más simétrico es el edificio, disminuyen el riesgo de concentración de esfuerzos, el momento torsor en planta y el comportamiento de la estructura es más predecible.

La asimetría tiende a concentrar esfuerzos, el ejemplo más común es el caso de las esquinas interiores. Aunque un edificio simétrico puede tener esquinas interiores como es el caso de las plantas en cruz. En este caso la planta del edificio es simétrica pero no

es una planta regular.

Existe simetría estructural si el centro de masa y el centro de rigidez coinciden en la planta. La simetría es conveniente a la forma del edificio y también a la distribución de la estructura. La experiencia de edificios con daños severos en terremotos mostró casos en que la asimetría estructural fue la causa del daño severo o el colapso de la estructura.

La falta de simetría produce efectos de torsión que son perjudiciales, destructivos y difíciles de estimar. Una buena solución estructural presenta simetría en las dos direcciones principales de la edificación. Debe señalarse que no basta una planta de forma simétrica sino la estructura también debe serlo. Tratar que el centro de rigideces esté lo más cerca posible del centro de masas, ya que de lo contrario tendríamos un caso de la llamada falsa simetría. La conclusión dice que una estructura será realmente simétrica cuando estos dos factores coincidan.

### 3.5.5 Rigidez torsional

Esta característica es complementaria de la anterior. Cuando se tiene una gran rigidez torsional, las deformaciones debidas a las asimetrías son menores que cuando la rigidez es baja. Más aún cuando éstas son amplificadas por el movimiento sísmico al

presentarse comportamiento inelástico.

La torsión entre pisos se produce por la excentricidad entre el centro de masa y el centro de rigidez en un piso, debido a que los elementos rígidos están colocados de manera asimétrica en un piso (ductos de elevadores), o a la colocación de grandes masas en forma asimétrica respecto al centro de masa. Generalmente se produce en edificios de esquina, debido a la gran rigidez que presentan los muros de colindancia, pero basta con que se excedan ciertos límites de excentricidad (una mala distribución de la rigidez lateral) para que se produzcan efectos

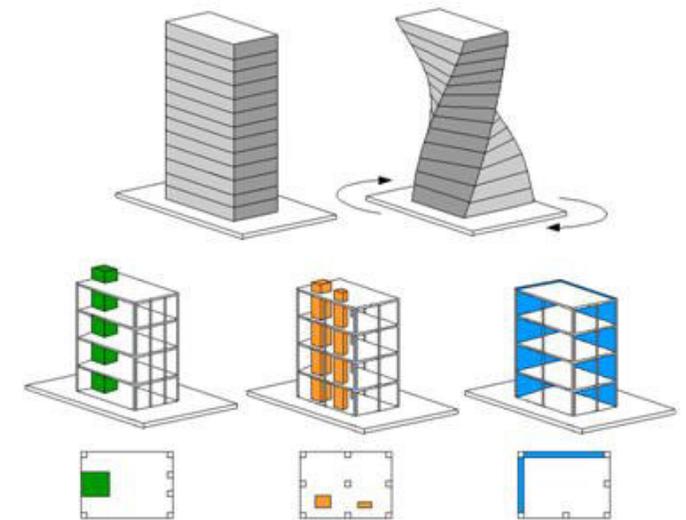


FIGURA 23. Ejemplo de estructuras que producen torsión  
fuente: <http://www.lis.ucr.ac.cr/index.php?id=25>



### 3.5.6 Altura y esbeltez

Cada vez que un edificio crece en altura, significa que existe un aumento en el periodo sísmico del mismo, debido a que, mientras mas alta es una estructura, mayor es su peso, por lo tanto su masa, y estando sometida a las fuerzas del entorno (gravedad) la aceleración de su masa es mayor provocando mayor fuerza. Un edificio no crece en la misma proporción que en su escala, sino que se rompe la relación armónica entre el tamaño y la estructura, por lo cual no únicamente las secciones tienen que crecer de tamaño, sino que se tienen que tomar consideraciones más de fondo en la configuración sísmica del edificio. En este sentido es recomendable que se debe cuidar mucho su relación de esbeltez (la relación con su ancho), los materiales más indicados, los sistemas estructurales tienen que ser más resistentes a las fuerzas sísmicas, el alto de los entrepisos y la calidad y distribución en la masa.

La altura de un edificio influye directamente en el periodo de oscilación, si aumenta la altura aumenta el periodo. Si un edificio alto tiene un periodo cercano a 2 segundos es probable que su aceleración sea menor que un edificio mas bajo, de 5 a 10 pisos, con periodo de  $\frac{1}{2}$  segundo. Los registros de terremotos indican que los sismos concentran su energía y

mayores aceleraciones en periodos cercanos a medio segundo. En un edificio de considerable altura la violación de los principios de distribución y proporción de masas inerciales implica costos altos y a medida que la altura crece, las fuerzas de inercia también crecen. No se puede alterar el tamaño de una estructura en sus componentes y conservar el mismo comportamiento estructural.

Pueden considerarse edificaciones bajas aquellas cuyos periodos sean de 0.4 a 0.5 segundos. En estructuras con periodos altos la irregularidad en planta genera grandes fuerzas excéntricas sobre muros y columnas. Es muy poco probable que un terremoto genere periodos de 2 segundos, este dato debe servir para romper la resonancia. El periodo de vibración de un edificio depende también de la relación entre la altura y ancho global, alturas de pisos, tipos de materiales y sistemas estructurales. Es muy raro que la altura por si sola constituya una variable que se deba controlar para disminuir el problema sísmico.

Un factor importante es la esbeltez que es la relación entre el ancho y el alto de un edificio. Cuando un edificio es muy alto, automáticamente aumenta su momento de volteo, y por el contrario, entre más



FIGURA 24. El proyecto para las Torres Petronas en Kuala Lumpur (Indonesia), uno de los edificios más altos del mundo. La tecnología antisísmica principal que utilizan se denomina "Mat Slab", que consiste en un inmenso sótano altamente reforzado que funciona como un gran basamento que sustituye las características mecánicas del subsuelo, y que al mismo tiempo provoca que el momento estabilizador del conjunto sea muy superior al momento de volteo que puede experimentar el mismo.

fuentes: <http://www.tublogdearquitectura.com/wp-content/uploads/2012/02/Torres-Petronas-3.jpg>

bajo aumenta su momento estabilizador debido a que el centro de masa esta mas cerca de la tierra.

### 3.5.7 Densidad estructural

La densidad de la estructura en planta se define como el área total de todos los elementos estructurales verticales (columnas, muros, etc) dividida entre el área bruta del piso. Como buen ejemplo de respuesta ante un sismo encontramos los edificios antiguos, los cuales permanecen intactos debido a que tienen un porcentaje de estructura en planta elevadísimo, es decir tienen un momento de inercia enorme.

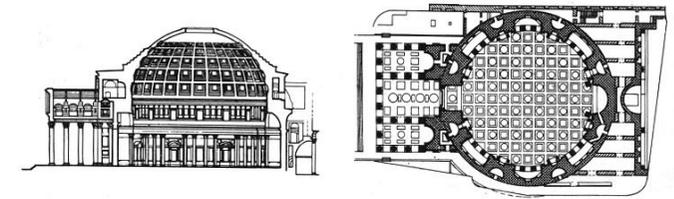
En edificios antiguos se observa una gran cantidad de muros de gran tamaño con función estructural. Se comprobó que muchos de ellos han funcionado bien a lo largo de los siglos en zonas sísmicas. Llevando las cargas gravitatorias y sísmicas hasta el terreno por vías directas.

Cuando tenemos mayor presencia de estructura en planta baja, el edificio está mejor preparado para soportar la fuerza cortante que actúa sobre ella, la acumulada de los pisos superiores y las cargas gravitatorias acumuladas. Muchos proyectos modernos se alejan de esta configuración, y por razones estéticas la planta baja tiene pocos elementos.

La configuración sísmica más eficiente es la que tiene la mayor cantidad de elementos verticales en la base, que es donde más se necesitan.

Una medida estadística puede ser la “densidad de la estructura en planta” a nivel del terreno, definida como el área total de todos los elementos estructurales verticales dividida por el área bruta del piso. En un edificio moderno esa área es de 1%, en edificios con pórticos y tabiques asciende al 2%.

Las plantas densamente rellenas de edificios antiguos alcanzan valores tales como: Taj Mahal, 50%; San Pedro, 25%; Panteón (Roma) 20%; catedral de Chartres 15%, mientras que en la actualidad edificios como el Sears Building (uno de los más altos del mundo) presenta una densidad de 5%. Aún así, y con todos los avances tecnológicos, el principio físico tan sencillo con el cual las estructuras antiguas aseguraban su resistencia sísmica sigue siendo muy válido; por eso en la actualidad existe una tendencia a procurar mayor densidad de la estructura en planta, evidentemente no se trata de volver a las formas del pasado, sino de aprender de ellas, por eso la introducción de elementos como los muros a cortante que elevan el momento de inercia, se está volviendo una práctica común.



fuelle: <http://augusto-imperator.blogspot.com.es/2015/07/el-panteon-de-agripa-la-apoteosis-del.html>



FIGURA 25. En esta figura se ejemplifica el desarrollo histórico de la densidad de la estructura en planta. En la parte superior podemos ver el esquema estructural del Panteón de Agripa (Roma), que tenía una densidad estructural en planta del 25%, y a la derecha el Sears Tower (Chicago), como ejemplo de cualquier rascacielos contemporáneo que tienen en promedio entre 5 y 2.5%.



fuelle: <http://tobifairley.com/blog/2011/all-american-architecture-with-laura-casey/>



### 3.5.8 Columna corta

El efecto de columna corta se da por una restricción parcial del desplazamiento lateral del cuerpo de una columna, que obliga a concentrar toda la demanda de deformaciones y tensiones en su porción libre. El caso más común se presenta cuando hay paredes que no completan toda la altura, sino que dejan un espacio vacío para la ventana u otro elemento que no de continuidad de piso a cielo raso. También es conocido como efecto ventana.

Una mayor rigidez lateral de una columna implica mayor resistencia a la deformación, por tanto mientras mayor es la rigidez, mayor será la fuerza necesaria para deformarla. Si una columna corta no está diseñada de forma adecuada para resistir esta fuerza, es muy probable de que sufrirá daño durante un efecto sísmico.

Es una de las causas más comunes de daños graves en edificaciones afectadas por terremotos. Sin embargo, también puede presentarse ante cualquier otra acción que produzca este efecto en la columna, tales como dilataciones térmicas o movimiento de fundaciones, entre otros. Para algunas configuraciones estructurales, se puede presentar inclusive ante dilataciones muy pequeñas,

relacionadas a variaciones en la temperatura ambiente.

Las consecuencias sobre el sistema estructural se pueden clasificar en efectos locales, que ocurren directamente en el miembro afectado y efectos globales, que involucran a la estructura como un sistema.

Entre los efectos locales está el incremento de la rigidez lateral y de las tensiones por cortante, así como la disminución de la ductilidad. Los efectos globales se derivan de la incompatibilidad de deformaciones entre las columnas cortas y el resto de los miembros estructurales resistentes a acciones laterales, las primeras fallan prematuramente y se genera una reacción en cadena.

Se puede decir que las columnas cortas son los elementos que más daño producen a una construcción. El pobre comportamiento de las columnas cortas se debe al hecho que en un terremoto, columnas de diferentes alturas libres tendrán la misma demanda de desplazamiento lateral. Sin embargo, al ser las columnas cortas más rígidas que las columnas más largas, estas atraen mucho más fuerza horizontal.

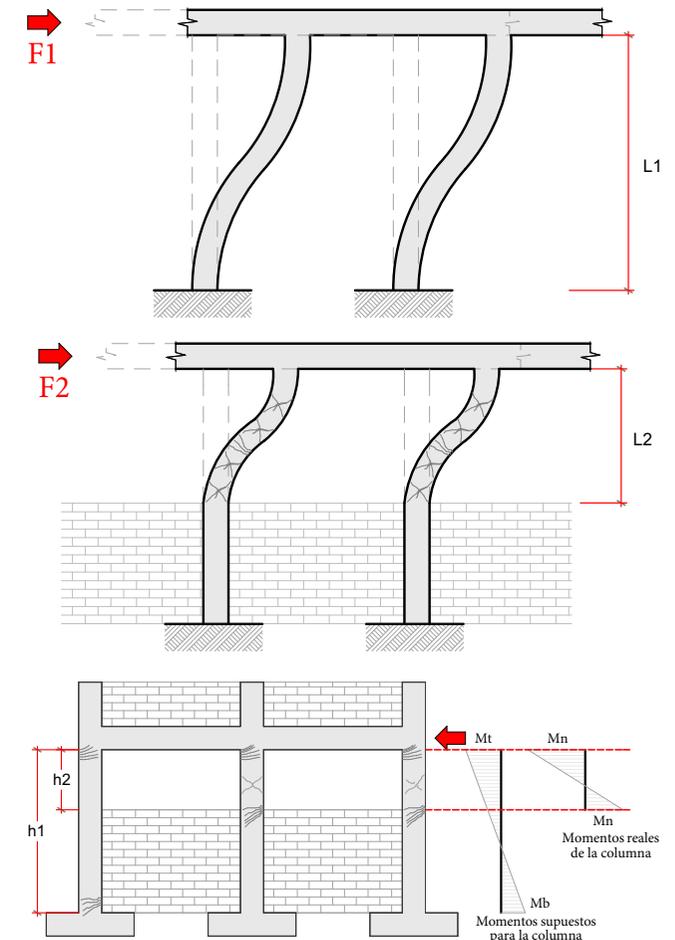


FIGURA 26. Encuentro entre muros de ladrillo con marco de concreto generando fallas por columna corta

fuente: autor

Es necesario conocer los efectos que producen las columnas cortas, para establecer parámetros que definan recomendaciones con el fin de evitar el fraccionamiento o colapso de una edificación en respuesta a la acción sísmica.

Entre los efectos mas comunes encontraremos:

- Las columnas cortas se originan cuando algún elemento, comúnmente las paredes, se encuentran adosadas a las columnas, restringiéndolas hasta donde llega la altura de las mismas.
- Se provocan concentraciones de fuerza cortante en los extremos libres de las columnas, que tienden a fallar frágilmente.
- Las columnas que se encuentran restringidas, adquieren mucha más rigidez en comparación con las demás columnas que no están confinadas ni restringidas en ninguno de sus lados. Por lo tanto, se generan elevados esfuerzos de corte en la columna corta, ocasionando que su respuesta ante un evento sísmico sea muy diferente al de las columnas de la misma estructura que no tengan restricción alguna.

- Ante la insuficiente ductilidad de la columna corta, la falla se genera por tensión diagonal producida por elevados esfuerzos cortantes.
- La columna corta es más frágil que las demás columnas no restringidas.
- parcialmente, debido a que su longitud deformable es más limitada.

Es por lo tanto recomendable no adosar directamente las paredes a las columnas, sino dejar un espacio libre entre ellas, o colocando algún tipo de junta que le permita a la columna deformarse libremente, permitiéndole así, trabajar dúctilmente en el probable caso de algún movimiento sísmico. (Deben fijarse muy bien las paredes a las vigas superiores, inferiores o a ambas). En caso de colocar paredes adosadas a las columnas, debe hacerse a lo largo de toda su longitud.

Como recomendación final para evitarse este tipo de falla, se pueden colocar porciones adicionales de mampostería a los lados de las columnas cortas generadas por los muros como se puede ver en el círculo verde de la FIGURA

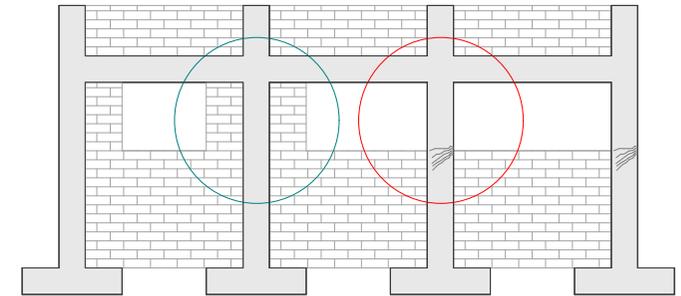


FIGURA 27. Recomendación para reducir el efecto de columna corta; fuente: autor



FIGURA 28. Falla típica columna corta



### 3.5.9 Separación entre estructuras adyacentes

Este efecto es conocido también como golpeteo y se refiere al que se produce en una edificación por la acción de un sismo que, al quedar impedido por otro más cercano y a su vez más rígido se generan fuerzas cortantes en las columnas golpeadas, por esta razón es conveniente crear amplias juntas totales entre los edificios adyacentes y que tengan diferentes alturas, con el fin de que en el momento del sismo puedan oscilar de manera distinta y evitar el choque brusco entre ellos.

En muchos casos, las estructuras no coinciden entre los niveles de las plantas y al golpearse entre ellos, las fallas pueden ser mayores, debido a que los forjados de cada edificio, golpearan en la parte intermedia de las columnas del adyacente.

La NEC-SE-DS dice que: “Todos los elementos de la estructura deben diseñarse y construirse para que actúen como un solo sistema estructural a efectos de resistir el sismo de diseño, a menos que intencionalmente se separen unos de otros una distancia suficiente para evitar problemas de colisión entre ellos.

Para determinar la distancia mínima de separación

entre los elementos estructurales, se deberá verificar si los sistemas de entrepiso de cada una de las partes intencionalmente separadas coinciden a la misma cota en altura.

- si no coinciden, la distancia mínima de separación será el promedio de los valores absolutos de los desplazamientos máximos horizontales inelásticos, para cada una de las partes de la estructura que se desee actúen separadamente.
- si las cotas de los entrepisos coinciden, la separación mínima será la mitad del valor absoluto del desplazamiento máximo horizontal inelástico de una de las partes, el más desfavorable.

Dichos valores deben medirse en la dirección perpendicular a la junta que las separe, a menos que se tomen medidas para que no se produzcan daños a los elementos estructurales al utilizar una distancia menor.

Estas recomendaciones generales para esta tipología de estructuras también concluye especificando que: “La normatividad urbana de las ciudades debería establecer la separación mínima que debe existir entre estructuras colindantes que no formen parte de la misma unidad estructural”.

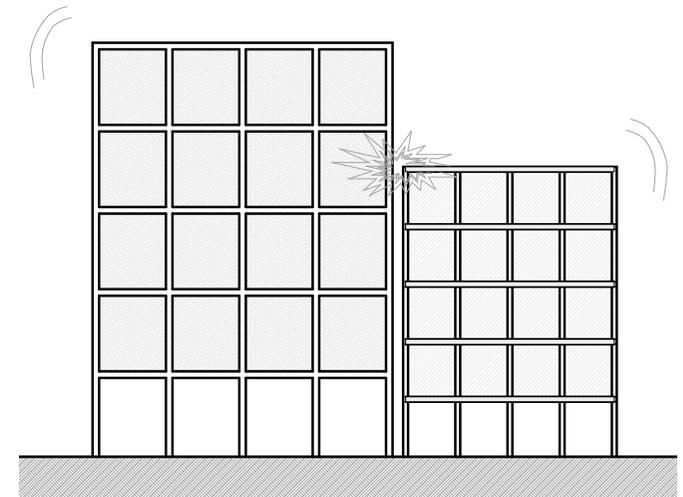


FIGURA 29. Riesgo de colisión de estructura al efecto de golpeteo entre estructuras adyacentes, ejemplo en una fotografía en Portoviejo Ecuador

fuelle: <http://www.larepublica.ec/blog/sociedad/2016/05/04/ecuador-contabiliza-cerca-de-1-200-replicas-del-terremoto-de-abril/#prettyPhoto>



persona observa las viviendas destruidas en Pedernales después del paso del terremoto de abril de 2016 en Ecuador  
fuente: <http://www.elmundo.es/pais-vasco/2016/04/21/5718b71322601d13168b461f.html>; edición: autor

## CAPITULO IV

## 4.1 Estructuras sismorresistentes

**P**ara comprender el comportamiento de las estructuras es necesario entender muy bien la relación entre Acciones - Estructura - Respuesta, es decir, que cualquier estructura está sometida a determinadas acciones exteriores (sismo, viento, empujes, hundimientos, temperatura, etc.) así como acciones interiores (peso propio, peso de instalaciones y personas, impactos, incendios, etc.) que la estructura tiene que soportar dentro de los límites de seguridad y trabajo permisibles; una buena estructura no es necesariamente aquella que soporta todas las acciones satisfactoriamente, sino aquella que sabe manejarlos de manera inteligente y creativa. Para soportar estas acciones la estructura sufre internamente esfuerzos que llamaremos primarios (tensión, compresión, flexión, cortante y torsión)

Todos estos esfuerzos internos provocados por acciones externas e internas a la estructura inevitablemente se manifiestan en respuestas muy visibles (flechas, agrietamientos, daños o incluso el colapso). Pensar en una estructura que no sufra deformaciones, flechas o agrietamientos es algo utópico, siempre los sufren aunque sean micrométricos, es así que un buen diseñador estructural debe estar consciente de esto y resolver

la estructura de tal manera que estos daños o afectaciones sean mínimas y no interfieran con su vida útil.

La acción más simple es aquella que se conoce como carga muerta, es decir el peso de la propia estructura, pero esto no se refiere al “esqueleto” sino a los pesos fijos del edificio, que algunas veces superan el peso de la estructura (esqueleto); saber determinar la magnitud de estos pesos fijos del edificio es el primer paso en el buen diseño estructural.

Los sitios donde se concentran los mayores esfuerzos (intensidad de una fuerza) en las estructuras son las uniones y conexiones entre elementos estructurales, por ejemplo las conexiones viga - columna, y columna - cimiento.

Son estas zonas las que deben soportar las mayores fuerzas cortantes y momentos debidos a flexión y por ello su diseño debe realizarse cuidadosamente, en especial, verificando la distribución del acero de refuerzo en los nudos, o la cantidad y tipo de soldadura a utilizar si estos son elementos de acero, y además, contar con una adecuada inspección durante su construcción, que es en donde se podrían producir irregularidades.

### 4.1.1 Teoría del cálculo de estructuras sismorresistentes

Con el desarrollo de técnicas de cálculo, los proyectos sismorresistentes de estructuras se han centrado en proporcionar capacidad de disipación de energía al pórtico estructural. este pórtico se proyecta normalmente para que soporte, además de las cargas gravitatorias y un determinado nivel de cargas de viento, los sismos con una probabilidad razonable de darse varias veces durante su vida útil, basándose para ello en un cálculo elástico. Para estas situaciones normales de carga es preciso que la estructura se mantenga dentro del dominio elástico.

Por el contrario, en caso de grandes terremotos cuya probabilidad de ocurrencia es muy baja, se admite que pórtico en su mayor parte pueda plastificar.

Dentro de los cálculos, no es complicado conseguir que el pórtico estructural se mantenga dentro del dominio elástico frente a las cargas gravitatorias, debido a que éstas se pueden estimar con relativa facilidad y precisión.

Sin embargo, el terremoto al presentarse como un fenómeno natural, es considerado netamente muy incierto y tanto la estimación del comportamiento estructural en el dominio elástico como el garantizar

que el edificio siga funcionando en caso de sismos importantes, son cuestiones comparativamente mucho más difíciles de conseguir a la hora de proyectar una estructura.

En las décadas comprendidas entre 1940 y 1960 se desarrollaron procedimientos de cálculo cada vez más avanzados sobre las estructuras y su respuesta ante eventos sísmicos. El criterio de diseño sísmico que se utilizaba al inicio de este período, pretendía que no se superara la capacidad de resistencia de la estructura. Sin embargo, se pudo comprobar que la aplicación de este criterio no aseguraba un comportamiento lineal elástico de las estructuras durante los terremotos, es decir, la ausencia de daños. Y que, a pesar de ello, este hecho no siempre llevaba al fallo de la estructura y, muchas veces, ni siquiera a daños severos.

Como conclusión se dijo que era posible que las estructuras sobrevivieran a los terremotos si se conseguía mantener su degradación entre ciertos límites, sin la necesidad de aumentar excesivamente su resistencia, y en tal caso, hasta era posible una reparación con un costo accesible.

De donde se pudo modificar el objetivo del diseño

sismorresistente diciendo que en vez de: *“asegurar la resistencia de una estructura a grandes fuerzas laterales, era más importante evitar el efecto destructivo de dichas fuerzas sobre la estructura”* (Paulay y Priestley 1992)

Para solucionar el problema de cálculo, era necesario utilizar diversos procedimientos de análisis no lineal como una herramienta esencial de diseño sismorresistente.

*“El diseño es un proceso en el que, partiendo de requisitos en la función, construcción, coste y estética de una estructura, se llega a dar una descripción completa de las características de todos sus componentes estructurales. Durante dicho proceso, deben hacerse razonamientos y tomarse decisiones referentes a aspectos tales como definición de las acciones de diseño y de las técnicas de cálculo, así como la obtención de una solución económica de diseño. Un problema de diseño, por una parte, no tiene solución única y por otra, está sometido a incertidumbres, tanto en las acciones como en el modelo estructural”* (Bozzo 1993; Bozzo y Barbat 1995a)

Hoy en diferentes países, entre ellos, EEUU y Japón, el nivel de resistencia sísmica de los edificios se

establece a partir del concepto de “riesgo aceptable”<sup>8</sup> Es también usual considerar varios niveles de protección de los edificios en su diseño sismorresistente. Estos niveles, denominados estados límite de diseño, podrían tener como objetivo el de mantener en funcionamiento todas las instalaciones de una estructura, a partir del cumplimiento de requisitos fundamentales de diseño sismorresistente como; requisito de que la estructura no colapse; requisito de limitar la susceptibilidad al daño.

Según (Paulay y Priestley 1992), pueden definirse los siguientes estados límite de diseño:

- *Estado límite de servicio. Supone el funcionamiento normal del edificio y de todas sus instalaciones durante los terremotos más frecuentes, es decir, de menor intensidad. Requiere que la estructura, sus componentes no estructurales y su contenido no sufran daño alguno. El criterio aplicado en*

<sup>8</sup> Evitar daños en la estructura y en los componentes no estructurales ante sismos de baja intensidad; permitir también leves daños en la estructura y en componentes no estructurales para sismos de mediana intensidad, y evitar el colapso de la construcción aún con importantes daños estructurales, de manera de proteger la vida humana ante sismos muy destructivos y de muy baja probabilidad de ocurrencia.



*el diseño es el de limitar los desplazamientos, lo que se consigue asegurando una rigidez no lineal. Puede admitirse que en los edificios de hormigón armado se produzcan ciertas fisuras, pero en ningún caso se producirá la fluencia de la armadura, un agrietamiento severo o el aplastamiento del hormigón.*

- *Estado límite de control del daño. Durante terremotos más severos se admiten ciertos daños estructurales relacionados con la fluencia de la armadura, lo que requerirá reparaciones después del terremoto. Y justamente este aspecto define el límite superior del daño admitido en este estado: los daños estructurales deben ser económicamente reparables.*
- *Estado límite de supervivencia. Debe asegurarse el cumplimiento de la condición de que no se produzcan pérdidas de vidas durante el terremoto más fuerte que pueda ocurrir en el período de exposición del edificio. Por este motivo, el único requisito de diseño que se requiere es la supervivencia de la estructura, es decir, evitar su colapso. Sin embargo, se admiten daños severos, hasta irreparables, tanto en la estructura como en su contenido.*

*Al aplicarse criterios basados en estos estados límite, el riesgo sísmico llega a ser una característica de diseño condicionante, pues el nivel de riesgo que se suele aceptar en este caso es mucho mayor que para otras acciones. También es importante destacar que las fronteras entre las características de los terremotos correspondientes a estos tres estados límite son algo difusas. Por este motivo, las normativas de diseño sismorresistente suelen simplificar el problema, considerando sólo dos niveles de protección y, a veces, únicamente uno. Este hecho añade incertidumbres a la propia definición de la acción realizada en las diferentes normativas. (Barbat, A. H. 1998)*

*Como consecuencia, para realizar diseños fiables, es necesario utilizar tipologías estructurales que no sean excesivamente sensibles a la falta de exactitud en la predicción de la acción sísmica (Barbat y Oller 1997).*

Para diseñar edificios sismorresistentes es necesario utilizar sistemas estructurales que proporcionen una adecuada disipación de energía, evitando de esta manera los fallos frágiles. Muchas de las deficiencias de diseño que se cometen y que son la causa de daños estructurales severos, son consecuencia del uso de edificios con tipologías estructurales no adecuadas en zonas sísmicas pero que, a pesar de

ello, se siguen utilizando. Por lo que es importante en el momento mismo de diseño y planimetría, elegir un sistema estructural que pueda conducir a un comportamiento sísmico satisfactorio, teniendo en cuenta, también los otros requisitos de diseño (función, distribución, costos, etc.). Por esto, y como ejemplo, todos los especialistas están de acuerdo en que deben emplearse en el diseño sismorresistente de los edificios de hormigón armado, aquellos sistemas que tengan más ductilidad<sup>9</sup> estructural. Esto implica seleccionar estructuras que cumplan los siguientes requisitos como indica Paulay y Priestley (1992).

- Que permitan un comportamiento inelástico global de la estructura.
- Que sean adecuados para poder predefinir las zonas en las que se concentrarán las deformaciones inelásticas.

<sup>9</sup> Se conoce como ductilidad a la propiedad de aquellos materiales que, bajo la acción de una fuerza, pueden deformarse sin llegar a romperse. Estos materiales, como ciertos metales o asfaltos, se conocen como dúctiles. En cambio, los materiales que no poseen esta propiedad se califican como frágiles. Esto quiere decir que los materiales dúctiles pueden experimentar importantes deformaciones antes de romperse, mientras que los frágiles se rompen casi sin deformación.

- Que aseguren un incremento de la resistencia estructural en ciertos modos de deformación en los que la estructura deba permanecer en el campo elástico y reducirla en los inelásticos. Esto implica evitar que se produzcan deformaciones inelásticas en ciertos elementos estructurales en los cuales se quiere evitar el daño.

Como conclusión se puede decir que es importante la simplicidad para un mejor comportamiento sísmico de conjunto de una estructura, y resulta más sencillo proyectar, entender y construir detalles estructurales. Otro factor importante es la simetría respecto a sus dos ejes en planta, es decir su geometría es idéntica en ambos lados de cualquiera de los ejes que se esté considerando. La falta de regularidad por simetría, masa, rigidez o resistencia en ambas direcciones en planta produce torsión, que no es fácil de evaluar con precisión. Para terminar, es importante mencionar que a pesar de tener una planta simétrica, puede haber irregularidades debido a una distribución excéntrica de rigideces o masas ocasionando también torsión.

#### 4.1.2 Elementos estructurales sismorresistentes

Esta claro que todos los elementos que componen una estructura que se encuentra situada en

zonas altamente sísmicas, deben ser calculadas y dimensionadas para que puedan responder favorablemente frente a los efectos de las acciones gravitatorias y a los de las acciones sísmicas. Estos dos tipos de acciones presentan diferencias marcadas entre las que, el valor de las acciones gravitatorias se puede conocer con exactitud mientras que el de las acciones sísmicas es mucho más incierto. La probabilidad de que las cargas sísmicas actúen durante el periodo de vida útil del edificio es notablemente menor que el de las cargas gravitatorias. Las solicitaciones y deformaciones que un terremoto severo impone en una estructura son, con diferencia, mucho más elevadas que las que puede llegar a provocar cualquier combinación de cargas gravitatorias. La acción sísmica se caracteriza, por lo tanto, por el hecho de combinar un efecto de carga muy elevado con una probabilidad de ocurrencia muy baja.

Para el diseño de elementos estructurales sismorresistentes es importante el desarrollo e implantación de estrategias y soluciones innovativas que limiten los daños estructurales y no estructurales a través de disipar la energía que el sismo introduce en la construcción en elementos especialmente preparados para ello y de esa manera

proteger el resto de la estructura, posteriormente evaluar cuantitativamente los daños estructurales, luego limitar drásticamente las deformaciones horizontales máximas entre plantas, y por último reducir las aceleraciones máximas absolutas de respuesta. Aquí se sitúan las nuevas estructuras con aislamiento de base y las estructuras con sistemas de control pasivo, activo o híbrido que se incluyen dentro de las estrategias de diseño de proyecto sismorresistente.

La capacidad sismorresistente de una estructura se puede juzgar por su habilidad para absorber y/o disipar la energía que introduce el terremoto. El objetivo de un proyecto sismorresistente es proporcionar globalmente a la estructura una capacidad de disipación de energía que sea adecuada a los niveles de demanda esperables en la zona donde vaya a estar ubicada.

#### 4.1.3 Efecto sísmico en los elementos estructurales

El efecto de los sismos sobre las estructuras depende de las características dinámicas tanto de la estructura como del movimiento. El problema es sumamente complejo, pues las características dinámicas del movimiento son variables tanto durante un mismo temblor, como de uno a otro, dependiendo de la



distancia epicentral<sup>10</sup>, profundidad focal y magnitud del sismo, así como del tipo de terreno en que estén emplazadas las estructuras.

Uno de los principales problemas radica en que las estructuras se dimensionan, normalmente, para cargas de tipo gravitatorio, es decir, cargas estáticas que actúan sobre un elemento. Y las acciones sísmicas, así como otras acciones no gravitatorias, son cargas dinámicas.

Un sismo, al ser una vibración del suelo, presenta un conjunto de fuerzas horizontales que se aplican sobre la rasante de un edificio, tiene una frecuencia y aceleración, que permiten la determinación de un valor de aceleración básica del suelo. Esta vibración se transmitirá a toda la estructura a través de sus soportes (pilares y muros), en donde las principales masas de la misma (losas y forjados), se moverán o desplazarán de forma relativa respecto al suelo.

*De una forma muy aproximativa, podría asimilarse cualquier estructura a un péndulo invertido, sometido a una vibración en la base. El péndulo describirá un*

*movimiento oscilatorio que progresivamente se irá amortiguando hasta desaparecer, recuperando la posición de equilibrio inicial (obviamente cuando cesa la acción sísmica o de excitación). Se sabe que no todos los péndulos (y no todos los edificios), responden del mismo modo ante una vibración en la base. De hecho, cada estructura posee una frecuencia propia o natural, determinada fundamentalmente por su rigidez y altura, a la que vibrará (oscilará) frente a cualquier excitación a la que se someta. En concreto, la relación entre la aceleración de base (sísmica) y los desplazamientos que experimentan las masas de la estructura, depende únicamente de esa frecuencia propia y del amortiguamiento de la estructura.*

Todas las estructuras, incluso las de hormigón armado son elásticas, es decir, pueden deformarse y moverse recuperando después la posición inicial.

Es intuitivo suponer que “hacen falta” muchas fuerzas para deformar la estructura, que es precisamente lo que produce un terremoto.

El diseño sismorresistente tiene por objetivo “cuantificar” estas fuerzas, por lo que es necesario realizar todo tipo de simplificaciones debido a que resulta muy difícil “calcular” su valor utilizando solo

ecuaciones matemáticas, por mas complejas que estas puedan ser. Se ha observado que la aceleración base del terremoto puede variar en cada instante, y por tanto variará también la respuesta del edificio. Así, la frecuencia natural del edificio es mas bien un concepto teórico y no una descripción exacta del comportamiento dinámico de la estructura y además, casi ninguna estructura puede simplificarse tanto como para suponerla equivalente a un péndulo invertido.

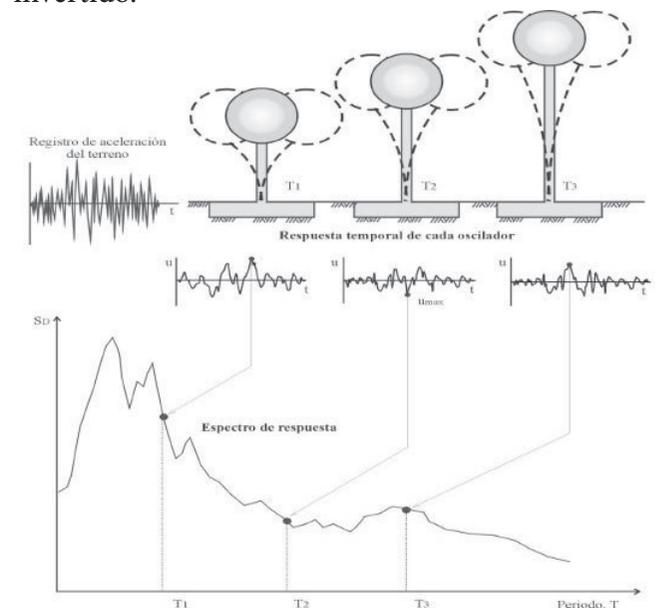


FIGURA 30. Esquema de péndulo y su respuesta ante la aceleración del terreno

fuentes: <https://xfma.wordpress.com/2013/02/19/estructuras-sismorresistentes-analisis-modal-espectral-capitulo-2/>

<sup>10</sup> Distancia medida o calculada sobre la superficie de la Tierra entre un punto de observación y el epicentro de un sismo.

## 4.2 Principales problemas de las estructuras frente a un sismo.

### 4.2.1 Planta libre

En arquitectura moderna se conoce como planta libre al piso de un edificio en el que la mayor parte de su espacio interior no presenta paredes o muros rígidos, inamovibles o difíciles de remover. Este tipo de diseño proporciona una serie de ventajas tanto estéticas como funcionales y han sido la causa para que internacionalmente desde principios del siglo XX se ha estimulado y en algunos casos se obliga a su uso a través de las normas de zonificación urbana en gran parte de las ciudades contemporáneas.

La planta libre ha sido ampliamente utilizada tanto en zonas que no son sísmicamente activas como en las que sí lo son, identificadas en las normas sísmicas como de los tipos piso blando o piso débil, con los consecuentes efectos desastrosos que ocurren con la presencia de un sismo.

Muchos colapsos de edificios durante terremotos pueden ser atribuidos al hecho de que los elementos de arriostramiento como paredes, que están presentes en los pisos superiores, son omitidas en planta baja, dejando como elementos aislados

unicamente las columnas. Así, una planta baja es propicia al derrumbamiento a efectos de una fuerza en dirección horizontal, a esta característica se lo ha denominado “piso blando”<sup>11</sup>. A menudo las columnas se destruyen por los desplazamientos cíclicos que se producen por el movimiento del suelo y la parte superior del edificio. Produciendo deformaciones en los extremos superior e inferior de las columnas.

La condición de piso blando puede ocurrir en cualquier piso, pero es más crítico cuando ocurre en el primero, porque las fuerzas sísmicas son generalmente más grandes ahí. La característica esencial de un piso blando o débil consiste en una discontinuidad de la rigidez o resistencia.

Durante un sismo en el (piso blando) se produce un gran desplazamiento lateral, que se traduce en una excentricidad de las cargas verticales provenientes de los pisos superiores rigidizados por los tabiques. Esto da lugar a un momento que debe ser equilibrado por

<sup>11</sup> Los pisos blandos son aquellos que muestran una reducción significativa en la rigidez lateral respecto a los demás pisos de la estructura. Considerado por los ingenieros sísmicos como uno de los errores típicos en la estructuras y siendo muy perjudiciales en lo que respecta al comportamiento global de la misma. También se lo conoce como piso débil.

los momentos flectores generados en los extremos de las columnas del (piso blando).

*Si el edificio presenta una planta libre, principalmente en alguno de los pisos inferiores, generalmente los componentes estructurales de ese piso se verán sometidos a grandes deformaciones. El comportamiento inelástico se concentra en la zona de la irregularidad. En la FIGURA, se ilustra la diferencia entre la deformación lateral de un edificio con una distribución homogénea de la rigidez en altura (a) y uno con la planta baja libre (b)*

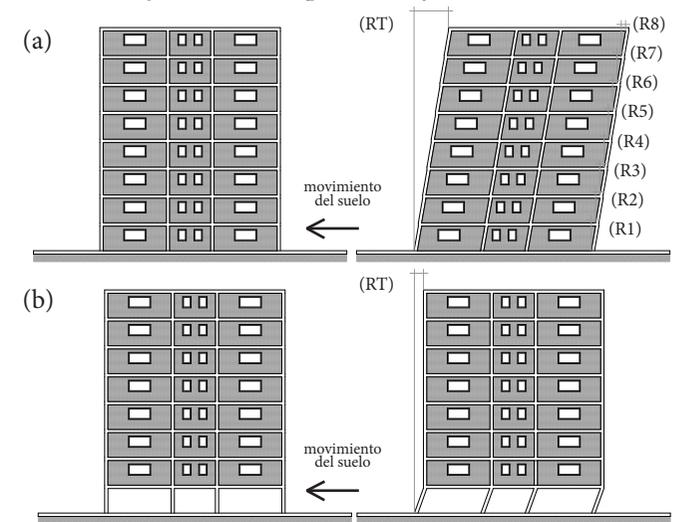


FIGURA 31. Distribución del desplazamiento total generado por sismo en: (a) edificio regular; y (b) edificio con planta baja libre.

fuerza: autor



Es común observar que las columnas del piso blando están diseñadas como para soportar momentos flectores generados por fuerzas sísmicas, en donde no se consideran los producidos por las fuerzas que crean desplazamiento lateral. Por lo que, durante un sismo, el momento flector actuante supera a la capacidad resistente, creando la formación de rótulas en los extremos de las columnas, lo que produce finalmente el colapso de la edificación.

Las tan usadas plantas bajas libres son el ejemplo más común de formación de estas irregularidades; los apartamentos residenciales u oficinas se distribuyen en los pisos superiores, mientras en el piso más bajo se ubica los estacionamientos para los vehículos o las zonas sociales que requieren espacios amplios y libres, total o parcialmente, de tabiquería interior. Generalmente el piso blando está presente en los edificios residenciales modernos construidos con sistema estructural porticado donde la presencia en los pisos superiores de componentes rígidos no intencionalmente estructurales, como es el caso de las paredes divisorias de mampostería, adosados a los componentes estructurales flexibles y la ausencia de estas paredes en planta baja modifica el comportamiento de los componentes estructurales en este piso por lo que los pisos superiores

conformarán un volúmen superior de mayor rigidez y mayor masa y así prácticamente toda la deformación lateral se concentrará en planta baja.

El piso débil generalmente se produce cuando debido a la ausencia, desplazamiento o reducción de tamaño de los componentes de resistencia a las fuerzas laterales en un piso, se interrumpe el flujo de fuerzas hacia la cimentación. El piso débil se puede generar como se muestra en las FIGURA 32, debido a: (a) la eliminación o debilitamiento de componentes de resistencia sísmica en la planta baja; y (b) en los sistemas mixtos o duales de pórticos y muros estructurales, al interrumpir la continuidad de los muros en planta baja. Estos casos se pueden presentar en pisos intermedios también.

En el caso de las plantas bajas libres con gran altura, las columnas son muy flexibles, no sólo debido a la total o parcial ausencia de componentes rígidos, sino como resultados de ser significativamente más alta con relación a las de los pisos superiores. Esta configuración arquitectónica es uno de los modelos característicos de los diseños modernos para oficinas, hoteles y hospitales, en los que no sólo se diseña los pisos de acceso al público, libres de muros, sino que generalmente este nivel, debido

a su importancia, tiene mayor altura de entrepiso que la del resto de los pisos, en los que se ubican las oficinas o las habitaciones. Existen numerosos casos de edificios que presentan una combinación de estos dos tipos de irregularidad, piso blando y piso débil, lo que los hace particularmente vulnerables sísmicamente.

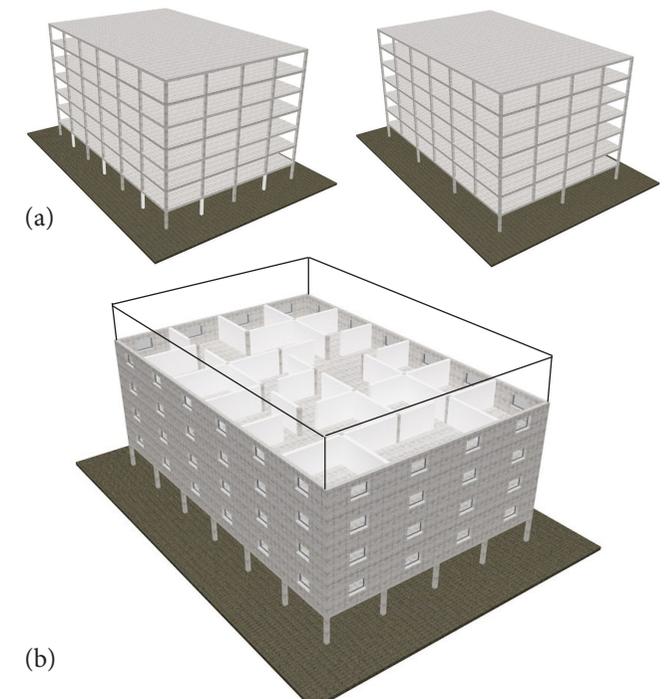


FIGURA 32. Casos de generación de piso débil en la planta baja de los edificios

fuentes: autor

Muchos de los colapsos producidos en los edificios durante un terremoto, pueden ser atribuidos al hecho de que los elementos de arriostramiento, por ejemplo paredes, que se encuentran presentes en los pisos superiores, son omitidas en planta baja y sustituido unicamente por columnas. Así, con la presencia de una fuerza (sísmo) en dirección horizontal en la planta baja que de por si es blanda, afectará directamente a toda la estructura sin que esta pueda resistir. A menudo las columnas resultan dañadas debido a los desplazamientos cíclicos entre el suelo en movimiento y la parte superior del edificio.

El problema de piso blando no se da unicamente en planta baja, aunque no es habitual, puede presentarse en cualquiera de las plantas altas de la edificación. Una de las razones para que esto se presente es que en dicha planta intermedia se haya modificado la dirección de las paredes interiores en correspondencia con las demás plantas, o que se cambie la altura de los entrepisos, produciendose un mecanismo de balanceo que muy probablemente fracasará con la presencia del sismo.

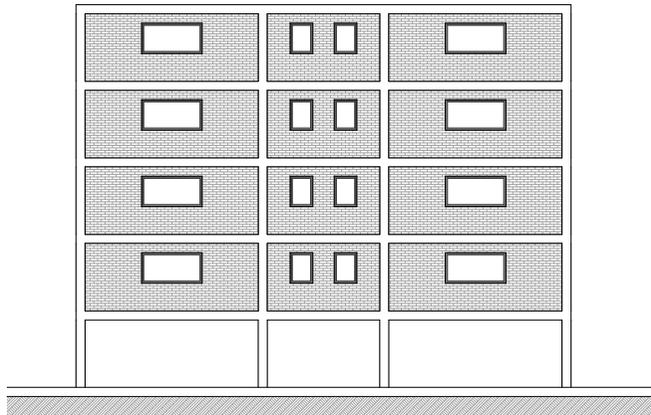


FIGURA 33. Ejemplo edificio con planta libre

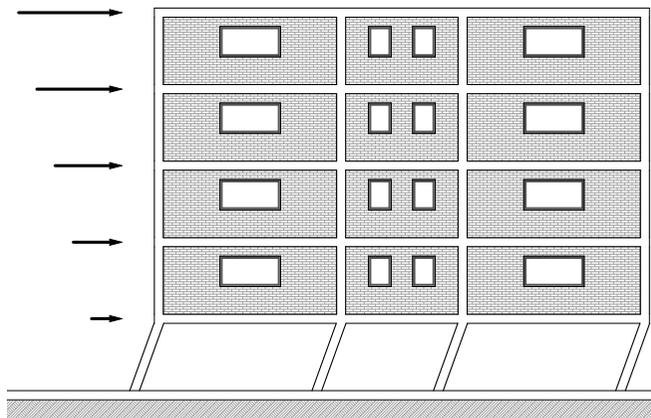


FIGURA 34. Ejemplo edificio con planta libre en respuesta a un esfuerzo sísmico



FIGURA 35. Ejemplo edificio con planta libre (volumetría)



FIGURA 36. Ejemplo edificio con planta libre en respuesta a un esfuerzo sísmico (volumetría)

fuelle: autor





*vehículo bajo los escombros de los edificios en el centro de Manta después del terremoto de 2016 en Ecuador*  
fuente: <http://ecuaconsultas.com/2017/04/ver-fotos-videos-del-terremoto-7-8-ecuador-16-abril.html> ; edición: autor

**CAPITULO V**

## 5. Ubicación, contexto y enfoque

### 5.1 Terremotos en Ecuador

Ecuador, es considerado como un país de alta peligrosidad sísmica, a lo largo de la historia, se han registrado diversos terremotos que han devastado ciudades, causando lamentablemente la pérdida de vidas de muchas personas e incontables daños materiales entre otras cosas.

Esto se debe a su ubicación geográfica, ya que se encuentra en la zona norte de la cordillera de los Andes, zona volcánica en donde los procesos tectónicos se dan por los efectos de la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. Se sabe que esta subducción está moviéndose a una velocidad de 7cm al año en dirección este-noroeste.

Las placas tectónicas juegan un papel importante en este fenómeno. El océano Pacífico reposa sobre estas placas, que convergen causando fricción entre ellas, que hace que se acumule tensión que debe ser liberada. Esto provoca no solo una alta actividad sísmica, sino una gran actividad volcánica.

En esta región conocida como cinturón de Fuego del Pacífico (FIGURA 37) se encuentran países como Ecuador, Chile, Bolivia, Colombia, Perú, México, entre otros, en donde se ha establecido que

cerca del 80% de los sismos más fuertes de todo el mundo se producen en estas naciones. El terremoto de 1960, de 9,5°Mw ocurrido en Chile (Valdivia), es considerado el movimiento sísmico más importante del mundo y por ende de la región.

Datos históricos demuestran que en Ecuador se han registrado terremotos de magnitudes considerables, que inducen al estudio más profundo de este fenómeno, con la finalidad de evitar que en un nuevo evento próximo los efectos sean mucho menores.

Entre los terremotos más importantes, los cuales han sido registrados tanto por su magnitud como por los efectos producidos en Ecuador se encuentran:

Año	Ubicación	Magnitud	Muertes
1797	Riobamba	8.3	-
1868	Ibarra	8.0	-
1906	Esmeraldas	8.8 °Mw	1000
1949	Ambato	6.8 °Mw	5050
1958	ECU-COL	7.8 °Mw	111
2016	Pedernales	7.8 °Mw	671

Cabe resaltar que en 1979 se produjo un terremoto de 8.1°Mw, en el océano Pacífico cerca a la población

de Tumaco que afectó a Colombia y a la zona costera de Ecuador, en donde se registraron 450 fallecidos, muchos desaparecidos y miles de damnificados.

Sin embargo en 1906, la costa ecuatoriana y cierta parte de la región colombiana fueron las principales afectadas por un sismo que, de acuerdo a la comunidad científica, pudo haber durado aproximadamente 30 minutos. Su inmensidad fue varias veces corregida por haber ocurrido hace tanto tiempo, pero hoy se calcula que alcanzó 8,8 grados de escala de Richter, siendo el mayor terremoto registrado en territorio Ecuatoriano. La costa de Centroamérica y el oeste de Japón también recibieron vibraciones por el movimiento.



FIGURA 37. Anillo de fuego del Pacífico

fuelle: <http://www.geoenciclopedia.com/cinturon-de-fuego-del-pacifico/>



Pero el mas reciente terremoto ocurrido en abril de 2016 en la zona de Pedernales, un cantón de la provincia costera de Manabí, en donde mas de 670 personas perdieron la vida y miles se quedaron sin hogar, ha desencadenado una cantidad de incognitas sobre si el país está preparado para estos fenomenos naturales que tendrá que afrontarlos por el resto de su existencia.

Desde comienzos del siglo XX, en Ecuador se han registrado siete terremotos de gran magnitud en esta misma zona, con epicentros ubicados a muy pocos kilómetros de este terremoto, como el de 1906 y el de 1942. El mayor de ellos es el terremoto de 1906 mencionado anteriormente e involucró una zona total de ruptura que se estima en unos 400-500 km y fue acompañado de un tsunami. El sismo de 2016 se ubica en el límite sur de la zona de ruptura del terremoto de 1906.

### 5.2 Zonas sísmicas en Ecuador

La norma ecuatoriana de la construcción (NCE-SE\_DS) referente a cargas sísmicas y diseño sismo resistente define que “El Ecuador se divide en seis zonas sísmicas, caracterizada por el valor del factor de zona Z. Todo el territorio ecuatoriano está catalogado como de amenaza sísmica alta, con excepción del

nororiente que presenta una amenaza sísmica intermedia y del litoral ecuatoriano que presenta una amenaza sísmica muy alta”.

Referente a la construcción, la norma dice que “Para los edificios de uso normal, se usa el valor de Z, que representa la aceleración máxima en roca esperada para el sismo de diseño, expresada como fracción de la aceleración de la gravedad.

El sitio donde se construirá la estructura determinará una de las seis zonas sísmicas del Ecuador, caracterizada por el valor del factor de zona Z, de acuerdo el mapa de la FIGURA 39”.

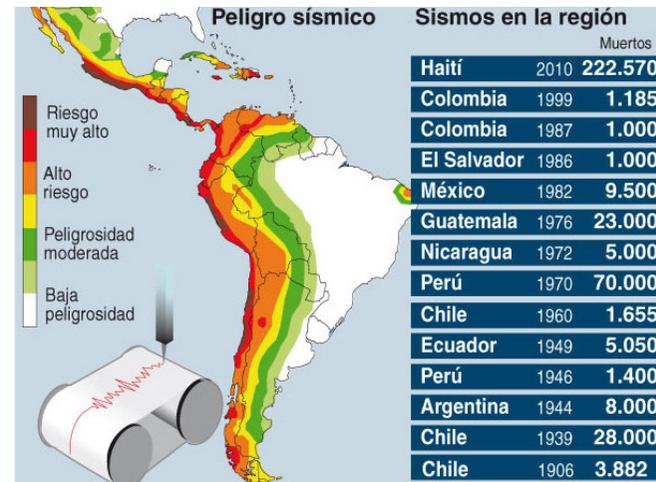


FIGURA 38. Riesgo sísmico en america latina.  
fuente: <http://www.eluniversopordescubrir.com/el-cinturon-de-fuego-del-pacifico-la-amenaza-sismica-de-iberoamerica/>

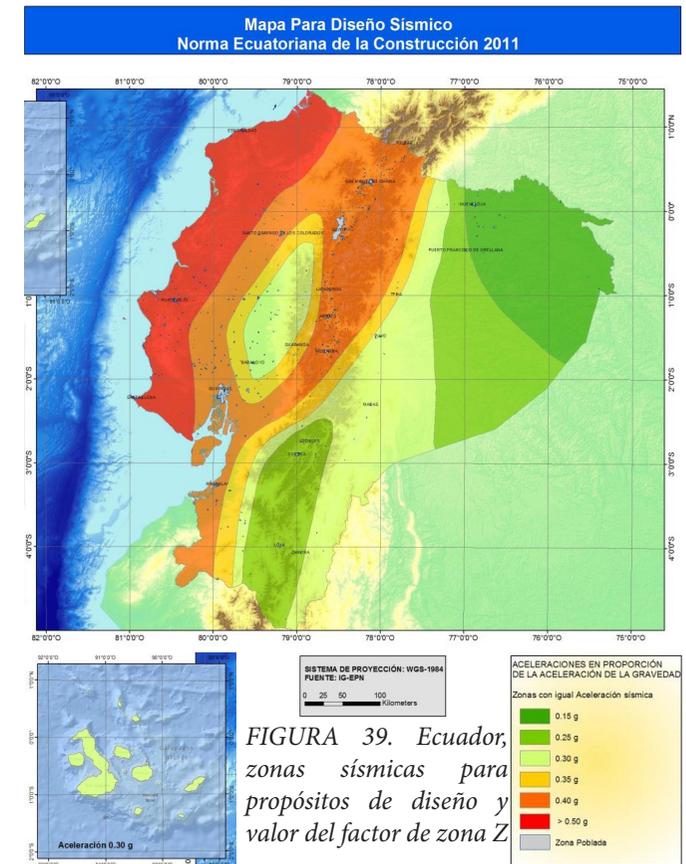


FIGURA 39. Ecuador, zonas sísmicas para propósitos de diseño y valor del factor de zona Z

El mapa de zonificación sísmica para diseño proviene del resultado del estudio de peligro sísmico para un 10% de excedencia en 50 años (periodo de retorno 475 años), que incluye una saturación a 0.50 g de los valores de aceleración sísmica en roca en el litoral ecuatoriano que caracteriza la zona VI.

fuente: <http://antonioaretxabala.blogspot.com.es/2016/04/el-terremoto-de-ecuador-del-16-de-abril.html>

### 5.3 Terremoto de 2016

De la información sísmica histórica y reciente con la que cuenta el Instituto Geofísico<sup>12</sup> de la Escuela Politécnica Nacional (EPN), con motivo de estudio se seleccionó un evento específico (terremoto de abril de 2016) tomando en consideración sus parámetros máximos y grado de confiabilidad respecto a su localización con el fin de realizar el análisis de los elementos estructurales.

#### 5.3.1 Datos generales

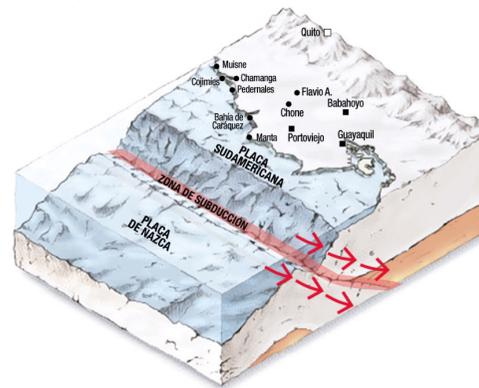
El sismo registrado el sábado 16 de abril a las 18h58 (tiempo local), de magnitud 7.8 (Mw magnitud momento), cuyo hipocentro se ubicó frente a Pedernales (Manabí), a 20 km de profundidad, fue resultado del desplazamiento entre dos placas tectónicas: la placa de Nazca (placa oceánica) que se sumerge bajo la Sudamericana (placa continental).

A este proceso se le conoce como subducción, y

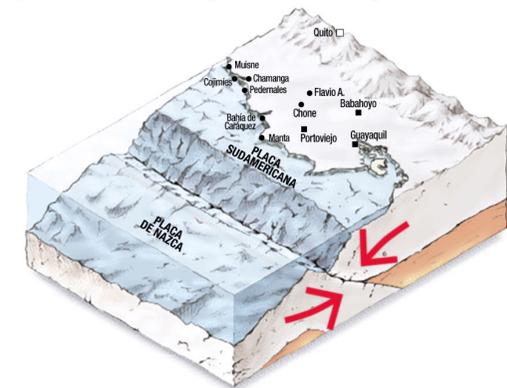
<sup>12</sup> El Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional constituye el principal centro de investigación en Ecuador para el diagnóstico y la vigilancia de los peligros sísmicos y volcánico.

El Instituto Geofísico recibe del Estado ecuatoriano el encargo oficial del diagnóstico y la vigilancia de los peligros sísmicos y volcánicos en todo el territorio nacional.

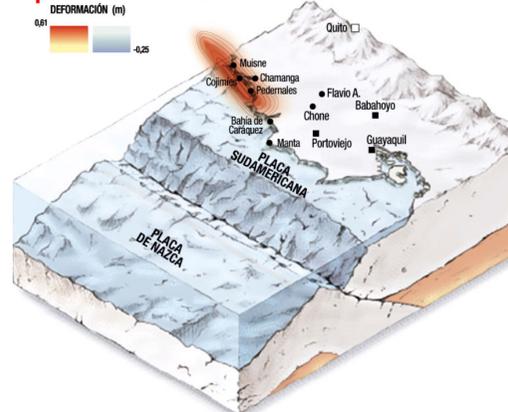
La placa de Nazca se hunde de forma permanente debajo de la Sudamericana, en un proceso llamado **subducción**



El movimiento suele ser imperceptible, pero el terremoto en Ecuador fue provocado por el **fuerte choque de las dos placas**



El terremoto habría generado una flexión de la corteza terrestre, **haciendo que un área de Ecuador se eleve**



**...Y otra de extensión similar se hunda hacia el interior**

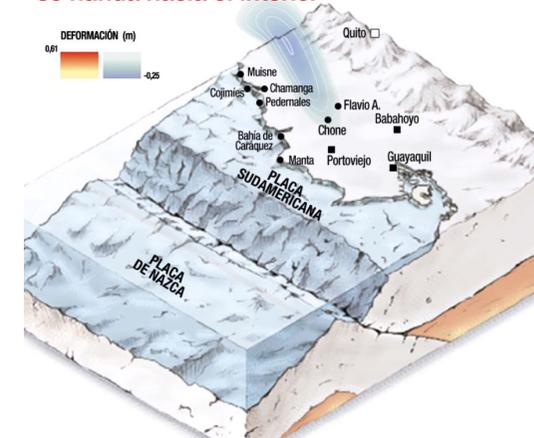


FIGURA 40 (1.2.3.4.)

fuelle: <http://semanariolaprensa.com/?p=11853>  
hipertextual.com-El Universo Ecuador-Instituto Geofísico de Ecuador

es el mismo fenómeno que originó los sismos del 31 de enero 1906 (Mw 8.8), que es el más grande registrado en Ecuador y el sexto más grande a escala mundial; el del 14 de mayo 1942 (Mw 7.8); 19 de enero de 1958 (Mw 7.8) y del 12 de diciembre de 1979 (Mw 8.1).

En esta zona de subducción se han producido muchos de los mayores terremotos registrados, como el de Valdivia (Chile), de 1960 y magnitud 9.5; el de Tohoku (Japón), de 2011 y magnitud 9.0, y el de Sumatra, de 2004 y magnitud 9.1. La magnitud del terremoto de Tohoku, que provocó la crisis de la central nuclear de Fukushima, fue mucho mayor que la del terremoto en Ecuador, porque rompió un área de 400 x 200 Km.

### 5.3.2 Sucesos

El terremoto fue precedido por un sismo de magnitud 4.8 Mw que ocurrió aproximadamente 11 minutos antes. El terremoto de 7,8 Mw sacudió a la costa pacífica ecuatoriana a las 18:58 horas (hora local), el movimiento telúrico se sintió principalmente en localidades cercanas a su epicentro, localizado entre las provincias de Manabí y Esmeraldas.

Sin embargo, el sismo también fue sentido con fuerza

en todo el territorio ecuatoriano. En lo que respecta a los países vecinos, las ondas alcanzaron ciudades del sur como Pasto, Cali, Ipiales en Colombia; mientras que en Perú fueron sentidas en los departamentos de Tumbes, Piura, Amazonas y Cajamarca.

### 5.3.3 Resumen de evaluación e intensidad

La intensidad es un indicador de la fuerza del evento, medido en personas, objetos y edificaciones.

Para determinar un nivel de intensidad se utilizó la Escala Macrosísmica Europea (EMS98), que es una actualización de la Escala de Mercalli. Esta escala cuenta con 12 grados.

Según se indica en el informe del IG (EPN); *La información levantada en campo sirvió para determinar una intensidad máxima de 9 EMS en las zonas de Pedernales y San José de Chamanga.*

*Este valor refleja el colapso observado en muchas edificaciones vulnerables y los daños en edificaciones construidas bajo las recomendaciones de las normas técnicas.*

Peró también *...En ciudades y poblaciones costeras como Bahía de Caráquez, Jama y Canoa y las zonas*

*centrales de Manta y Portoviejo, los daños en las edificaciones muestran una intensidad de 8 EMS. En estas dos últimas ciudades la distribución de daños es muy heterogénea y concentrada en ciertas áreas de la urbe.*

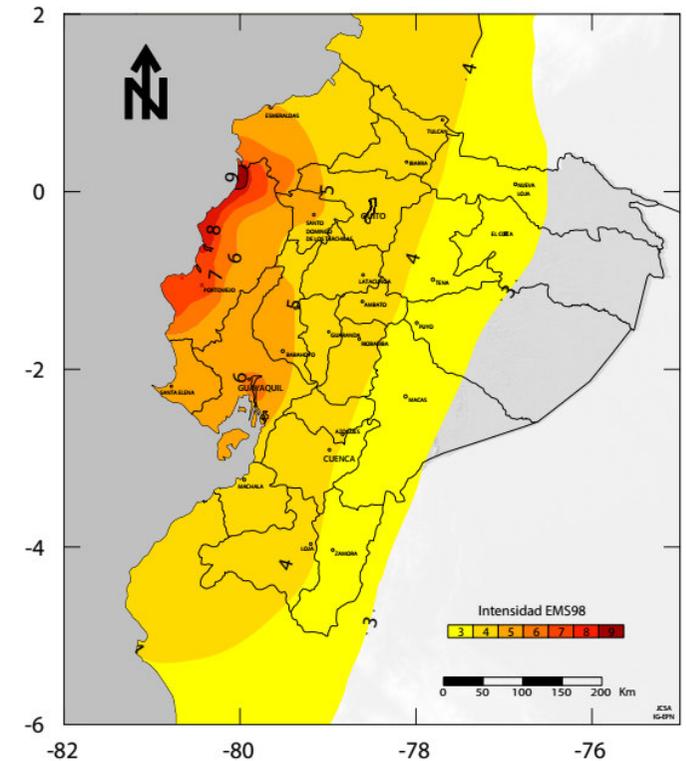


FIGURA 41 Mapa de intensidades del sismo del 16 de abril de 2016

fuelle: Actualización del mapa presentado en el informe especial N°12.  
<http://igepn.edu.ec/servicios/noticias/1316-informe-sismico-especial-n-12-2016>

En la FIGURA 41, conocida como mapa de isosistas, se observa que los daños están distribuidos en la Provincia de Manabí. En las provincias de Esmeraldas, Santa Elena, Guayas, Los Ríos y parte de Santo Domingo de los Tsáchilas, se observaron fisuras en las paredes de las edificaciones, que no comprometen a la estabilidad de la estructura. En general, en las provincias de la Sierra, la intensidad máxima es 4 EMS que indica que el sismo fue sentido ampliamente por la población.

### 5.3.4 Datos de aceleración

En el informe del IG se indica que “La aceleración es un parámetro muy importante en el diseño de edificaciones porque es directamente proporcional a la fuerza que debe soportar una estructura durante un sismo. Esta información es utilizada en los códigos de construcción para generar las recomendaciones que rigen el diseño.

Se cuenta con la información de varias estaciones de aceleración ubicadas en todo el país, que se detallan con círculos en el mapa de la FIGURA. Estas estaciones son parte de la Red Nacional de Acelerógrafos (RENAC) del Instituto Geofísico.

los valores de la máxima amplitud (PGA) de las tres componentes para los registros disponibles. Las mayores aceleraciones están registradas en Pedernales y en el sur del epicentro (estrella negra). Los valores en Manta, Portoviejo, y Chone son más grandes que las

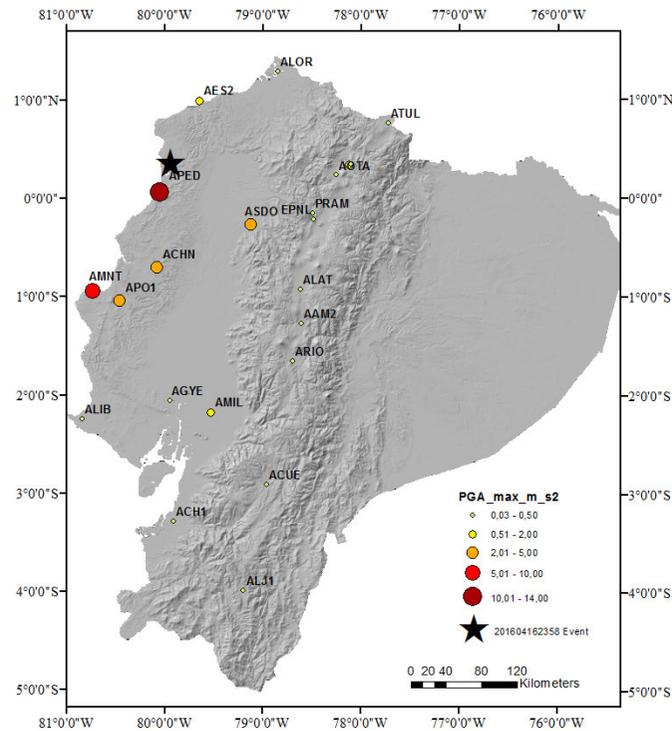


FIGURA 42 Distribución espacial de estaciones y acelerógrafos.

fuelle: Actualización del mapa presentado en el informe especial N°12. <http://igeppn.edu.ec/servicios/noticias/1316-informe-sismico-especial-n-12-2016>

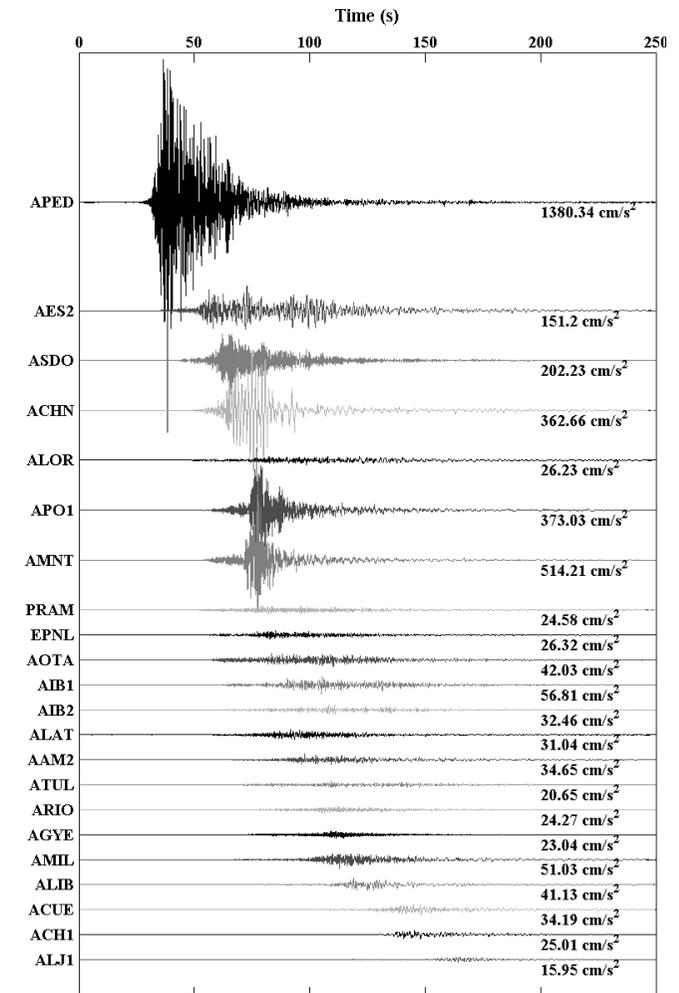


FIGURA 43 Acelerogramas del terremoto del 16 de abril de 2016 ordenados con respecto a la distancia epicentral. Se han considerado las componentes con la máxima aceleración (PGA), la cual está indicada a la derecha de la señal.



observaciones en Esmeraldas que está más cerca del epicentro y de la falla. Muestra también la aceleración máxima obtenida en los sitios de las estaciones para la componente con la aceleración máxima. En Pedernales (estación APED) se registró un valor de 13.803 m/s<sup>2</sup> (1.407 g). En la figura 3 se observa una diferencia importante entre las formas de onda de las estaciones al sur (AMNT, ACHN, APO2) y las estaciones ubicadas en el norte (LGCB, AES2). En el norte, los valores de aceleración pico son más bajos pero con una duración mayor, mientras que en el sur, se observa mayores aceleraciones pico pero con una duración más corta”.

En la FIGURA 43 muestra los acelerogramas del terremoto de las 18h58 (TL) del 16 de abril del 2016 ordenados con respecto a la distancia epicentral. Se han considerado las componentes con la máxima aceleración (PGA), la cual está indicada a la derecha de la señal. El tiempo de origen (0s) corresponde al momento de ocurrencia del evento menos 20s. Se utiliza en todos los casos la misma escala vertical.

En la FIGURA 44 se presentan los datos de dos estaciones en la provincia de Manabí con las aceleraciones más altas. Las señales con los espectros de respuesta de las componentes horizontales

están comparadas con los espectros de la Norma Ecuatoriana de Construcción (NEC15). Para las estaciones de Manta y Portoviejo, los espectros de respuesta son ligeramente menores a los de la NEC15, para un tipo de suelo D. Se ha seleccionado este tipo de suelo en base a la aplicación de la metodología de Zhao et al, 2006.

### 5.3.5 Efectos en las construcciones

Debido a su ubicación, magnitud y profundidad este terremoto produjo efectos devastadores en la zona, sin embargo los datos que se han podido recolectar, han servido para diversos análisis sobre la calidad de construcciones que se implantan en esta región del Ecuador, han servido también para analizar la vulnerabilidad de las edificaciones con el fin de mejorar al momento de ejecutar un nuevo proyecto arquitectónico, el cual va más allá de elección de materiales y construcción, sino de una correcta planificación, seguimiento y control por parte de las entidades a las que les corresponde emitir los permisos de construcción.

En un artículo de julio de 2019 se pudo definir que; “Más de 650 personas perdieron la vida, y varios miles resultaron heridos. El terremoto causó millones de dólares en daños, y miles de personas perdieron sus

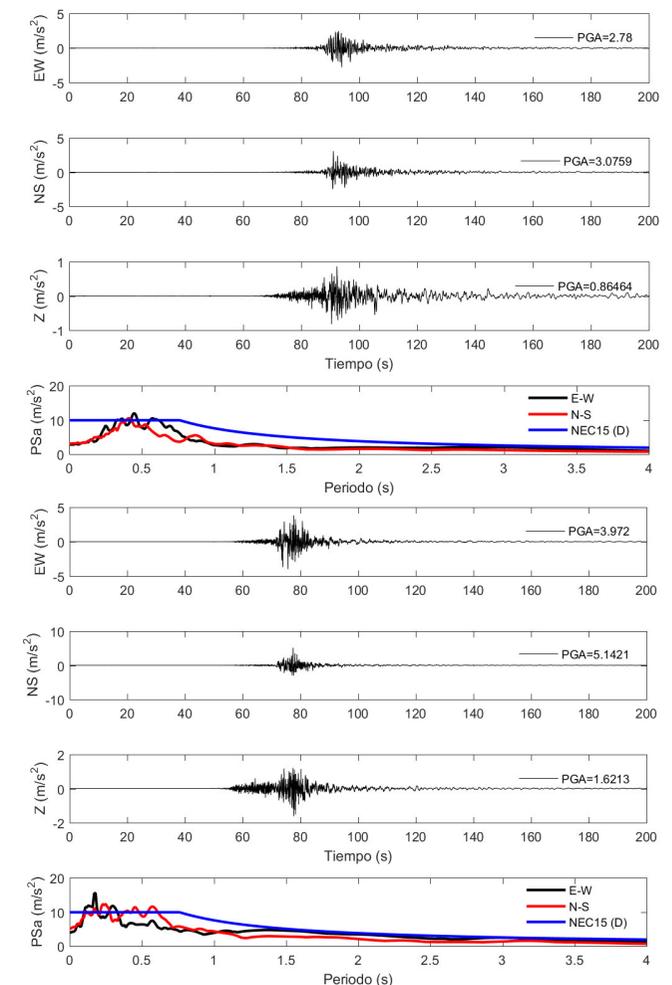


FIGURA 44 Señales de aceleración y espectros de respuesta para las estaciones de Portoviejo (arriba) y Manta (abajo)  
 fuente: Actualización del mapa presentado en el informe especial N°12.  
<http://igeppn.edu.ec/servicios/noticias/1316-informe-sismico-especial-n-12-2016>

casas, o quedaron sin acceso a los servicios básicos. La tercera parte de las muertes ocurrieron en la ciudad costera de Manta, incluyendo 91 personas que fallecieron cuando un edificio comercial colapsó”.

Y continúa; “Este terremoto fue especialmente dañino por varias razones. Los edificios experimentan mayor vibración cuando están asentados sobre sedimentos suaves, que cuando están sobre suelo firme. Esto es lo que en ingeniería sísmica se denomina Efecto de Sitio. Muchas de las ciudades afectadas están precisamente construidas sobre sedimentos. Esto es así, sencillamente porque son terrenos planos, generalmente localizados en depósitos de ríos y estuarios costeros. Otro problema experimentado en algunas partes de Ecuador, fue el fenómeno de licuefacción de suelo.

Finalmente, la calidad de las construcciones juega un papel importante, y puede ser determinante para que un edificio soporte o no un terremoto. Desafortunadamente, la mayoría de las construcciones en Ecuador son frecuentemente construidas con materiales sísmicamente no resistentes, incluyendo ladrillos de barro, bloques con huecos no rellenos y concreto pobremente reforzado”. (Gabriel Lotto and Ross Stein).



foto 1



foto 2



foto 3

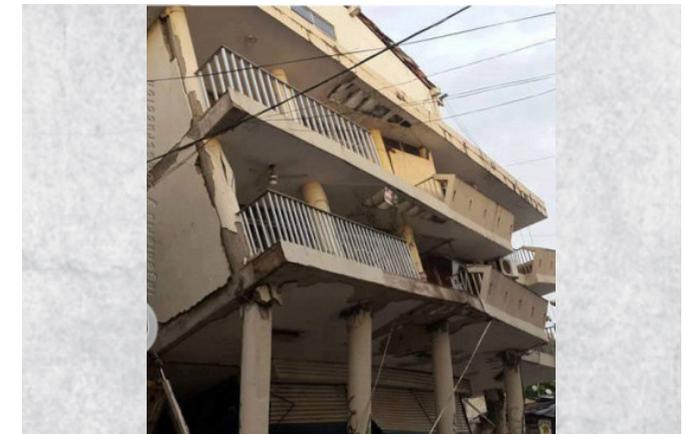


foto 4





foto 5

antes



foto 7

antes



foto 9

antes foto 10

después

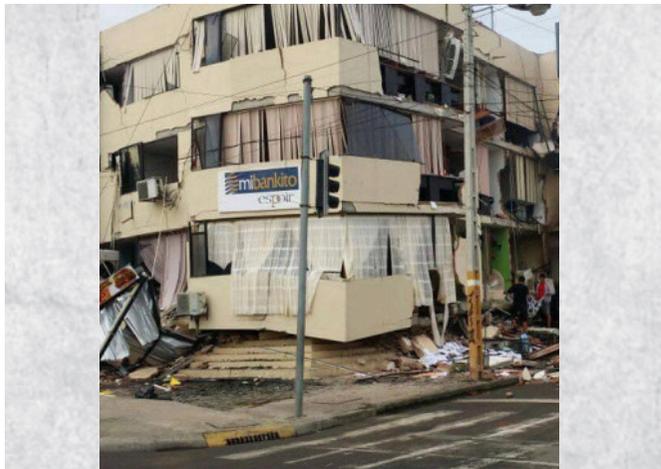


foto 6

después



foto 8

después



foto 11

después

### 5.3.6 Daños en estructuras

Muchas de las estructuras que fueron afectadas drásticamente en este terremoto presentan como factor común el problema de piso blando. Innumerables viviendas de 2 a 3 plantas y edificios de mediana altura han sufrido este efecto debido a su cambio de conformación en el diseño entre planta baja y las plantas superiores.

A primera vista hay un peso muy grande en la parte superior (IMAGEN )y las estructuras no son lo suficientemente sólidas para sostenerla. El sentido común en zonas sísmicas define como recomendación que los elementos más pesados deben estar abajo y conforme se eleva la construcción se debe aligerar el peso.

La diferencia de rigidez entre los pisos inferiores con los superiores provocaron el efecto piso blando en el centro del edificio (IMAGEN ), se puede observar que el centro de masa del edificio no se encuentra en la mitad debido a la descompensación de las masas excedentes que ejercen fuerza perimetral en la estructura posiblemente provocado por el elemento de remate ubicado en los dos últimos pisos así como el área destinada a la circulación vertical que culmina en la terraza.



foto 12



foto 13



foto 14



foto 15



Otro tipo de problema que se encuentra en las estructuras afectadas, es la deformación como respuesta a las fuerzas de sismo. Por ejemplo, el extremo superior de un edificio de oficinas se puede inclinar unos pocos centímetros en cada dirección durante un sismo. La deformación relativa entre pisos, ocasiona que las ventanas de vidrio, particiones livianas y otros elementos que han sido fijados a la estructura sufran también deformación.

Esto provoca por ejemplo que, materiales frágiles como el vidrio que no pueden tolerar deformación, se agrieten cuando el perímetro donde están confinados se cierre y el edificio ejerza esfuerzos directamente sobre ellos. Sin embargo, cuando esta fuerza es mayor, provoca la caída de mampostería que al actuar independientemente de la estructura es más frágil. Si la estructura no colapsa y la mampostería completa de piso a cielo raso al interior y perimetrales así como las divisiones de diferentes materiales como vidrio o gypsum se verán afectadas.

Se evidencia en las imágenes adjuntas que las estructuras no han colapsado pero sí se han deformado produciendo el desplome de las paredes perimetrales completas y de otras con grandes ventanales.

En otras edificaciones se observa la aparición de rotulas plásticas en las columnas del primer piso. Uno de los grandes problemas para que esto suceda es el hecho de que muchas de las edificaciones construidas se las ha realizado mediante autoconstrucción. Por otro lado irregularidades en simetría tanto en planta como en elevación, distribución inadecuada de masas que al final provocan torsiones elevadas.

De las imágenes que se pueden observar, también se podría decir que existe el volcamiento de algunas estructuras debido a que muy comúnmente es síntoma de efectos licuefactivos del suelo. Esto es muy común en zonas costeras en donde suelos arenosos saturados bajo el efecto del suelo se licuan y producen una pérdida de capacidad de resistencia del suelo generando estos tipos de fallas, sin que se puedan dejar de lado los efectos de resonancia cuando se producen amplificaciones del período de vibración de algunas estructuras.

A pesar de que muchos países establecen manuales y normas de construcción antisísmica, en Ecuador, no hay seguimiento de las autoridades para el cumplimiento de estas disposiciones. En todas las imágenes adjuntas, se visualizan fallas estructurales, y es que aparte de los cálculos en



foto 16

antes



foto 17

después

zonas sísmicas, puede haber fallas en los procesos de construcción, debido a la falta de mano de obra calificada. Debemos recordar que los empalmes del acero de refuerzo deben estar sujeto a los diseños estructurales.

A todo esto también se puede adjuntar que muchas de las construcciones afectadas son antiguas, por lo que no tenían resistencia ni buen soporte estructural.

Un problema que se evidencia como un fenómeno no solo en Ecuador sino en latinoamerica, es el hecho de que la gente empieza una obra y deja los hierros en los pisos que aún no se han construido, sin cubrirlos, es decir a la intemperie, esto con el fin de continuar levantando pisos en el futuro, sin embargo no se toma en cuenta el hecho de que estas edificaciones al estar ubicadas en la costa, específicamente junto a la playa, es propensa a que la brisa marina oxide los hierros, dañando la conexión que tendrán esas diferentes plantas en el futuro.

A esto sumamos la mala calidad del material y las sales que entran en contacto con el hormigón al usar arena de mar, se creará una mezcla perfecta para fracasar en el caso de que un sismo fuerte sacuda una construcción con estas características.



foto 18



foto 19

antes

después





foto 20



foto 21



foto 22



foto 23



foto 24



foto 25

### 5.3.7 Análisis fotográfico

Fuente fotos (1 a 11, 16, 17): <https://civilgeeks.com/2016/04/19/imagenes-de-estructuras-antes-y-despues-del-sismo-en-la-zona-cero-de-ecuador/>

foto 1. Casa 1 (Portoviejo - antes)

foto 2. Casa 1 (Portoviejo - después)

foto 3. Casa 2 (Portoviejo - antes)

foto 4. Casa 2 (Portoviejo - después)

foto 5. Casa 1 (Manta - antes)

foto 6. Casa 2 (Manta - después)

foto 7. Edificio 1 (Manta - antes)

foto 8. Edificio 1 (Manta - después)

foto 9. Edificio 2 (Portoviejo - antes)

foto 10. Edificio 2 (Portoviejo - después)

foto 11. Edificio 2 (Portoviejo . después)

foto 12. Hotel Royal pacific (Canoa)

foto 13. Vivienda (Portoviejo)

foto 14. Vivienda (Portoviejo)

foto 15. Vivienda (Manta)

Fuente fotos (16 a 19): <http://www.upsocl.com/mundo/mira-el-antes-y-despues-del-terremoto-en-ecuador-y-entenderas-la-verdadera-magnitud-del-desastre-2/>

foto 16. Edificio 3 (Portoviejo - antes)

foto 17. Edificio 3 (Portoviejo - después)

foto 18. Torre control aeropuerto manta

foto 19. Torre control aeropuerto manta

Hoteles (Canoa, Manabí - Ecuador), Fuente fotos (20 a 25): <http://www.ilovecanao.com/canoa-tras-el-terremoto/>

foto 20. Hotel Bellavista

foto 21. Hotel Sharit

foto 22. Hotel Camaleón

foto 23. Hotel Mitad del mundo Surf

foto 24. Hotel Jah Bless (1)

foto 25. Hotel Jah Bless (2)



*Una grieta en una calle de la ciudad de Manta*

fuelle: <http://ecuaconsultas.com/2017/04/ver-fotos-videos-del-terremoto-7-8-ecuador-16-abril.html> ; edición: autor

CAPITULO VI

## 6. Cálculo estructural

### 6.1 Caso de estudio - Edificio Tipo

Para evaluar el efecto que se produce en la estructura, se ha considerado una edificación que resultó afectada en el sismo de abril de 2016, esta construcción con menos de 20 años de antigüedad, tiene 5 plantas y funcionaba principalmente como hotel a partir de la primera planta, además de un restaurante y zona administrativa en planta baja.

Es una edificación que tiene características similares a las de la mayoría que resultaron afectadas en el terremoto, en donde destaca su estructura de hormigón armado con pilares que forman pórticos ortogonales y forjados de losas bidireccionales.

Es considerada óptima para su análisis porque además de las características señaladas, posee una configuración vertical propia de edificaciones que no presentan una buena respuesta a efectos sísmicos, en donde su planta baja es mas pequeña que las plantas superiores que presentan voladizos. Existe también una marcada diferencia entre planta baja y el resto de plantas en lo que tiene que ver con la densidad de paredes que dividen los espacios interiores.

Se podría deducir que esta edificación presenta un claro ejemplo de piso débil dada su configuración, como se ve en las fotografías adjuntas.



*Hotel Royal Pacific antes del terremoto*

*fente: google maps*

### 6.1.1 Análisis fotográfico



1.



2.



3.



4.



5.



6.

fuelle: google maps

### 6.1.2 Características.

El edificio seleccionado se encontraba ubicado en el poblado de Canoa, dentro de la provincia de Manabí (Ecuador), lugar que quedó 90% destruido luego del paso del terremoto de 7,8 grados del 16 de abril de 2016.

Al estar ubicado junto al mar, esta zona es considerada altamente turística, por lo que ofrece diferentes opciones de hospedaje en donde muchos hoteles presentan similares características al edificio seleccionado.

El hotel Royal Pacific tenía una capacidad de hospedaje para 50 personas distribuidas en 24 habitaciones y el restaurante una amplitud máxima para 32. A la hora del terremoto (18h58) se considera que al interior se encontraban cerca de 30 personas, aparentemente 7 de ellos fallecieron al momento en que la estructura se desplomó.

#### Colapso estructural

Como se ve en la fotografía 1, el peso de los pisos superiores produjo que las dos primeras plantas se redujeran a escombros. Se puede observar que los pilares han fracasado ante los esfuerzos cortantes producidos por la fuerza del terremoto.

En la parte superior del hotel, se observaron diversas paredes que presentaban fracturas, así como trizaduras en pilares y losas, sin embargo no se produjo un colapso total, la fotografía 2, presenta el estado de la edificación al momento de su derrumbo



*Hotel Royal Pacific después del terremoto*

1.



*Hotel Royal Pacific en demolición*

2.

fuelle: <http://www.ecuavisa.com/articulo/terremoto/noticias/148311-secreto-edificios-que-no-se-cayeron-durante-terremoto-ecuador>

final, en donde se ve que las plantas inferiores practicamente se redujeron a escombros.

Sin duda, la fotografía 3 demuestra con mayor claridad el estado del hotel luego del paso del terremoto, se puede observar que las plantas inferiores se redujeron a escombros, desapareciendo por completo, también se ve que las paredes de las plantas superiores presentan grades grietas en forma de X, pero también encontramos que en la última planta o planta superior, la afección del terremoto es mucho menor.

La fotografías 4, 5 y 6, muestran el efecto producido en las columnas de las plantas 1 y 2, indicando la dirección del terremoto y su afección en la edificación. La mampostería ha desaparecido mientras que la deformación de los pilares es completa.

Todas las fotografías permiten analizar y concluir que la estructura han sido extremadamente vulnerables frente a la fuerza y magnitud del terremoto al que ha sido sometido.



3.



4.



5.



6.

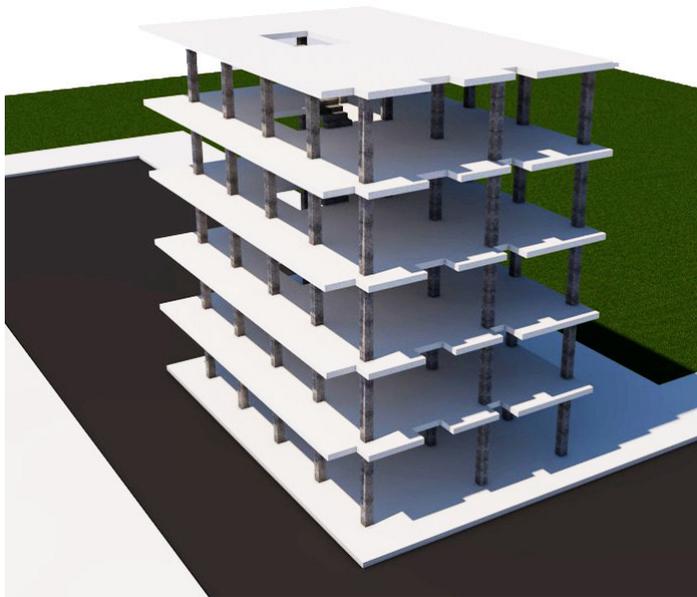
Foto 3 fuente: <http://www.ilovecano.com/canoa-tras-el-terremoto/>

Fotos (4,5,6) fuente: <http://www.eqclearinghouse.org/2016-04-16-muisne/2016/05/01/rc-buildings-part-2-jama-calceta-canoa-san-isidro-and-chone/>

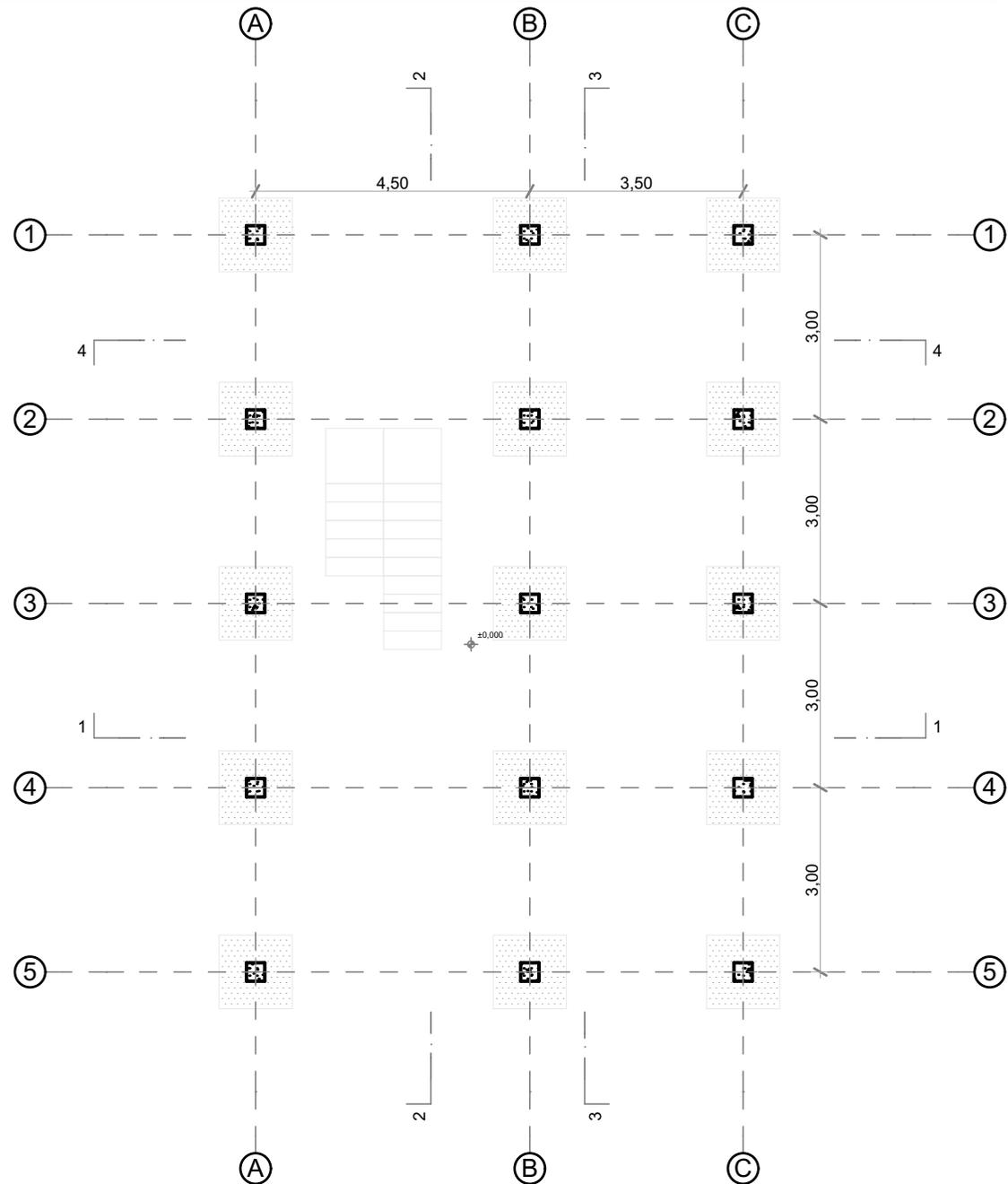
## 6.2 Estructura

La estructura principal esta conformada de pórticos ortogonales en sentido longitudinal y transversal, con zapatas de cimentación, pilares de hormigón armado y forjados de losas con armadura bidireccional.

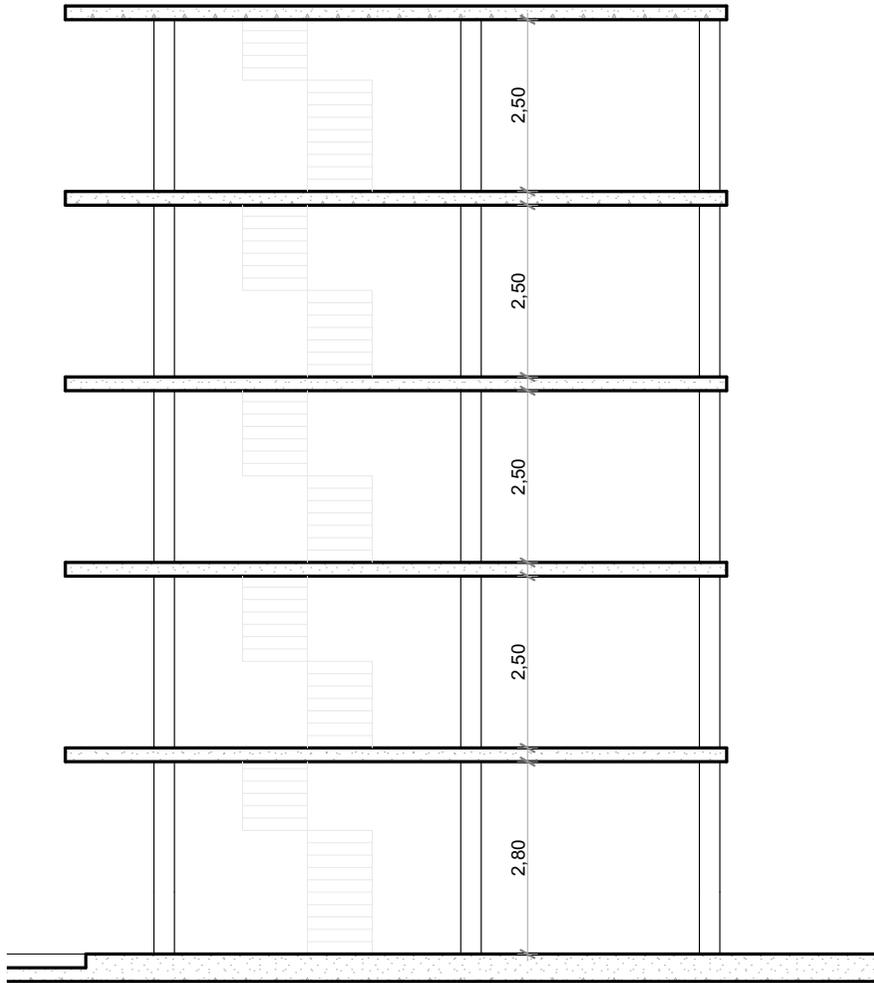
Como se observa en la planta estructural las dimensiones entre los ejes de los pilares (todos iguales), son de 3m en sentido longitudinal y de 4,5m y 3,5m entre ejes AB y BC respectivamente en sentido transversal.



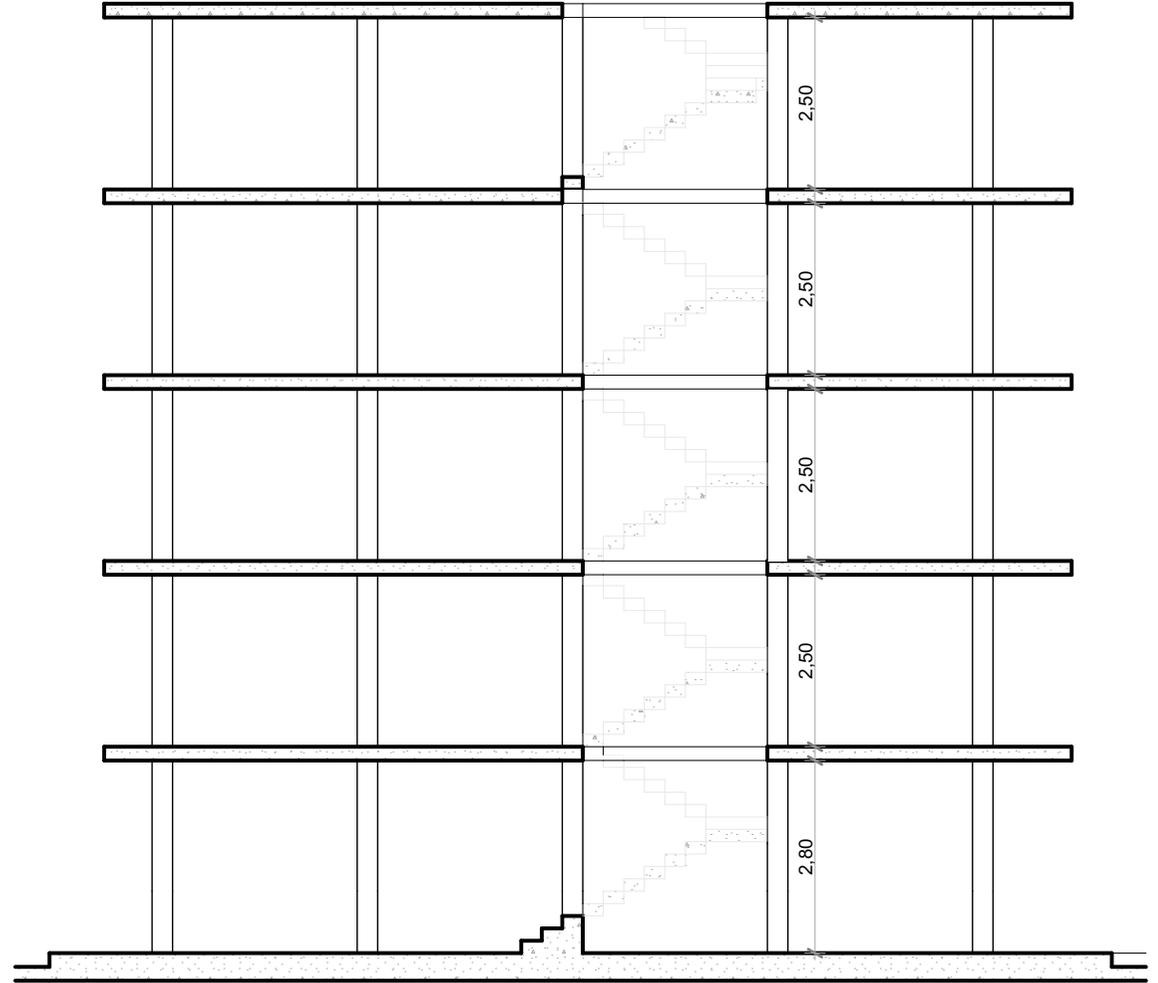
Axonometría estructural



planta estructural

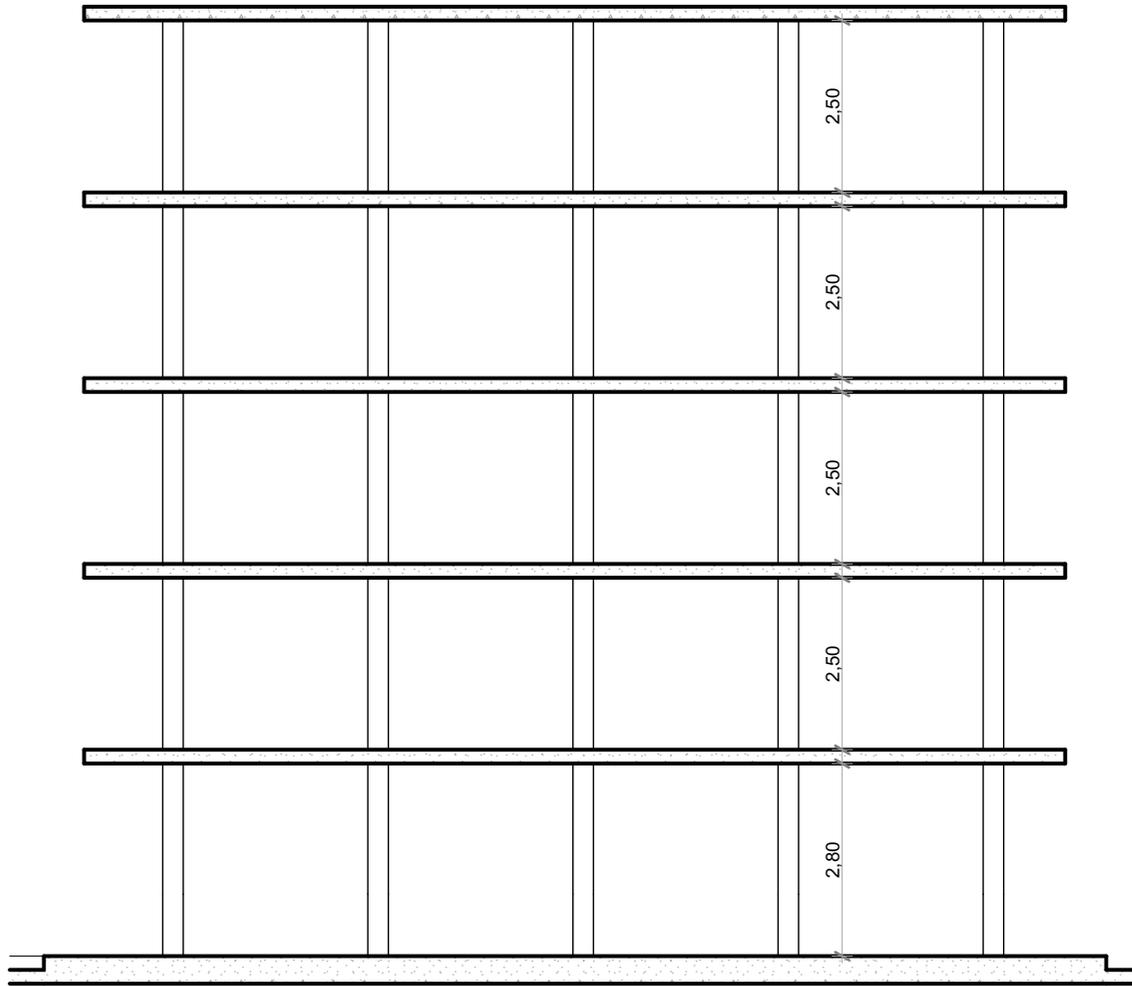


corte 1 - 1

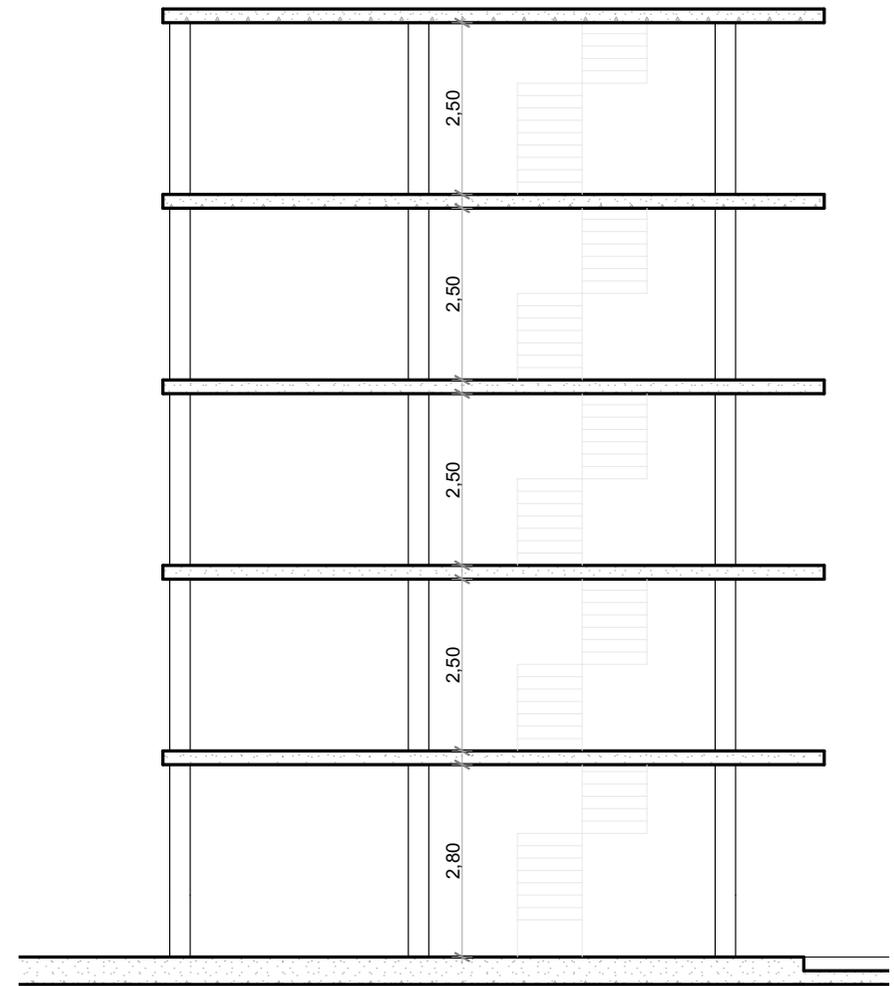


corte 2 - 2





corte 3 - 3



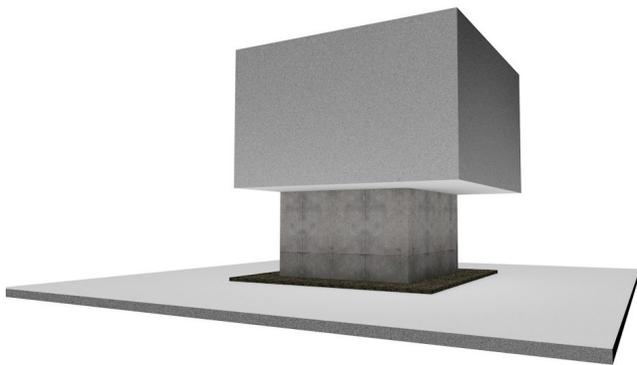
corte 4 - 4

### 6.2.1 Características estructurales

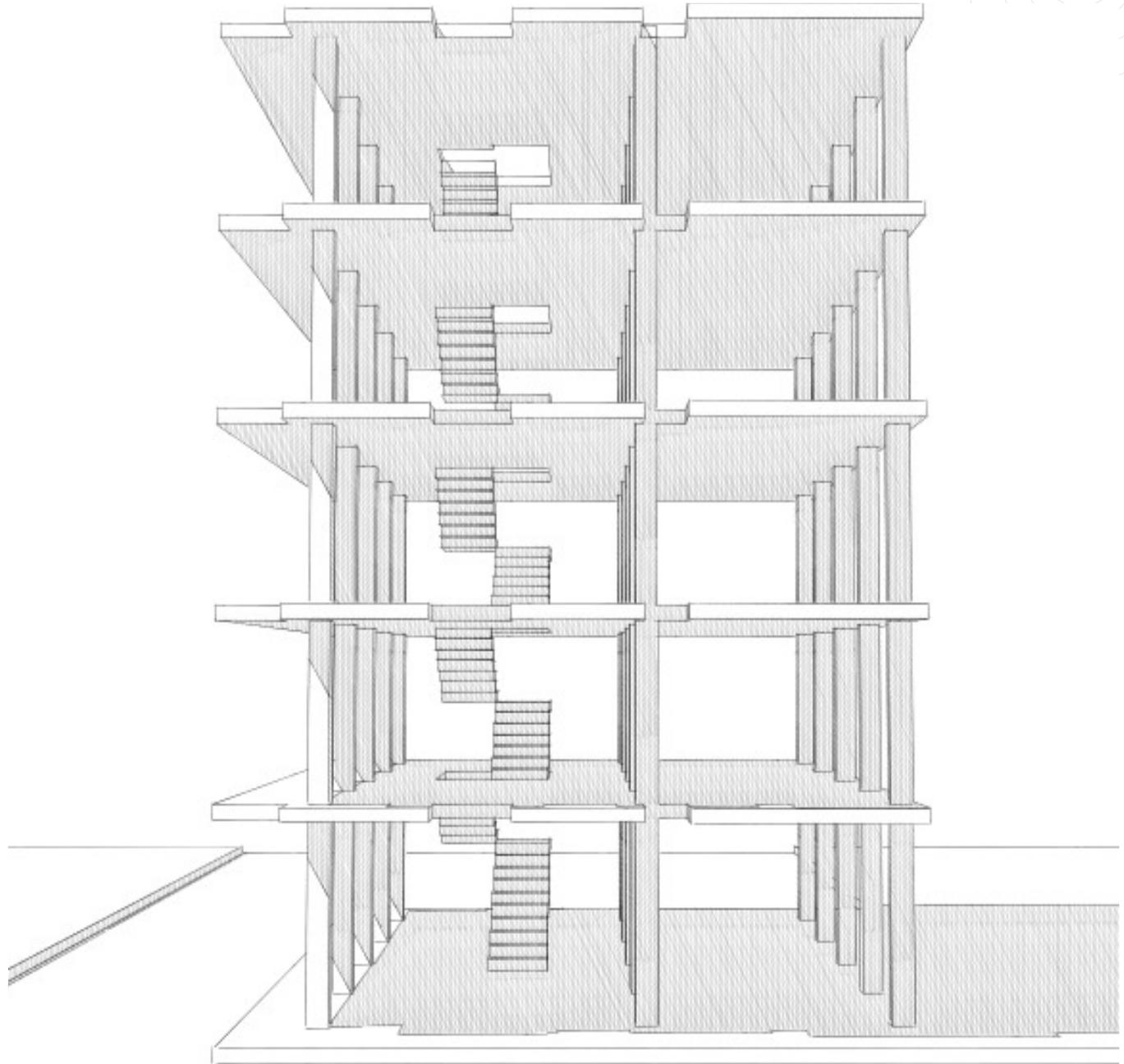
El edificio demuestra entre sus características principales, que la altura de planta baja es mayor al de todas las plantas superiores, esto es muy común en las edificaciones ubicadas en la region costa del Ecuador.

Otra característica que se puede ver, es la presencia de voladizos a partir de primera planta alta, en este caso en la parte frontal, se generan balcones, en las partes, lateral y posterior, se producen los voladizos con la finalidad de generar mayor espacio al interior de las habitaciones.

Sin embargo esta tipología de diseño no es recomendable frente a esfuerzos sísmicos, como ya se ha explicado anteriormente, debido a que es considerado un problema de configuración vertical cuando se plantean cambios excesivos bruscos de rigidez y masa entre pisos consecutivos.



*Forma de configuración de esta edificación*



*Axonometria frontal de la estructura*

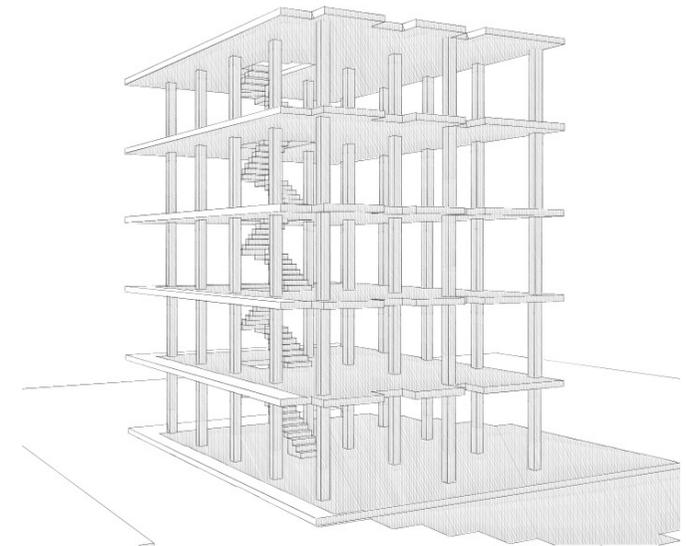
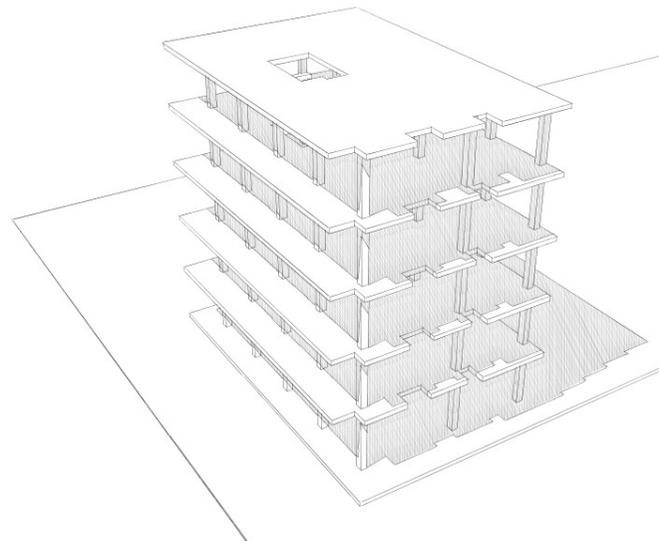
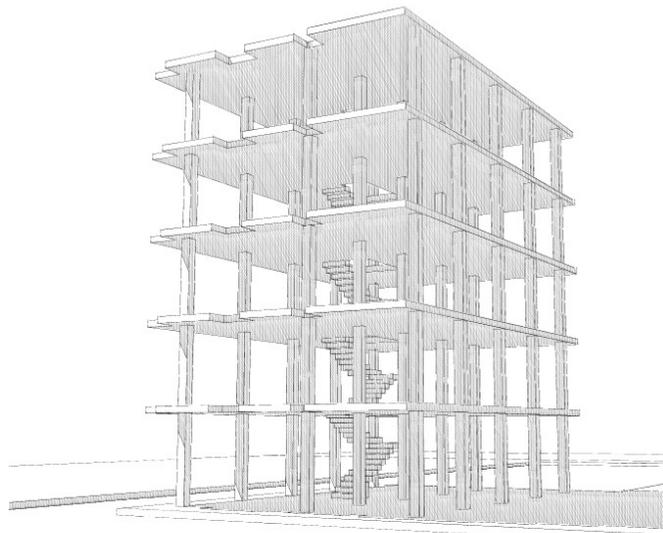
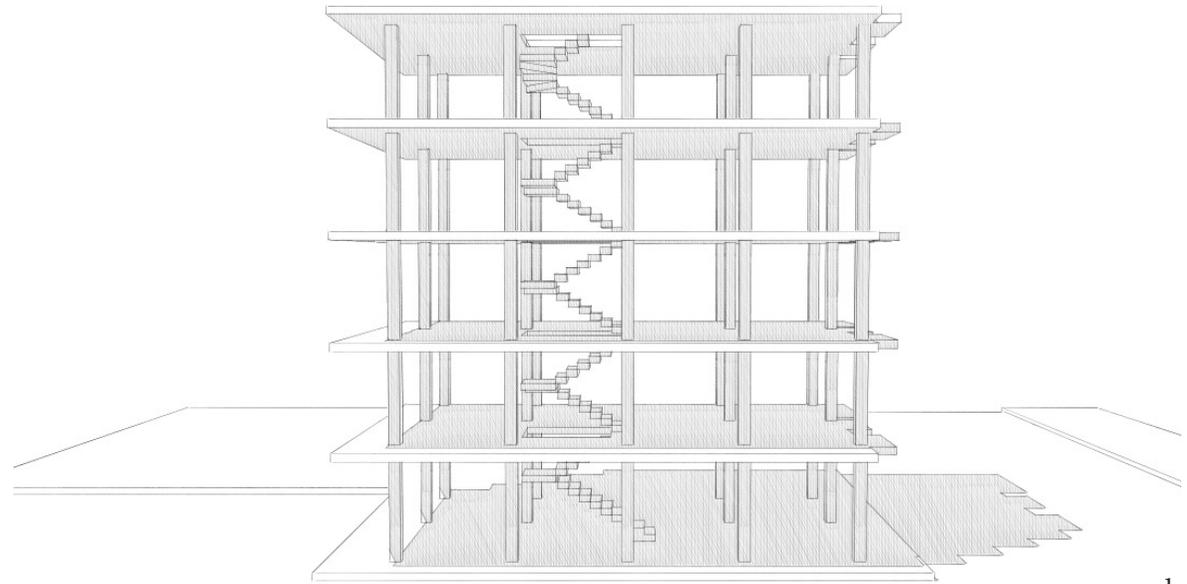


Para realizar los cálculos, se ha modelizado la estructura simplificada entre pilares y forjados de losas, tomando en cuenta las gradas de circulación así como la altura entre losas y los voladizos existentes.

Los pilares se distribuyen en 3 longitudinales por 5 transversales, en total 15 columnas que en planta baja tienen una altura de  $h=2.80\text{m}$  y en el resto de las plantas  $h=2.5\text{m}$ .

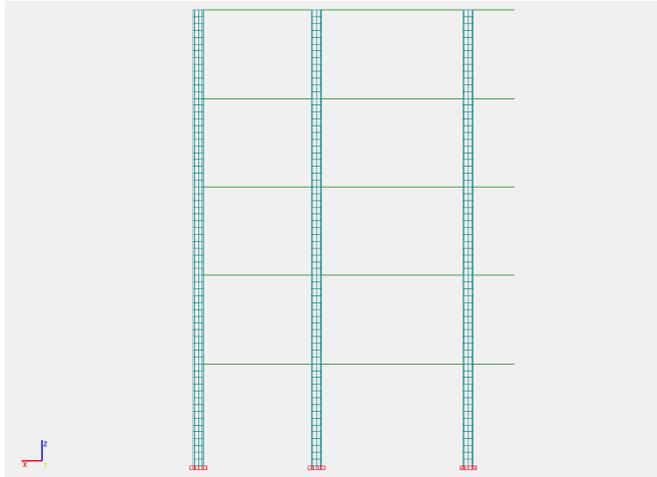
Las imágenes axonométricas (1, 2, 3, 4) adjuntas, permiten comprender de mejor manera la distribución y forma de la estructura planteada como objeto de cálculo.

La estructura se ha resuelto con apoyos que no permiten el movimiento en las tres direcciones pero permite el giro en las tres direcciones, estos apoyos se han asignado en la base de todos los soportes de planta baja y también en todos los encuentros de la obra de fábrica con el suelo.

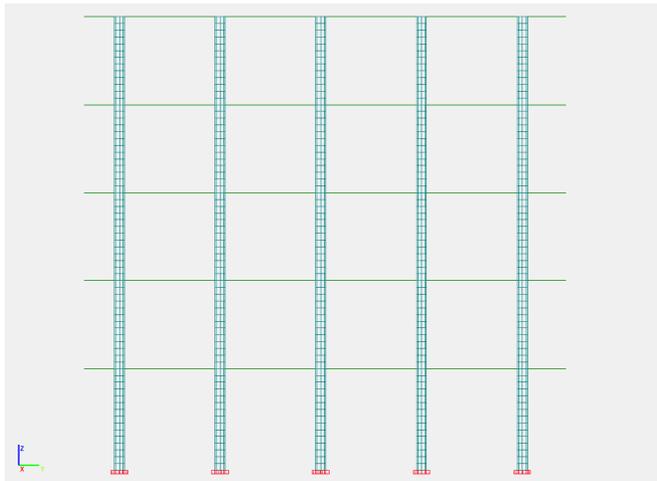


### 6.3 Modelo de cálculo.

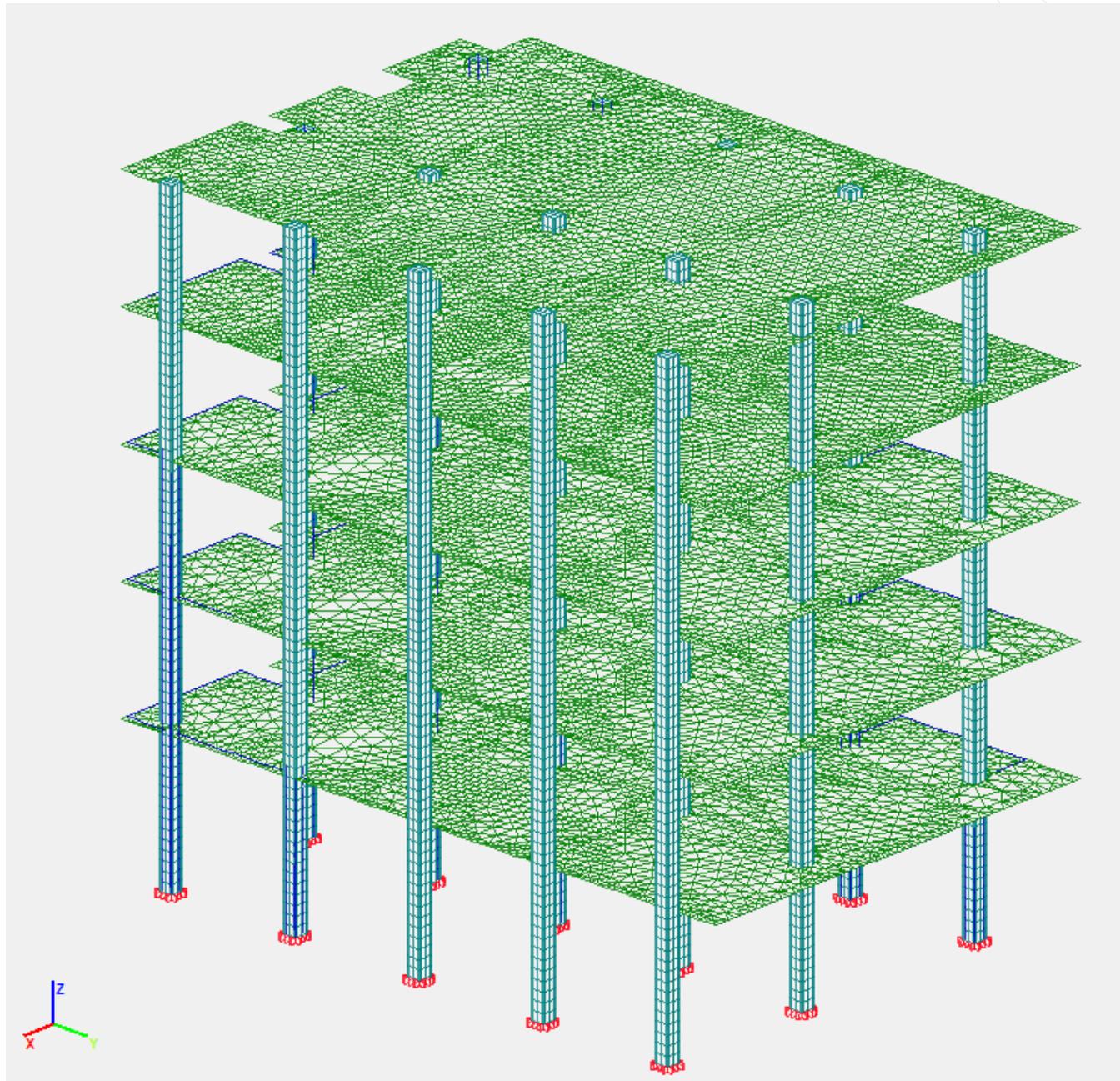
Mediante el programa de ordenador ANGLE<sup>13</sup> se ha realizado el cálculo de la estructura, considerando; apoyos (cimentación), sólidos (pilares) y láminas (losas y forjados).



01. Alzado frontal

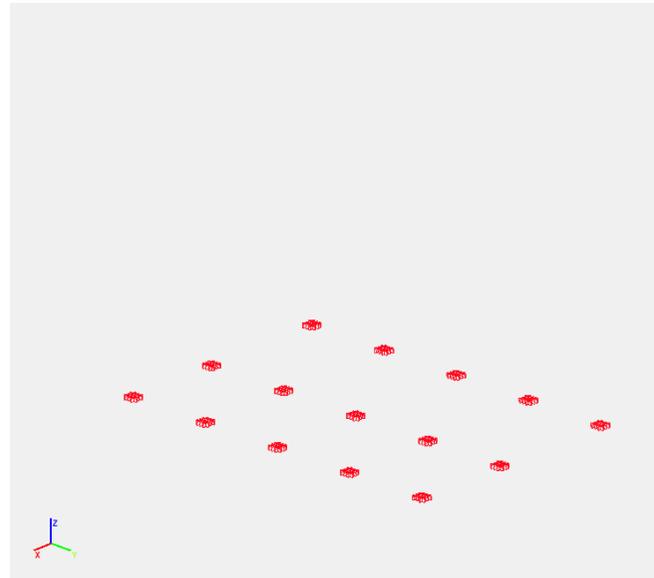
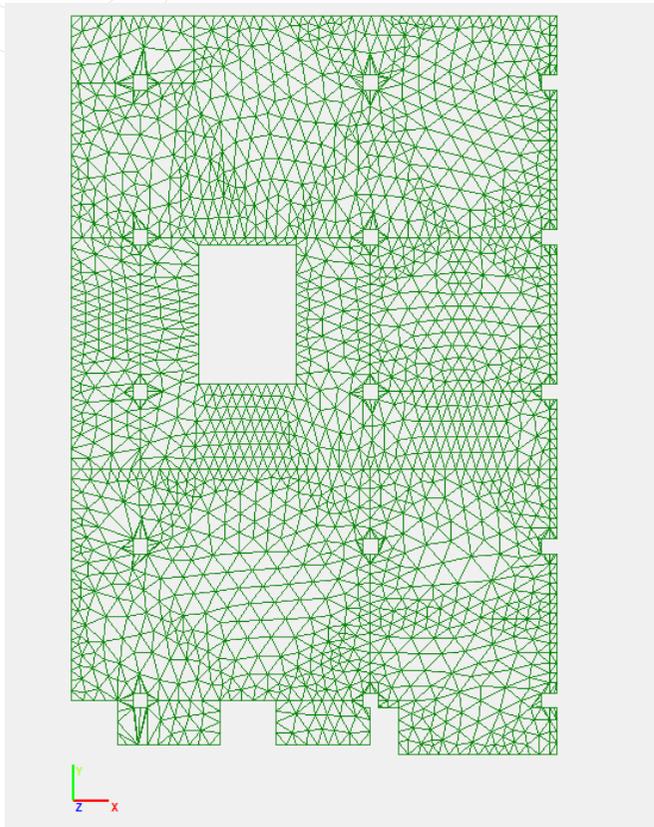


02. Alzado lateral

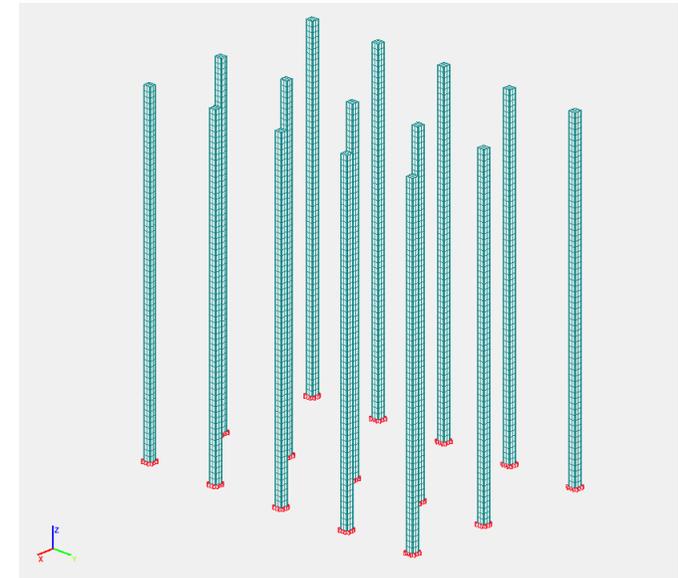


03. Axonometría

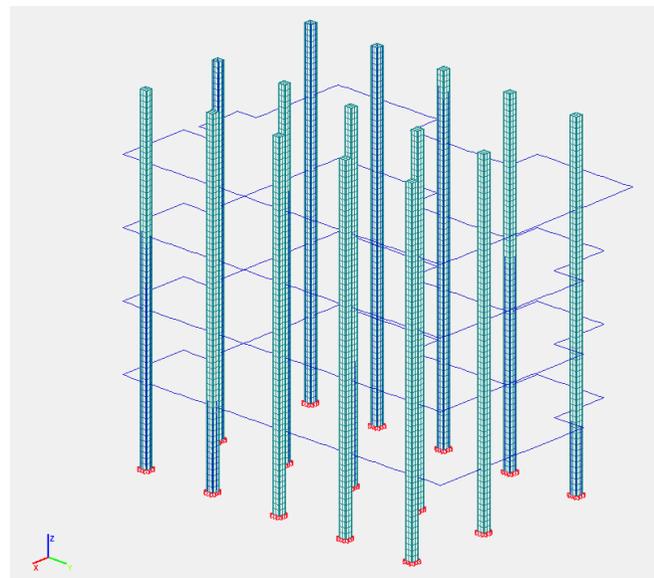
13 Programa de Análisis estructural por elementos finitos.  
Autor: Adolfo Alonso Durá



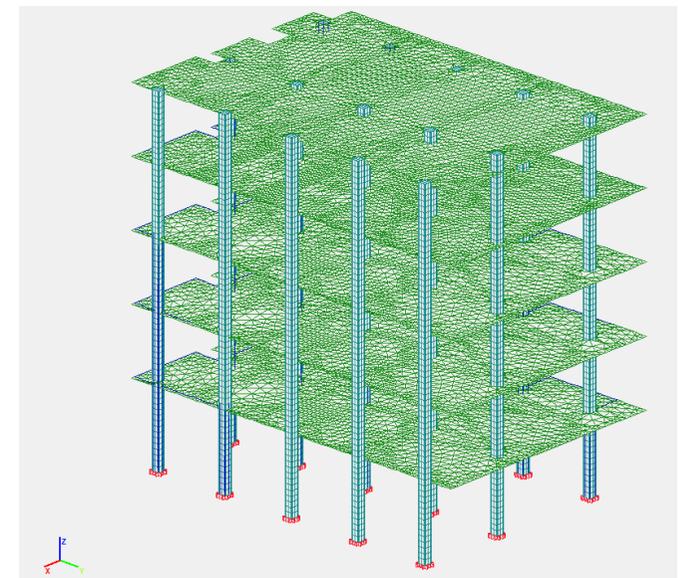
04. Apoyos



05. Sólidos



06. Barras



07. Láminas y modelo completo

### 6.3.1 Datos del modelo

Rígida - Espacial

Nodos	35970
Barras	4968
Láminas	20746
Sólidos	16080
Vínculos	375
Hexaedros	16080

### 6.3.2 Combinaciones

Para el calculo lineal es necesario definir claramente las diferentes cargas que actúan sobre la estructura, por lo que se han considerado dentro de las hipótesis las principales como lo indica la siguiente tabla.

Hipótesis	Carga
H1	carga permanente
H2	sobrecarga de Uso
H5	acción sísmica dirección X
H6	acción sísmica dirección Y

Para el análisis de la estructura se han planteado diferentes combinaciones de acuerdo a las hipótesis planteadas indicadas anteriormente.

	Combinaciones		
ELS	1,00H1	1,00H2	
ELU	1,35H1	1,50H2	
SISMO 1	1,00H1	1,00H2	1,00H5
SÍSMO 2	1,00H1	1,00H2	1,00H6

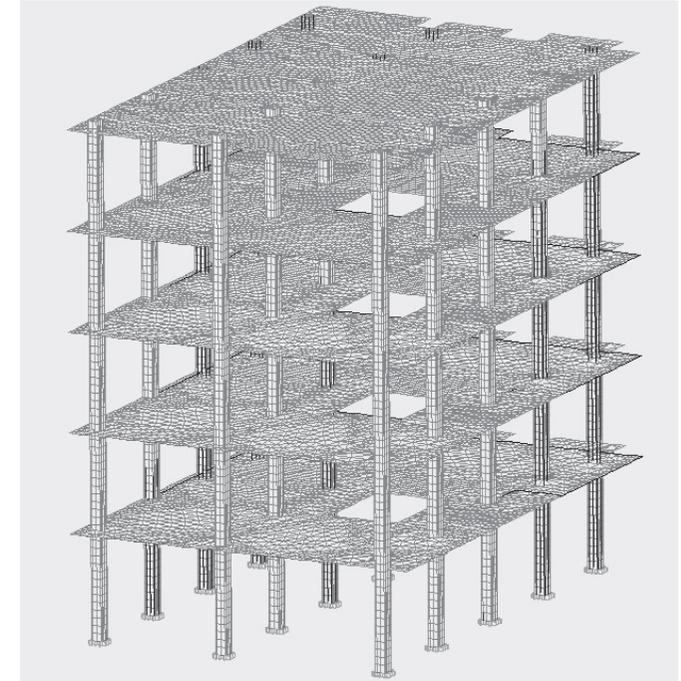
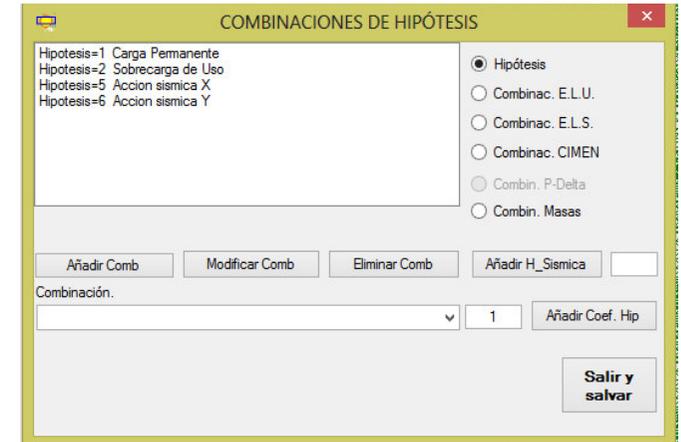
### 6.3.4 Comportamiento lineal.

El análisis lineal demostrará el comportamiento elástico - lineal de los materiales considerando la estructura sin deformar. Como en este caso, el material principal es el Hormigón los resultados encontrados tienen una exactitud muy aceptable.

Se ha considerado importante analizar la estructura en su totalidad. A través de las herramientas que el programa ANGLE, se pueden observar en que condiciones se encuentra la estructura.

Como ejemplo de datos se adjuntan los análisis de momentos y tensiones en los sentidos (X, Y) de los forjados configurados a través de placas, en las que con anterioridad se han definido diferentes características como su material, espesor, etc.

Posteriormente se ha evaluado las deformaciones que presenta la estructura dentro de la combinación de estado limite de servicio. Con esto tenemos un claro conocimiento de como se encuentra la estructura como un primer análisis de sus elementos.

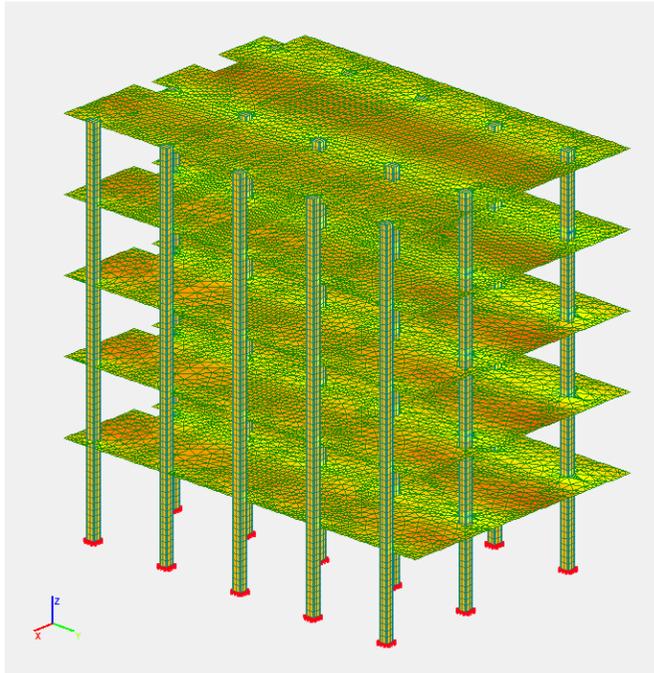


07. Combinaciones y modelo de análisis

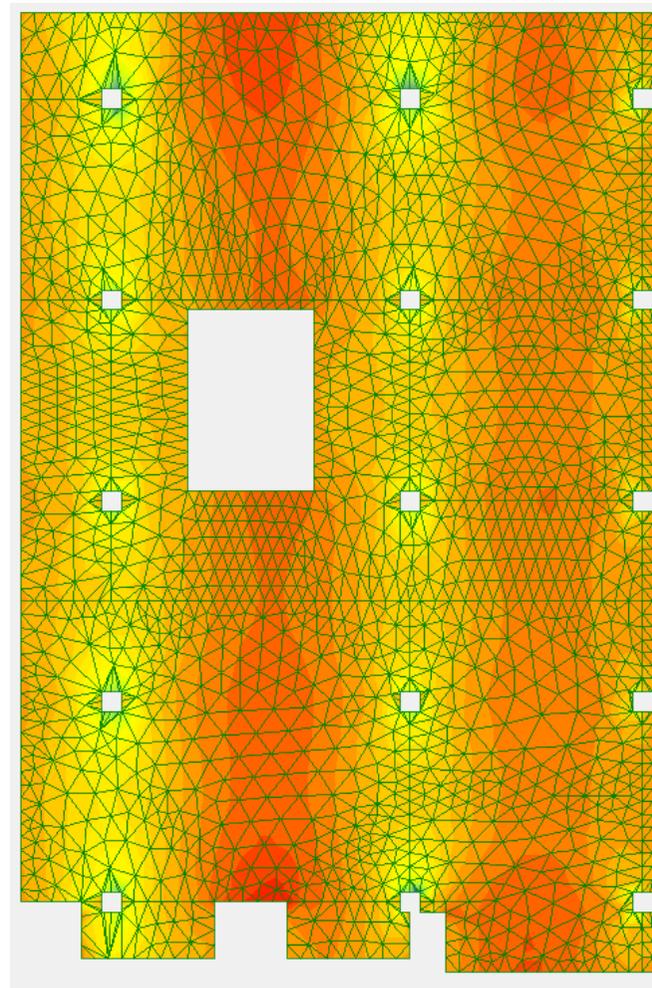
## Análisis Momentos (X, Y)

Estudio de momentos en sentido (X, Y) en la primera placa de la estructura (1 planta alta). Se adjunta también el cuadro de resultados.

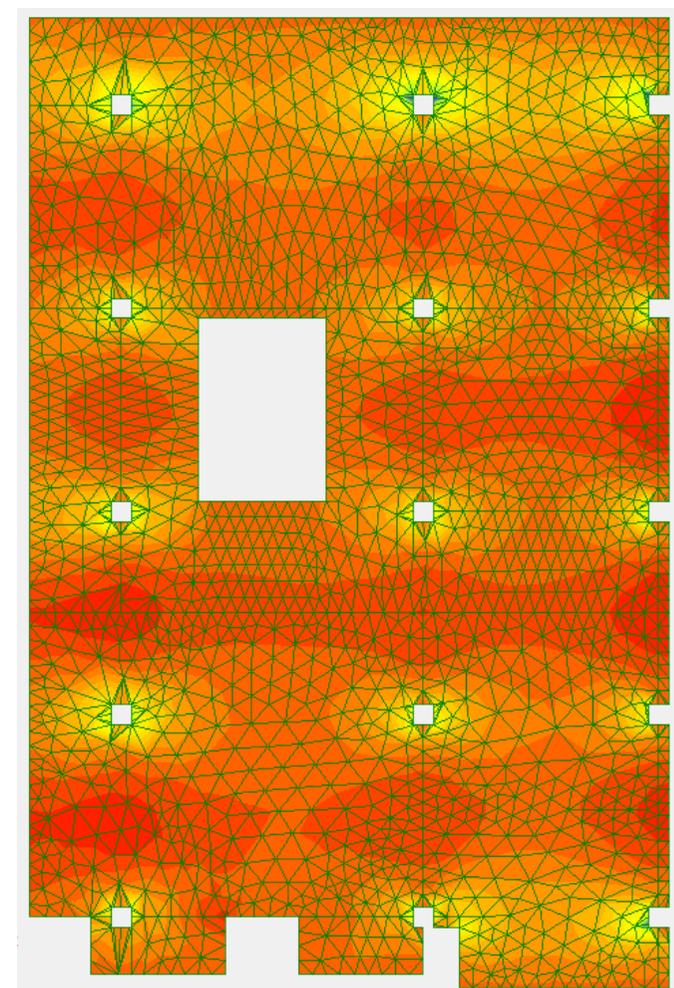
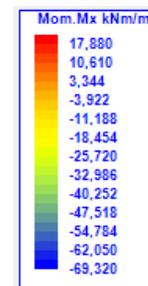
Este estudio ha sido realizado dentro del estado límite de servicio (ELS)



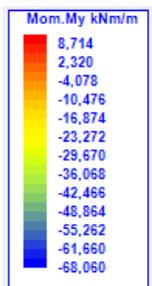
08. Modelo (momentos)



09. Momento X



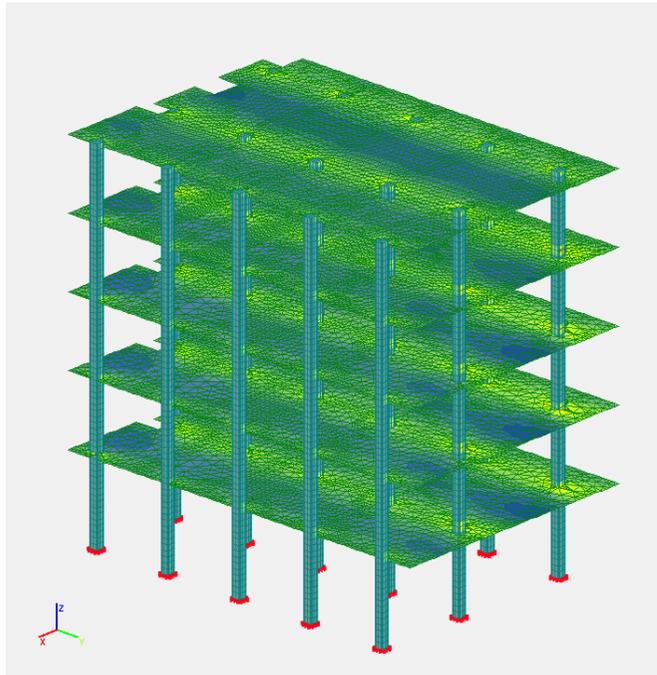
10. Momento Y



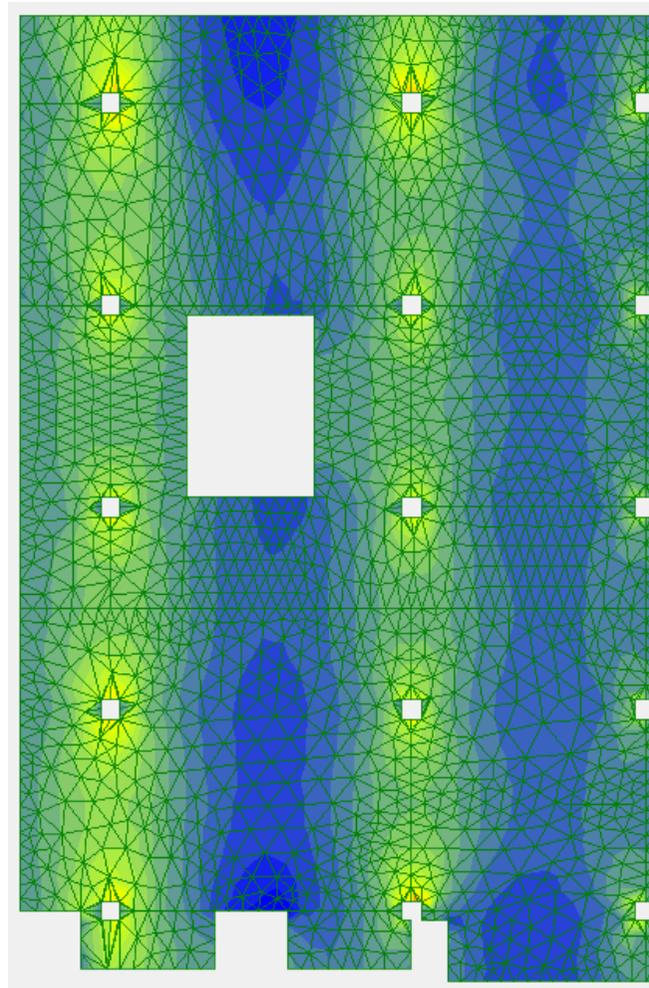
### Análisis Tensiones (X, Y)

Estudio de tensiones en sentido (X, Y) en la primera placa de la estructura (1 planta alta). Se adjunta también el cuadro de resultados.

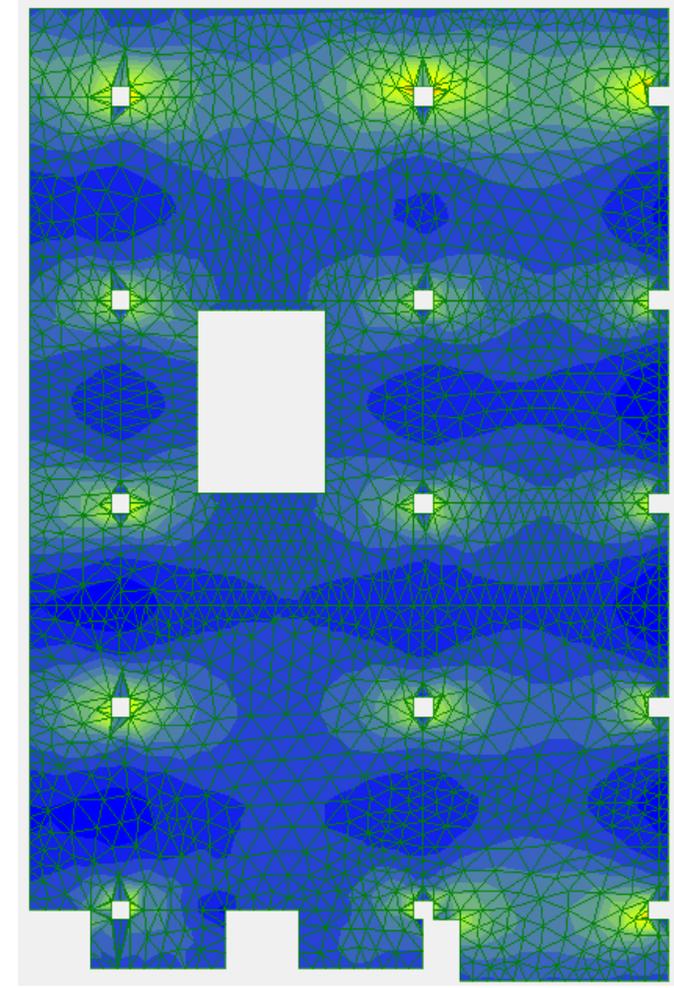
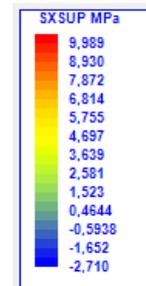
Este estudio ha sido realizado dentro del estado límite de servicio (ELS)



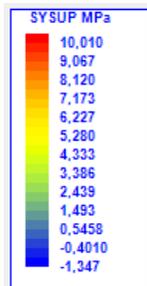
11. Modelo (tensiones)



12. Tensión X



13. Tensión Y

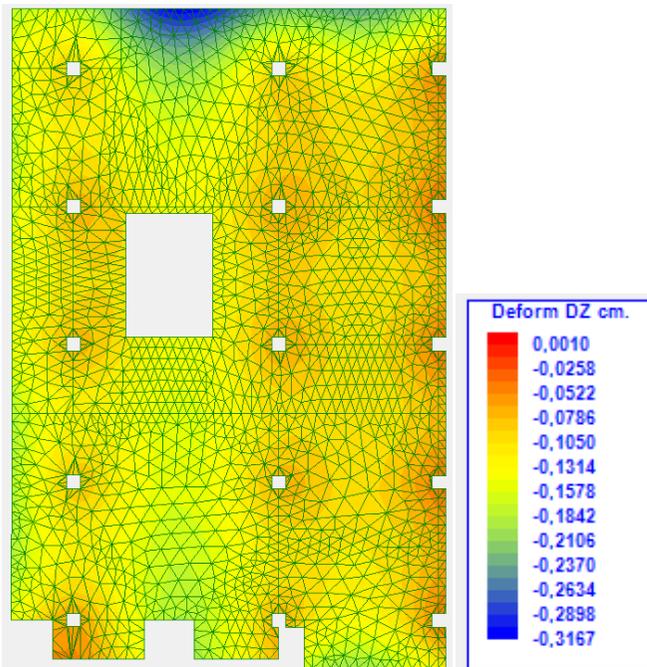


## Deformaciones

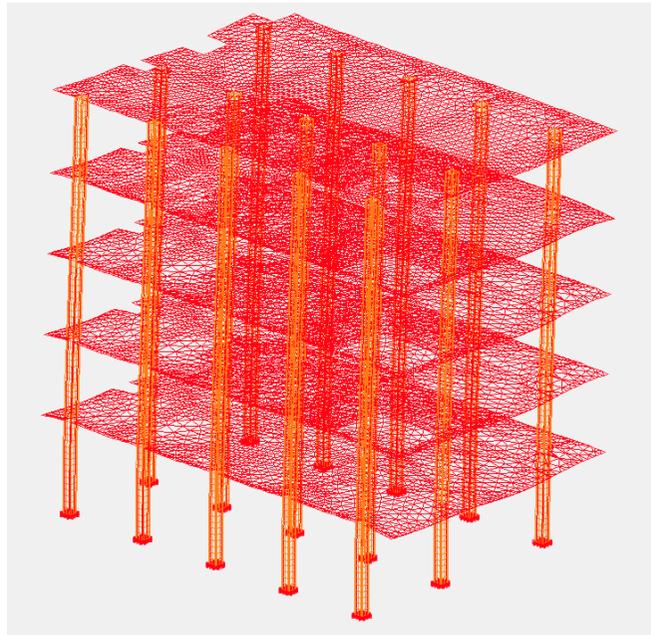
Estudio de deformaciones en el modelo completo. Se adjunta también el cuadro de resultados.

Este estudio ha sido realizado dentro del estado límite de servicio (ELS) considerando las hipótesis 1 y 2. (carga permanente mas sobrecarga de uso).

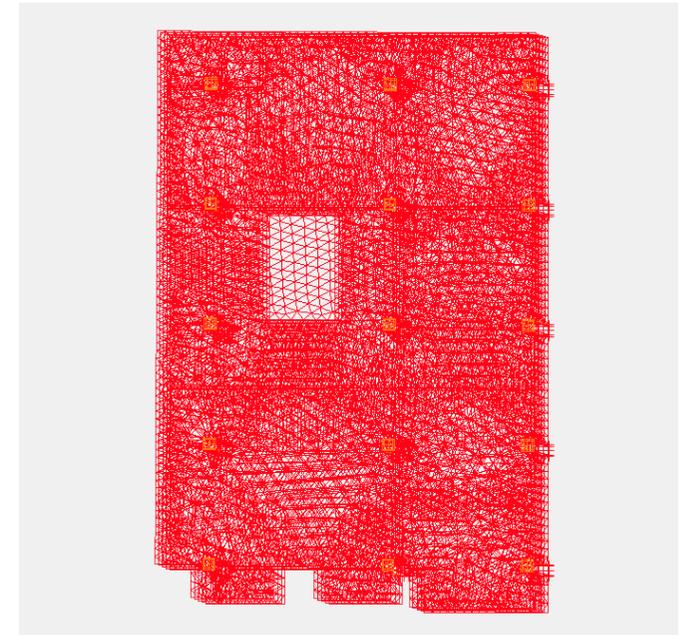
En la imagen 14, se pueden ver los diferentes valores de deformación en una de las losas de la estructura, con esto podemos encontrar el punto de mayor deformación (flecha) del modelo de cálculo.



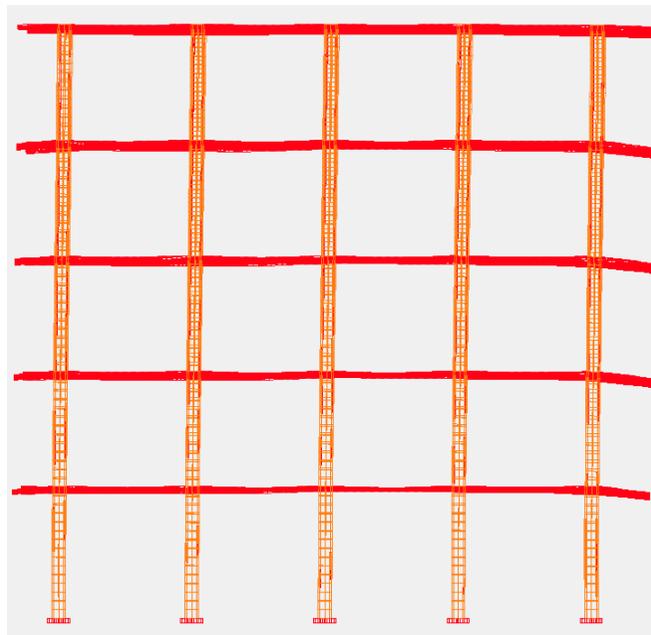
14. deformación en placa datos de isovalores



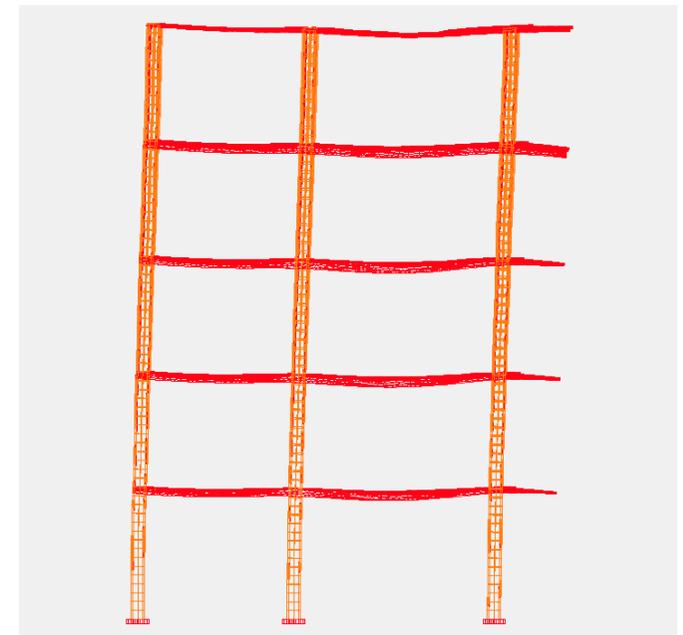
15. Modelo deformación



16. Deformación (planta)



17. Deformación (alfado lateral)



18. Deformación (alzado frontal)

### 6.3.5 Vulnerabilidad sísmica

Como elemento fundamental para determinar la seguridad de las edificaciones es necesario tomar en cuenta la atención a la vulnerabilidad que presentan ante la presencia de un terremoto.

*Determinar la vulnerabilidad sísmica de un edificio presenta varias indeterminaciones que obligan a tomar datos referencia aproximados y no certeros. De entre ellas, una es la caracterización de los esfuerzos que provocan el sismo, puesto que una acción sísmica es complicada de prever en tiempo y magnitud, y por otra la respuesta de la estructura, sobre todo en el caso de edificios históricos en los que los materiales que las componen son heterogéneos y sus propiedades en la mayoría de los casos se desconocen (De Mazarredo Aznar, 2015)*

### 6.3.6 Comportamiento no lineal.

El análisis no lineal permite obtener datos sobre el comportamiento real de las estructuras. Para este caso en particular este cálculo permitirá definir un análisis con mayor rigor que el que aporta el cálculo lineal.

Se basa en el método de los elementos finitos (MEF), que no es otra cosa que un método de análisis numérico basado en la división de un sistema físico continuo en un número finito de elementos. Por lo que, la complejidad del continuo queda reducido a

un número limitado de variables y ecuaciones que pueden ser resueltas mediante métodos numéricos.

### 6.3.7 Análisis frente al sismo. (Método Pushover<sup>14</sup>).

*El tratamiento del modelo estructural, sometido a una historia de aceleraciones en un análisis no lineal, supone poseer unos medios de cómputo y tiempo, que no están al alcance de muchos profesionales. Una forma de paliar de un sistema con múltiples grados de libertad pueda asociarse al de un modelo de referencia de un grado de libertad (Meza 2008, p.2)*

Para poder realizar este análisis es necesario establecer una correspondencia entre la demanda sísmica y la capacidad de la estructura. Para el caso a analizar, se utilizará el análisis por empujes incrementales (método pushover), con el fin de definir el comportamiento de la estructura perteneciente al edificio a analizar (hotel royal pacific).

Uno de los mejores resultados que presenta este método es su evaluación visual, al permitir mostrar el comportamiento de la estructura cuando está sometida a esfuerzos dinámicos de manera veloz e intuitiva. La capacidad de la estructura se representa por la curva fuerza - desplazamiento, que resulta del

<sup>14</sup> El método Pushover, ha sido desarrollado por Freeman en 1998, el cual se caracteriza por la comparación, mediante un método gráfico, de la capacidad de una estructura frente a la demanda que provoca el terreno como consecuencia de un terremoto

análisis estático no lineal.

Para el análisis se introduce una acción sísmica sometiendo la estructura a un patrón de cargas laterales  $F_i$ , que va aumentando de manera progresiva hasta alcanzar la capacidad máxima de la estructura.

La capacidad de respuesta estructural se representa mediante la curva que relaciona las reacciones de la base, cortante basal  $V_b$  y los desplazamientos  $D$  en el nivel superior de la estructura.

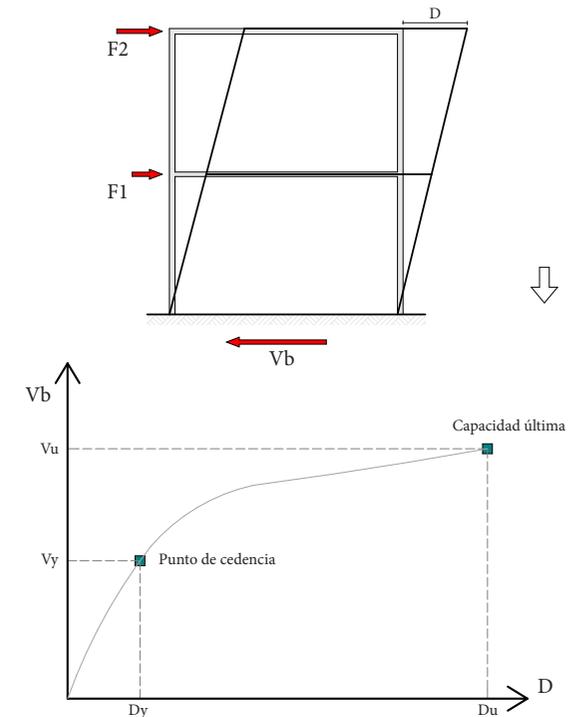


FIGURA 45 Cargas aplicado en el método Pushover y curva de capacidad (Vacas Albala, 2009)

En la representación de la curva se pueden observar dos puntos característicos, el punto de cedencia y el de capacidad máxima. El primero, representa la posición donde la curva de la estructura deja de ser lineal, mientras que la capacidad última muestra el punto donde la estructura ha alcanzado el mecanismo de colapso o su capacidad máxima.

Cuando se habla de la demanda del terremoto, se lo especifica como un espectro elástico, eminentemente amortiguado o inelástico. Se usa en modo aceleración - desplazamiento dentro del espectro de respuesta, y sus periodos marcados por líneas radiales.

Para el caso de estudio, se ha analizado la NEC-SEDS, en donde el espectro (FIGURA 46) obedece a una fracción de amortiguamiento respecto al crítico de 5%, se obtiene mediante diferentes ecuaciones, válidas para periodos de vibración estructural T.

Para el análisis y como método de simplificación, se puede decir que el punto de intersección entre el espectro de capacidad y el espectro de demanda, se define como punto de desempeño de la estructura. Y este nos indica como los elementos estructurales responden al llegar al límite de la demanda sísmica a la cual se enfrentan.

La (FIGURA 47), demuestra un espectro simplificado de capacidad, en donde se puede observar el punto de intersección (desempeño).

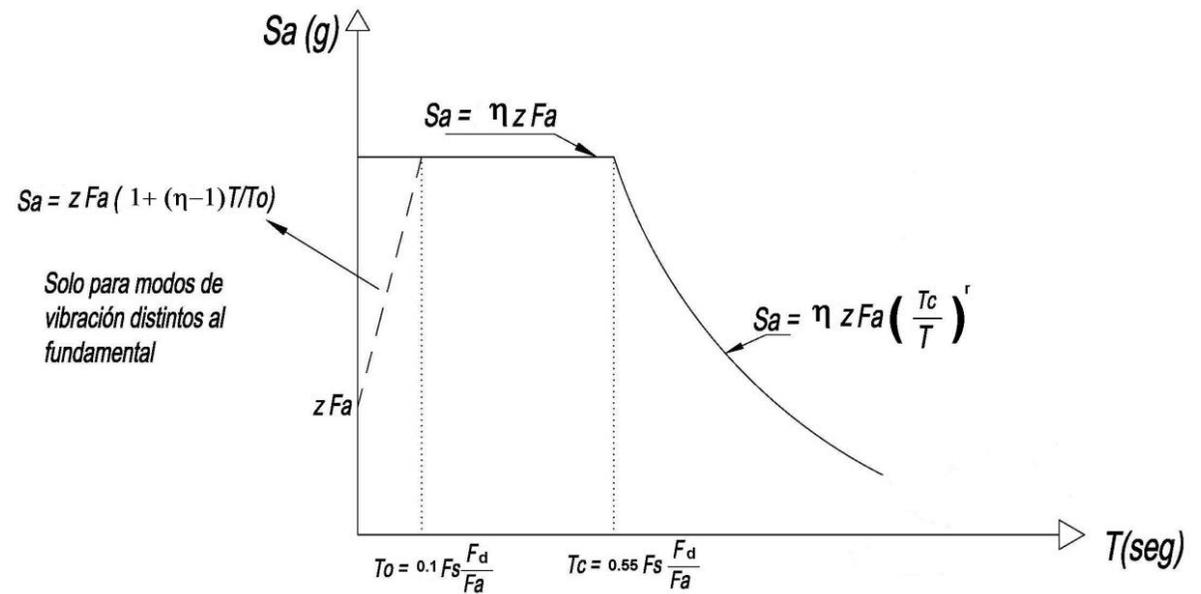


FIGURA 46. Espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño

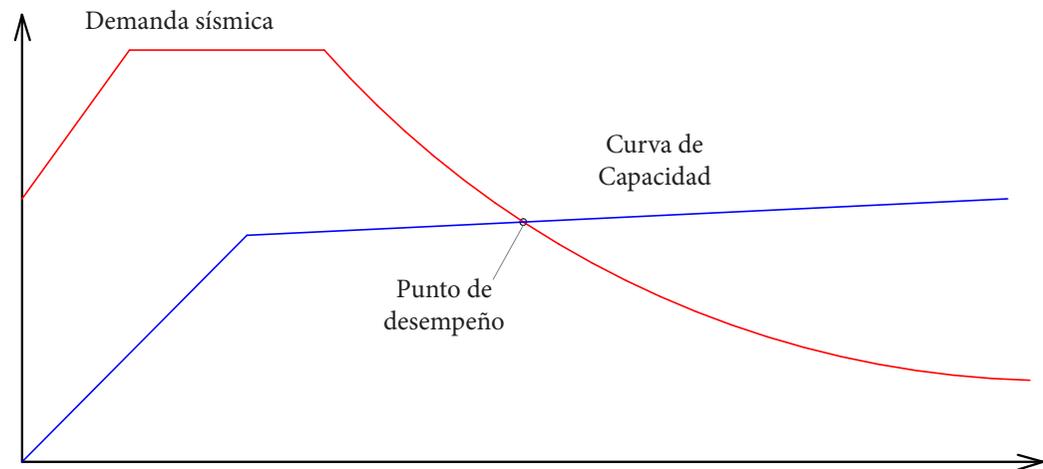


FIGURA 47. Espectro de capacidad (Vacas Albala, 2009)

En la actualidad existen algunos métodos para relacionar la curva de capacidad y la demanda, con el fin de obtener el punto de desempeño o "Performance Point" (Abril Jaramillo, 2015, p.52). Para comparar ambas curvas, demanda y capacidad, se han de transformar en un formato homogéneo, formato denominado ADRS: espectro de respuesta Aceleración - Desplazamiento.

Ver FIGURA 48

Finalmente esta curva se simplifica mostrandose como un trazo bilineal que debe cumplir los requisitos siguientes: El área de las dos curvas debe ser la misma, también las coordenadas del punto de máximo desplazamiento deben coincidir, y por último la pendiente de la rama inicial debe ser la misma en las dos curvas.

La grafica bilineal se define completamente con dos puntos que corresponderán con un desplazamiento espectral (Sd) al final de la rama elástica (Sd2) y un desplazamiento espectral al final de la rama plástica (Sd4) y que serán umbrales de daño. (Molines Cano, José, 2017)

Luego del análisis no\_lineal, y ya definiendo el comportamiento de la estructura, los resultados del método Push Over demuestran que la curva de demanda sísmica es mucho mayor al de la capacidad de la estructura.

Ver FIGURA 49

Clasificación de los umbrales de daño

Umbrales de daño	Definición
Leve	$Sd1=0.7Dy$
Moderado	$Sd2 =Dy$
Severo	$Sd3=Dy+.025(Du-Dy)$
Completo	$Sd4=Du$

Se puede apreciar en la imagen que para el espectro de diseño que presenta la norma para la zona en donde este se presentó el terremoto, el colapso de la construcción es inminente.

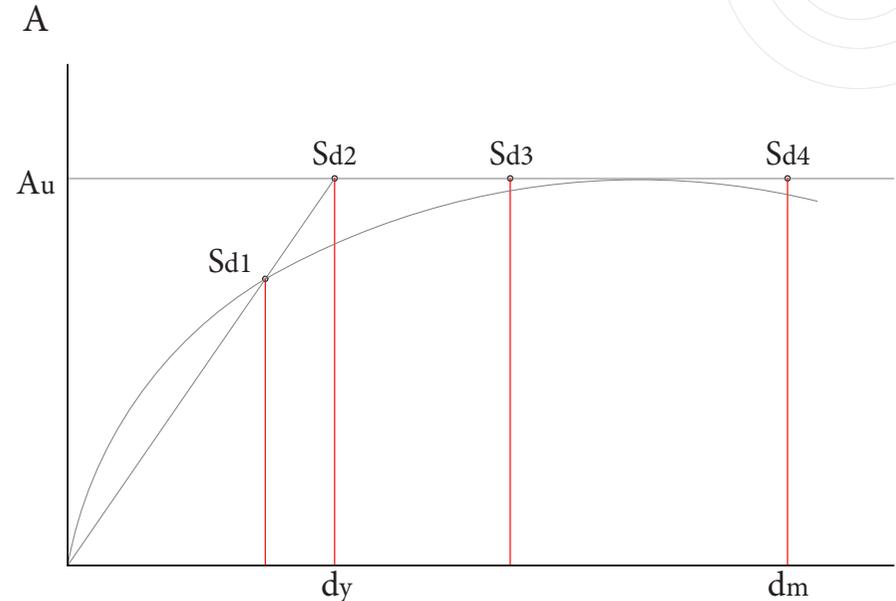


FIGURA 48. Umbrales de los estados de daño (Perelló Roso 2015)

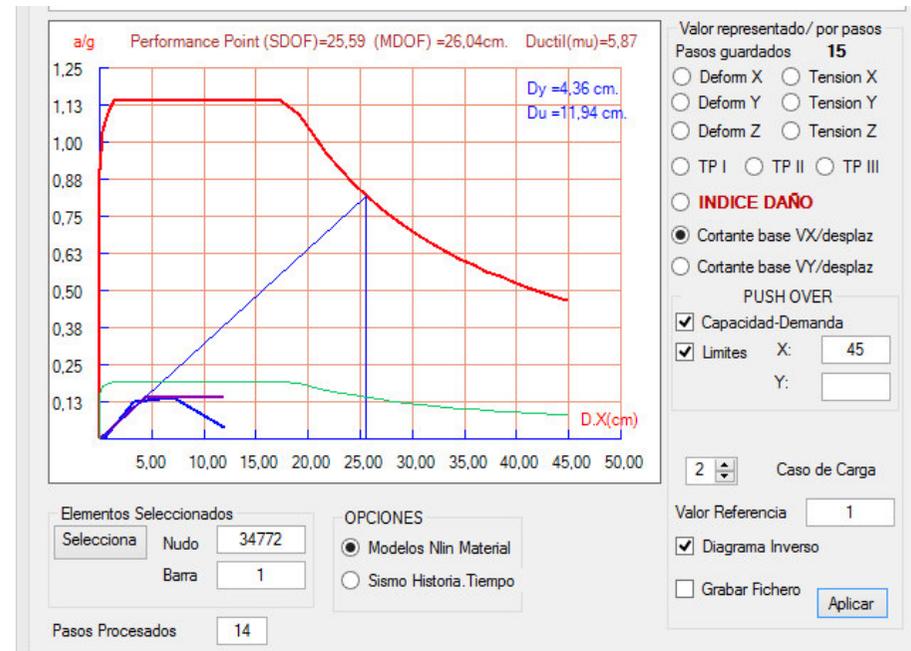


FIGURA 49. Diagrama Push Over del modelo

### 6.3.8 Análisis no lineal en el tiempo.

El comportamiento sísmico se puede evaluar también por medio de un análisis no lineal en el dominio del tiempo. Esto se puede desarrollar mediante la integración numérica de las ecuaciones diferenciales del movimiento, para lo cual se utilizan acelerogramas que reproducen el movimiento del terreno.

Estos acelerogramas pueden identificar la agitación del terreno aplicada en la estructura como una variable en el tiempo.

Para este caso de análisis de la simulación de la estructura se han podido utilizar los acelerogramas (FIGURA 50) según sus direcciones (X, Y, Z) de la estación APED, de los datos obtenidos por el IG(EPN) del terremoto de abril de 2016.

### 6.3.9 Análisis no lineal del modelo (estudio de deformación)

El análisis se enfoca en el comportamiento estructural de la edificación modelizada como respuesta frente a cargas gravitatorias y acciones sísmicas que actúan sobre ella.

Para el análisis se plantea obtener los datos obtenidos del estudio de deformación de la estructura en los 10 modos de vibración que se resume en la Tabla 1 al final del mismo y que se presenta a continuación.

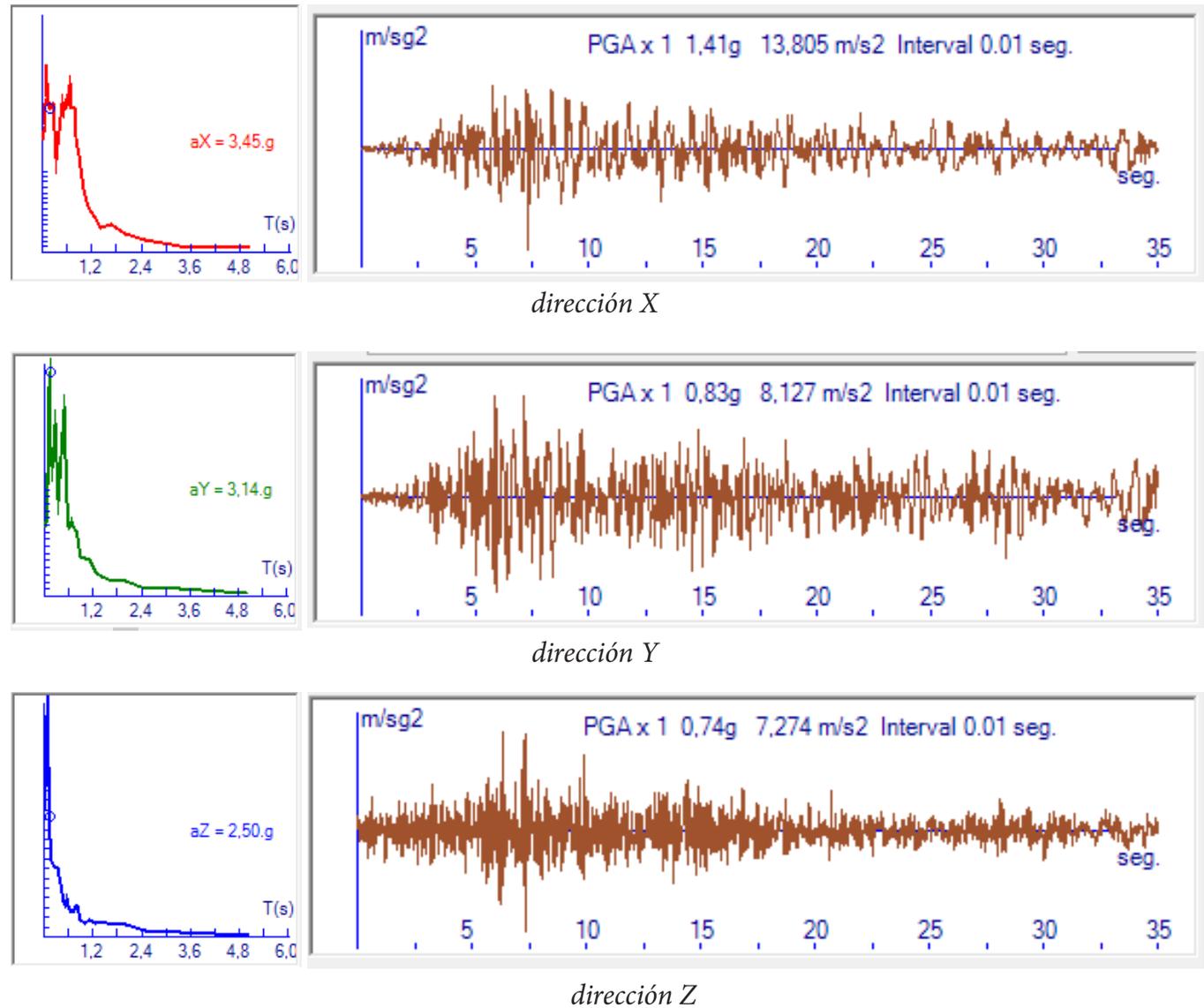
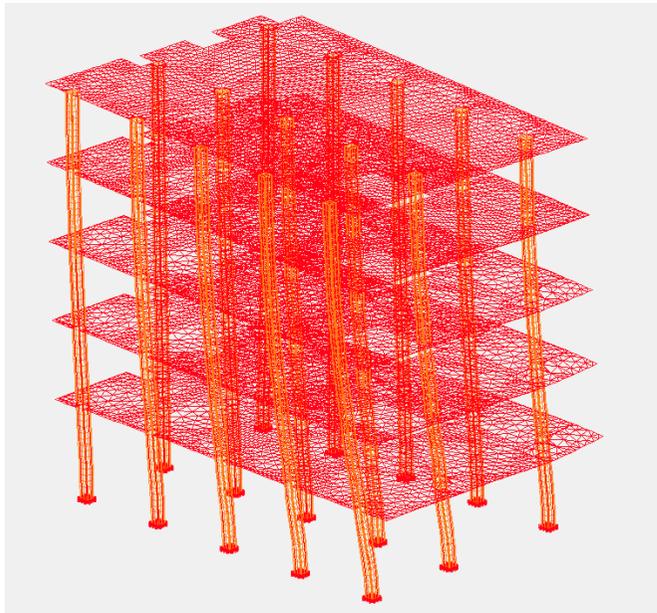
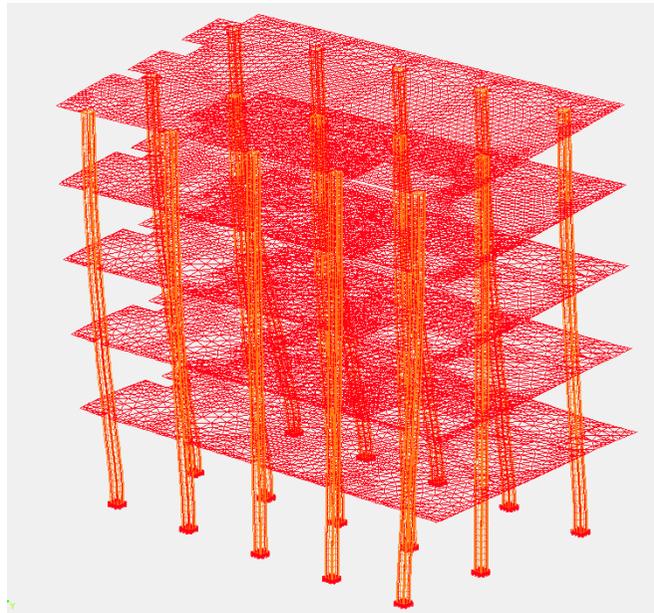


FIGURA 50. Acelerogramas del terremoto de abril de 2016 en Ecuador, estación APED, direcciones X, Y, Z

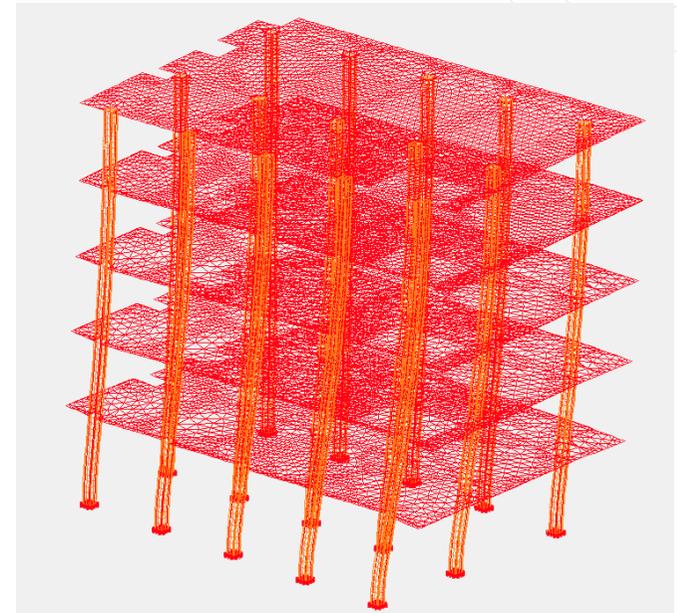
estudio deformación, modos de vibración.



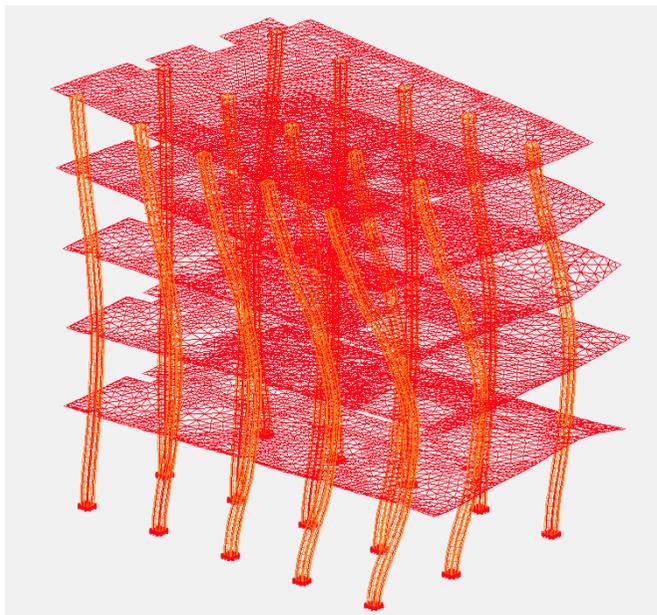
19. modo 1



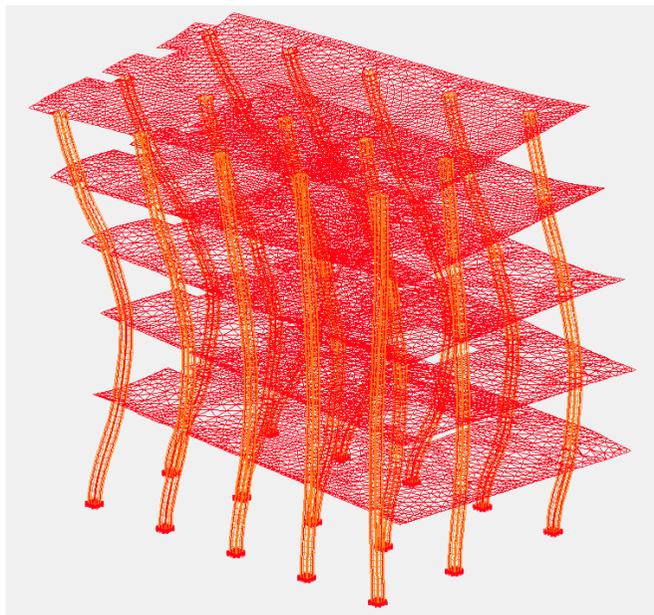
20. modo 2



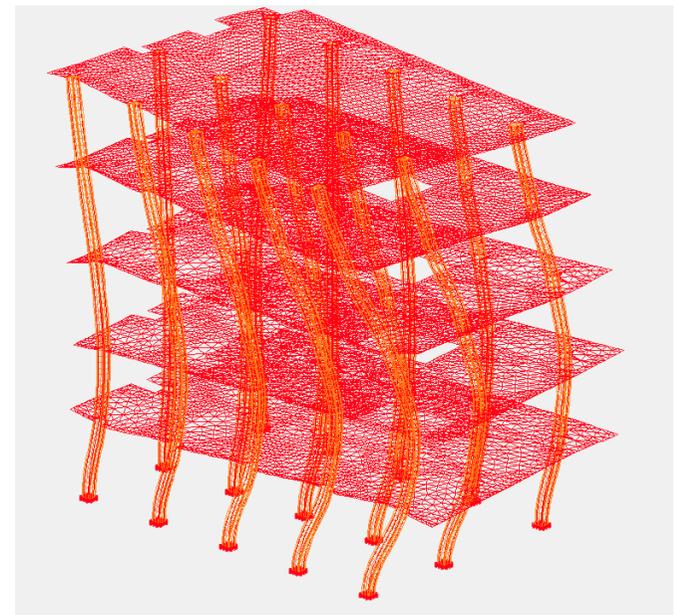
21. modo 3



22. modo 4

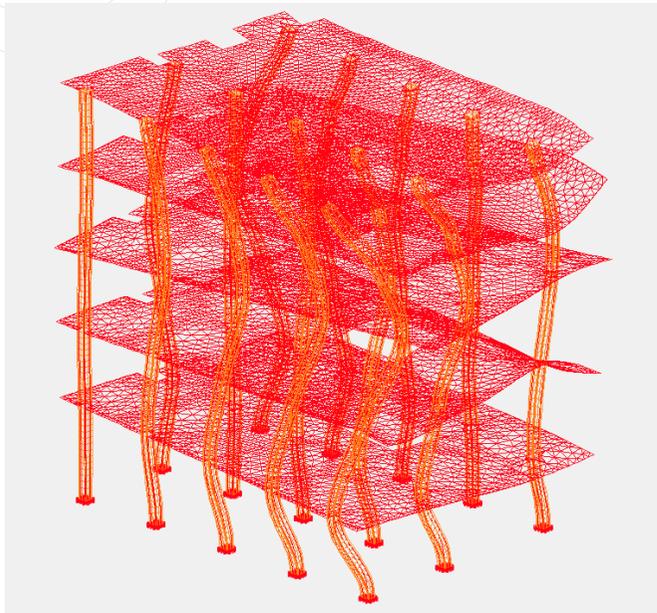


23. modo 5

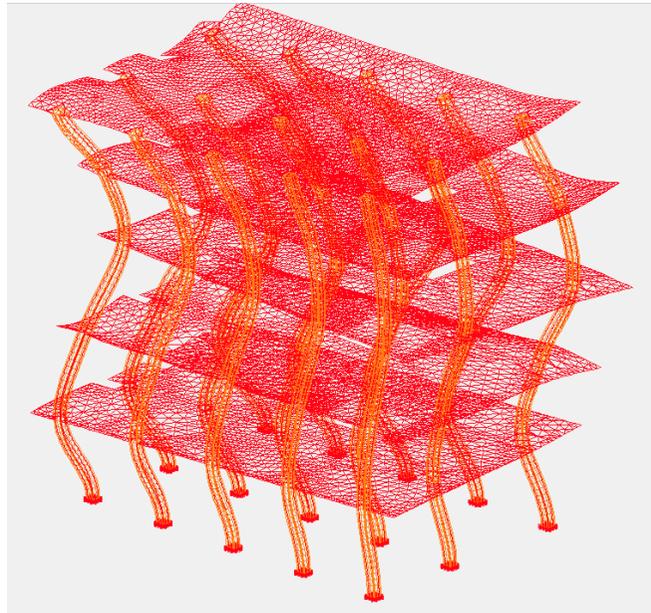


24. modo 6

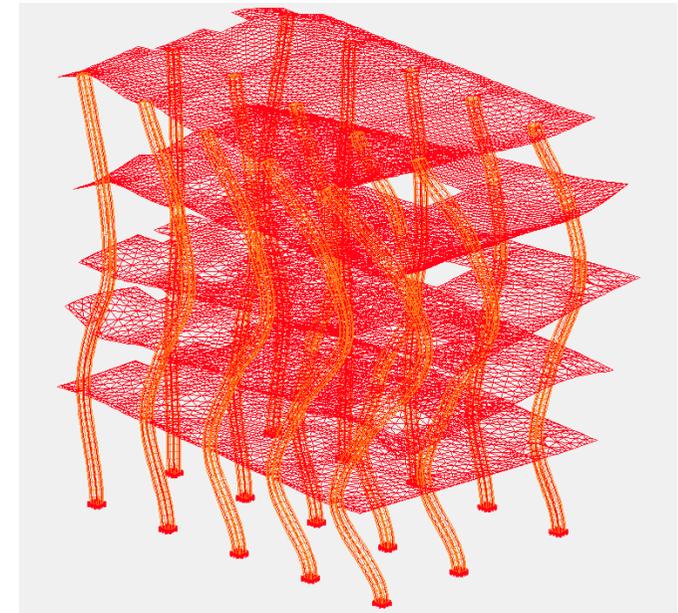




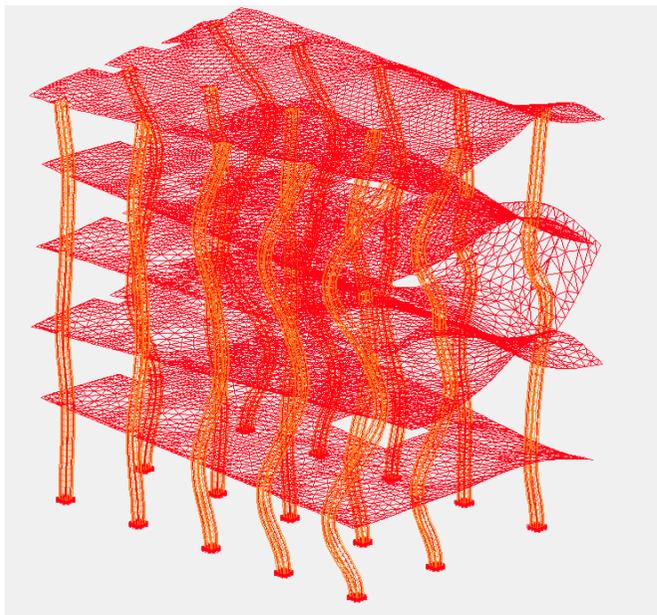
25. modo 7



26. modo 8



27. modo 9



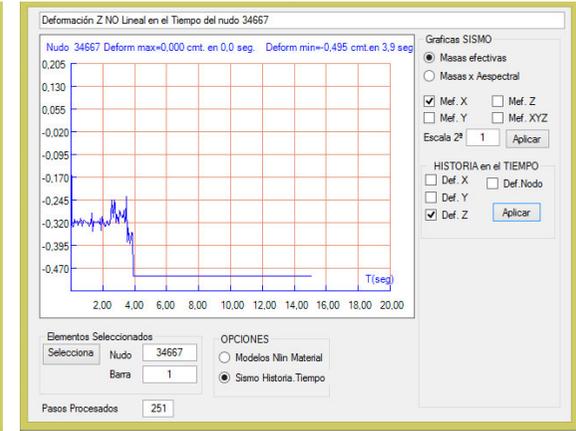
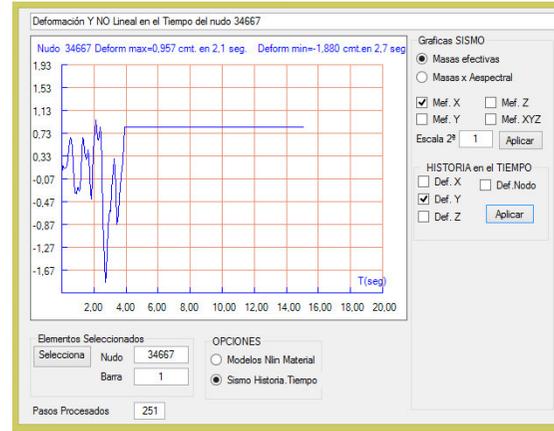
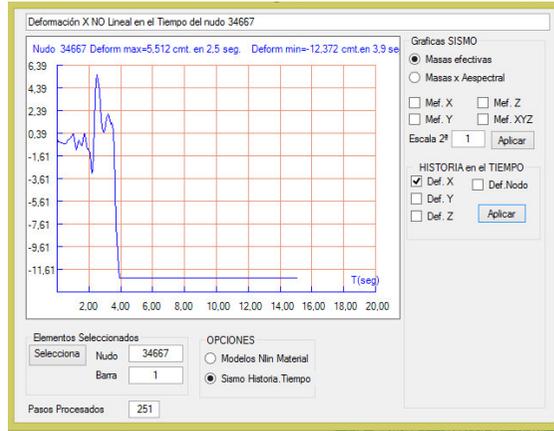
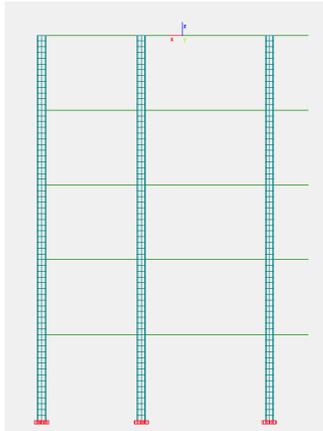
28. modo 10

modo	frecuencia angular $\omega$	frecuencia (cps)	periodo (seg)	M. efec X (%)	M. efec Y (%)	M. efec Z (%)	M. tot X (%)	M. tot Y (%)	M. tot Z (%)
1	7.77790934990	1.237415	0.8081361	63.11	2.46	0.00	63.11	2.46	0.00
2	7.86711014094	1.25209	0.7986649	22.36	12.95	0.01	85.47	15.42	0.01
3	8.13846349955	1.295277	0.7720358	0.29	70.91	0.00	85.76	86.32	0.01
4	24.0643220993	3.829956	0.2610996	6.07	0.57	0.02	91.83	86.89	0.03
5	24.4854394702	3.896979	0.2566091	3.15	2.45	0.03	94.98	89.34	0.05
6	25.4296451875	4.047254	0.2470811	0.13	6.19	0.00	95.11	95.53	0.06
7	41.7602428148	6.646349	0.1504585	1.07	0.40	0.00	96.18	95.94	0.06
8	42.7085801338	6.797282	0.1471176	1.60	0.57	0.01	97.78	96.50	0.07
9	43.9312290460	7.151027	0.1398401	0.05	1.65	0.00	97.83	98.15	0.07
10	58.4924605518	9.309364	0.1074187	0.28	0.15	0.00	98.11	98.30	0.07

Tabla 1. Tabla resumen de los modos de vibración, masas efectivas movilizadas por cada modo y valores totales acumulados del modelo

### Diagramas Nlin-H.-Tiempo

Los siguientes gráficos, representan la deformación máxima en las 3 componentes (X,Y,Z) de dos puntos escogidos al azar del modelo (nodos 34667, 14415)

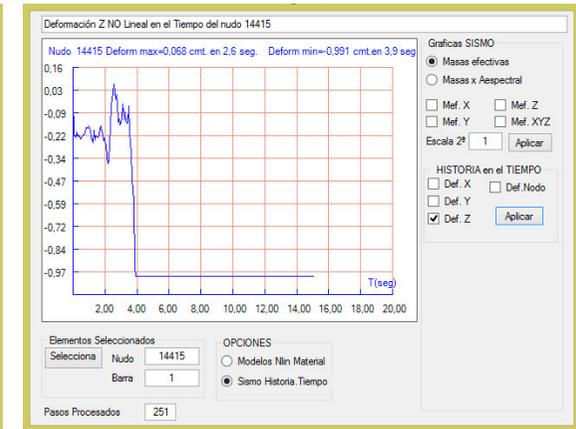
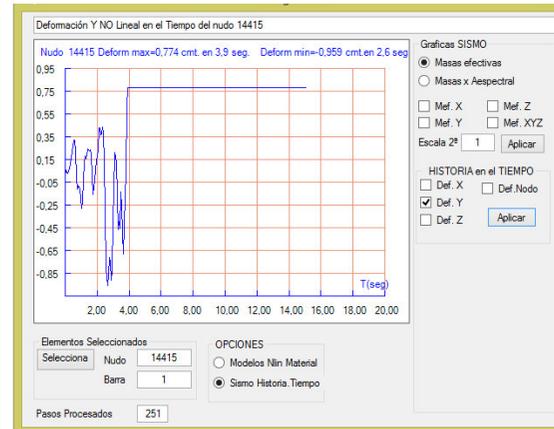
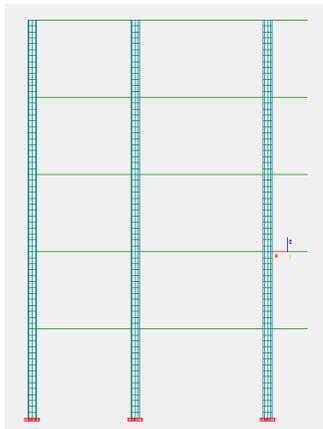


ubicación nodo 34667 (losa de cubierta)

dirección X	cm	tiempo (seg)
desplazamiento	5.51	2.5
deformación mínima	-12.37	3.9

dirección Y	cm	tiempo (seg)
desplazamiento	0.95	2.1
deformación mínima	-1.88	2.7

dirección Z	cm	tiempo (seg)
desplazamiento	0.00	2.1
deformación mínima	-0.49	3.9

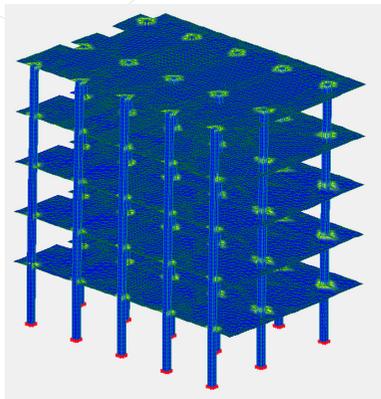


ubicación nodo 14415 (forjado 2da planta)

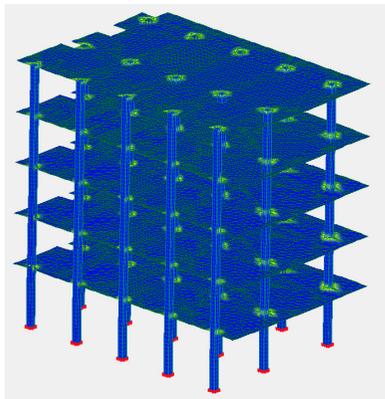
dirección X	cm	tiempo (seg)
desplazamiento	3.24	2.6
deformación mínima	-7.42	3.9

dirección Y	cm	tiempo (seg)
desplazamiento	0.77	3.9
deformación mínima	-0.95	2.6

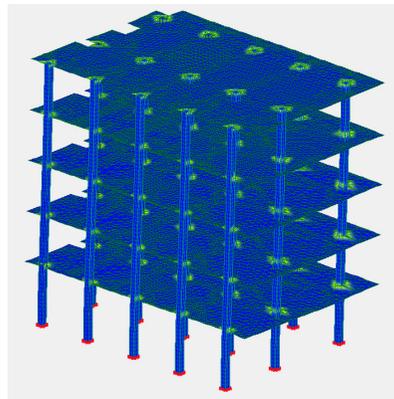
dirección Z	cm	tiempo (seg)
desplazamiento	0.06	2.6
deformación mínima	-0.99	3.9



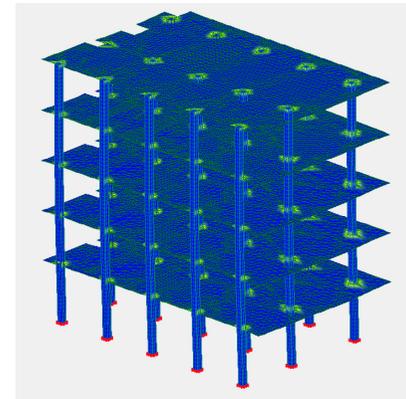
29. Paso 1



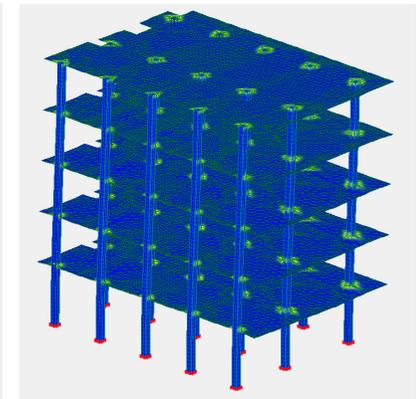
30. Paso 5



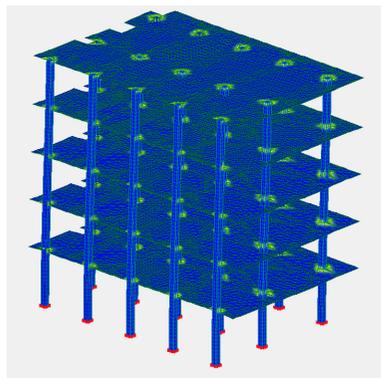
31. Paso 10



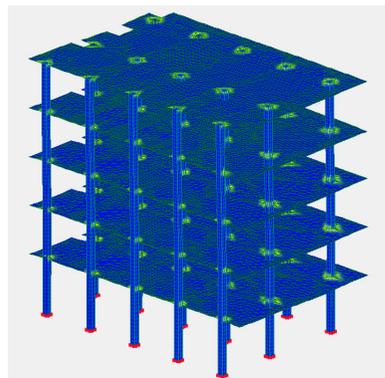
32. Paso 15



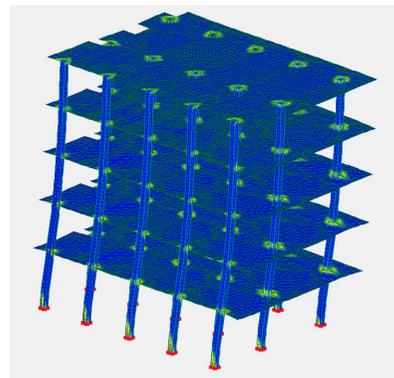
33. Paso 20



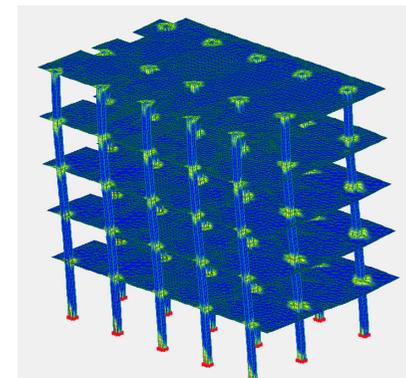
34. Paso 25



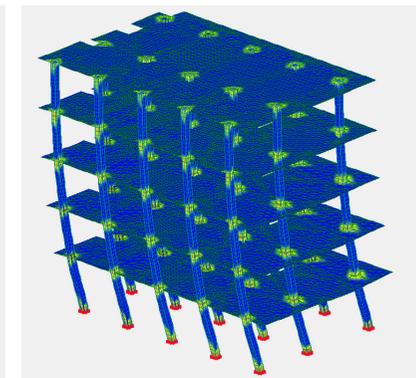
35. Paso 30



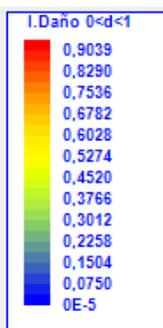
36. Paso 35



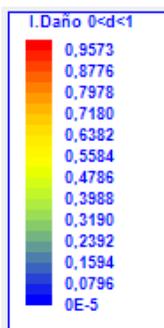
37. Paso 40



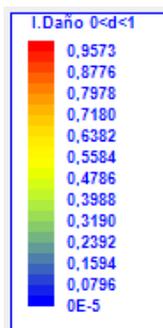
38. Paso 45



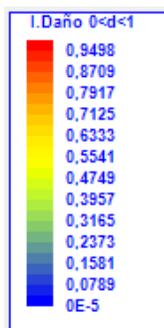
Paso 1



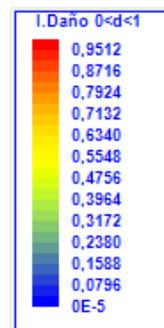
Paso 5



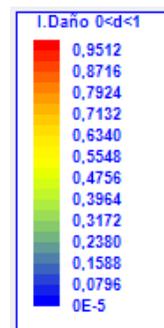
Paso 10



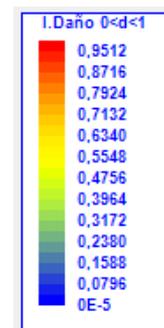
Paso 15



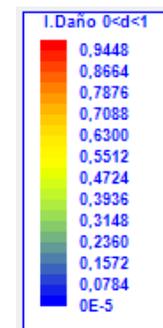
Paso 20



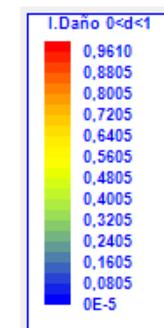
Paso 25



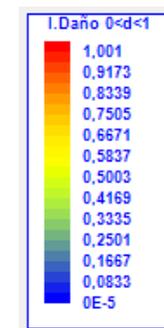
Paso 30



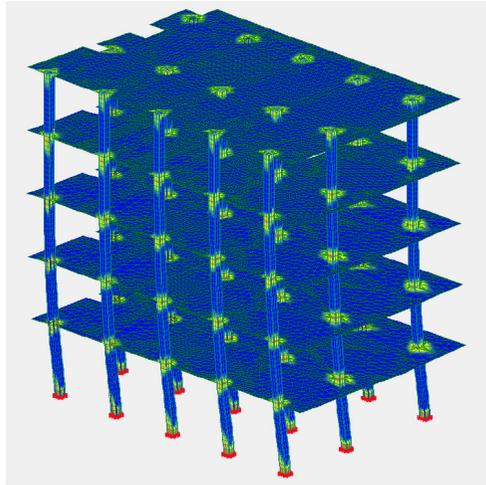
Paso 35



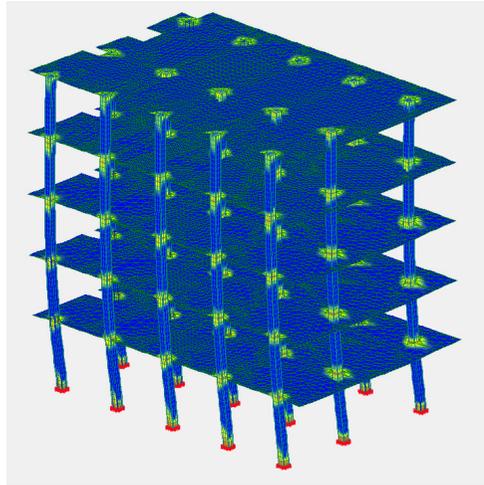
Paso 40



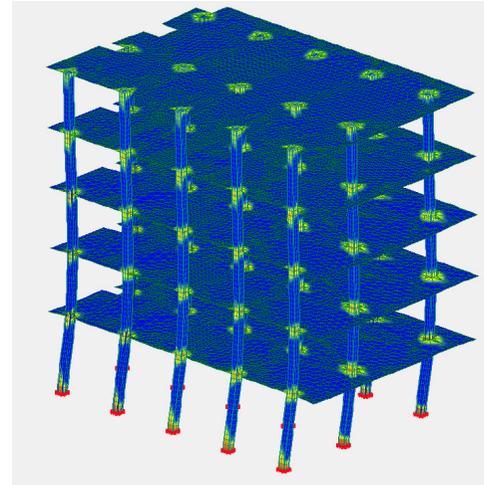
Paso 45



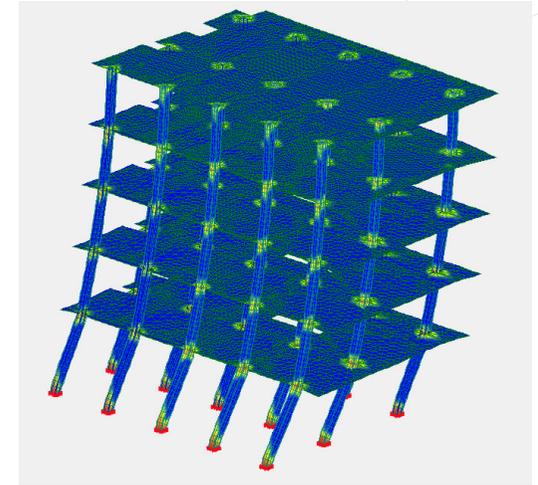
39. Paso 50



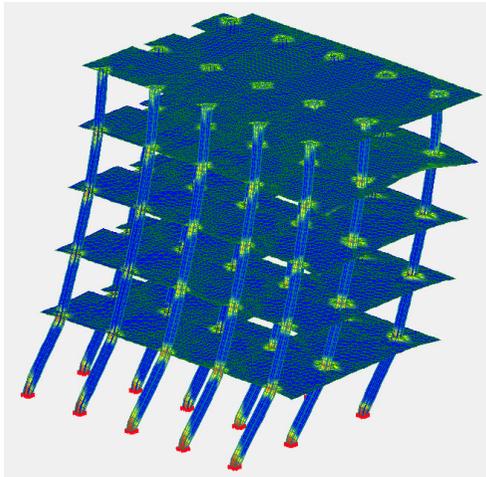
40. Paso 55



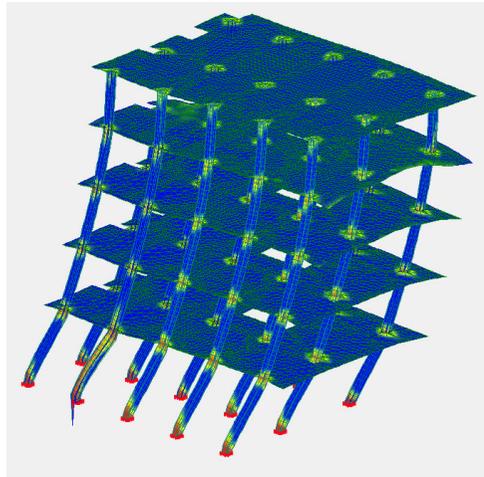
41. Paso 60



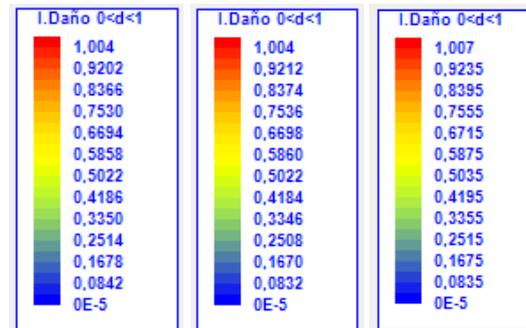
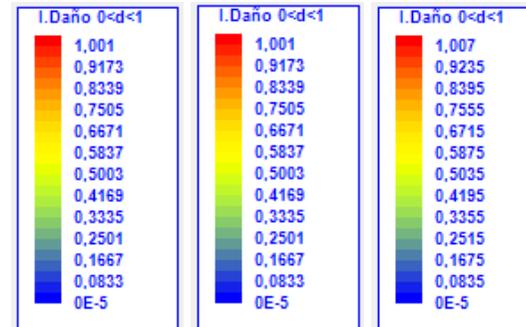
42. Paso 62



43. Paso 63



44. Paso 64



Respuesta de la estructura hasta el paso 64, en el paso 65 es decir a los 3,90 segundos esta ha colapsado

Paso	T(seg)	Paso	T(seg)
1	0.06	40	2.40
5	0.30	45	2.70
10	0.60	50	3.00
15	0.90	55	3.30
20	1.20	60	3.60
25	1.50	62	3.72
30	1.80	63	3.78
35	2.1	64	3.84

Tabla 2. Tabla resumen del análisis no\_lineal y la respuesta de la estructura frente al esfuerzo sísmico al que ha sido sometida, relación entre el número de pasos y el tiempo

El estudio del modelo define el colapso de la estructura en el segundo 3,90. Como se puede observar, se produce debido a que rompe en los pilares de planta baja, considerados como los elementos mas vulnerables del edificio.



Vista aérea de Pedernales (foto: Pablo Cozzaglio)  
fuente: <http://cnnespanol.cnn.com/2016/04/19/aumenta-a-480-el-numero-de-muertos-en-ecuador-tras-el-terremoto/#0>; edición: autor

# CONCLUSIONES

# Conclusiones

En el desarrollo de esta investigación se ha estudiado la vulnerabilidad constructiva de las edificaciones de la zona afectada en Ecuador después del terremoto sufrido en el país en abril de 2016.

Para ello ha sido importante conocer el origen de los sismos, su naturaleza, la causa y los efectos que producen en las estructuras. Si bien el país ha sufrido muchos eventos similares a lo largo de la historia, después de observar los resultados, se puede concluir que Ecuador no estuvo preparado para afrontar este fenómeno.

Muchas de las edificaciones que colapsaron, presentaron diversos problemas de diseño, como una mala configuración vertical, ausencia de rigidez, o falta de regularidad estructural, problemas que evidencian el error de ejecutar una construcción sin tener el mínimo conocimiento sobre Arquitectura sismorresistente.

Cuando se diseña y planifica una obra, es importante conocer y tener en cuenta las consideraciones necesarias para evitar que una estructura sea vulnerable ante la presencia de un sismo, tener los conocimientos básicos sobre una correcta configuración estructural, evitarían daños

catastróficos que podrían cobrar la vida de las personas que la habitan.

Un mal diseño inicial, produce que su estructura sea compleja, y mientras mas complicada sea esta, es mas propensa a colapsar. Columnas cortas, separación entre estructuras adyacentes, forma de la planta o resolución de las esquinas correctamente, son algunos de los elementos que pasan a segundo orden cuando se plantea un proyecto nuevo. Esto es aún peor cuando el diseño no lo realiza un profesional sino es propuesto de manera empírica.

En Ecuador es muy común encontrar edificios ejecutados sin permisos, sin control y sin conocimientos básicos de construcción. Si bien la Norma Ecuatoriana de la Construcción presenta los requerimientos y metodologías que deberían ser aplicados al diseño sismo resistente de edificios y otras estructuras; y que además esta complementada con normas extranjeras reconocidas, esta es omitida casi en su totalidad por los responsables del calculo estructural y peor aún de quienes ejecutan la obra.

Es muy probable que la mayoría de las construcciones que resultaron afectadas, muchas de ellas colapsadas, no tengan el mínimo cumplimiento de todos los

parámetros que especifica la Norma. La manera de construir nos permite decir esto, debido a que, algunos analisis demuestran que muchas de las construcciones han sido ejecutadas con materiales que no cumplen la resistencia necesaria.

Arena de mar, Hormigón de baja resistencia, y hierro afectado por la salinidad del ambiente, son algunos de los materiales empleados en la mayoría de las construcciones colapsadas y posteriormente demolidas luego del paso del terremoto.

Además de los materiales lo que llama la atención despues de investigar sobre los edificios colapsados, y al observar infinita cantidad de fotografías, es encontrar que el principal problema de configuración ha sido el piso blando, la demanda sísmica ha sido sumamente alta y eso sumado a la mala configuración de los edificios, han provocado que la parte más fragil de la estructura fracase.

Lo que llama la atención, después de analizar la historia sísmica en el Ecuador, es encontrarnos nuevamente con un panorama devastador en la zona afectada, las cifras de fallecidos como de damnificados, y en segundo plano las perdidas materiales que han sido abundantes, demuestran



que el país no ha podido aprender de su pasado, sino el paso del tiempo ha hecho olvidar algo tan evidente como que Ecuador se encuentra situado en el anillo de fuego, considerado un lugar altamente sísmico.

Toda la información previa y análisis realizados, han sido objeto de estudio en el modelo de calculo planteado en el capitulo final de esta investigación.

Dentro del análisis lineal, la estructura nos muestra las deformaciones, los esfuerzos de tracción y de momentos flectores, en donde podemos observar los puntos en donde la estructura es mas propensa a sufrir un colapso.

Sin embargo el principal resultado registrado se ha obtenido a partir del desarrollo del análisis no lineal, para esto, se ha tratado de levantar el modelo lo mas próximo a la realidad y calcularlo a través del espectro de diseño propio de la zona afectada por el terremoto.

En el análisis Push Over, se ha podido demostrar que la curva de capacidad de resistencia de la estructura esta muy por debajo de la curva de demanda sísmica, esto nos permite concluir que la estructura no

cumplía los requisitos sismorresistentes definidos en la Norma.

El análisis no lineal en el tiempo, nos permite ver que la estructura colapsa antes de llegar a los 4 segundos de estar sometidas a la fuerza sísmica establecida, la parte que primero fracasa se encuentra en los pilares de planta baja y posteriormente el forjado correspondiente al entrepiso de la primera planta alta.

Estos resultados coinciden con los que se pudieron observar en las fotografías (posteriores al terremoto) del edificio analizado, en donde claramente demuestran que el colapso ha iniciado en los pilares de planta baja para culminar con la desplome de las 2 primeras plantas del Hotel.

Para finalizar, se puede decir que el grado de vulnerabilidad de los edificios emplazados en la zona afectada por el terremoto es elevado, y esto debido a que existe una falta de profesionalismo y responsabilidad por parte de las personas que ejecutan las obras, pero también de los organismos de control que permiten que estas obras se lleven a cabo.

Este trabajo de fin de Master, ha servido para conocer de mejor manera el comportamiento de las estructuras, su respuesta frente a diferente esfuerzos, entre ellos el sísmico, pero sobre todo nos permite ser mas concientes al momento, de diseñar, planificar y ejecutar una obra, sobre todo si esta se emplaza en un país altamente sísmico como es Ecuador.

# Bibliografía

---

## LIBROS

- AGUIAR, R. Y.  
(2001). Evaluación rápida de la vulnerabilidad sísmica. Quito, Ecuador: Centro de investigaciones científicas. Escuela politecnica del Ejercito.
- ALONSO DURÁ, A.  
(2003). Un Modelo De Integración del Análisis Estructural en Entornos CAD, para Estructuras de Edificación, Tesis doctoral Universidad Politécnica de Valencia, 2003
- ALONSO DURÁ, A.  
ANGLE (2014) Structural Analysis Software for Finite Element. Developed by A. Alonso. Department of Mechanics of the Continuous Medium and Theory of Structures. Universitat Politècnica de València. Spain
- BARBAT, ALEX H.  
Calculo sísmico de las estructuras, editores técnicos asociados, Barcelona 1982.
- BARBAT, A. H.; CANET, J. M.  
(1994). Estructuras sometidas a acciones sísmicas: Cálculo por Ordenador, Centro internacional de métodos numéricos en Ingeniería.
- BAZAN E. MELI R.  
Diseño sísmico de edificios, limusa, México 2010.
- BENAVENT-CLIMENT, AMADEO.  
Estructuras sismorresistentes, MAIA, Madrid 2010.
- BENITO, B.; JIMENEZ, M.E.  
(1999). Peligrosidad sísmica. Madrid



- 
- BOZZO L. BARBAT A.  
 Diseño sísmico de edificios de hormigón armado, monografía CIMNE, 1995.
  
  - BOZZO L. M., BARBAT  
 (1999), Diseño sismo resistente de edificios: técnicas convencionales y avanzadas. Reverté, Barcelona, España
  
  - CARDONA, O. (2005).  
 BID/IDEA Programa de Indicadores para la Gestion de Riesgos. . Sistema de Indicadores para la Gestión del Riesgo de Desastres: “Informe Técnico Principal”.  
 Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
  
  - CARDONA O. D. Y BARBAT, A. H.  
 (2000). El riesgo sísmico y su prevención, Calidad Siderúrgica, Madrid.
  
  - CASOLO, S.; PEÑA, F.  
 (2005). Modelo de elementos rígidos para el análisis de estructuras de mampostería. Métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería.
  
  - DE MAZARREDO AZNAR, L.  
 (2015), Análisis Constructivo y Estructural de la Iglesia de San Juan del Hospital de Valencia. Tesis doctoral. Dir: Adolfo Alonso Durá; Begoña Serrano Lanzarote  
 y Veronica Llopis Pulido. Universitat Politècnica de Valencia.
  
  - GINER, JOSÉ.  
 Sismicidad y riesgo sísmico en la C. A. V., Club universitario, Alicante 2001.
  
  - GORETTI A DI PASQUALE G.  
 An Overview Of Post-earthquake Damage Assessment in Italy. E.E.E.R.I Workshop Pasadena, California Sept.2002
  
  - KAMINOSONO T. , KUMAZAWA F., NAKANO Y.  
 Quick Inspection Manual for damaged Reinforced Concrete Buildings due to Earthquakes. Institute of Land Infraestructure and Management ,Japan 2002

- 
- MALDONADO E, GÓMEZ I., CHIO CHO G.  
Seismic Vulnerability Functions and seismic damage probability matrices for masonry buildings using simulation techniques. Dyna, Año 75, N° 155,p.p 63-76  
Medellín, 2008
  - MARTINEZ RUIZ, G.  
(2007). Vulnerabilidad sísmica de edificios de obra de fábrica para mediana y gran luz. Barcelona. Valencia. Universitat Politècnica de Catalunya. Escuela Técnica superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos.
  - MASI A., VONA M.  
Vulnerabilità Sísmica di Edifici in c.a realizzati negli anni '70. XI Congresso Nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia", Genova 2001
  - MENA, U. (2002).  
Evaluación del riesgo sísmico en zonas urbanas. Barcelona: Universidad Politècnica de Cataluña.
  - MEZA, J.M.; ORDUÑA, A.; AYALA, G.  
(2008), Método simplificado para la evaluación de la capacidad sísmica de edificios históricos de mampostería. Sociedad mexicana de ingeniería estructural. XVI  
Xongreso nacional de ingeniería estructural. Veracruz
  - MOLINES CANO, J. M.  
(2017). La Real Parroquia de los Santos Juanes de Valencia. Análisis Constructivo y Estructural, Tesis doctoral Universitat Politècnica de Valencia, 2017
  - PEÑA MONDRAGÓN, F  
(2010). Estrategias para el modelado y el análisis sísmico de estructuras históricas. Revista de Ingeniería Sísmica, num 83, pp 43-63. Sociedad Mexicana de  
Ingeniería Sismica, Distrito Federal, México
  - TARBUCK E. LUTGENS F.,  
Ciencias de la tierra Una introducción a la geología física, Pearson 8va edición, Madrid 2005.



---

## PROGRAMAS:

- ANGLE. Programa de Análisis estructural No-lineal por elementos finitos. Autor: Adolfo Alonso Durá (Universitat Politècnica de Valencia)
- AUTOCAD. (2013) Dibujo 2D y 3D. Autodesk
- ARCHICAD. (19) Dibujo 2D y 3D. Graphisoft
- ADOBE PHOTOSHOP. Edición de fotografías. Microsoft
- ADOBE INDESIGN. Diagrama TFM. Microsoft

## WEBS:

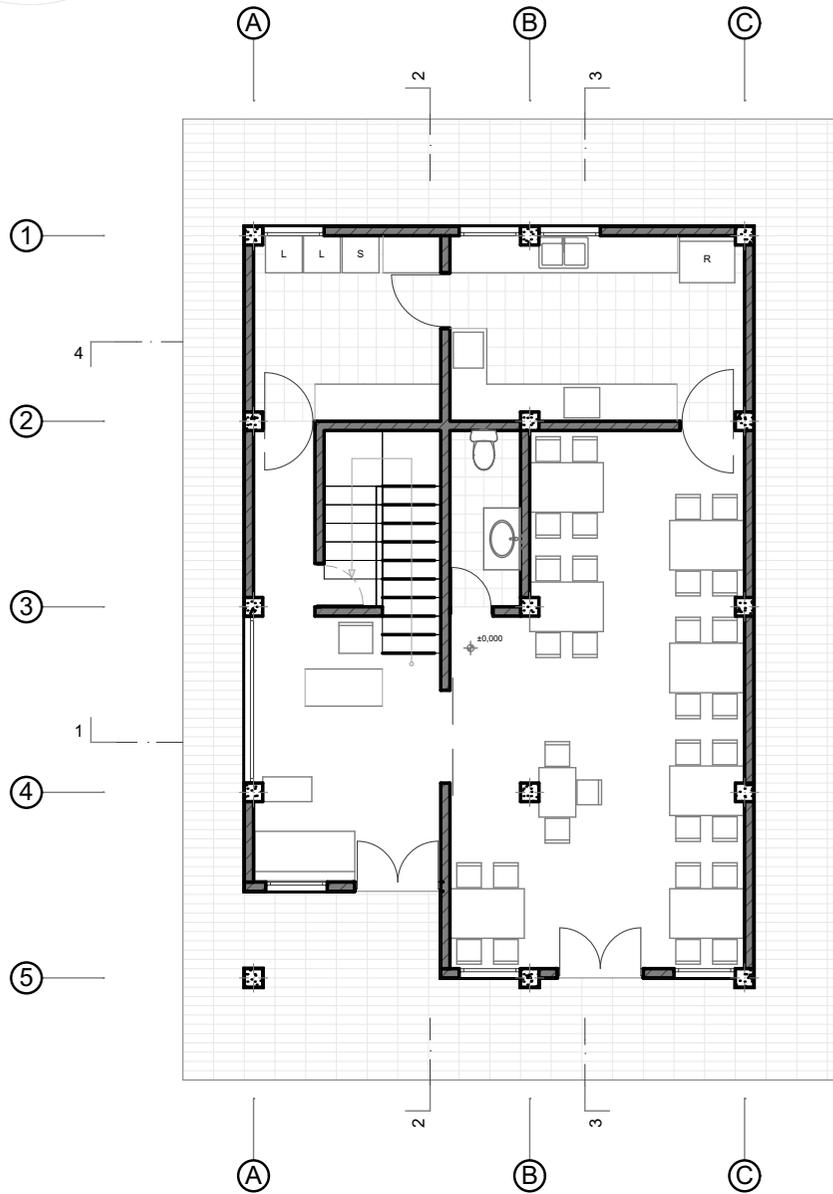
- <https://www.google.es/maps/>
- [http://www.bbc.com/mundo/noticias/2016/04/160422\\_ecuador\\_terremoto\\_problemas\\_construcciones\\_arquitectura\\_ab](http://www.bbc.com/mundo/noticias/2016/04/160422_ecuador_terremoto_problemas_construcciones_arquitectura_ab)
- <https://estudioarquivolta.wordpress.com/2016/04/20/terremotos-como-afecta-el-sismo-a-los-edificios/>
- <http://temblor.net/earthquake-insights/terremotos-en-ecuador-1009/>
- [http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/113/htm/sec\\_7.htm](http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/113/htm/sec_7.htm)
- <http://geografia-09.blogspot.com.es/2010/10/causas-y-efectos-de-los-sismos.html>
- [http://www.profesorenlinea.cl/Ciencias/Placas\\_tectonicas\\_Teoria.htm](http://www.profesorenlinea.cl/Ciencias/Placas_tectonicas_Teoria.htm)
- <http://umcientifica.blogspot.com.es/2010/03/los-terremotos-historia-origen-de-los.html>
- <http://www.funvisis.gob.ve/archivos/www/terremoto/Papers/Doc015/doc015.htm#TopOfPage>
- <https://es.scribd.com/document/333828507/Criterios-Fundamentales-Para-El-Diseno-Sismorresistente>
- <https://es.scribd.com/document/333828507/Criterios-Fundamentales-Para-El-Diseno-Sismorresistente>
- <http://www.upsocl.com/mundo/mirael-antes-y-despues-del-terremoto-en-ecuador-y-entenderasla-verdadera-magnitud-del-desastre-2/>
- <https://civilgeeks.com/2016/04/19/imagenes-de-estructuras-antes-y-despues-del-sismo-en-lazona-cero-de-ecuador/>

# Anexos

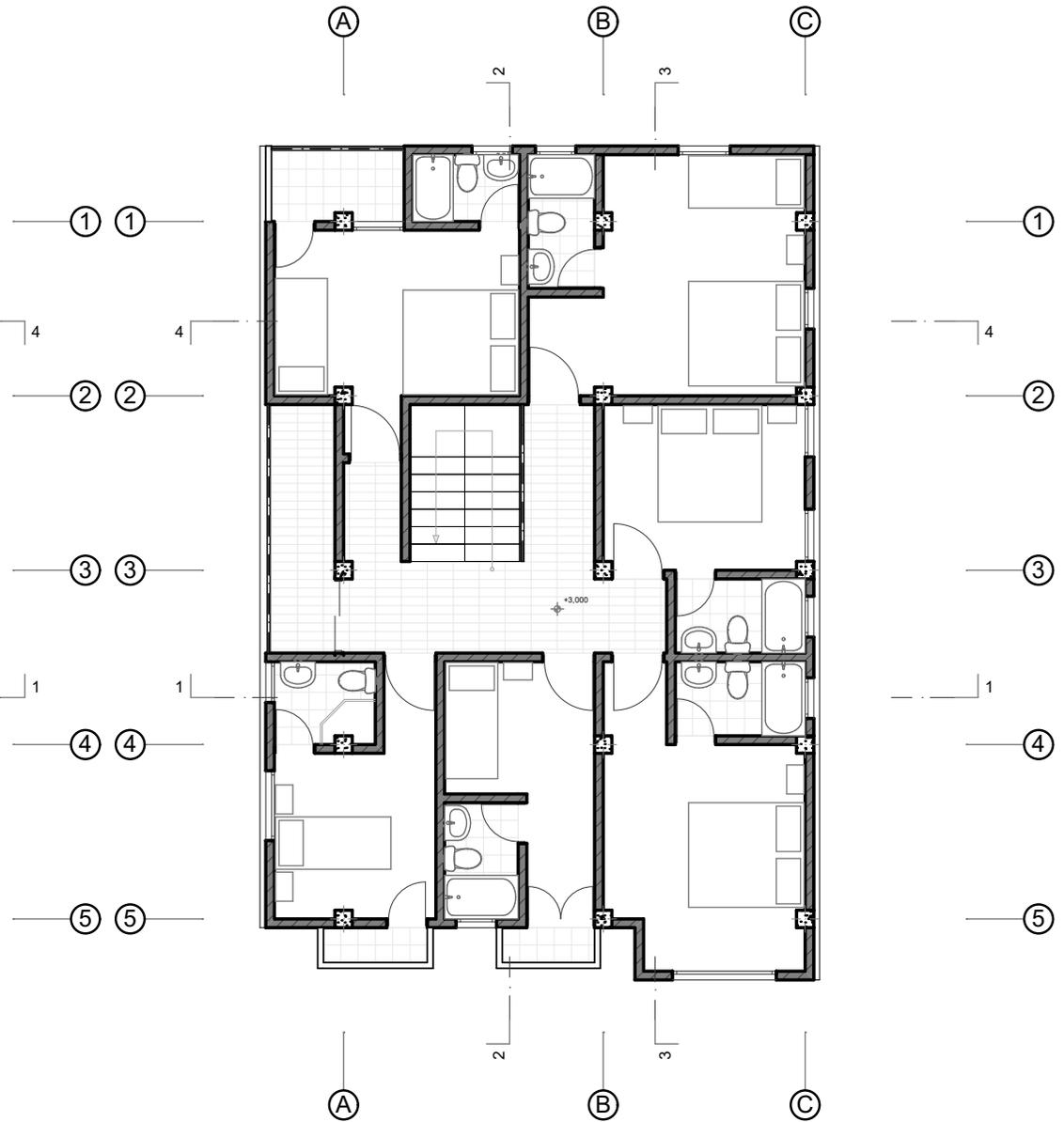
---



# PLANOS



planta baja



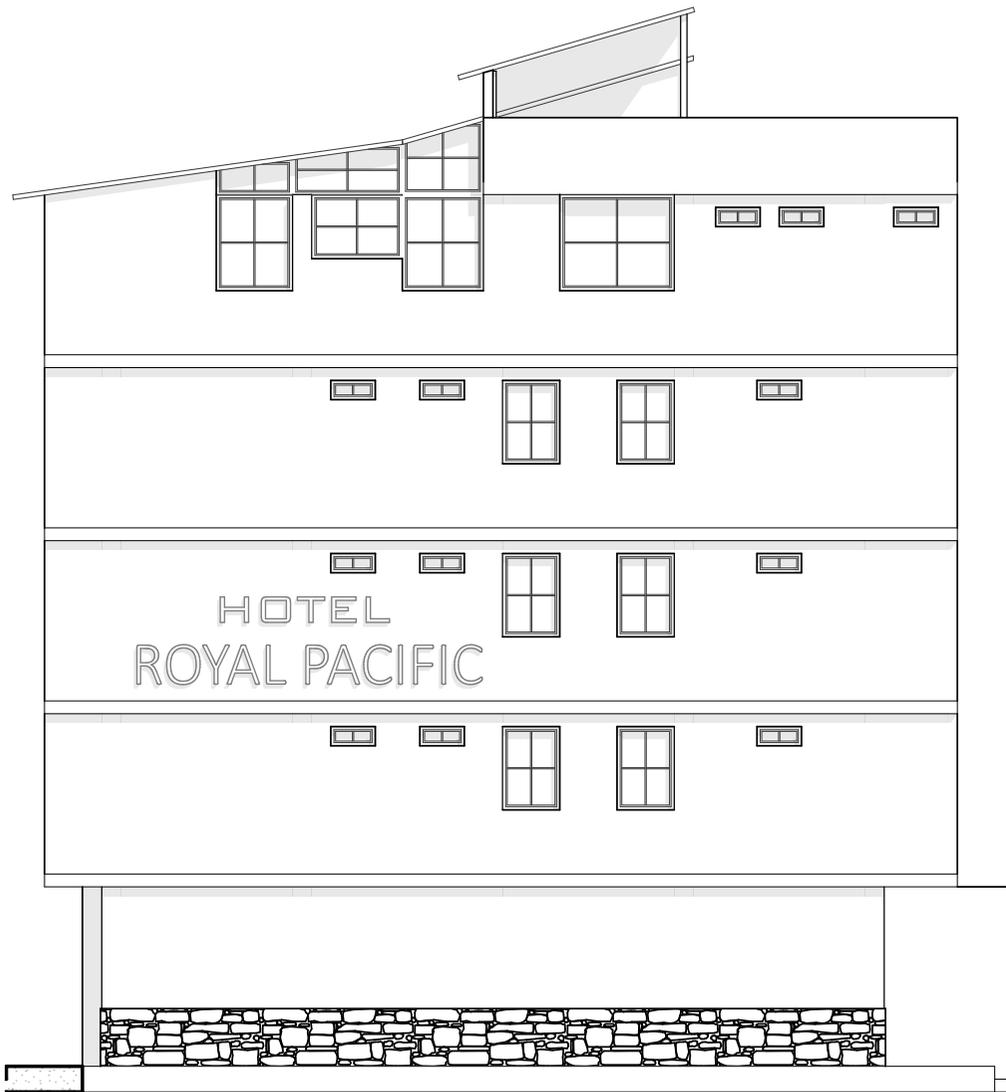
planta tipo



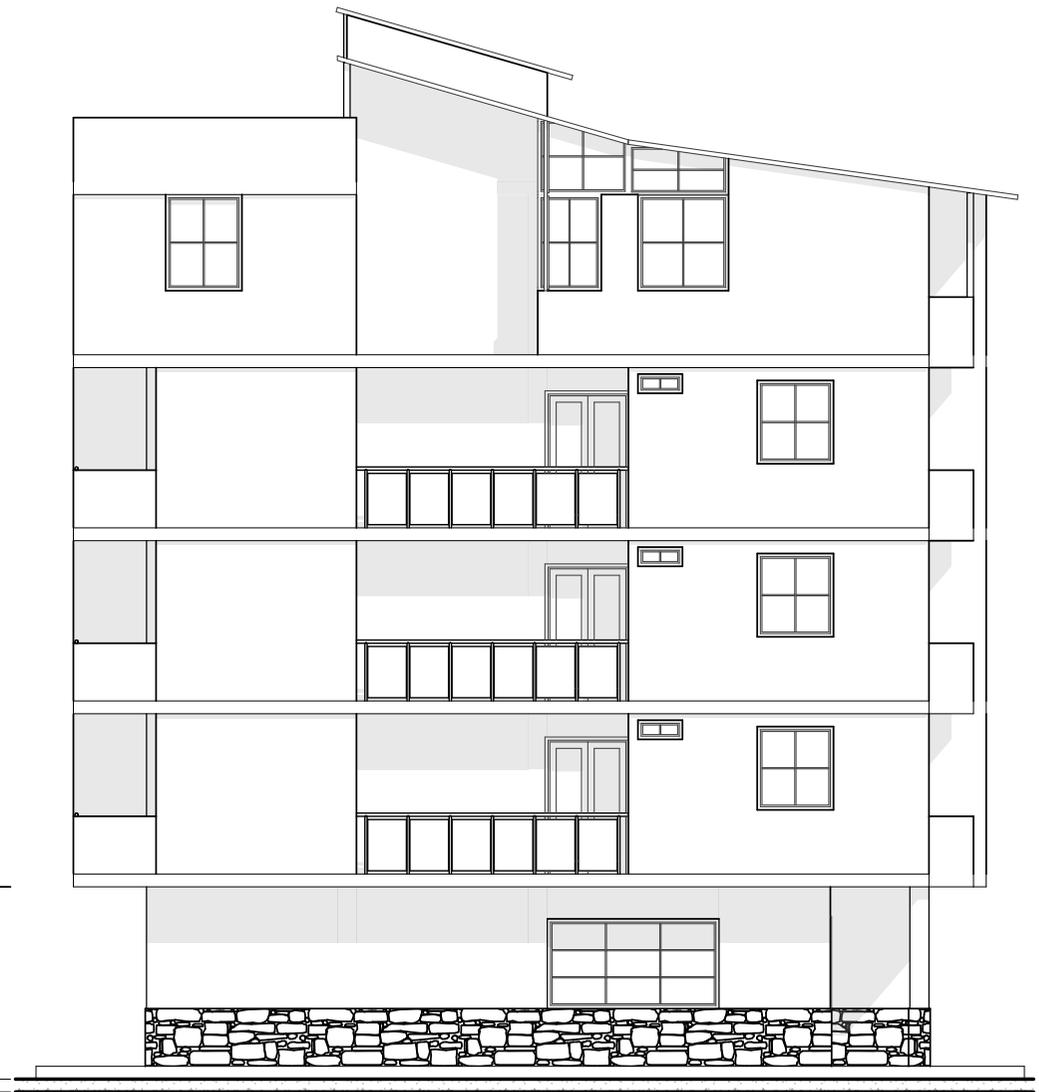
elevación frontal

elevación posterior

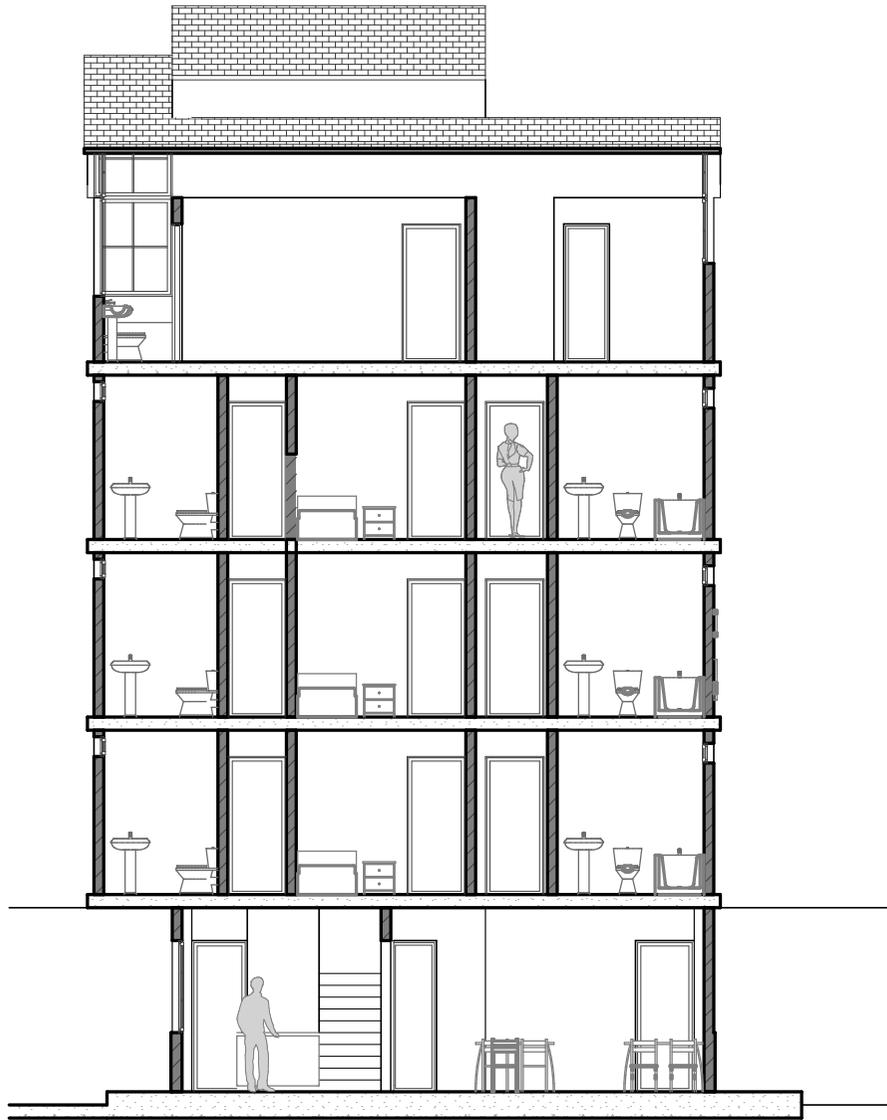




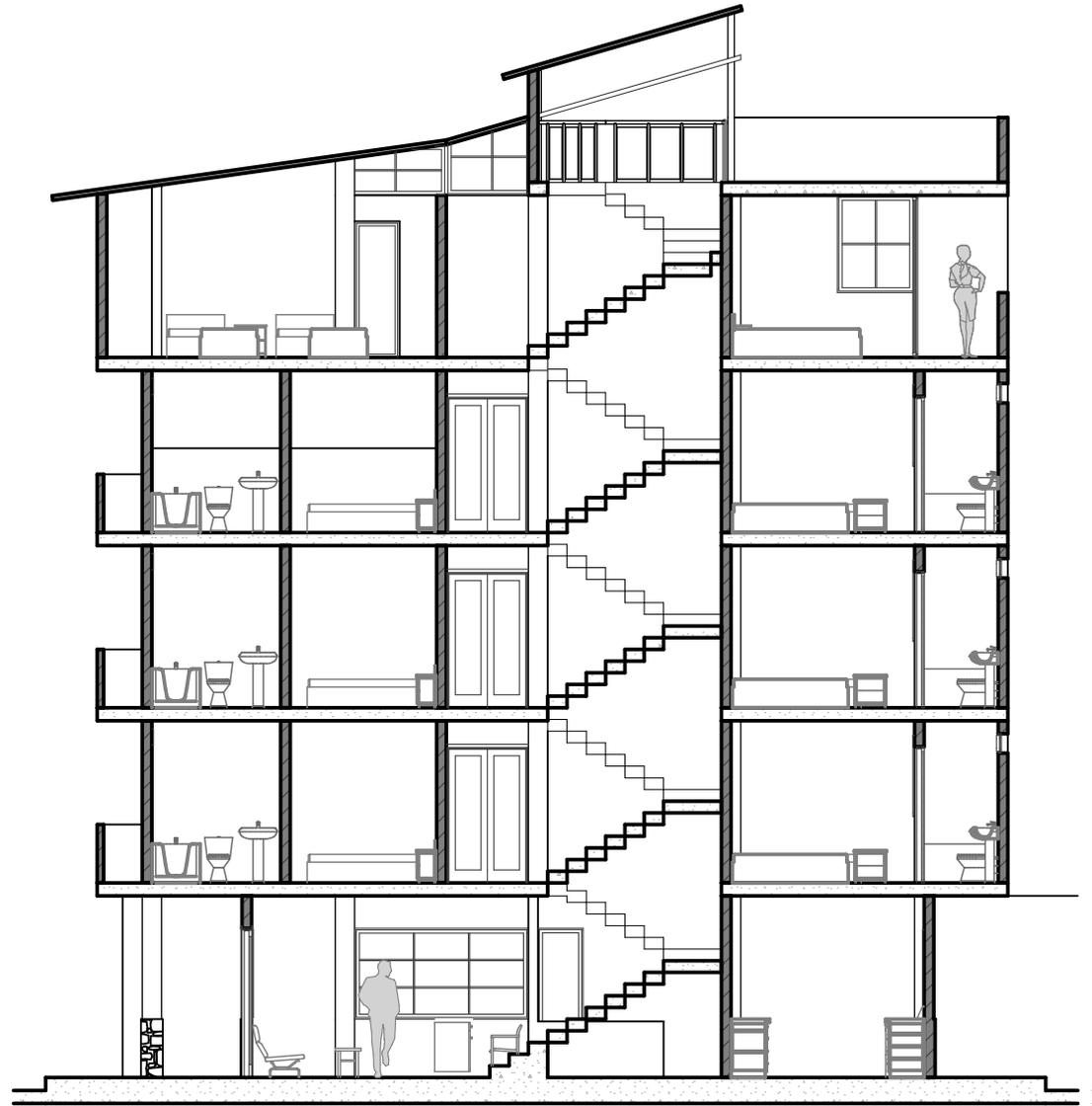
elevación lateral derecha



elevación lateral izquierda

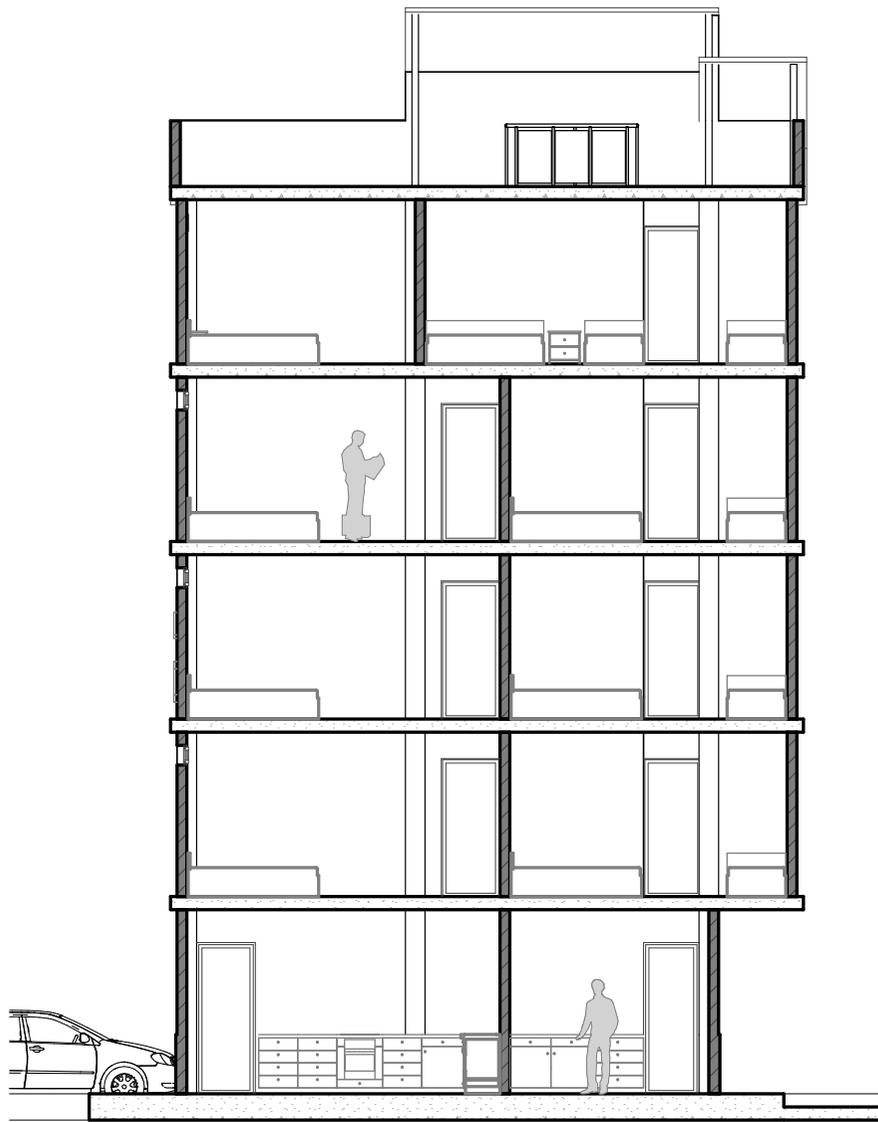


corte 1 - 1



corte 2 - 2





corte 3 - 3



corte 4 - 4

LEVANTAMIENTO 2D Y 3D  
Modelo a analizar y calcular, dibujo de perspectivas

Axonometrias



2.1



2.2



1.1



3.1



3.2



1.2



4.1



4.2



# NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN - NEC

## NEC-SE-DS

## CARGAS SÍSMICAS

## DISEÑO SISMO RESISTENTE

NOTA: Como anexos dentro de la NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN - NEC, únicamente se colocan ciertos parámetros que han sido considerados importantes a tener en cuenta en la investigación, tomando en cuenta que la NORMA completa tiene un total de 139 páginas.

### 3. Carga sísmica y condición del suelo

#### 3.1. Zonas sísmicas y curvas de peligro sísmico

##### 3.1.1. Zonificación sísmica y factor de zona Z

Para los edificios de uso normal, se usa el valor de Z, que representa la aceleración máxima en roca esperada para el sismo de diseño, expresada como fracción de la aceleración de la gravedad.

El sitio donde se construirá la estructura determinará una de las seis zonas sísmicas del Ecuador, caracterizada por el valor del factor de zona Z, de acuerdo el mapa de la [Figura 1](#).

Para informaciones complementarias, véase también los apéndices [10.1](#) y [10.3](#).

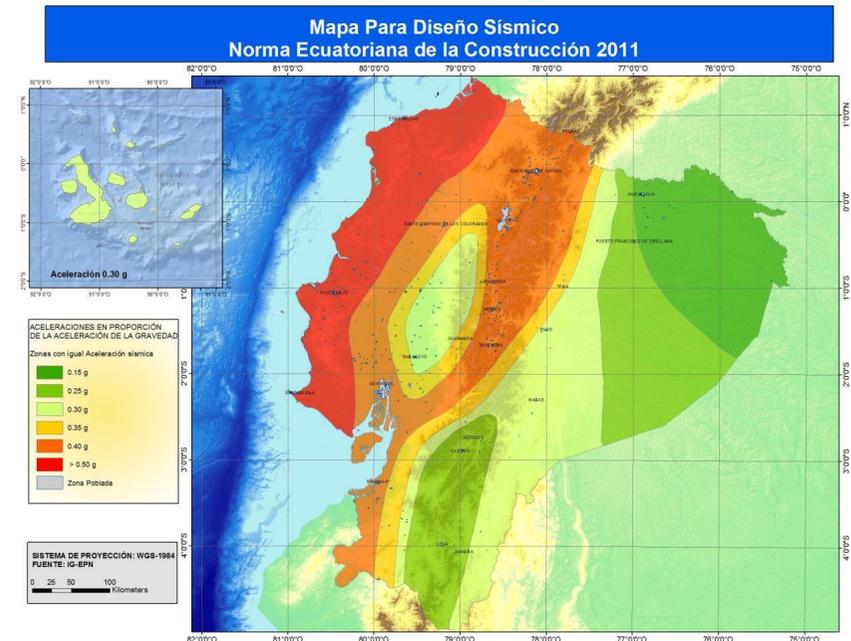


Figura 1. Ecuador, zonas sísmicas para propósitos de diseño y valor del factor de zona Z

El mapa de zonificación sísmica para diseño proviene del resultado del estudio de peligro sísmico para un 10% de excedencia en 50 años (**periodo de retorno 475 años**), que incluye una saturación a 0.50 g de los valores de aceleración sísmica en roca en el litoral ecuatoriano que caracteriza la zona VI.

Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Valor factor Z	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.50
Caracterización del peligro sísmico	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy alta

Tabla 1. Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada

Todo el territorio ecuatoriano está catalogado como de amenaza sísmica alta, con excepción del:

- Nororiente que presenta una amenaza sísmica intermedia,
- Litoral ecuatoriano que presenta una amenaza sísmica muy alta.

#### Determinación

- Para facilitar la determinación del valor de Z, en la [Tabla 16](#): Poblaciones ecuatorianas y valor del factor Z de la sección [10.2](#) se incluye un listado de algunas poblaciones del país con el valor correspondiente.
- Si se ha de diseñar una estructura en una población o zona que no consta en la lista y que se dificulte la caracterización de la zona en la que se encuentra utilizando el mapa (véase [Figura 1](#)), debe escogerse el valor de la población más cercana.

#### 3.1.2. Curvas de peligro sísmico

Para el diseño de estructuras de ocupación especial y/o esencial, bien como puentes, obras portuarias y otras estructuras diferentes a las de edificación; es necesario utilizar diferentes niveles de peligro sísmico con el fin de verificar el cumplimiento de diferentes niveles de desempeño, de acuerdo con lo estipulado en la sección [4.2.4](#). Por ello, se usan curvas de peligro sísmico, presentada en esta sección.

Para definir los diferentes niveles de aceleración sísmica esperada en roca, se proporcionan en las curvas de peligro sísmico probabilista para cada capital de provincia, en donde se relaciona el valor de la aceleración sísmica esperada en roca (PGA) con un nivel de probabilidad anual de excedencia. ([Figura 16](#) a [Figura 38](#) del apéndice [10.3](#)).

El periodo de retorno correspondiente es el inverso de la probabilidad anual de excedencia. En cada figura se incluye también las curvas de aceleraciones máximas espectrales para periodos estructurales de 0.1, 0.2, 0.5 y 1.0 segundos.

En los apéndices se encuentran las curvas de peligro sísmico de capitales de provincia, proporcionando aceleraciones máximas esperadas en roca (PGA) y aceleraciones máximas espectrales para diferentes niveles de probabilidad anual de excedencia, tal como en el siguiente ejemplo:

Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Valor factor Z	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.50
Caracterización del peligro sísmico	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy alta

Tabla 1. Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada

Todo el territorio ecuatoriano está catalogado como de amenaza sísmica alta, con excepción del:

- Nororiente que presenta una amenaza sísmica intermedia,
- Litoral ecuatoriano que presenta una amenaza sísmica muy alta.

#### Determinación

- Para facilitar la determinación del valor de Z, en la [Tabla 16](#): Poblaciones ecuatorianas y valor del factor Z de la sección [10.2](#) se incluye un listado de algunas poblaciones del país con el valor correspondiente.
- Si se ha de diseñar una estructura en una población o zona que no consta en la lista y que se dificulte la caracterización de la zona en la que se encuentra utilizando el mapa (véase [Figura 1](#)), debe escogerse el valor de la población más cercana.

#### 3.1.2. Curvas de peligro sísmico

Para el diseño de estructuras de ocupación especial y/o esencial, bien como puentes, obras portuarias y otras estructuras diferentes a las de edificación; es necesario utilizar diferentes niveles de peligro sísmico con el fin de verificar el cumplimiento de diferentes niveles de desempeño, de acuerdo con lo estipulado en la sección [4.2.4](#). Por ello, se usan curvas de peligro sísmico, presentada en esta sección.

Para definir los diferentes niveles de aceleración sísmica esperada en roca, se proporcionan en las curvas de peligro sísmico probabilista para cada capital de provincia, en donde se relaciona el valor de la aceleración sísmica esperada en roca (PGA) con un nivel de probabilidad anual de excedencia. ([Figura 16](#) a [Figura 38](#) del apéndice [10.3](#)).

El periodo de retorno correspondiente es el inverso de la probabilidad anual de excedencia. En cada figura se incluye también las curvas de aceleraciones máximas espectrales para periodos estructurales de 0.1, 0.2, 0.5 y 1.0 segundos.

En los apéndices se encuentran las curvas de peligro sísmico de capitales de provincia, proporcionando aceleraciones máximas esperadas en roca (PGA) y aceleraciones máximas espectrales para diferentes niveles de probabilidad anual de excedencia, tal como en el siguiente ejemplo:



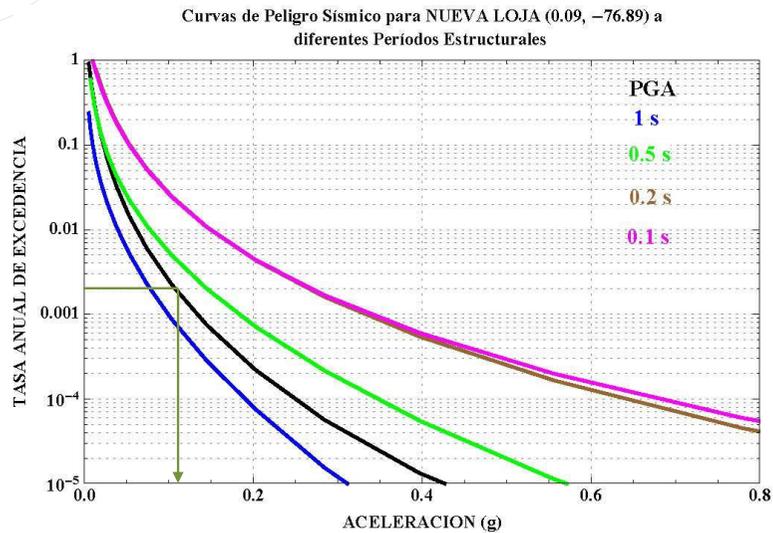


Figura 2 : Curvas de peligro sísmico, Nueva Loja.

Se encuentran informaciones complementarias sobre los estudios de microzonificación sísmica en el apéndice 10.6.3.

### 3.2. Geología local

#### 3.2.1. Tipos de perfiles de suelos para el diseño sísmico

Se definen seis tipos de perfil de suelo los cuales se presentan en la [Tabla 2](#).

Los parámetros utilizados en la clasificación son los correspondientes a los 30 m superiores del perfil para los perfiles tipo A, B, C, D y E. Aquellos perfiles que tengan estratos claramente diferenciables deben subdividirse, asignándoles un subíndice i que va desde 1 en la superficie, hasta n en la parte inferior de los 30 m superiores del perfil.

Para el perfil tipo F se aplican otros criterios, como los expuestos en la sección [10.6.4](#) Requisitos específicos: respuesta dinámica para los suelos de tipo F y la respuesta no debe limitarse a los 30 m superiores del perfil en los casos de perfiles con espesor de suelo significativo.

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$V_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	$1500$ m/s $> V_s \geq 760$ m/s

Tipo de perfil	Descripción	Definición
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$760$ m/s $> V_s \geq 360$ m/s
	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$N \geq 50.0$ $S_u \geq 100$ KPa
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$360$ m/s $> V_s \geq 180$ m/s
	Perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > N \geq 15.0$ $100$ kPa $> S_u \geq 50$ kPa
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$V_s < 180$ m/s
	Perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	$IP > 20$ $w \geq 40\%$ $S_u < 50$ 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:	
	<b>F1</b> —Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como; suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc.	
	<b>F2</b> —Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H >3m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas).	
	<b>F3</b> —Arcillas de muy alta plasticidad (H >7.5 m con índice de Plasticidad IP >75)	
	<b>F4</b> —Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H >30m)	
	<b>F5</b> —Suelos con contrastes de impedancia $\alpha$ 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.	
<b>F6</b> —Rellenos colocados sin control ingenieril.		

Tabla 2 : Clasificación de los perfiles de suelo

Se encuentran informaciones complementarias para determinar los perfiles del suelo y realizar ensayos geotécnicos en el apéndice [10.6.2](#).

### 3.2.2. Coeficientes de perfil de suelo $F_a$ , $F_d$ y $F_s$

*Nota: Para los suelos tipo F no se proporcionan valores de  $F_a$ ,  $F_d$  ni de  $F_s$ , debido a que requieren un estudio especial, conforme lo estipula la sección 10.6.4.*

#### a. $F_a$ : Coeficiente de amplificación de suelo en la zona de periodo cortó.

En la [Tabla 3](#) se presentan los valores del coeficiente  $F_a$  que amplifica las ordenadas del espectro de respuesta elástico de aceleraciones para diseño en roca, tomando en cuenta los efectos de sitio.

Tipo de perfil del subsuelo	I	II	III	IV	V	VI
Factor Z	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥0.5
A	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B	1	1	1	1	1	1
C	1.4	1.3	1.25	1.23	1.2	1.18
D	1.6	1.4	1.3	1.25	1.2	1.12
E	1.8	1.5	1.39	1.26	1.14	0.97
F	Véase <a href="#">Tabla 2</a> : Clasificación de los perfiles de suelo y la sección <a href="#">10.6.4</a>					

Tabla 3: Tipo de suelo y Factores de sitio  $F_a$

#### b. $F_d$ : desplazamientos para diseño en roca.

En la [Tabla 4](#) se presentan los valores del coeficiente  $F_d$  que amplifica las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para diseño en roca, considerando los efectos de sitio.

Tipo de perfil del subsuelo	I	II	III	IV	V	VI
Factor Z	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥0.5
A	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B	1	1	1	1	1	1
C	1.6	1.5	1.4	1.35	1.3	1.25
D	1.9	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
E	2.1	1.75	1.7	1.65	1.6	1.5
F	Véase <a href="#">Tabla 2</a> : Clasificación de los perfiles de suelo y <a href="#">10.6.4</a>					

Tabla 4: Tipo de suelo y Factores de sitio  $F_d$

#### c. $F_s$ : comportamiento no lineal de los suelos

En la [Tabla 5](#) se presentan los valores del coeficiente  $F_s$ , que consideran el comportamiento no lineal de los suelos, la degradación del periodo del sitio que depende de la intensidad y contenido de frecuencia de la excitación sísmica y los desplazamientos relativos del suelo, para los espectros de aceleraciones y desplazamientos.

Tipo de perfil del subsuelo	I	II	III	IV	V	VI
Factor Z	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥0.5
A	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
B	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
C	1	1.1	1.2	1.25	1.3	1.45
D	1.2	1.25	1.3	1.4	1.5	1.65
E	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
F	Véase <a href="#">Tabla 2</a> : Clasificación de los perfiles de suelo y <a href="#">10.6.4</a>					

Tabla 5: Tipo de suelo y Factores del comportamiento inelástico del subsuelo  $F_s$

*Nota: Para poblaciones con más de 100000 habitantes (que deberían disponer de estudios de microzonificación sísmica y geotécnica en su territorio) y sitios con suelo de tipo F, se realizará espectro de respuesta elástico de aceleraciones específico al sitio, basado en la geología, tectónica, sismología y características del suelo local. El espectro debe desarrollarse para una fracción del amortiguamiento respecto al crítico de 5,00%, a menos que la utilización de otros valores sea consistente con el comportamiento estructural previsto y con la intensidad del sismo establecida para el sitio.*

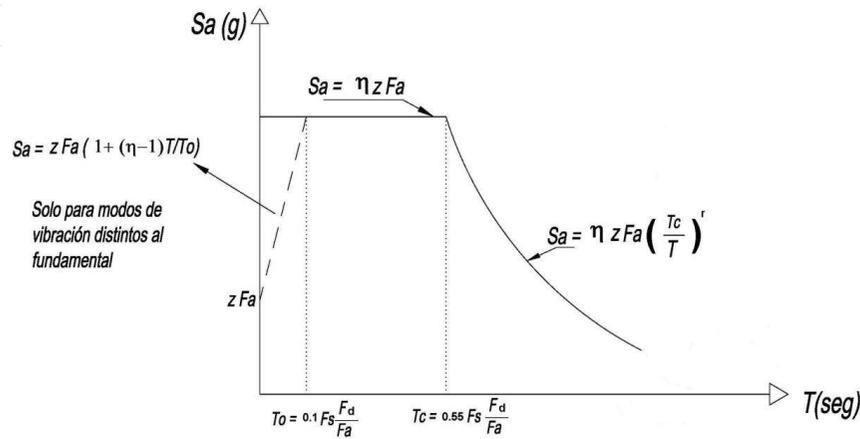
## 3.3. Componentes horizontales de la carga sísmica: espectros elásticos de diseño

### 3.3.1. Espectro elástico horizontal de diseño en aceleraciones

El espectro de respuesta elástico de aceleraciones  $S_a$ , expresado como fracción de la aceleración de la gravedad, para el nivel del sismo de diseño, se proporciona en la [Figura 3](#), consistente con:

- el factor de zona sísmica  $Z$ ,
- el tipo de suelo del sitio de emplazamiento de la estructura,
- la consideración de los valores de los coeficientes de amplificación de suelo  $F_a$ ,  $F_d$ ,  $F_s$ .





Dónde:

$\eta$	Razón entre la aceleración espectral $S_a$ ( $T = 0.1$ s) y el PGA para el periodo de retorno seleccionado.
$F_a$	Coefficiente de amplificación de suelo en la zona de periodo cortó. Amplifica las ordenadas del espectro elástico de respuesta de aceleraciones para diseño en roca, considerando los efectos de sitio
$F_d$	Coefficiente de amplificación de suelo. Amplifica las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para diseño en roca, considerando los efectos de sitio
$F_s$	Coefficiente de amplificación de suelo. Considera el comportamiento no lineal de los suelos, la degradación del periodo del sitio que depende de la intensidad y contenido de frecuencia de la excitación sísmica y los desplazamientos relativos del suelo, para los espectros de aceleraciones y desplazamientos
$S_a$	Espectro de respuesta elástico de aceleraciones (expresado como fracción de la aceleración de la gravedad $g$ ). Depende del periodo o modo de vibración de la estructura
$T$	Periodo fundamental de vibración de la estructura
$T_0$	Periodo límite de vibración en el espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño
$T_c$	Periodo límite de vibración en el espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño
$Z$	Aceleración máxima en roca esperada para el sismo de diseño, expresada como fracción de la aceleración de la gravedad $g$

Figura 3: Espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño

Dicho espectro, que obedece a una fracción de amortiguamiento respecto al crítico de 5%, se obtiene mediante las siguientes ecuaciones, válidas para periodos de vibración estructural  $T$  pertenecientes a 2 rangos:

## 4. Metodología del diseño sísmoresistente

### 4.1. Categoría de edificio y coeficiente de importancia I

**NOTA:** al determinar las fuerzas a partir de las curvas de peligro sísmico, dichas fuerzas no requieren ser modificadas por el factor de importancia I.

La estructura a construirse se clasificará en una de las categorías que se establecen en la [Tabla 7](#) y se adoptará el correspondiente factor de importancia I.

El propósito del factor I es incrementar la demanda sísmica de diseño para estructuras, que por sus características de utilización o de importancia deben permanecer operativas o sufrir menores daños durante y después de la ocurrencia del sismo de diseño.

Categoría	Tipo de uso, destino e importancia	Coefficiente I
<b>Edificaciones esenciales</b>	Hospitales, clínicas, Centros de salud o de emergencia sanitaria. Instalaciones militares, de policía, bomberos, defensa civil. Garajes o estacionamientos para vehículos y aviones que atienden emergencias. Torres de control aéreo. Estructuras de centros de telecomunicaciones u otros centros de atención de emergencias. Estructuras que albergan equipos de generación y distribución eléctrica. Tanques u otras estructuras utilizadas para depósito de agua u otras substancias anti-incendio. Estructuras que albergan depósitos tóxicos, explosivos, químicos u otras substancias peligrosas.	1.5
<b>Estructuras de ocupación especial</b>	Museos, iglesias, escuelas y centros de educación o deportivos que albergan más de trescientas personas. Todas las estructuras que albergan más de cinco mil personas. Edificios públicos que requieren operar continuamente	1.3
<b>Otras estructuras</b>	Todas las estructuras de edificación y otras que no clasifican dentro de las categorías anteriores	1.0

Tabla 6: Tipo de uso, destino e importancia de la estructura

El diseño de las estructuras con factor de importancia 1.0 cumplirá con todos los requisitos establecidos en el presente capítulo de la norma.

Para aquellas estructuras con factor de importancia superior a 1.0, deberán cumplir además con los requisitos estipulados en las secciones [4.2.4](#) y [4.2.5](#).

construir estructuras adosadas, en aquellos pisos en los cuales se requiere adosamiento, la estructura debe separarse del lindero del terreno una distancia igual a:

$$\Delta_E = 0.5 \Delta_{Mup}$$

Dónde:

$\Delta_E$  Fuerzas laterales de diseño reducidas

$\Delta_{Mup}$  Desplazamiento del último piso

### 5.2.3. Establecimiento de separaciones máximas entre estructuras

El establecimiento de separaciones máximas entre estructuras debe evitar el golpeteo entre estructuras adyacentes, o entre partes de la estructura intencionalmente separadas, debido a las deformaciones laterales.

Se considera el efecto desfavorable en que los sistemas de entrepiso de cada una de las partes intencionalmente separadas de las estructuras, o de estructuras adyacentes, no coincidan a la misma cota de altura.

Para los casos de coincidencia o no coincidencia, se establece la cuantificación de separación máxima.

## 5.3. Regularidad/configuración estructural

### 5.3.1. Configuración estructural

#### a. Configuraciones a privilegiar

Diseñadores arquitectónicos y estructurales procuraran que la configuración de la estructura sea simple y regular para lograr un adecuado desempeño sísmico. La [Tabla 8](#) muestra configuraciones estructurales recomendadas.

#### b. Configuraciones más complejas

Cambios abruptos de rigidez y resistencia como los mostrados en la [Tabla 9](#), deben evitarse con el fin de impedir acumulación de daño en algunos componentes en desmedro de la ductilidad global del sistema y por lo tanto no se recomiendan.

Al utilizar una configuración similar a las no recomendadas, el diseñador deberá demostrar el adecuado desempeño sísmico de su estructura, siguiendo los lineamientos especificados en la [NEC-SE-RE](#).

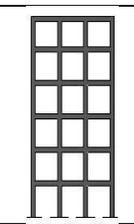
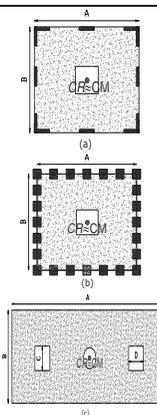
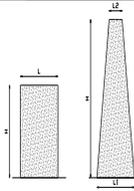
CONFIGURACIÓN EN ELEVACIÓN $\phi_{Ei}=1$	CONFIGURACIÓN EN PLANTA $\phi_{Pi}=1$
<p>La altura de entrepiso y la configuración vertical de sistemas aporticados, es constante en todos los niveles.</p> <p><math>\phi_{Ei}=1</math></p> 	<p>La configuración en planta ideal en un sistema estructural es cuando el Centro de Rigidez es semejante al Centro de Masa.</p> <p><math>\phi_{Pi}=1</math></p> 
<p>La dimensión del muro permanece constante a lo largo de su altura o varía de forma proporcional.</p> <p><math>\phi_{Ei}=1</math></p> 	

Tabla 9 : Configuraciones estructurales recomendadas

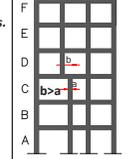
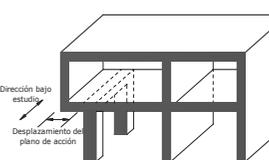
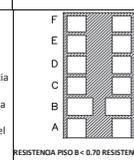
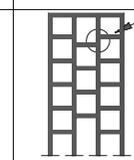
IRREGULARIDADES EN ELEVACIÓN	IRREGULARIDADES EN PLANTA
<p><b>Ejes verticales discontinuos o muros soportados por columnas.</b></p> <p>La estructura se considera irregular no recomendada cuando existen desplazamientos en el alineamiento de elementos verticales del sistema resistente, dentro del mismo plano en el que se encuentran, y estos desplazamientos son mayores que la dimensión horizontal del elemento.</p> 	<p><b>Desplazamiento de los planos de acción de elementos vertical.</b></p> <p>Una estructura se considera irregular no recomendada cuando existen discontinuidades en los ejes verticales, tales como desplazamientos del plano de acción de elementos verticales del sistema resistente.</p> 
<p><b>Piso débil-Discontinuidad en la resistencia.</b></p> <p>La estructura se considera irregular no recomendada cuando la resistencia del piso es menor que el 70% de la resistencia del piso inmediatamente superior, (entendiéndose por resistencia del piso la suma de las resistencias de todos los elementos que comparten el cortante del piso para la dirección considerada).</p> <p>RESISTENCIA PISO B &lt; 0.70 RESISTENCIA PISO C</p> 	
<p><b>Columna corta</b></p> <p>Se debe evitar la presencia de columnas cortas, tanto en el diseño como en la construcción de las estructuras.</p> 	

Tabla 10 : Configuraciones estructurales no recomendadas

### 5.3.2. Regularidad en planta y elevación

Una estructura se considera como regular en planta y en elevación, cuando no presenta ninguna de las condiciones de irregularidad descritas en la [Tabla 10 y Tabla 11](#).

En este caso, se puede usar el DBF: **Diseño basado en fuerzas** (método 1 estático descrito en la sección [6](#)).



Se permitirá utilizar el procedimiento DBF únicamente en los casos en que las estructuras presentan regularidad tanto en planta como en elevación (es decir cuando  $\phi_P = \phi_E = 1$ ).

En los casos restantes, la aplicación del cálculo dinámico permitirá incorporar efectos torsionales y de modos de vibración distintos al fundamental.

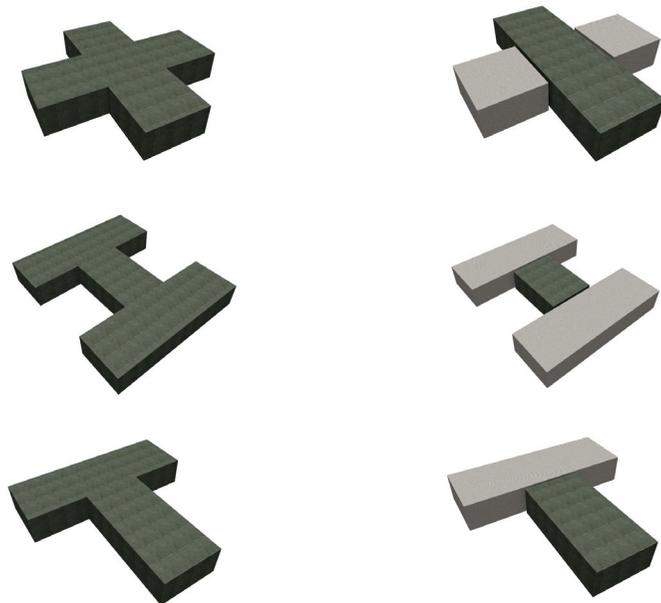
### 5.3.3. Irregularidades y coeficientes de configuración estructural

En caso de estructuras irregulares, tanto en planta como en elevación, se usaran los coeficientes de configuración estructural, que "penalizan" al diseño con fines de tomar en cuenta dichas irregularidades, responsables de un comportamiento estructural deficiente ante la ocurrencia de un sismo.

La [Tabla 10](#) y la [Tabla 11](#) describen las tipologías de irregularidades que se pueden presentar con mayor frecuencia en las estructuras de edificación. Junto a la descripción se caracteriza la severidad (acumulativa o no) de tales irregularidades.

Los coeficientes de configuración estructural incrementan el valor del cortante de diseño, con la intención de proveer de mayor resistencia a la estructura, pero no evita el posible comportamiento sísmico deficiente de la edificación. Por tanto, es recomendable evitar al máximo la presencia de las irregularidades mencionadas.

En caso de estructuras irregulares, se debería privilegiar el uso del DBD: Diseño basado en desplazamientos (método descrito en la sección [7](#))



Ejemplo de como resolver juntas en formas irregulares

<p><b>Tipo 1 - Irregularidad torsional</b>  <math>\phi_{PT}=0.9</math>  <math>\Delta &gt; 1.2 \frac{(\Delta 1 + \Delta 2)}{2}</math></p> <p>Existe irregularidad por torsión, cuando la máxima deriva de piso de un extremo de la estructura calculada incluyendo la torsión accidental y medida perpendicularmente a un eje determinado, es mayor que 1,2 veces la deriva promedio de los extremos de la estructura con respecto al mismo eje de referencia. La torsión accidental se define en el numeral 6.4.2 del presente código.</p>	
<p><b>Tipo 2 - Retrocesos excesivos en las esquinas</b> <math>\phi_{PT}=0.9</math>  <math>A &gt; 0.15B</math> y <math>C &gt; 0.15D</math></p> <p>La configuración de una estructura se considera irregular cuando presenta entrantes excesivos en sus esquinas. Un entrante en una esquina se considera excesivo cuando las proyecciones de la estructura, a ambos lados del entrante, son mayores que el 15% de la dimensión de la planta de la estructura en la dirección del entrante.</p>	
<p><b>Tipo 3 - Discontinuidades en el sistema de piso</b>  <math>\phi_{PT}=0.9</math>  a) <math>CxD &gt; 0.5AxB</math>  b) <math>[CxD + CxE] &gt; 0.5AxB</math></p> <p>La configuración de la estructura se considera irregular cuando el sistema de piso tiene discontinuidades apreciables o variaciones significativas en su rigidez, incluyendo las causadas por aberturas, entrantes o huecos, con áreas mayores al 50% del área total del piso o con cambios en la rigidez en el plano del sistema de piso de más del 50% entre niveles consecutivos.</p>	
<p><b>Tipo 4 - Ejes estructurales no paralelos</b>  <math>\phi_{PT}=0.9</math></p> <p>La estructura se considera irregular cuando los ejes estructurales no son paralelos o simétricos con respecto a los ejes ortogonales principales de la estructura.</p>	
<p>Nota: La descripción de estas irregularidades no faculta al calculista o diseñador a considerarlas como normales, por lo tanto la presencia de estas irregularidades requiere revisiones estructurales adicionales que garanticen el buen comportamiento local y global de la edificación.</p>	

Tabla 11: Coeficientes de irregularidad en planta

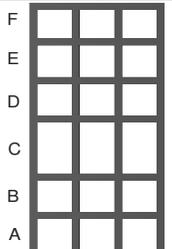
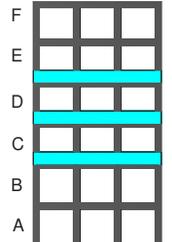
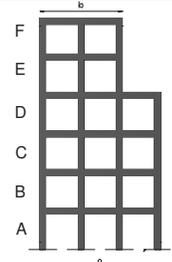
<p><b>Tipo 1 - Piso flexible</b>  <math>\phi_{ei}=0.9</math>                  Rigidez <math>K_c &lt; 0.70</math> Rigidez <math>K_o</math>  <math>Rigidez &lt; 0.80 \frac{(K_o + K_e + K_f)}{3}</math></p> <p>La estructura se considera irregular cuando la rigidez lateral de un piso es menor que el 70% de la rigidez lateral del piso superior o menor que el 80 % del promedio de la rigidez lateral de los tres pisos superiores.</p>	
<p><b>Tipo 2 - Distribución de masa</b>  <math>\phi_{ei}=0.9</math>  <math>m_D &gt; 1.50 m_E</math> ó  <math>m_D &gt; 1.50 m_C</math></p> <p>La estructura se considera irregular cuando la masa de cualquier piso es mayor que 1,5 veces la masa de uno de los pisos adyacentes, con excepción del piso de cubierta que sea más liviano que el piso inferior.</p>	
<p><b>Tipo 3 - Irregularidad geométrica</b>  <math>\phi_{ei}=0.9</math>  <math>a &gt; 1.3 b</math></p> <p>La estructura se considera irregular cuando la dimensión en planta del sistema resistente en cualquier piso es mayor que 1,3 veces la misma dimensión en un piso adyacente, exceptuando el caso de los altillos de un solo piso.</p>	
<p>Nota: La descripción de estas irregularidades no faculta al calculista o diseñador a considerarlas como normales, por lo tanto la presencia de estas irregularidades requiere revisiones estructurales adicionales que garanticen el buen comportamiento local y global de la edificación.</p>	

Tabla 12 : Coeficientes de irregularidad en elevación

**a. Coeficiente de regularidad en planta  $\phi_p$**

El coeficiente  $\phi_p$  se estimará a partir del análisis de las características de regularidad e irregularidad en las plantas en la estructura, descritas en la [Tabla 10](#). Se utilizará la expresión:

$$\phi_p = \phi_{PA} \times \phi_{PB}$$

Dónde

$\phi_p$  Coeficiente de regularidad en planta

$\phi_{PA}$  Mínimo valor  $\phi_{pi}$  de cada piso i de la estructura en el caso de irregularidades tipo 1, 2 y/o 3

$\phi_{PB}$  Mínimo valor  $\phi_{pi}$  de cada piso i de la estructura en el caso de irregularidades tipo 4

$\phi_{Pi}$  Coeficiente de configuración en planta

Cuando una estructura no contempla ninguno de los tipos de irregularidades descritas en la [Tabla 11](#), en ninguno de sus pisos,  $\phi_p$  tomará el valor de 1 y se le considerará como regular en planta.

**b. Coeficiente de regularidad en elevación  $\phi_E$**

El coeficiente  $\phi_E$  se estimará a partir del análisis de las características de regularidad e irregularidad en elevación de la estructura, descritas en la [Tabla 12](#). Se utilizará la expresión:

$$\phi_E = \phi_{EA} \times \phi_{EB}$$

Dónde:

$\phi_E$  Coeficiente de regularidad en elevación

$\phi_{EA}$  Mínimo valor  $\phi_{Ei}$  de cada piso i de la estructura, en el caso de irregularidades tipo 1;  $\phi_{Ei}$  en cada piso se calcula como el mínimo valor expresado por la tabla para la irregularidad tipo 1

$\phi_{EB}$  Mínimo valor  $\phi_{Ei}$  de cada piso i de la estructura, en el caso de irregularidades tipo 1;  $\phi_{Ei}$  en cada piso se calcula como el mínimo valor expresado por la tabla para la irregularidad tipo 2 y/o 3

$\phi_{Ei}$  Coeficiente de configuración en elevación

Cuando una estructura no contempla ninguno de los tipos de irregularidades descritos en las [Tabla 11](#) y [Tabla 12](#) en ninguno de sus niveles,  $\phi_E = 1$  y se le considerará como regular en elevación.

**Casos particulares**

$$\text{Si } \Delta M_i < 1.30 * \Delta M_{i+1} : \phi_p = \phi_E = 1$$

Dónde:

$\Delta M_i$  Deriva máxima de cualquier piso

$\Delta M_{i+1}$  Deriva máxima del piso superior

Adicionalmente, para estructuras tipo pórtico especial sismo resistente con muros estructurales (sistemas duales), que cumplan con la definición de la [sección 1.2](#), se considerará:

$$\phi_E = 1$$

Dónde:

$\phi_E$  Coeficiente de regularidad en elevación



UNIVERSITAT  
POLITÀCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR DE  
ARQUITECTURA

MASTER

A rquitectura avanzada  
P aisaje  
U rbanismo  
D iseño

