

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE CIVIL

DISERTACIÓN PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

“DESARROLLO DEL SOFTWARE DE ANÁLISIS Y DISEÑO, PUCESTRUCT:
IMPLEMENTACIÓN DEL CAPÍTULO DE PELIGRO SÍSMICO DE LA NORMA
ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN, NEC-SE-DS”

NOMBRE:

PAÚL FERNANDO CAMPAÑA HARO

DIRECTOR:

ING. JUAN SEBASTIÁN BAQUERO

QUITO, 2016

DEDICATORIA

A mis padres Paúl y Fernanda,

Por su apoyo incondicional en todo momento,

Por sus enseñanzas para ser una persona de bien,

A mi hermano Martín,

Quien siempre fue una fuente de inspiración para mí,

Y a mis abuelos,

Por confiar en mí y brindarme su apoyo para seguir adelante.

AGRADECIMIENTO

Principalmente agradezco a Dios,
Quien siempre está presente en mi vida,
Para nunca dejarme desmayar y seguir adelante,
Y poder cumplir los objetivos.

A mi abuelo Fausto Haro,
Por su apoyo a lo largo de toda la carrera universitaria.

Al Ingeniero Juan Sebastián Baquero,
Director de esta disertación, por el tiempo brindado
Y el conocimiento compartido para finalizar la carrera.

A mis amigos de Universidad,
Con quienes compartimos tantos momentos,
Que durarán toda la vida

Tabla de contenido

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
1. RESUMEN.....	1
2. INTRODUCCION	2
2.1. Antecedentes	2
2.2. Planteamiento del problema.....	16
2.3. Objetivos.....	19
2.3.1. Objetivo general.....	19
2.3.2. Objetivos específicos.....	19
2.4. Alcance.....	20
3. DESARROLLO	21
3.1 Marco Teórico.....	21
3.1.1 Norma Ecuatoriana de la Construcción.....	23
3.1.2. Norma Extranjera de apoyo.....	24
3.1.3. Criterios generales de estructuración	25
3.2. Reconocimiento de datos.....	35
3.2.1. Datos requeridos de entrada según norma.....	35
3.2.2. Procedimientos de diseño recomendados según norma.....	48
3.2.3. Datos de salida que se obtienen en base a procedimientos de la norma.....	50
3.3. Estructuración del programa computacional propuesto, PUCEstruct.....	50
3.4. MATLAB como herramienta de programación.....	63
3.4.1. Desarrollo de interfaz de ingreso de datos.....	64
3.4.2. Desarrollo de procesos de cálculo.....	64
3.4.3. Desarrollo de interfaz de salida de datos.....	64
3.5 Ejemplo de verificación	65
3.5.1 Aplicación de la norma NEC-SE-DS usando módulo del programa PUCEstruct.....	65
4. CONCLUSIONES	73
5. RECOMENDACIONES	74
6. BIBLIOGRAFÍA.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1 Placas tectónicas en América del Sur</i>	3
<i>Figura 2.2 Convergencia de placas tectónicas</i>	5
<i>Figura 1.3 Convergencia de placas tectónicas</i>	5
<i>Figura 1.4 Ondas sísmicas</i>	6
<i>Figura 2.5 Ondas principales</i>	6
<i>Figura 2.6 Ondas secundarias</i>	7
<i>Figura 1.7 Ondas secundarias</i>	7
<i>Figura 2.8 Onda Rayleigh</i>	8
<i>Figura 2.9 Representación de una falla normal</i>	8
<i>Figura 2.10 Representación de una falla inversa</i>	9
<i>Figura 2.11 Representación de una falla de rumbo</i>	9
<i>Figura 2.12 Representación de una falla vertical</i>	10
<i>Figura 2.13 Red Nacional de estaciones sísmicas en el Ecuador</i>	11
<i>Figura 2.14 Distribución de equipos acelerográficos en el Ecuador</i>	12
<i>Figura 2.15 Diagrama desplazamiento vs tiempo</i>	14
<i>Figura 3.1 Pisos blandos a nivel de planta baja</i>	26
<i>Figura 3.2 Pisos blandos en pisos superiores</i>	27
<i>Figura 3.3 Soporte lateral asimétrico en planta</i>	27
<i>Figura 3.4 Discontinuidad en elementos</i>	28
<i>Figura 3.5 Muros de hormigón armado</i>	29
<i>Figura 3.6 Sistemas de soporte mixto</i>	29
<i>Figura 3.7 sistemas “bracing”</i>	30
<i>Figura 3.8 Edificios de mampostería con muros de hormigón armado</i>	30
<i>Figura 3.9 Muros de mampostería reforzados</i>	31

<i>Figura 3.10 Empate de elementos estructurales y no estructurales.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3.11 Columnas cortas.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 3.12 Diagonales de acero.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 3.13 Juntas de separación entre estructuras.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 3.14 Distribución regular en planta.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 3.15 Ductilidad en las estructuras</i>	<i>34</i>
<i>Figura 3.16 Espectro de respuesta.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 3.17 Mapa de peligro sísmico del Ecuador.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 3.18 Curvas de peligro sísmico para Quito</i>	<i>37</i>
<i>Figura 3.19 Espectro de diseño.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 3.20 Efecto de resonancia</i>	<i>47</i>
<i>Figura 3.21 Modelación de un sistema de un grado de libertad</i>	<i>51</i>
<i>Figura 3.22 Diagrama de cuerpo libre de fuerzas opuestas al movimiento</i>	<i>52</i>
<i>Figura 3.23 Relación lineal fuerza - desplazamiento</i>	<i>53</i>
<i>Figura 3.24 Vibración libre de los diferentes tipos de sistemas</i>	<i>55</i>
<i>Figura 3.25 Esquema de amortiguador viscoso.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 3.26 Amortiguador viscoso.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 3.27 Esquema de amortiguador metálico.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 3.28 Amortiguador metálico.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 3.29 Amortiguador de fricción</i>	<i>59</i>
<i>Figura 3.30 Aceleración constante</i>	<i>60</i>
<i>Figura 3.31 Variación lineal de la aceleración</i>	<i>60</i>
<i>Figura 3.32 Espectro de respuesta combinado D-V-A para el movimiento de un terreno con $\xi=0.2, 5, 10$ y 20%.....</i>	<i>63</i>

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Terremotos en Ecuador.....	3
Tabla 2.2 Magnitud en la escala de Richter.....	14
Tabla 2.3 Intensidad en la escala de Mercalli.....	16
Tabla 3.1 Valores del factor z dependiendo de la zona sísmica	37
Tabla 3.2 Perfiles de suelo.....	38
Tabla 3.3 Coeficiente de sitio Fa	40
Tabla 3.4 Coeficiente de sitio Fd.....	40
Tabla 3.5 Coeficiente de sitio Fs	40
Tabla 3.6 Coeficientes dependiendo del tipo de estructura	41
Tabla 3.7 Coeficientes de irregularidad en planta	43
Tabla 3.8 Coeficientes de irregularidad en elevación.....	44
Tabla 3.9 Factor de importancia de las estructuras dependiendo del tipo de uso.....	45
Tabla 3.10 Factor de reducción de resistencia para sistemas estructurales dúctiles.....	46
Tabla 3.11 Factor de reducción de resistencia para sistemas estructurales de ductilidad limitada.....	46
Tabla 3.12 Coeficiente k.....	48
Tabla 3.13 Valores de fracción de amortiguamiento recomendadas.....	56

1. RESUMEN

En la actualidad se han desarrollado nuevas normas y otras ya existentes se han mejorado en lo que respecta a la construcción de estructuras sísmo resistentes. Es una variable fundamental a tomar en cuenta en el Ecuador debido a que nos encontramos en una zona de riesgo sísmico alto.

Por este motivo en esta disertación se realiza una herramienta de apoyo para los ingenieros civiles, la cual se basa en el capítulo de peligro sísmico de la vigente Norma Ecuatoriana de la Construcción 2015.

PUCEstruct, la herramienta de apoyo desarrollada en esta disertación se la realizó de la forma más didáctica para que el usuario pueda manejarla sin ningún problema y entregue como resultado, datos que son necesarios para el diseño sísmo resistente. Siempre es importante comparar nuestras normas ecuatorianas con otras que sean más desarrolladas y en este caso se realizó una comparación con la norma American Society of Civil Engineers 7, publicada en el año 2010 (ASCE 7-10) debido a que los americanos están en una constante actualización y mejora de sus normas gracias a permanentes investigaciones que realizan con respecto al tema de las estructuras sísmo resistentes.

El uso de las normas para el diseño de estructuras sísmo resistentes tiene la finalidad de que las mismas se comporten de manera adecuada ante eventos sísmicos que se puedan producir en cualquier momento y así salvar las vidas de la gente que se encuentra en el interior de las estructuras. Con la finalidad de facilitar la obtención de datos necesarios para el diseño de estructuras sísmo resistentes se creó el programa PUCEstruct.

2. INTRODUCCION

2.1. Antecedentes

En el año 1772 A.C en Babilonia se creó el código de Hammurabi, el cual tenía como principal filosofía: “ojo por ojo, diente por diente”. En este código se estipulaba que si un constructor construía una casa y la misma fallaba y se caía matando al dueño, se debía matar al constructor. También se estipulaba que si la casa se caía matando al hijo del dueño, se debía matar al hijo del constructor y por último que si la casa se caía sin matar a nadie, el constructor con su dinero debía construir nuevamente la casa.

En la era moderna en el año 1666, un gran incendio devastó gran parte del centro de la ciudad de Londres y para su reconstrucción se creó el “acta de reconstrucción de Londres” en donde se establecieron algunas regulaciones para dar a las estructuras mayor capacidad de resistencia contra el fuego y reconstruir las estructuras en el centro de la ciudad. Casi 200 años después, en 1859 en la ciudad de Baltimore en Estados Unidos de América se creó el primer código de la construcción, basándose en el “acta de reconstrucción de Londres”. En este nuevo código se incluyeron regulaciones como: espesor de la mampostería, la calidad de los materiales, la separación con edificaciones ya existentes, entre otras. En esas épocas las actualizaciones de los códigos de la construcción se los realizaba para que las estructuras tengan mayor resistencia al fuego debido a los grandes incendios que destrozaron ciudades, hasta que en el año de 1908 una comisión italiana creó el primer código sísmico luego de que un terremoto sacudiera a la ciudad italiana de Messina-Reggio, matando a 160 mil personas. En Japón sucedió algo parecido cuando en el año de 1923 un terremoto en la ciudad de Kanto mató a 140 mil personas, luego de este acontecimiento, Japón adoptó un coeficiente sísmico y limitó la altura de los edificios. (Murota, 2004) (Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2007)

En Estados Unidos en 1925 un gran terremoto de magnitud 6.8 azotó a la ciudad de Santa Bárbara en el estado de California y fue ahí donde la gente y las autoridades vieron la necesidad de implementar requisitos sísmicos para la construcción de las estructuras, los mismos que 2 años después, en 1927 aparecieron en un apéndice del código de la construcción. En este apéndice se hablaba de mejorar la calidad del mortero y de la mano de obra en la construcción de mampostería de bloque. En 1933 se incluyeron requisitos sísmicos para estructuras de gran importancia como son escuelas y hospitales además de edificaciones públicas donde había gran cantidad de personas en su interior. (Olshansky, 1998)

Ecuador históricamente ha sido un país con alto riesgo de sufrir sismos debido a su geología y ubicación. La mayoría de los sismos que se producen en Ecuador se deben al efecto de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, el movimiento se está dando a una velocidad de 7cm/año.

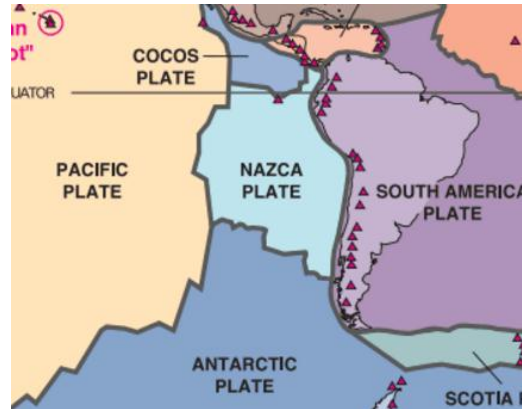


Figura 2.1 Placas tectónicas en América del Sur

Fuente: (U.S. Geological Survey , s.f.)

Han existido varios acontecimientos donde los sismos han afectado a ciudades y hasta a provincias enteras, dejando en evidencia la falta de un diseño sismo resistente en las estructuras bajo la aplicación del capítulo de peligro sísmico de la norma ecuatoriana de la construcción.

Tabla 2.1 Terremotos en Ecuador

Terremotos en Ecuador			
Año	Lugar	Magnitud	Efectos
1797	Riobamba	8.3	Se extendió hasta ciudades cercanas como Quito causando hasta 40000 muertes.
1868	Carchi	6.3	Se sintió en el suroeste de Colombia y causó 70000 víctimas (muertos y heridos)
1906	Costas Ecu-Col	8.8	Olas de hasta 5m en rio verde y Tumaco
1949	Ambato	6.8	Ciudades como Pelileo, Pillaro, Patate fueron destruidas
1958	Costas Ecu-Col	7.8	30% de construcciones destruidas en Esmeraldas
1987		6.9	

	Cerca volcán reventador		1000 muertos y pérdidas por 1000000 de dólares
2010	Tena	7.2	Tuvo una duración de 40 seg y fue sentido en todo el Ecuador
2014	Pichincha	5.1	4 muertos, casas afectadas en Calderón y deslizamientos de tierra en vías
2016	Pedernales	7.8	Varias ciudades de Esmeraldas y Manabí destruidas y 661 fallecidos

Fuente: (AstroCiencias, 2016) (INOCAR, s.f.)

La mayoría de sismos y los que más han afectado a los humanos son los producidos por el movimiento de placas tectónicas, pero no son las únicas razones por las que se producen. Se distinguen principalmente tres tipos:

Microsismos

Son pequeñas vibraciones que se producen en la tierra debido a causas como grandes tormentas, derretimiento de glaciares, caída de grandes rocas, compactación de suelo mediante grandes vibraciones, explosiones, etc. (Muñoz J. A., 2001)

Sismos Volcánicos

En ciertas ocasiones las erupciones volcánicas generan movimientos sísmicos debido a la gran energía que se libera cuando el magma y piroclastos son evacuados. Para que exista un sismo volcánico no necesariamente debe darse la erupción del volcán, se puede producir el sismo debido a la gran energía que se encuentra acumulada en el volcán la cual se va liberando. (Bolt, 2003)

Sismo tectónico

Estos sismos son provocados por el movimiento de placas tectónicas, choques o separación de las mismas, generan una acumulación de energía interna que se libera el momento del movimiento. (Bolt, 2003)

Existen dos principales fenómenos en el movimiento de las placas tectónicas:

- Convergencia.- movimiento de las placas tectónicas donde una de las placas se hunde debajo de otra. El punto de intersección de las placas se denomina zona de subducción.

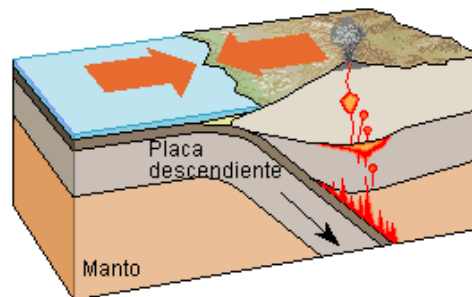


Figura 2.2 Convergencia de placas tectónicas

Fuente:(Convergencia y divergencia, 2013)

- Divergencia.- movimiento en el que dos placas tectónicas se separan, mientras las placas se alejan nuevo material proveniente del manto va rellenando el lugar.

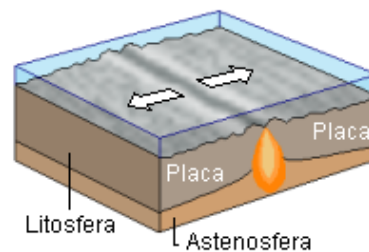


Figura 2.3 Divergencia de placas tectónicas

Fuente: (Convergencia y divergencia, 2013)

Ondas sísmicas

La propagación y dispersión de los sismos se dan mediante las ondas sísmicas. El punto dentro de la corteza terrestre donde nace la propagación de las ondas se llama hipocentro y el punto de contacto de las ondas con la superficie de la tierra se denomina epicentro. Existen 2 tipos de ondas y se clasifican según sus características de propagación:



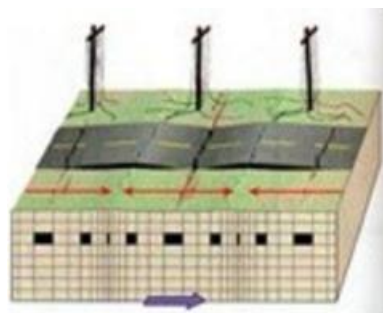
Figura 2.4 Ondas sísmicas

Fuente: (Sistema de alerta temprana de sismos Escuela Industrial , 2014)

Ondas internas

Son ondas que viajan por el interior, transmiten los temblores preliminares de un terremoto pero no son muy destructivas. Se dividen en dos clases:

- Ondas “p” o principales.- son ondas longitudinales que viajan en dirección de la propagación, comprimen y dilatan al suelo por donde se transmiten. Viajan a una velocidad de 1.73 veces la velocidad de las ondas secundarias. Su velocidad depende de la rigidez y densidad del material que atraviese, pero aproximadamente la velocidad es de 1500 m/s en el agua.

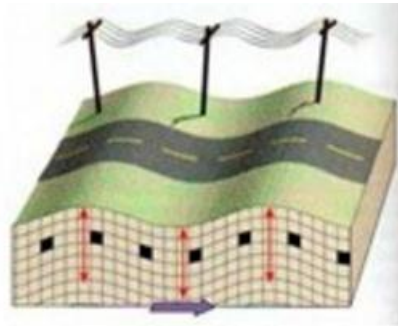


Onda P

Figura 2.5 Ondas principales

Fuente:(Escobar, 2013)

- Ondas “s” o secundarias.- son ondas transversales a la dirección de propagación, tienen menor velocidad y aparecen luego de las principales. Solo pueden viajar a través de sólidos ya que los fluidos no soportan esfuerzos de corte. Tienen mayor amplitud que las ondas p y producen la mayor parte de los daños.



Onda S

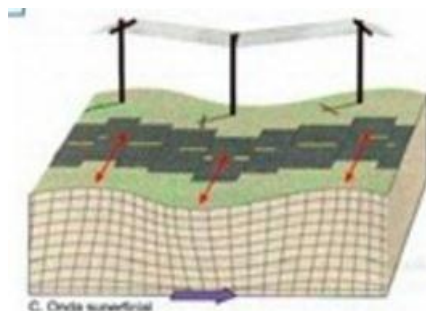
Figura 2.6 Ondas secundarias

Fuente: (Escobar, 2013)

Ondas superficiales

Este tipo de ondas se generan cuando las ondas internas llegan a la superficie de la tierra, se propagan por la superficie terrestre ya sea en fluidos o sólidos. Son las causantes de los daños a las estructuras. Se dividen principalmente en dos tipos:

- Ondas Love.- estas ondas producen un movimiento horizontal de corte en la superficie, la velocidad es aproximadamente 0.9 veces la velocidad de las ondas secundarias.

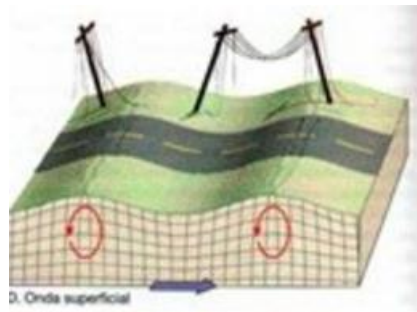


Onda Love

Figura 2.7 Ondas Love

Fuente: (Escobar, 2013)

- Ondas Rayleigh.-son ondas de periodo largo que se mueven en forma elíptica como las olas del mar, su velocidad es ligeramente inferior a la de las ondas love.



Onda Rayleigh

Figura 2.8 Onda Rayleigh

Fuente: (Escobar, 2013)

Fallas geológicas

Las fallas son agrietamientos o fisuras de la corteza terrestre producidas por las grandes presiones que vienen desde el interior de la Tierra. Las fallas son susceptibles a moverse o desplazarse durante eventos sísmicos. Existen 4 tipos de fallas:

- Falla normal.- cuando un bloque se desliza hacia abajo en relación al otro bloque.

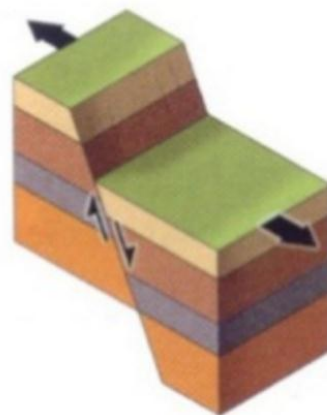


Figura 2.9 Representación de una falla normal

Fuente: (IES-SUEL, 2009)

- Falla inversa.- este tipo de falla se da cuando un bloque sube con respecto al otro.

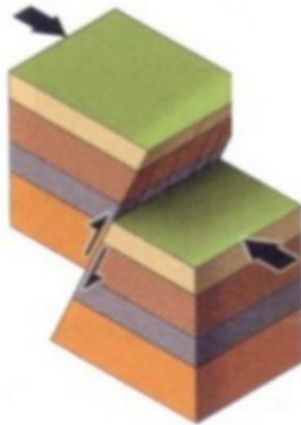


Figura 2.10 Representación de una falla inversa

Fuente: (IES-SUEL, 2009)

- Falla de rumbo.- el movimiento de los bloques se produce debido a la fuerza horizontal que produce el uno sobre el otro, también llamada falla de desgarre.

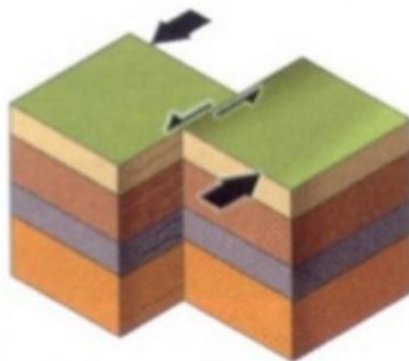


Figura 2.11 Representación de una falla de rumbo

Fuente: (IES-SUEL, 2009)

- Falla vertical.- se producen por fuerzas de cizalladura, un bloque se desliza de forma vertical con respecto al otro.

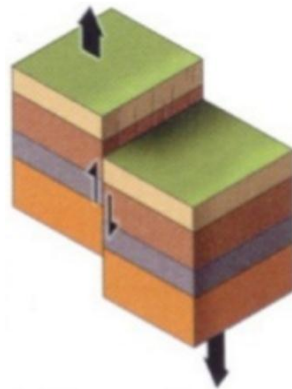


Figura 2.12 Representación de una falla vertical

Fuente: (IES-SUEL, 2009)

Medición de los sismos

En el Ecuador la entidad encargada de realizar la medición cuando se produce un sismo es el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional. Para la medición de los sismos o terremotos es necesario contar con sismómetros, los cuales son instrumentos que están diseñados para medir las vibraciones que se producen en el interior de la Tierra debido a erupciones volcánicas, terremotos y otras fuentes sísmicas.

El objetivo principal del Instituto Geofísico es el monitoreo permanente durante las 24 horas del día los 365 días de año de la actividad sísmica dentro del Ecuador, tanto de origen volcánico como de origen tectónico. Es por esta razón que el IG empezó la instalación de sismómetros alrededor de todo el país a finales de los años setenta, actualmente existen 120 estaciones sísmicas en el Ecuador, las cuales transmiten los datos en tiempo real al IG y permite calcular datos del hipocentro, epicentro, magnitudes, entre otros. (Instituto Geofísico)

**RED NACIONAL DE ESTACIONES SÍSMICAS
INSTITUTO GEOFÍSICO – ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

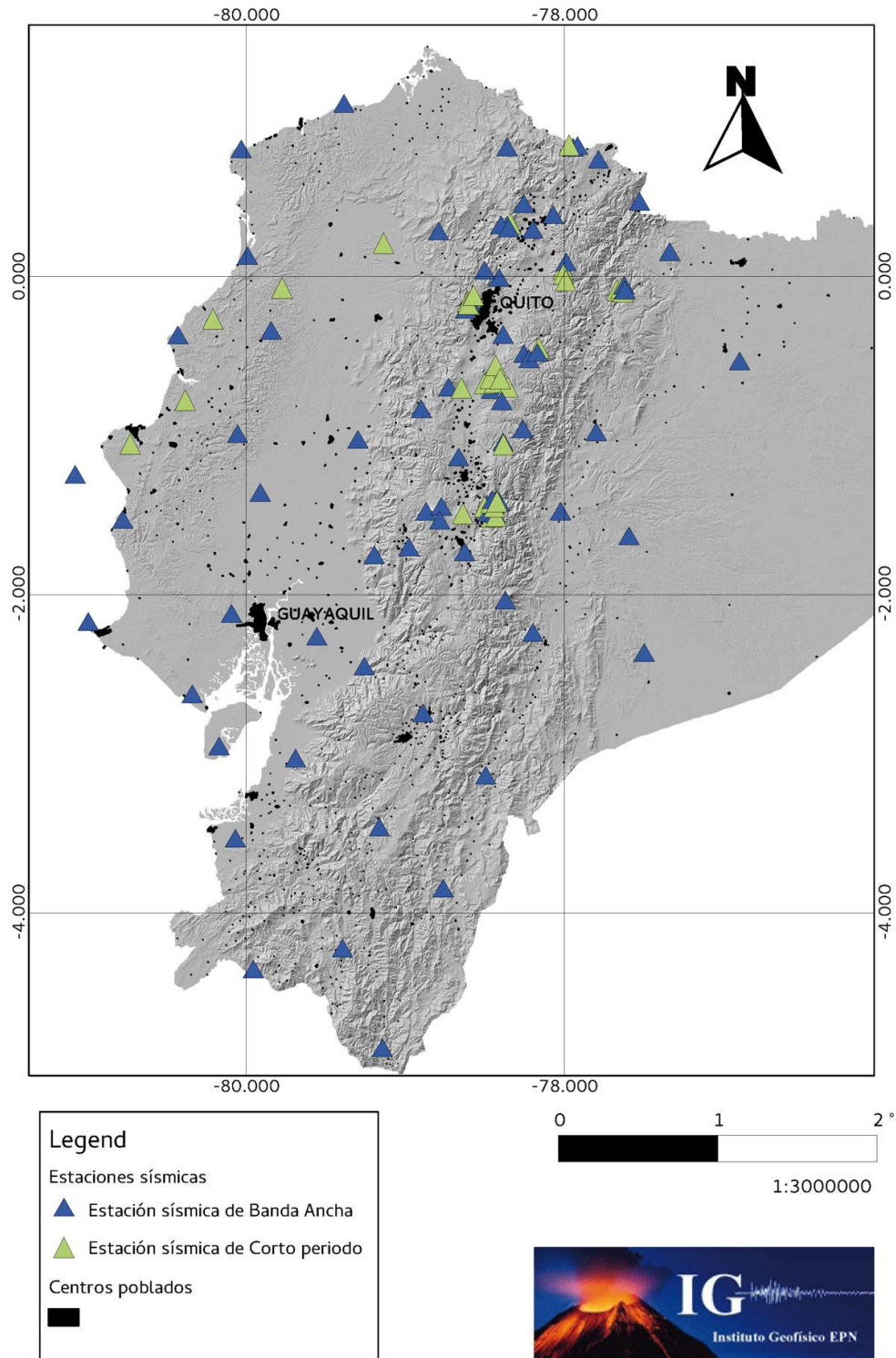


Figura 2.13 Red Nacional de estaciones sísmicas en el Ecuador

Fuente: (Instituto Geofísico)

Existen dos tipos de estaciones sísmicas alrededor del Ecuador, estaciones sísmicas de banda ancha las cuales responden a frecuencias entre 0.1Hz – 1Hz y estaciones sísmicas de periodo corto las cuales responden a frecuencias de 1Hz – 10Hz.

A los ingenieros civiles nos interesa conocer principalmente las aceleraciones que se producen en lugares determinados debido a un sismo ya que la Norma Ecuatoriana de la Construcción establece que es necesario conocer el espectro de pseudo aceleraciones para calcular la fuerza lateral total en la base de las estructuras producida por un sismo.

Los acelerómetros son instrumentos que permiten obtener la variación de aceleraciones durante el tiempo que ocurre el sismo mediante un gráfico denominado acelerograma el cual relaciona la aceleración con el tiempo de duración. El Ecuador cuenta con una red nacional de acelerógrafos (RENAC) que permiten el registro de las aceleraciones que se producen en un sismo. Entre los años 2008 y 2012 nació el proyecto "Fortalecimiento del instituto geofísico, ampliación y modernización del servicio nacional de sismología y vulcanología", financiado por el SENESCYT, el cual permitió cubrir de equipos acelerográficos todo el territorio nacional. (Instituto Geofísico, s.f.)



Figura 2.14 Distribución de equipos acelerográficos en el Ecuador

Fuente: (Instituto Geofísico)

Escalas de medición de los sismos

Cuando se produce un sismo existe una cantidad de energía liberada la cual provoca consecuencias en la superficie de la Tierra. Para medir estas características existen dos escalas, la escala de Richter y la escala de Mercalli.

- Escala de Richter.- mide la cantidad de energía liberada en forma de ondas durante un terremoto mediante la amplitud máxima de las ondas que es registrada por un sismógrafo. Los valores varían desde 0 hasta 10. Esta escala no varía de forma lineal sino de forma logarítmica por lo cual no se puede decir que un sismo de magnitud 4 libera el doble de energía de un sismo de magnitud 2. Cada aumento de 1 punto en la magnitud, significa el aumento de 10 veces la energía liberada. La relación entre la magnitud de las ondas y la energía liberada está dada por la siguiente ecuación propuesta por Richter:

$$\log E = 11.8 + (1.5 * M) \text{ (Kramer, 1996)}$$

Siendo:

E = energía liberada en forma de ondas (ergios)

M = magnitud del sismo en la escala de Richter

Y para obtener la magnitud del sismo es necesario conocer los datos que nos entrega el sismógrafo y aplicar la siguiente formula.

$$M = \log\left(\frac{A * \Delta t^3}{1.62}\right)$$

Donde:

A = amplitud de las ondas en mm

Δt = tiempo desde el inicio de las ondas principales a las ondas secundarias medido en segundos.

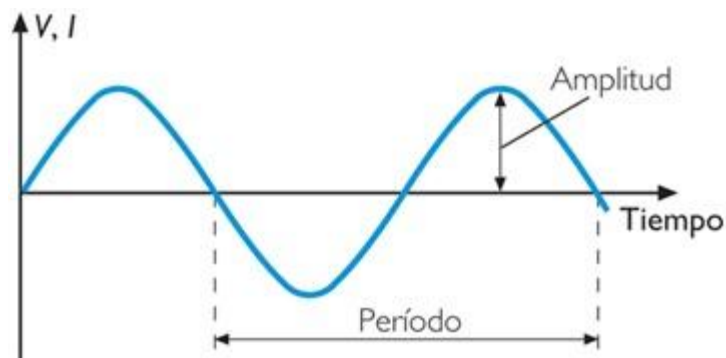


Figura 2.15 Diagrama desplazamiento vs tiempo

Fuente: (Gore, 2012)

La escala de Richter presenta la siguiente donde se observa los posibles efectos que pueden provocar los sismos dependiendo de su magnitud.

Tabla 2.2 Magnitud en la escala de Richter

Magnitudes Richter	Descripción	Efectos de un sismo
Menos de 2,0	Micro	Los microsismos no son perceptibles.
2,0-2,9	Menor	Generalmente no son perceptibles.
3,0-3,9		Perceptibles a menudo, pero rara vez provocan daños.
4,0-4,9	Ligero	Movimiento de objetos en las habitaciones que genera ruido. Sismo significativo pero con daño poco probable.
5,0-5,9	Moderado	Puede causar daños mayores en edificaciones débiles o mal construidas. En edificaciones bien diseñadas los daños son leves.
6,0-6,9	Fuerte	Pueden ser destructivos en áreas pobladas, en hasta unos 160 kilómetros a la redonda.
7,0-7,9	Mayor	Puede causar serios daños en extensas zonas.
8,0-8,9	Gran	Puede causar graves daños en zonas de varios cientos de kilómetros.
9,0-9,9		Devastadores en zonas de varios miles de kilómetros.
10,0+	Épico	Nunca registrado; ver tabla de más abajo para el equivalente de energía sísmica.

Fuente: (Velazquez, 2012)

La escala de Richter mide hasta magnitudes de 10 y es por esta razón que en 1979 Thomas C. Hanks y Hiroo Kanamori crearon una escala sucesora a la de Richter

llamada Magnitud momento, esta nueva escala no se satura y nos permite llegar a magnitudes mayores a 10. Al igual que en la de Richter, la escala de magnitud momento cuantifica la energía liberada durante un sismo pero a partir de los siguientes parámetros:

1. Tamaño del área que se deslizó en el plano de falla.
2. Distancia que se deslizó dicha área.
3. Fuerza requerida para oponerse a la fricción que mantenía unidas a las rocas.

(Lutgens, 2001)

La escala de magnitud momento registra por ejemplo magnitudes de 25 debido a un impacto del planeta Theia con la Tierra hace 4530 millones de años y magnitudes de 32 debido al estallido de rayos gamma. Esta escala no tiene límite pero es poco probable que se presenten eventos que sean capaces de registrar tan altas magnitudes, es por eso que la escala de Richter es aun utilizada porque registra magnitudes más cercanas a eventos que probablemente pueden ocurrir o han ocurrido en la Tierra.

(Pascual, 2014)

- Escala de Mercalli.- es una escala de 12 grados creada por el italiano Giuseppe Mercalli la cual evalúa y cuantifica la intensidad de los sismos a través de los efectos y daños causados en las estructuras. (Barberá, 2013)

Tabla 2.3 Intensidad en la escala de Mercalli

Grado	Descripción
I. Muy débil	No se advierte sino por unas pocas personas y en condiciones de perceptibilidad especialmente favorables.
II. Débil	Se percibe sólo por algunas personas en reposo, particularmente aquellas que se encuentran ubicadas en los pisos superiores de los edificios.
III. Leve	Se percibe en los interiores de los edificios y casas.
IV. Moderado	Los objetos colgantes oscilan visiblemente. La sensación percibida es semejante a la que produciría el paso de un vehículo pesado. Los automóviles detenidos se mecen.
V. fuerte	La mayoría de las personas lo percibe aun en el exterior. Los líquidos oscilan dentro de sus recipientes y pueden llegar a derramarse. Los péndulos de los relojes alteran su ritmo o se detienen. Es posible estimar la dirección principal del movimiento sísmico.
VI. Bastante Fuerte	Lo perciben todas las personas. Se siente inseguridad para caminar. Se quiebran los vidrios de las ventanas, la vajilla y los objetos frágiles. Los muebles se desplazan o se vuelcan. Se hace visible el movimiento de los árboles, o bien, se les oye cruji.
VII. Muy fuerte	Los objetos colgantes se estremecen. Se experimenta dificultad para mantenerse en pie. Se producen daños de consideración en estructuras de albañilería mal construidas o mal proyectadas. Se dañan los muebles. Caen trozos de mampostería, ladrillos, parapetos, cornisas y diversos elementos arquitectónicos. Se producen ondas en los lagos .
VIII. Destructivo	Se hace difícil e inseguro el manejo de vehículos. Se producen daños de consideración y aun el derrumbe parcial en estructuras de albañilería bien construidas. Se quiebran las ramas de los árboles. Se producen cambios en las corrientes de agua y en la temperatura de vertientes y pozos.
IX. Ruinoso	Pánico generalizado. Todos los edificios sufren grandes daños. Las casas sin cimentación se desplazan. Se quiebran algunas canalizaciones subterráneas, la tierra se fisura.
X. Desastroso	Se destruye gran parte de las estructuras de albañilería de toda especie. El agua de canales, ríos y lagos sale proyectada a las riberas.
XI. Muy desastroso	Muy pocas estructuras de albañilería quedan en pie. Los rieles de las vías férreas quedan fuertemente deformados. Las cañerías subterráneas quedan totalmente fuera de servicio.
XII. Catastrófico	El daño es casi total. Se desplazan grandes masas de roca. Los objetos saltan al aire. Los niveles y perspectivas quedan distorsionados.

Fuente: (Barberá, 2013)

2.2. Planteamiento del problema.

Debido a que Ecuador está ubicado en una zona propensa a sufrir sismos por la subducción entre placas tectónicas, es indispensable realizar el diseño de las estructuras utilizando requisitos sismo resistentes que se encuentran en el capítulo de peligro sísmico de la norma ecuatoriana de la construcción. El último terremoto que afectó mayoritariamente a las provincias de Manabí y Esmeraldas en la Costa ecuatoriana, dejó en evidencia la falta de un análisis sísmico en las estructuras. Los sismos producen muchas pérdidas, tanto humanas como materiales, y es por esta razón que muchos países del mundo que se encuentran en zonas de riesgo a producirse este tipo de fenómenos incluyendo Ecuador se han visto en la necesidad de incorporar requerimientos sísmicos que cada vez se vuelven más indispensables para la construcción de edificaciones.

Dentro de las normas o códigos sísmicos se establecen un conjunto de requisitos para el diseño de estructuras que son vulnerables a sufrir los efectos de los sismos, reduciendo el

riesgo a niveles aceptables ya que hay que cuidar la vida de la gente que se encuentra dentro de las estructuras.

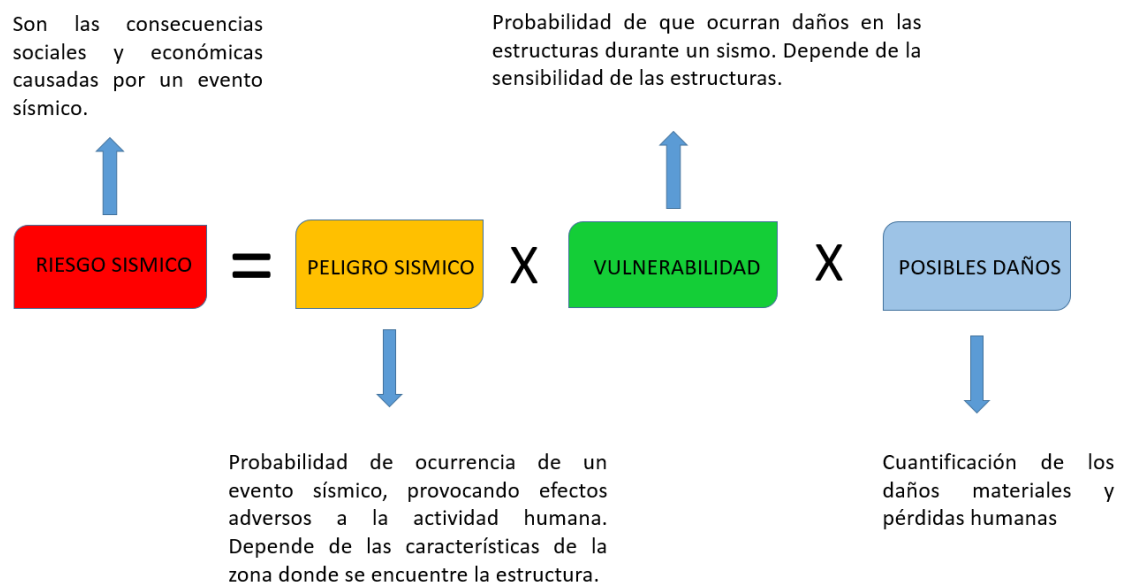
Según estadísticas proporcionadas por la University College London, en los últimos 300 años 3 billones de personas han muerto debido a terremotos. Esta importante cifra se debe a la falta de diseños sísmo resistente en las estructuras alrededor del mundo. Debemos tomar en cuenta que 2/3 de la corteza terrestre esta sísmicamente activa, lo que significa que mil millones de personas viven en zonas donde cualquier momento puede producirse un terremoto. En 1995 un terremoto en Japón de magnitud 7 mató a 5420 personas y causó una pérdida económica de 150 billones de dólares, mientras que en 1972 un terremoto de magnitud 6.1 en Nicaragua mató a 10000 personas y causó 2 billones de dólares en pérdidas económicas lo que representa el 40% del producto interno bruto de ese país. Con estos ejemplos podemos decir que las pérdidas económicas son relativas porque pese a que fueron menores en Nicaragua hubo mayor cantidad de personas fallecidas. El diseño sísmo resistente tiene como objetivo reducir el daño en las estructuras, es decir, reducir las pérdidas económicas y al mismo tiempo brindar mayor seguridad a los ocupantes reduciendo la cantidad de muertes que se pueden dar. Volviendo a nuestro país, la norma ecuatoriana de la construcción en el capítulo de peligro sísmico nos especifica claramente el objetivo del diseño sísmo resistente: (Rossetto)

- Prevenir daños en elementos no estructurales y estructurales, ante terremotos pequeños y frecuentes, que pueden ocurrir durante la vida útil de la estructura.
- Prevenir daños estructurales graves y controlar daños no estructurales, ante terremotos moderados y poco frecuentes, que pueden ocurrir durante la vida útil de la estructura.
- Evitar el colapso ante terremotos severos que pueden ocurrir rara vez durante la vida útil de la estructura, procurando salvaguardar la vida de sus ocupantes.

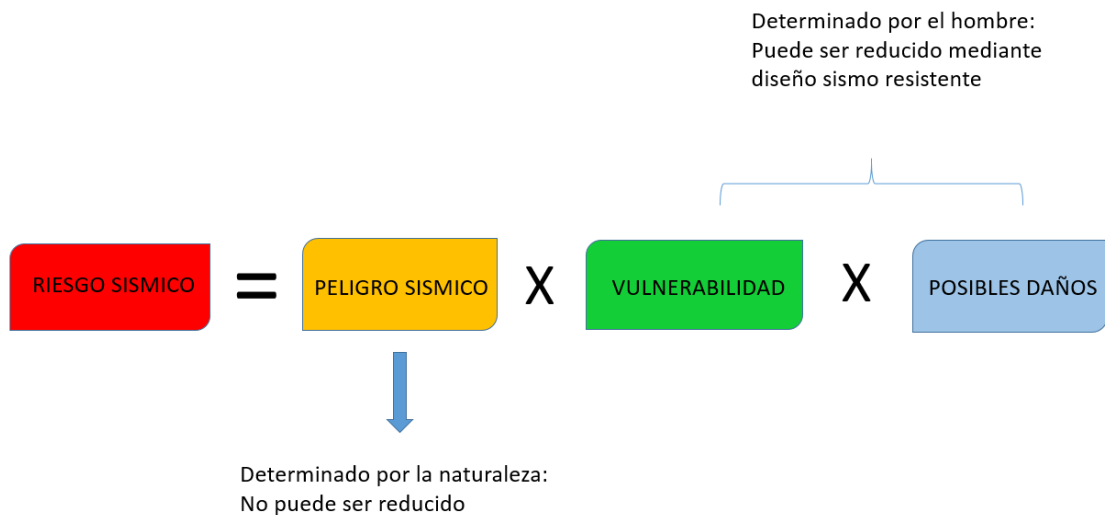
(Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

Los terremotos no los podemos prevenir ni predecir y no es en sí el movimiento del suelo el que produce las pérdidas humanas y materiales, sino el colapso de las estructuras que no fueron diseñadas para soportar fuerzas sísmicas y son muy débiles.

Por varias razones, ya sea la falta de recursos económicos o la irresponsabilidad en algunos sectores del país, no se contrata a un ingeniero para construir las estructuras y los mismos dueños son los encargados de guiar la obra. Estas personas que no son ingenieros no tienen conocimientos suficientes de la norma ecuatoriana de la construcción y se confían del sobre dimensionamiento de los elementos, lo cual es incorrecto. Para este tipo de gente que es complicado la interpretación de la NEC – 15 y sería de mucha ayuda un programa computacional de fácil manejo que les proporcione parámetros o datos para realizar un diseño sismo resistente. El problema radica en que los ingenieros civiles debemos realizar nuestro trabajo con conciencia, sabiendo que debemos diseñar las estructuras con criterios sismo resistentes para salvar la vida de la gente ya que los sismos pueden llegar en cualquier momento y pueden ocasionar grandes pérdidas.



Fuente: (Muñoz, 1989)



Como podemos ver, de los 3 factores que influyen en el riesgo sísmico, dos dependen del ser humano y para que el riesgo sísmico sea bajo el Ingeniero civil debe tener claro que Ecuador es un país de alto riesgo sísmico para lo cual se debe diseñar estructuras sismo resistentes. Por esta razón es importante contar con herramientas computacionales como PUCEstruct que simplifiquen el proceso y nos ayuden con parámetros necesarios para el diseño sismo resistente y reducir el riesgo sísmico.

2.3. Objetivos.

2.3.1. Objetivo general.

Desarrollar y proponer una herramienta computacional que facilite la aplicación del Capítulo de Peligro Sísmico de la Norma Ecuatoriana de la Construcción, NEC-SE-DS, en el ámbito laboral o académico, mediante la automatización de los procedimientos descritos en dicha norma.

2.3.2. Objetivos específicos.

- Identificar los métodos de diseño para la determinación de las fuerzas sísmicas laterales.
- Aplicación del procedimiento para obtener un espectro de respuesta.

- Realizar un diseño de las estructuras que satisfaga la filosofía de diseño propuesta por la NEC.
- Conocer los métodos existentes para llegar de un registro de aceleraciones a un espectro de respuesta.
- Conocer los datos que se deben introducir en el programa para que nos genere la respuesta correcta.
- Presentar una versión inicial del programa PUCEstruct y de su interfaz de usuario que facilite la utilización del capítulo de norma NEC-SE-DS.

2.4. Alcance.

En esta disertación se obtendrán los parámetros necesarios para el diseño sísmico resistente de estructuras tipo edificación, por ejemplo, espectros de diseño, registro sísmico sintético en caso que la estructura sea irregular, fuerzas laterales que deben aplicarse a cada piso, entre otros, basados en el capítulo de peligro sísmico de la norma NEC – 15.

3. DESARROLLO

3.1 Marco Teórico

El capítulo de peligro sísmico de la NEC es una guía indispensable para la construcción de obras civiles en el Ecuador, ya que nos indica requisitos mínimos para el diseño para que las estructuras tengan un comportamiento adecuado en caso de un sismo, precautelando las vidas humanas. En este capítulo se diferencian las dos metodologías para realizar un diseño sísmico, el primero es un diseño basado en fuerzas (DBF) y el segundo es un diseño basado en desplazamientos (DBD). Además en este capítulo se puede conocer los factores que influyen en el grado de afectación que puede causar un sismo a una estructura, por ejemplo el tipo de suelo, la importancia de la estructura, la aceleración máxima en roca, la aceleración en el suelo, la regularidad en planta y en elevación de la estructura, etc.

Para realizar un diseño sismo resistente es indispensable contar con parámetros que nos proporcionan los espectros de respuesta y registros de aceleraciones. En nuestro país no contamos con una base de datos de registros de aceleraciones para realizar análisis dinámicos tiempo-historia, por lo tanto se propone generar registros de aceleraciones sintéticos. El programa englobará todos estos aspectos que nos indica la NEC para entregarnos una respuesta (datos) que serán útiles para el diseño sismo resistente de las estructuras.

Lo que se busca es que el programa procese datos que nosotros los ingenieros vamos a introducir, y nos arroje una respuesta de la estructura sometida a fuerzas sísmicas, refiriéndome a respuesta al corte basal que se generará, a un espectro de respuesta, a la distribución de fuerzas laterales y a un registro de aceleraciones en ciertos casos.

DEFINICIONES:

ACELEROGRAMAS: Registro temporal o cronológico de valores de aceleración que se han registrado durante un sismo.

COEFICIENTE DE IMPORTANCIA.- Coeficiente relativo a las consecuencias de un daño estructural y al tipo de ocupación

CORTANTE BASAL DE DISEÑO.- Fuerza total de diseño por cargas laterales, aplicada en la base de la estructura, resultado de la acción del sismo de diseño con o sin reducción.

ESTRUCTURA.- Conjunto de elementos estructurales ensamblados para resistir cargas verticales, sísmicas y de cualquier otro tipo.

FUERZAS SÍSMICAS DE DISEÑO.- Fuerzas laterales que resultan de distribuir adecuadamente el cortante basal de diseño en toda la estructura.

PERÍODO DE VIBRACIÓN.- Es el tiempo que transcurre dentro de un movimiento armónico ondulatorio, o vibratorio, para que el sistema vibratorio vuelva a su posición original considerada luego de un ciclo de oscilación.

SISMO DE DISEÑO.- Evento sísmico que tiene una probabilidad del 10% de ser excedido en 50 años (período de retorno de 475 años), determinado a partir de un análisis de la peligrosidad sísmica del sitio de emplazamiento de la estructura o a partir de un mapa de peligro sísmico.

Z (factor).- El valor de Z de cada zona sísmica representa la aceleración máxima en roca esperada para el sismo de diseño, expresada como fracción de la aceleración de la gravedad.

REGISTROS SISMICOS SINTETICOS: Son registros de aceleraciones artificiales que se generan mediante diferentes métodos en zonas donde no se cuenta con registros sísmicos, lo cual produce una alta incertidumbre en la respuesta estructural. (Bonett, 2002)

ESPECTRO DE RESPUESTA.- Representación gráfica de la respuesta máxima, expresada en términos de desplazamiento, velocidad o aceleración, que produce una acción dinámica (sismo) en una estructura. En las abscisas se representa el período propio de la estructura y en las ordenadas la respuesta máxima calculada para distintos factores de amortiguamiento. (Crisafulli, 2002)

3.1.1 Norma Ecuatoriana de la Construcción.

Luego del terremoto de magnitud 6.8 en la escala de Richter que sacudió Ambato y poblaciones cercanas en el año de 1949, el gobierno Ecuatoriano se vio en la necesidad de crear un código nacional de la construcción en 1951. En este código se incluyeron requisitos sísmo resistentes y el uso de hormigón armado para la construcción de viviendas. Con algunos sismos posteriores se dieron cuenta la poca elasticidad del hormigón armado ya que se destruyeron totalmente las viviendas hechas de este material, cosa que no ocurrió con casas antiguas de madera o caña guadua.

A lo largo de los años se ha ido actualizando el código ecuatoriano de la construcción debido a que se van creando avances constructivos y nuevos requisitos que se deben cumplir en el diseño de las estructuras y una actualización importante fue en Septiembre del 2011 cuando la Subsecretaría de Hábitat y Asentamientos Humanos del Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI) promovió que se reemplace el código ecuatoriano de la construcción por la Norma ecuatoriana de la construcción (NEC). (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 1976)

3.1.1.1 Capítulo NEC-SE-DS. Peligro Sísmico.

Por la principal razón de que nuestro país está localizado en una zona calificada de alto riesgo sísmico, se incluyó en la norma ecuatoriana de la construcción el capítulo de Peligro Sísmico que tiene como principal objetivo el reducir el riesgo sísmico a niveles aceptables. En este capítulo se muestran una serie de requerimientos que son obligatorios en el diseño de las estructuras que por naturaleza son vulnerables a los terremotos que se pueden presentar a lo largo de su vida.

Cuando se produce un sismo, los ingenieros deseamos que las estructuras se comporten de tal modo que los elementos que las forman no rebasen ningún estado límite de falla de los esfuerzos ya sean de compresión, tracción, cortante, torsión o flexión para que se pueda salvar la vida de las personas que se encuentran en el interior. En la filosofía de diseño sísmo resistente se intenta prevenir daños graves en elementos estructurales y no estructurales ante terremotos pequeños, moderados y severos que pueden ocurrir durante la vida útil de la estructura para velar por la seguridad de las personas.

Para realizar un diseño sísmo resistente de las estructuras, la NEC nos propone dos métodos:

- Diseño basado en fuerzas (DBF): utilizado para cualquier estructura.

- Diseño basado en desplazamientos (DBD): podrá ser utilizado como alternativa al DBF.

En esta disertación de tesis nos centraremos solamente en el diseño basado en fuerzas debido a que es el más utilizado y con el que más familiarizado están la mayoría de los ingenieros civiles del país.

3.1.2. Norma Extranjera de apoyo.

3.1.2.1. ASCE7-10

La mayoría de países alrededor del mundo a lo largo de los años han ido creando sus propios códigos de la construcción, los cuales son de vital importancia en la construcción de las estructuras ya que nos indican requisitos mínimos que debemos cumplir para velar por la seguridad de las personas que van hacer uso de esas estructuras.

El código “Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures” publicado por la American Society of Civil Engineers (ASCE), es uno de los más importantes y que puede servir de ayuda para la creación de códigos de la construcción en otros países debido a la gran potencia mundial que es Estados Unidos. Los avances tecnológicos y la calidad de los ingenieros que participaron en la creación de este código, que se ha ido actualizando permanentemente, han contribuido a que sea conocido a nivel mundial.

Es por esta razón que he tomado este código (ASCE 7-10) como apoyo para realizar algunas similitudes y comparaciones que tiene con nuestro código (NEC1 – 15).

De los 31 capítulos que tiene el ASCE 7-10, 3 son destinados al diseño sismo resistente de las estructuras:

- **Capítulo 11:** Seismic Design Criteria
- **Capítulo 12:** Seismic Design Requirements for Building Structures
- **Capítulo 13:** Seismic Design Requirements for Nonstructural Components

(American Society of Civil Engineers, 2010)

Objetivo

Refiriéndose a los capítulos 11,12 y 13 de la ASCE 7-10 y al capítulo de peligro sísmico de la NEC – 15, se puede decir que tienen en contexto básicamente el mismo objetivo, ya que se quiere reducir el riesgo sísmico tomando en cuenta en el diseño que todos los elementos que forman la estructura sean capaces de resistir las fuerzas laterales y verticales producidas por los sismos, dentro de los límites de deformación.

Procedimiento para la obtención del espectro de respuesta

En este aspecto difieren la norma ecuatoriana de la construcción con la ASCE 7-10 ya que en la NEC – 15 para realizar el espectro de respuesta partimos con el factor z (aceleración máxima esperada en roca), para saber el valor de z existe un mapa de peligro sísmico que se divide en 6 zonas y cada una con un valor diferente de z que puede ir desde 0.15 hasta 0.50. Partiendo con el valor del factor z y relacionándolo con el tipo de suelo de la zona donde se requiera hacer el análisis sísmico ya se puede encontrar los demás coeficientes que se requieren para el espectro de respuesta.

En el ASCE 7-10 se parte de dos valores, S_s y S_1 que se los obtiene de los mapas que fueron realizados por la United States Geological Survey (USGS). S_s es la aceleración de respuesta espectral en un periodo corto de 0.2 segundos donde los valores son menores o iguales a 0.15 y S_1 es la aceleración de respuesta espectral en un periodo de 1 segundo donde los valores son menores o iguales que 0.04. Al igual que en la NEC, aquí también se relacionan estos valores con el tipo de suelo donde se va hacer el análisis y se obtienen los demás coeficientes necesarios para el espectro de respuesta como T_0 , T_s y T_L . (American Society of Civil Engineers, 2010) (International Siesmic Application Technologies, 2014)

3.1.3. Criterios generales de estructuración

Existen varios criterios generales que son de suma importancia y debemos tomarlos en cuenta al momento de realizar el diseño de una estructura, caso contrario, es muy posible que la estructura no se comporte de manera adecuada durante un sismo lo cual le hace más vulnerable a sufrir daños. Los códigos son documentos que se realizan en base a investigaciones realizadas por lo que son de gran importancia al definir requisitos mínimos y ciertos criterios generales de estructuración que el ingeniero debe seguir durante un diseño. Basarnos en los códigos nos permite a los ingenieros reducir la vulnerabilidad sísmica de las

estructuras mejorando en gran medida su resistencia al colapso permitiendo reducir el riesgo sísmico y lo más importante, permitiendo salvar vidas.

A continuación se presentan algunos criterios generales a manera de principios básicos que debemos tomar en cuenta propuestos por el profesor Hugo Bachmann en su artículo titulado “Seismic Conceptual Design of Buildings - Basic principles for engineers, architects, building owners, and authorities”. (Bachmann, 2002)

Principio básico 1. Evitar pisos blandos a nivel de planta baja

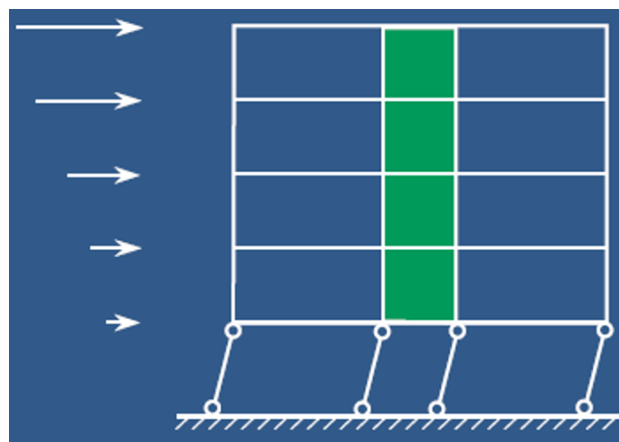


Figura 3.1 Pisos blandos a nivel de planta baja

Fuente: (Bachmann, 2002)

Piso blando se refiere cuando la rigidez lateral de un piso es 70% menor que la rigidez lateral del piso inmediato superior. El piso blando presenta mayor flexibilidad que los demás por lo cual tendrá mayor desplazamiento. Estos casos se suelen dar en edificios donde existe discontinuidad de muros de corte, es decir, en el primer piso no hay muros de corte debido a que tendrá otro tipo de ocupación como locales comerciales y a partir del segunda piso ya se colocan muros de corte. También se puede dar el caso de piso blando cuando la altura del piso de planta baja es mayor que las superiores provocando menor rigidez y mayor deflexión en ese piso.

Principio básico 2. Evitar pisos blandos en pisos superiores

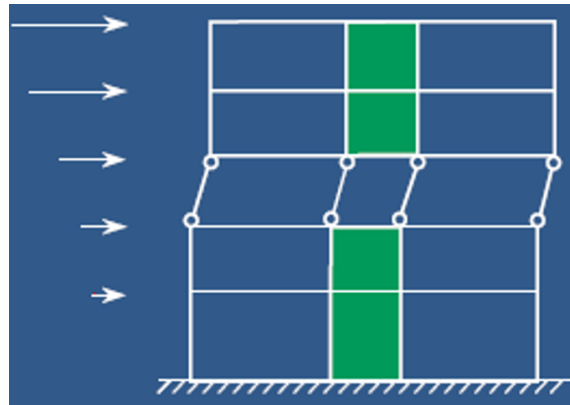


Figura 3.2 Pisos blandos en pisos superiores

Fuente: (Bachmann, 2002)

Al igual que en el principio básico 1, se debe evitar que cualquier piso sea 70% menos rígido que el superior debido a que tendrá mayor ductilidad y el desplazamiento será mayor pudiendo llegar a la falla.

Principio básico 3. Evitar soporte lateral asimétrico en planta

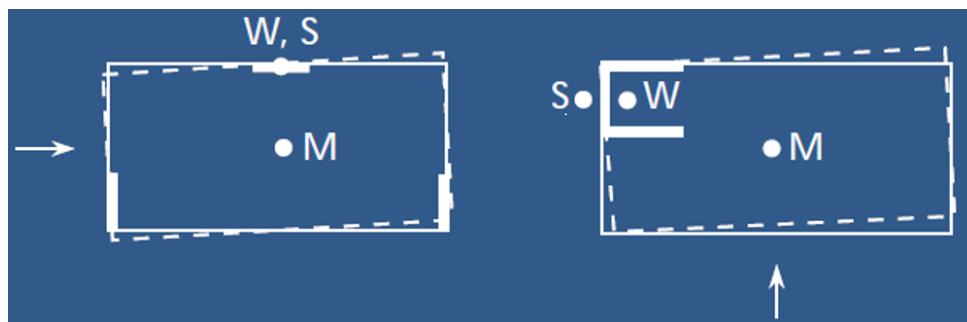


Figura 3.3 Soporte lateral asimétrico en planta

Fuente: (Bachmann, 2002)

Para entender bien este principio debemos tener claro que todas las estructuras tienen un centro de masa y un centro de rigidez en planta. El centro de masas es el lugar geométrico en donde está concentrada la masa y centro de rigidez se entiende como el lugar geométrico donde al aplicar las fuerzas sísmicas, la estructura sufrirá un desplazamiento pero no rotará. Un buen diseño consistirá en colocar elementos de soporte lateral como muros de corte, de manera simétrica para que el centro de masas y el centro de rigidez coincidan o estén lo más cerca posible para que no exista excentricidades. La excentricidad es la distancia tanto

en el eje X con el eje Y que separa al centro de rigidez del centro de masas, estas excentricidades son las que causan torsión o rotación en planta cuando actúan las fuerzas sísmicas llevando posiblemente al colapso de la misma.

Principio básico 4. Evitar discontinuidad en elementos de rigidez y resistencia



Figura 3.4 Discontinuidad en elementos

Fuente: (Bachmann, 2002)

Las variaciones o modificaciones de continuidad de elementos de refuerzo como son los muros de corte puede causar repentinas variaciones en la rigidez y la resistencia de la edificación. Estas discontinuidades pueden interferir en el comportamiento dinámico de la estructura e influyen en la distribución de fuerzas hacia los demás elementos. El caso de la izquierda donde la rigidez y resistencia aumentan desde abajo hacia arriba es más desfavorable que el caso de la derecha donde la rigidez y la resistencia disminuyen de abajo hacia arriba. En los casos donde se colocan muros de corte desde cierto piso en adelante y no desde la base de la estructura, es decir, existe una discontinuidad de los muros de corte también es desfavorable debido a que durante un sismo el muro induce esfuerzos adicionales en las columnas ya cargadas que se encuentran debajo.

Principio básico 5. Considerar al menos 2 muros esbeltos en cada dirección principal

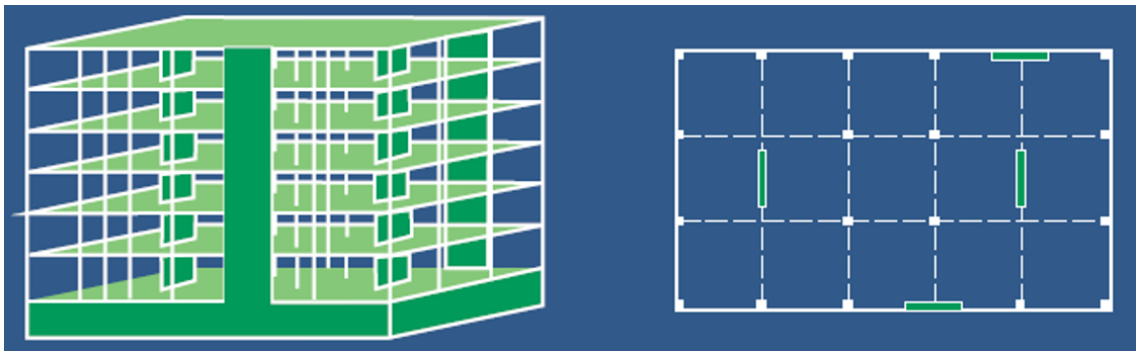


Figura 3.5 Muros de hormigón armado

Fuente: (Bachmann, 2002)

Los muros de hormigón armado son el sistema de refuerzo más utilizado contra las fuerzas sísmicas. Deben ser colocados en toda la altura del edificio sin discontinuidades. Se recomienda colocar dos muros en cada dirección (X y Y) para resistir las fuerzas sísmicas que se producen en las dos direcciones.

Principio básico 6. Evitar sistemas de soporte mixto que incluyan muros de mampostería

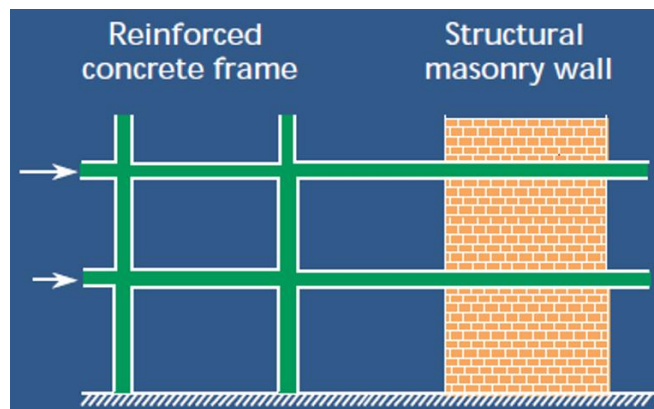


Figura 3.6 Sistemas de soporte mixto

Fuente: (Bachmann, 2002)

La combinación de vigas con columnas forman pórticos que en un diseño correcto distribuyen las fuerzas de manera adecuada, mientras que un muro de mampostería no está diseñado para soportar y distribuir fuerzas inerciales ni sísmicas por lo que pueden fallar. Otra razón por la que no es recomendable esta combinación de muros de mampostería con

pórticos se debe a que el muro de mampostería es menos flexible que los pórticos y las deflexiones serán mayores durante un sismo y pueden colapsar.

Principio básico 7. Evitar sistemas “bracing” con rellenos de mampostería

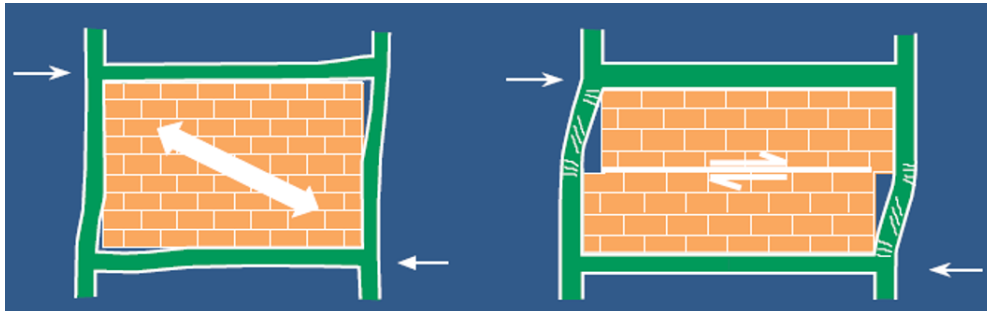


Figura 3.7 sistemas “bracing”

Fuente: (Bachmann, 2002)

Principio básico 8. Rigidizar edificios de mampostería con muros de hormigón armado

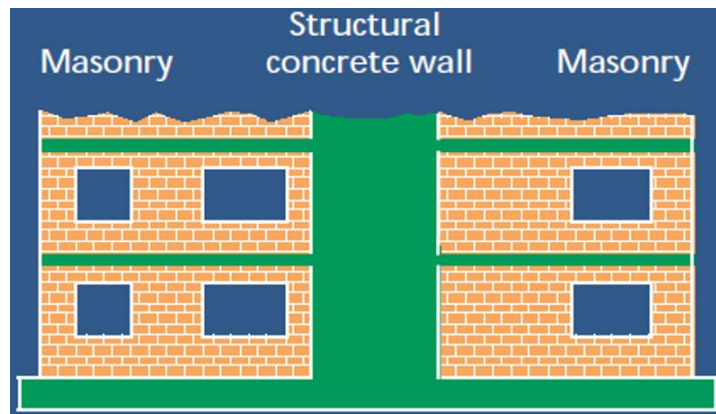


Figura 3.8 Edificios de mampostería con muros de hormigón armado

Fuente: (Bachmann, 2002)

Los muros de hormigón armado son los elementos estructurales que mejor disipan las fuerzas sísmicas, es por esta razón que en edificios de mampostería se recomienda colocar muros debido a que las deformaciones producidas por las fuerzas sísmicas pueden ser excesivas en la mampostería y el muro ayuda a rigidizar la estructura para controlar las deformaciones.

Principio básico 9. Reforzar muros de mampostería para que soporten cargas laterales

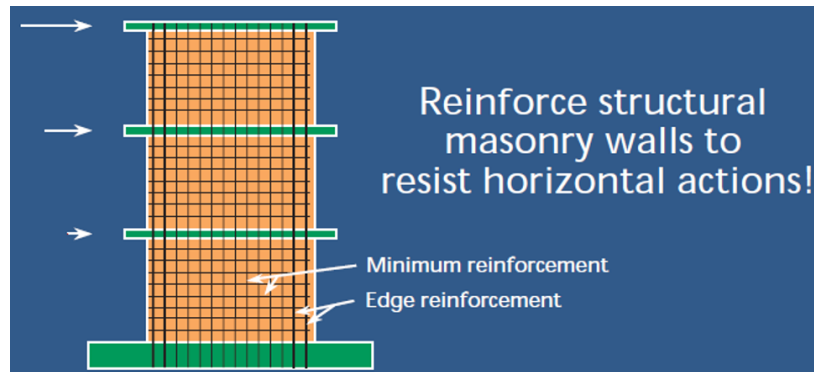


Figura 3.9 Muros de mampostería reforzados

Fuente: (Bachmann, 2002)

Las paredes de mampostería son elementos no estructurales debido a que no transmiten o no disipan fuerzas hacia otros elementos estructurales como vigas o columnas. Por esta razón en algunas edificaciones se opta por reforzar la mampostería con varillas de acero brindándole cierta rigidez para que pueda resistir fuerzas laterales y se convierta en elemento estructural.

Principio básico 10. Empate adecuado de elementos estructurales y no estructurales

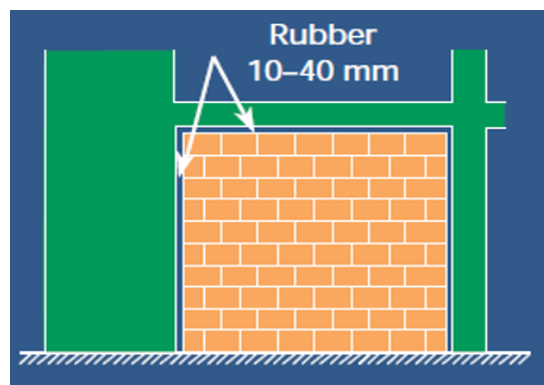


Figura 3.10 Empate de elementos estructurales y no estructurales

Fuente: (Bachmann, 2002)

Es recomendable dejar una junta o un espacio entre la mampostería (elemento no estructural) y los elementos estructurales como columnas o vigas. Esa junta debe ser rellena con un

material flexible como el caucho para que brinde ductilidad a la mampostería y no falle fácilmente cuando actúen las fuerzas sísmicas.

Principio básico 11. Evitar columnas cortas

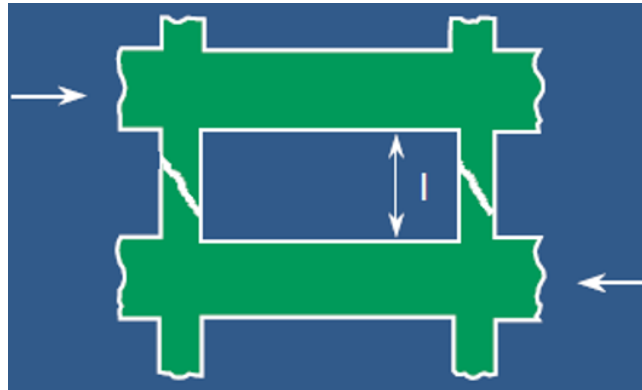


Figura 3.11 Columnas cortas

Fuente: (Bachmann, 2002)

Las fuerzas de corte que se producen en los extremos de la columna son igual a:

$$V = \frac{M_s + M_i}{L}$$

Donde M_s es el momento superior, M_i es el momento inferior y L es la longitud de la columna. En el caso de las columnas cortas los momentos superiores e inferiores son muy grandes debido a su gran rigidez y la longitud L hace que el esfuerzo de corte sea mayor por lo que llevaría a la falla de la columna.

Principio básico 12. Diseño adecuado de diagonales de acero



Figura 3.12 Diagonales de acero

Fuente: (Bachmann, 2002)

En primer lugar se debe realizar un análisis del tipo de diagonales que se requiere en la estructura y las dimensiones y espesor necesarios. Se debe chequear la compatibilidad entre las deformaciones de los demás elementos estructurales y las diagonales, esto puede indicar que se necesita mayor rigidez en las diagonales u otro tipo de arriostramiento.

Principio básico 13. Diseñar juntas de separación entre estructuras contiguas

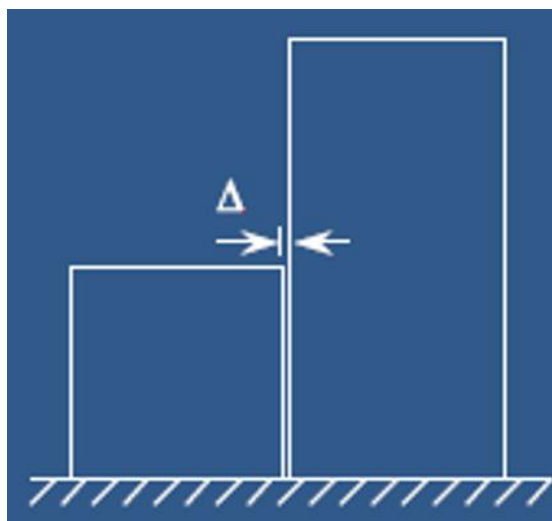


Figura 3.13 Juntas de separación entre estructuras

Fuente: (Bachmann, 2002)

Es importante dejar juntas de separación entre edificios contiguos debido a que en un sismo los dos edificios se van a mover y si están muy pegados pueden chocar. En el capítulo de peligro sísmico de la NEC – 15 se especifica la distancia que se debe dejar entre dos edificios dependiendo de las cotas de los pisos de las dos estructuras.

Principio básico 14. Distribución regular en planta

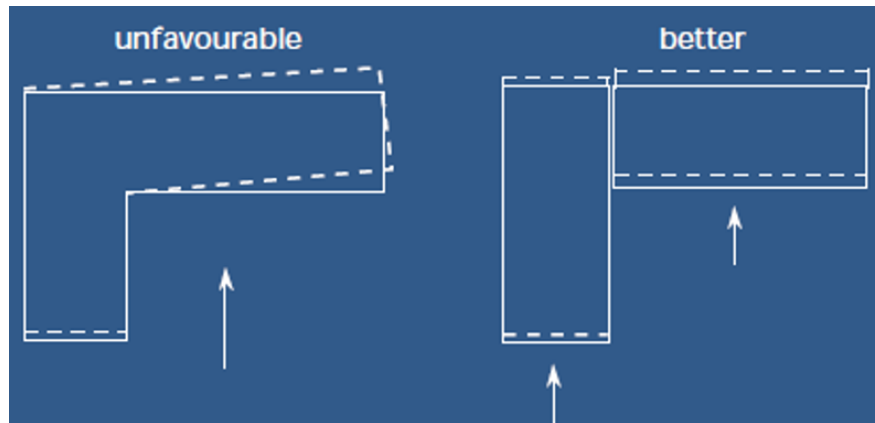


Figura 3.14 Distribución regular en planta

Fuente: (Bachmann, 2002)

Se recomienda la regularidad en planta debido a que en estructuras donde existe irregularidades en planta la rigidez es diferente en los distintos sentidos por lo que se producen esfuerzos de torsión que tienden a rotar a la estructura.

Principio básico 15. Las estructuras en general deben comportarse de manera dúctil

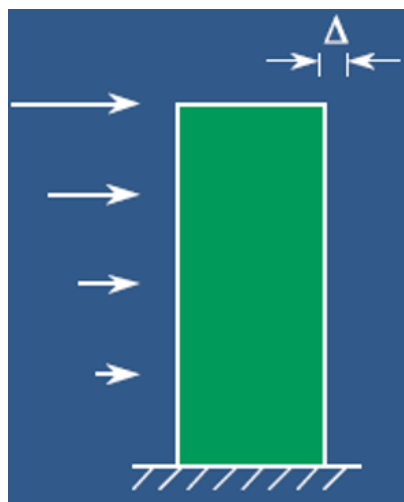


Figura 3.15 Ductilidad en las estructuras

Fuente: (Bachmann, 2002)

La ductilidad es la capacidad que tiene un material para deformarse sin llegar a la falla. Esto quiere decir que las fuerzas producidas por los sismos pueden deformar a la estructura pero debido al material del que este hecha la estructura, esta puede deformarse disipando la energía gracias a la ductilidad del material pero sin llegar a fallar.

Principio básico 16. Realizar un espectro de respuesta del sitio donde se construirá

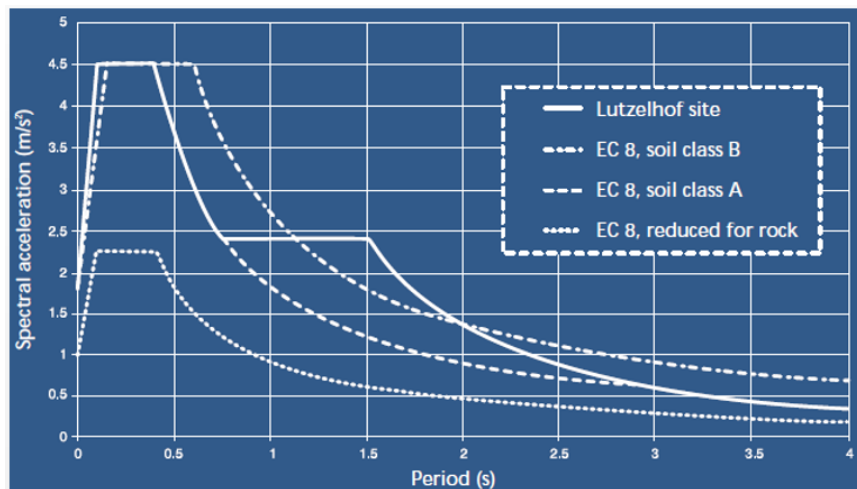


Figura 3.16 Espectro de respuesta

Fuente: (Bachmann, 2002)

El espectro de respuesta nos ayuda a calcular la pseudo aceleración que es necesaria para encontrar el cortante basal que actuará en la base de una estructura dependiendo del periodo de vibración de la misma. Este espectro es específico de cada sitio porque depende de las características del suelo donde se emplazara la estructura. (Bachmann, 2002)

3.2. Reconocimiento de datos.

3.2.1. Datos requeridos de entrada según norma.

“Los requisitos establecidos en este capítulo (Peligro sísmico) son de cumplimiento obligatorio a nivel nacional, por lo tanto, todos los profesionales, empresas e instituciones públicas y privadas tienen la obligación de cumplir y hacer cumplir los requisitos mínimos aquí establecidos” (Norma Ecuatoriana De La Construcción, 2015)

Bases de diseño

Los requisitos que se muestran en la NEC – 15 en el capítulo de peligro sísmico, parten en función de la zona sísmica del Ecuador donde se quiere construir la estructura, del tipo de suelo donde se va a construir, la relación de amplificación espectral, el tipo de uso que se le va a dar, la importancia de la estructura, la regularidad en planta y en elevación de la estructura, el peso de la estructura y el sistema estructural que se utilizará.

3.2.1.1. Zonas sísmicas

En la NEC – 15, en el mapa de peligro sísmico, se ha dividido en 6 zonas al Ecuador, cada zona con un valor diferente del factor z el cual representa la aceleración máxima en roca esperada para el sismo de diseño y los valores son expresados en fracción de la gravedad. Para la elaboración de éste mapa de peligro sísmico, se realizó un estudio de peligro sísmico para un 10% de excedencia en 50 años (periodo de retorno 475 años). (Norma Ecuatoriana De La Construcción, 2015)

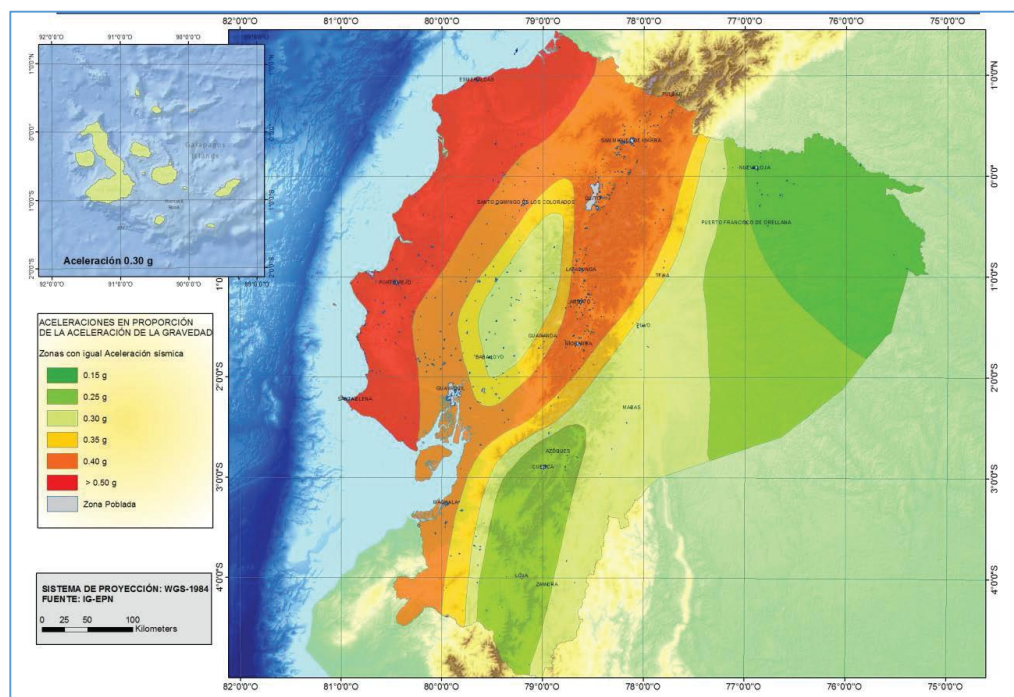


Figura 3.17 Mapa de peligro sísmico del Ecuador

Fuente: (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

Tabla 3.1 Valores del factor z dependiendo de la zona sísmica

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

Fuente: (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

3.2.1.2 Curvas de peligro sísmico

La NEC – 15 nos indica que se debe utilizar diferentes niveles de peligro sísmico para estructuras de ocupación especial, esenciales, puentes, obras portuarias y otras estructuras diferentes a las edificaciones, con el fin de verificar el cumplimiento de diferentes niveles de desempeño.

Se proporcionan curvas de peligro sísmico probabilista para cada capital de provincia para poder definir los diferentes niveles de aceleración sísmica esperada en roca. En las curvas de peligro sísmico se relaciona el valor de la aceleración en el terreno (PGA) con un nivel de probabilidad anual de excedencia y en cada figura se incluyen curvas para períodos estructurales de 0.1, 0.2, 0.5 y 1.0 segundos. (Norma Ecuatoriana De La Construcción, 2015)

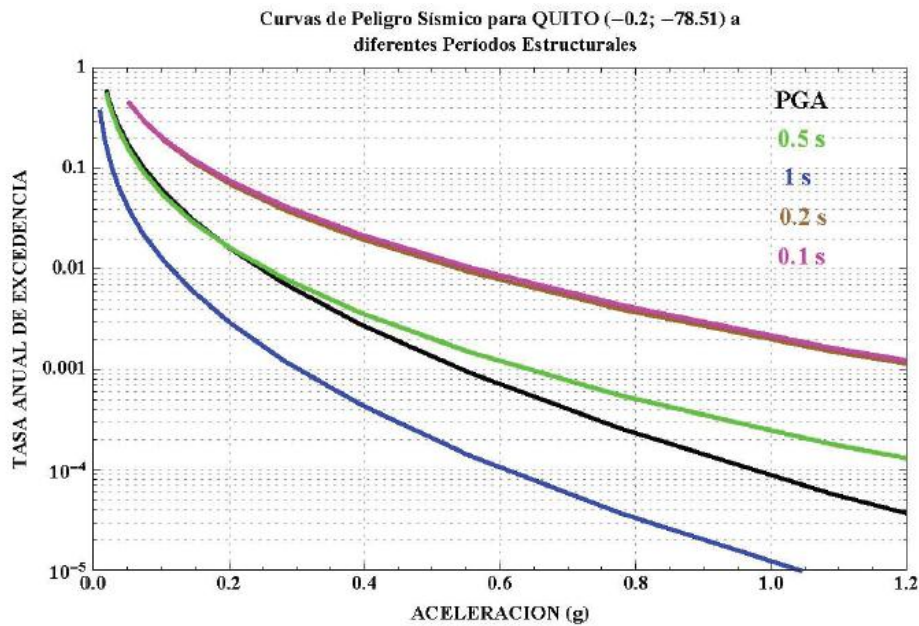


Figura 3.18 Curvas de peligro sísmico para Quito

Fuente: (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

3.2.1.3 Geología local

La respuesta sísmica de la estructura dependerá en gran parte del tipo o perfil de suelo en el cual está construida independientemente del tipo de cimentación que se utilice, ya que hay diferentes tipos de suelo y cada uno con diferentes propiedades. En la NEC – 15 los suelos se dividen en 6 tipos, A, B, C, D, E y F y para poder identificar qué tipo de suelo es el que tenemos es necesario conocer algunos factores como:

- velocidad de la onda cortante **V_s**
- número medio de golpes del ensayo de penetración estándar en cualquier perfil de suelo **N**.
- número medio de golpes del ensayo de penetración estándar (ensayo SPT) para el 60% de la energía teórica, a lo largo de todo el perfil del suelo **N₆₀**.
- Número medio de golpes del ensayo de penetración estándar (para estratos de suelos no cohesivos) **N_{ch}**.
- Resistencia al corte no drenado **Su**.
- Índice de plasticidad **IP**.
- Contenido de agua en porcentaje **w**.

Tabla 3.2 Perfiles de suelo

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

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

Fuente: (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

3.2.1.4 Coeficientes de perfil de suelo Fa, Fd, Fs

Estos 3 coeficientes son indispensables para la generación del espectro de respuesta. Fa amplifica las ordenadas del espectro de respuesta elástico de aceleraciones para diseño en roca, Fd amplifica las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos en roca y Fs considera el comportamiento no lineal de los suelos. Para obtener los valores de estos coeficientes es necesario relacionar la zona sísmica (factor z) y el tipo de suelo donde se va a asentar la estructura.

Tabla 3.3 Coeficiente de sitio Fa

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	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	1.4	1.25	1.1	1.0	0.85
F	Véase Tabla 2 : Clasificación de los perfiles de suelo y la sección 10.5.4					

Fuente: (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

Tabla 3.4 Coeficiente de sitio Fd

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	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	1.36	1.28	1.19	1.15	1.11	1.06
D	1.62	1.45	1.36	1.28	1.19	1.11
E	2.1	1.75	1.7	1.65	1.6	1.5
F	Véase Tabla 2 : Clasificación de los perfiles de suelo y 10.6.4					

Fuente: (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

Tabla 3.5 Coeficiente de sitio Fs

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	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	0.85	0.94	1.02	1.06	1.11	1.23
D	1.02	1.06	1.11	1.19	1.28	1.40
E	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
F	Véase Tabla 2 : Clasificación de los perfiles de suelo y 10.6.4					

Fuente: (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

3.2.1.5 Espectro elástico de diseño

Un espectro de diseño es la envolvente de varios registros de aceleraciones que se han tomado en una misma zona donde se produjo un sismo.

Para la generación del espectro de diseño además de utilizar los coeficientes que se han descrito anteriormente como la zona sísmica (factor z), perfil del suelo y coeficientes de sitio, debemos también conocer la razón entre la aceleración espectral y el PGA (η) y el período fundamental de vibración de la estructura (T).

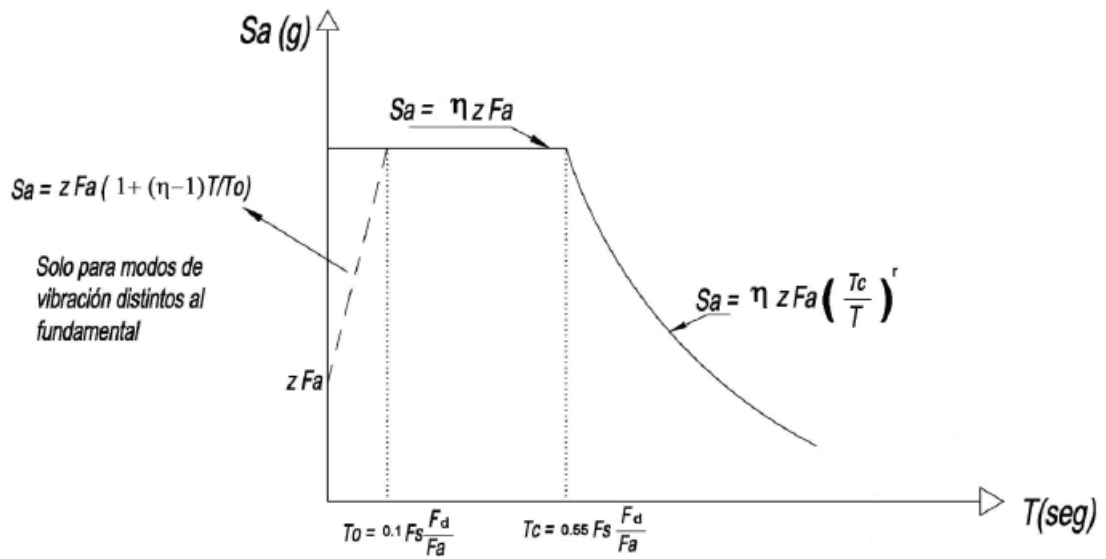


Figura 3.19 Espectro de diseño

Fuente: (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

El período fundamental de vibración de la estructura depende de la altura de la edificación de n pisos (hn) y de un coeficiente que depende del tipo de estructura (Ct).

$$T = Ct * hn^\alpha$$

Tabla 3.6 Coeficientes dependiendo del tipo de estructura

Tipo de estructura	C _t	α
Estructuras de acero		
Sin arriostramientos	0.072	0.8
Con arriostramientos	0.073	0.75
Pórticos especiales de hormigón armado		
Sin muros estructurales ni diagonales rigidizadoras	0.055	0.9
Con muros estructurales o diagonales rigidizadoras y para otras estructuras basadas en muros estructurales y mampostería estructural	0.055	0.75

Fuente: (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

3.2.1.6 Cortante Basal

Además de la generación del espectro de diseño, la NEC – 15 también nos permite encontrar el cortante basal que es indispensable para el diseño de estructuras. El cortante basal es una fuerza lateral que se produce en la base de las estructuras, resultado de la acción de un sismo. (Norma Ecuatoriana De La Construcción, 2015)

Para encontrar esta fuerza lateral necesitamos de varios coeficientes o factores como:

- Coeficientes de configuración en planta y en elevación.
- Coeficiente de importancia de la estructura.
- Factor de reducción de resistencia sísmica.
- Período de vibración.
- Peso total de la estructura (carga muerta).
-

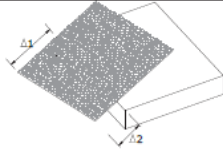
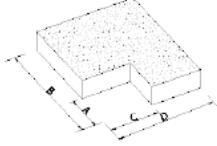
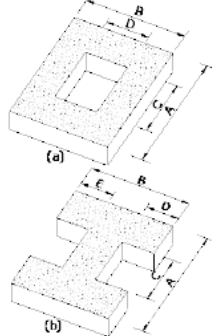
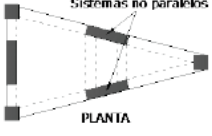
3.2.1.6.1 Coeficientes de configuración en planta y en elevación

Con el paso de los años todo se va modernizando y eso significa que van apareciendo nuevos gustos en la gente y se va dejando de lado lo tradicional, se busca darle un aspecto único a cada obra y ahí es donde aparecen un sin número de formas y estilos diferentes en las estructuras. Todo esto es posible porque la ingeniería civil nos permite construir prácticamente cualquier estructura.

Para lograr que una obra sea única, se busca hacer algo nuevo y diferente y eso implica muchas veces irregularidades tanto en planta como en elevación y es por esta razón que debemos tomar en cuenta los coeficientes de regularidad estructural ya que previenen al diseño de las posibles irregularidades las cuales son las responsables de un comportamiento diferente al ideal en el caso de producirse un sismo.

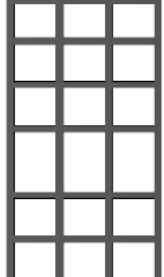
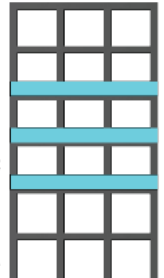
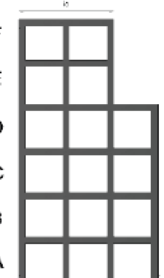
Estos coeficientes lo que hacen es incrementar el valor del cortante basal con el objetivo de brindar mayor resistencia a la estructura, hay que tener en cuenta que esto no quiere decir que se garantice un buen comportamiento de la estructura ante eventos sísmicos y para esto la NEC nos presenta los siguientes casos de irregularidades:

Tabla 3.7 Coeficientes de irregularidad en planta

<p>Tipo 1 - Irregularidad torsional $\phi_{pt}=0.9$ $\Delta > 1.2 \frac{(\Delta 1 + \Delta 2)}{2}$</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>Tipo 2 - Retrocesos excesivos en las esquinas $\phi_{pt}=0.9$ $A > 0.15B$ y $C > 0.15D$</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>Tipo 3 - Discontinuidades en el sistema de piso $\phi_{pt}=0.9$ a) $CxD > 0.5AxB$ b) $[CxD + CxE] > 0.5AxB$</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>Tipo 4 - Ejes estructurales no paralelos $\phi_{pt}=0.9$</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>	

Fuente: (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

Tabla 3.8 Coeficientes de irregularidad en elevación

<p>Tipo 1 - Piso flexible $\phi_E=0.9$ Rigidez $K_c < 0.70$ Rigidez K_D $Rigidez < 0.80 \cdot \frac{(K_D + K_E + K_F)}{3}$</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>Tipo 2 - Distribución de masa $\phi_E=0.9$ $m_D > 1.50 m_E$ ó $m_D > 1.50 m_C$</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>Tipo 3 - Irregularidad geométrica $\phi_E=0.9$ $a > 1.3 b$</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>	

Fuente: (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

3.2.1.6.2 Coeficiente de importancia de la estructura

La filosofía del diseño sísmo resistente principalmente lo que pretende es salvar la vida de la gente que se encuentra dentro de las estructuras pero debemos tener en cuenta que no todas las estructuras tienen la misma importancia, las estructuras o edificaciones donde exista permanentemente concurrencia de bastante gente como centros comerciales, teatros, cines, museos, ministerios, etc deben resistir más la fuerza de un sismo que una casa de dos pisos. Ante eventos de la naturaleza como son los terremotos, deben existir estructuras que no colapsen para que la gente pueda ser atendida como son las clínicas, hospitales, centros de salud, etc. Además los servicios de emergencia también deben estar habilitados y las instalaciones tampoco deben colapsar como bomberos, policía e instalaciones militares. El objetivo de este factor de importancia I es aumentar la demanda sísmica de diseño para las estructuras, que debido a sus características o funciones que se desempeñan en ellas

deben permanecer operativas y sufrir menos daño que otras. (Norma Ecuatoriana De La Construcción, 2015)

Tabla 3.9 Factor de importancia de las estructuras dependiendo del tipo de uso

Categoría	Tipo de uso, destino e importancia	Coefficiente I
Edificaciones esenciales	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 sustancias anti-incendio. Estructuras que albergan depósitos tóxicos, explosivos, químicos u otras sustancias peligrosas.	1.5
Estructuras de ocupación especial	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
Otras estructuras	Todas las estructuras de edificación y otras que no clasifican dentro de las categorías anteriores	1.0

Fuente: (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

3.2.1.6.3 Factor de reducción de resistencia sísmica

El factor de reducción de resistencia (R) está relacionado directamente con la ductilidad de la estructura. La ductilidad es la capacidad que tiene un material para deformarse plásticamente sin llegar a la falla o rotura. Éste factor tiene el objetivo de reducir la fuerza sísmica de diseño tomando en cuenta el grado de ductilidad de la estructura y el diseño adecuado de las conexiones viga columna, en el caso de hormigón se espera la formación de la rótula plástica y en caso de acero se debe verificar la calidad de la soldadura para que en estos dos casos exista una buena distribución de las fuerzas. (Fitzpatrick Engineering Group, 2012)

Tabla 3.10 Factor de reducción de resistencia para sistemas estructurales dúctiles

Sistemas Estructurales Dúctiles	R
Sistemas Duales	
Pórticos especiales sismo resistentes, de hormigón armado con vigas descolgadas y con muros estructurales de hormigón armado o con diagonales rigidizadoras (sistemas duales).	8
Pórticos especiales sismo resistentes de acero laminado en caliente, sea con diagonales rigidizadoras (excéntricas o concéntricas) o con muros estructurales de hormigón armado.	8
Pórticos con columnas de hormigón armado y vigas de acero laminado en caliente con diagonales rigidizadoras (excéntricas o concéntricas).	8
Pórticos especiales sismo resistentes, de hormigón armado con vigas banda, con muros estructurales de hormigón armado o con diagonales rigidizadoras.	7
Pórticos resistentes a momentos	
Pórticos especiales sismo resistentes, de hormigón armado con vigas descolgadas.	8
Pórticos especiales sismo resistentes, de acero laminado en caliente o con elementos armados de placas.	8
Pórticos con columnas de hormigón armado y vigas de acero laminado en caliente.	8
Otros sistemas estructurales para edificaciones	
Sistemas de muros estructurales dúctiles de hormigón armado.	5
Pórticos especiales sismo resistentes de hormigón armado con vigas banda.	5

Fuente: (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

Tabla 3.11 Factor de reducción de resistencia para sistemas estructurales de ductilidad limitada

Sistemas Estructurales de Ductilidad Limitada	R
Pórticos resistentes a momento	
Hormigón Armado con secciones de dimensión menor a la especificada en la NEC-SE-HM , limitados a viviendas de hasta 2 pisos con luces de hasta 5 metros.	3
Hormigón Armado con secciones de dimensión menor a la especificada en la NEC-SE-HM con armadura electrosoldada de alta resistencia	2.5
Estructuras de acero conformado en frío, aluminio, madera, limitados a 2 pisos.	2.5
Muros estructurales portantes	
Mampostería no reforzada, limitada a un piso.	1
Mampostería reforzada, limitada a 2 pisos.	3
Mampostería confinada, limitada a 2 pisos.	3
Muros de hormigón armado, limitados a 4 pisos.	3

Fuente: (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

3.2.1.6.4 Período de vibración

El período de vibración, como los demás factores, es muy importante en el diseño y puede llegar a ser más importante aún por las consecuencias que puede causar un mal cálculo de éste.

El período de vibración es el tiempo necesario en completar una oscilación dentro de una onda. En Ingeniería civil se busca diseñar las estructuras con un período de vibración distinto al periodo de vibración del suelo causado por las ondas sísmicas ya que si la vibración natural de una estructura se iguala a una vibración externa que en este caso son las ondas producidas por un sismo, es decir, tienen el mismo período de vibración, se produce el efecto llamado resonancia donde se aumenta la amplitud del movimiento haciéndolo más grande con consecuencias que pueden llegar al colapso de las estructuras.

Las tablas que nos presenta la NEC – 15 para el cálculo del período de vibración se muestran en la sección ya vista 4.2.1.5.

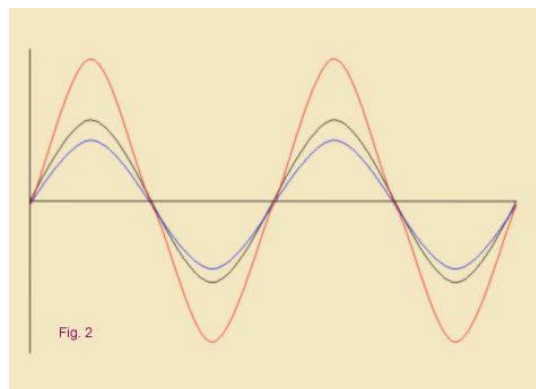


Figura 3.20 Efecto de resonancia

Fuente: (Bassler, 2014)

3.2.1.7 Distribución vertical de fuerzas sísmicas laterales

La fuerza lateral producida por el sismo en la base de la estructura (V) debe ser distribuida en la altura, es decir, en todos los pisos de la edificación para realizar su diseño. La distribución de fuerzas tiene forma triangular, siendo mayor la fuerza que se producirá en el último piso debido a la altura y menor en los pisos cercanos a la base. Los factores que influyen en la distribución del cortante basal son:

- Número de pisos de la estructura.
- Peso de cada piso de la estructura.

- Altura de los pisos.
- Coeficiente relacionado con el período de vibración de la estructura (k).

Para encontrar el coeficiente k es necesario saber el período de vibración de la estructura para entrar a la siguiente tabla:

Tabla 3.12 Coeficiente k

Valores de T (s)	k
≤ 0.5	1
$0.5 < T \leq 2.5$	$0.75 + 0.50 T$
> 2.5	2

Fuente: (Norma Ecuatoriana De La Construcción, 2015)

3.2.2. Procedimientos de diseño recomendados según norma.

Los sismos son eventos producidos por la naturaleza debido a movimiento de placas tectónicas o erupciones de volcanes o también pueden ser inducidos por los seres humanos mediante grandes explosiones o fuertes golpes sobre el suelo.

Los sismos producen en las estructuras fuerzas laterales y desplazamientos que debemos tener en cuenta en el diseño de las estructuras.

Si las estructuras tienen la capacidad de resistir elásticamente las fuerzas de un sismo, es decir, deformarse gracias a la ductilidad sin llegar a fallar, se producirá una relación lineal entre la fuerza que se aplica por el sismo y los desplazamientos, mientras que si las estructuras no tienen la resistencia necesaria debido a la poca ductilidad, la relación entre las fuerzas y el desplazamiento deja de ser lineal y entra en el campo inelástico que puede ser peligroso llevando al colapso de las estructuras.

Para el diseño de las estructuras tomando en cuenta lo dicho anteriormente, la NEC nos presenta dos métodos:

- Diseño basado en fuerzas (DBF)
- Diseño basado en desplazamientos (DBD)

3.2.2.1 Diseño basado en fuerzas (DBF)

En la mayoría de los códigos de la construcción o códigos sísmicos que se utilizan hoy en día para un diseño sismo resistente de estructuras, se parte de un análisis elástico que consiste en brindar cierto grado de ductilidad a las estructuras para que tengan la capacidad de

deformarse dentro de un rango permitido, disipando la energía que producen las fuerzas sísmicas. (ESPOL, 2009)

El método basado en fuerzas consiste en encontrar las fuerzas laterales equivalentes mediante dos tipos de análisis:

- Estático
- Dinámico

3.2.2.1.1 Método estático

Como mínimo se deberá aplicar este método en el análisis y se deberá utilizar el factor z para encontrar el PGA y por consiguiente el espectro en aceleraciones.

3.2.2.1.2 Métodos dinámicos

Este método se utilizará para todo tipo de estructuras exceptuando a las que son totalmente regulares y se dividirá en análisis espectral y análisis paso a paso.

El análisis espectral consiste en la creación de un espectro sísmico de respuesta descrito anteriormente en la sección 4.2.1.5 o construir el espectro utilizando las curvas de peligro sísmico.

El análisis paso a paso en el tiempo consiste en el uso de registros de aceleraciones de una misma zona que fueron tomados por un acelerograma durante eventos sísmicos. (Norma Ecuatoriana De La Construcción, 2015)

Pasos a seguir en el DBF

Los pasos a seguir son los siguientes.

- Determinación del espectro de diseño $S_a(T)$ de acuerdo con las características geotectónicas del lugar de emplazamiento de la estructura
- Cálculo aproximado del período fundamental de vibración aproximado T_a
- Determinación del cortante de base V con los resultados de los pasos anteriores.
- Determinación de las distribuciones vertical y horizontal de V .
- Dirección de aplicación de estas fuerzas sísmicas y verificación de que los índices de deriva no sobrepasen el valor permitido.

(Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

3.2.3. Datos de salida que se obtienen en base a procedimientos de la norma.

El programa PUCEstruct está programado en base a lo que nos indica el capítulo de peligro sísmico de la NEC – 15 y por esta razón los datos de salida o resultados serán:

Espectro de diseño

Es una representación gráfica de la probable respuesta de un suelo ante un movimiento sísmico, comportamiento que se lo puede estimar en base a una serie de registros de acelerogramas de varios sismos que han ocurrido en una misma zona de los cuales se obtienen valores máximos de desplazamiento, velocidad y aceleración para un determinado periodo de vibración. Para obtener como resultado un espectro de diseño debemos ingresar todos los datos anteriormente mencionados.

Registro de aceleraciones

Los acelerogramas recogen datos de tiempo y aceleración durante un evento sísmico, estos datos podemos ingresar al programa PUCEstruct y mediante funciones que tiene el programa Matlab se puede representar gráficamente esos datos dando como resultado un registro de aceleraciones.

Cortante basal

El usuario deberá ingresar algunos datos que el programa le pedirá para realizar el cálculo del cortante basal de la estructura.

Distribución de fuerzas laterales

El cortante basal V se distribuirá en la altura del edificio, la fuerza lateral actuante en cada piso será necesaria para el diseño.

3.3. Estructuración del programa computacional propuesto, PUCEstruct.

Como se ha mencionado anteriormente, se busca que el programa nos entregue como resultado datos que sean necesarios para el diseño sismo resistente entre los cuales está el espectro de diseño. Veamos cómo se puede generar un espectro de diseño a base de registros de aceleraciones.

Debemos empezar idealizando una estructura, y para eso podemos representar gráficamente un sistema de un grado de libertad.

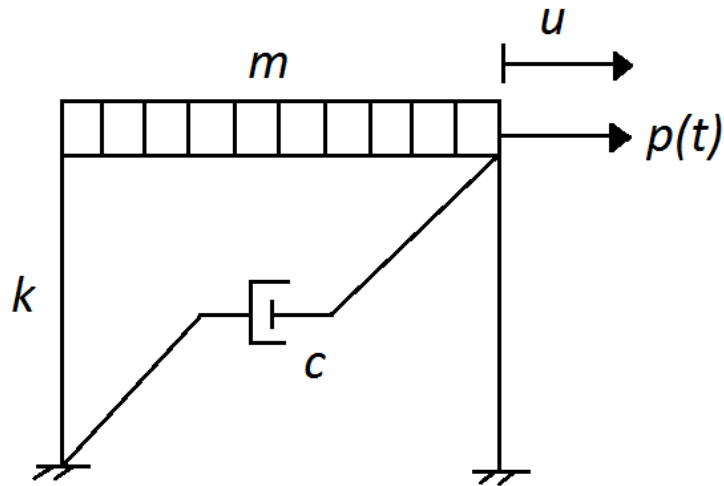


Figura 3.21 Modelación de un sistema de un grado de libertad

m = masa de la estructura

c = coeficiente de amortiguamiento

k = rigidez

$p(t)$ = fuerza externa

u = desplazamiento o deformación

Se **denomina grados de libertad (GDL)** al número de posibles movimientos ya sean de rotación o traslación que se pueden generar en los nudos de la estructura bajo diferentes estados de carga. El análisis estático debe formularse con 3 grados de libertad, desplazamiento lateral y rotación de los dos nudos, pero en este caso idealizaremos un análisis dinámico de la estructura con la masa concentrada en la parte superior y por consiguiente tomando en cuenta solo el desplazamiento lateral, es decir, con un grado de libertad. (Chopra, 2012)

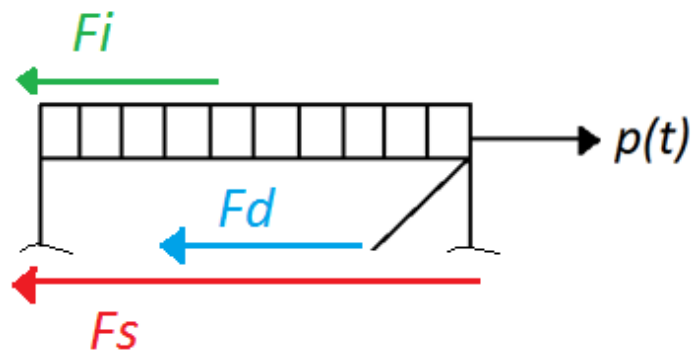


Figura 3.22 Diagrama de cuerpo libre de fuerzas opuestas al movimiento

En la figura 4.5 podemos observar que existen 3 fuerzas que se oponen al movimiento producido por la fuerza $p(t)$, la fuerza inercial (F_i) que depende de la masa y se opone a la aceleración, la fuerza restauradora (F_s)(elástica o inelástica) que toma en cuenta el coeficiente de rigidez que se opone al desplazamiento y la fuerza de amortiguamiento (F_d) que toma en cuenta el coeficiente de amortiguamiento y se opone a la velocidad. Para cumplir el estado de equilibrio de la estructura, la fuerza $p(t)$ será igual a las fuerzas que se oponen al movimiento.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t)$$

Rigidez

Es la capacidad que tiene un elemento estructural para soportar esfuerzos sin adquirir grandes deformaciones o desplazamientos.

El coeficiente k es la constante de proporcionalidad entre la fuerza y el desplazamiento y se lo evidencia en el gráfico fuerza – desplazamiento suponiendo que es una relación lineal ya sean deformaciones pequeñas o grandes.

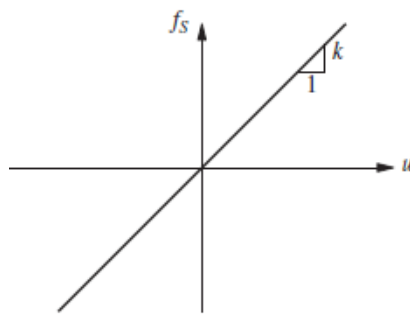


Figura 3.23 Relación lineal fuerza - desplazamiento

Fuente: (Chopra, Relación fuerza-desplazamiento, 2012)

Como sabemos, el material del que este hecho un elemento influye directamente en la rigidez, no es lo mismo un elemento de acero que uno de madera, el primero tendrá mayor rigidez que el segundo.

La inercia es la capacidad que tienen los elementos para oponerse al movimiento. Esta propiedad de los elementos es muy importante tomar en cuenta cuando se habla de rigidez ya que cuando existe mayor sección, existirá mayor inercia y el elemento será más rígido. En Ingeniería no se busca que las estructuras o los elementos que las forman sean muy rígidos debido a que a mayor rigidez el elemento será más frágil y fallara con mayor facilidad. Cuando se diseñan elementos de hormigón, se coloca acero, el cual le brinda ductilidad al elemento. La ductilidad es la propiedad que tienen los elementos para deformarse sin llegar a la falla. Cuando se presentan eventos sísmicos, las estructuras muy rígidas serán las primeras en fallar, mientras que las estructuras que posean ductilidad disipan la energía a través de la deformación.

Amortiguamiento

Es el proceso mediante el cual la amplitud de la vibración libre disminuye de manera constante. El objetivo del amortiguamiento dentro de una estructura es disipar la energía del sistema de vibración mediante diferentes mecanismos. En la figura 4.4 se idealizó a la estructura con un amortiguador de constante c , pero en la realidad las estructuras no se presentan de esa manera. En la realidad, en estructuras que no tienen sistemas de amortiguamiento, se considera que la amplitud de las vibraciones se reducen debido a la fricción en las conexiones de acero, la apertura y cierre de micro fisuras que se han producido

en el hormigón y la fricción que existe entre la propia estructura y los elementos no estructurales como la mampostería.

Para saber el valor de la constante de amortiguamiento c es necesario determinar el valor de la fracción de amortiguamiento ξ . "La constante de amortiguamiento c es una medida de la energía disipada en un ciclo de vibración libre y la fracción de amortiguamiento es una propiedad del sistema que depende de la masa y la rigidez". (Chopra, Vibración libre viscosamente amortiguada, 2012)

Basémonos en la ecuación del movimiento, podemos introducir la fracción de amortiguamiento normalizando la masa de la ecuación:

$$\frac{m * \ddot{u}}{m} + \frac{c * \dot{u}}{m} + \frac{k * u}{m} = 0$$

Donde:

$$C_{cr} = 2 * m * W_n$$

$$W_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$C_{cr} = 2\sqrt{k * m}$$

Además:

$$\xi = \frac{c}{C_{cr}}$$

Reemplazando C_{cr} :

$$\xi = \frac{c}{2 * m * W_n}$$

Despejando c/m :

$$\frac{c}{m} = 2 * \xi * W_n$$

Por lo tanto la ecuación normalizada queda de la siguiente manera:

$$\ddot{u} + (2 \times \xi \times W_n) \times \dot{u} + W_n^2 \times u = 0$$

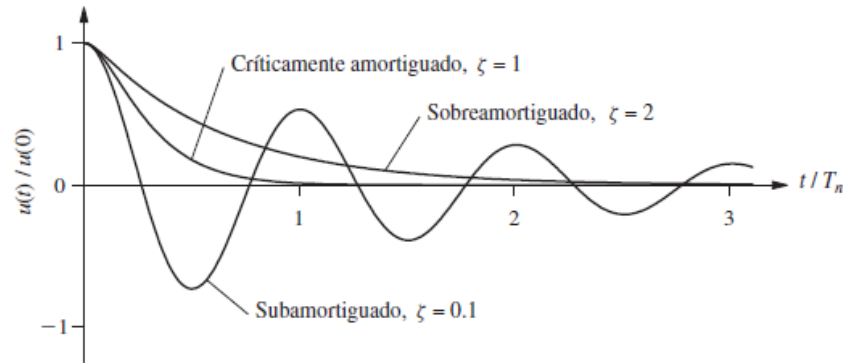


Figura 3.24 Vibración libre de los diferentes tipos de sistemas

Fuente: (Goytia & Villanueva, 2001)

Lo ideal para la obtención del valor de ξ sería tener registros de los movimientos que se producen en diferentes estructuras durante los sismos ya sean edificios, presas, puentes, galpones, etc, y de diferentes materiales como acero, hormigón, hormigón presforzado, madera, mampostería, etc. Esto datos servirían para estimar valores de fracción de amortiguamiento pero esto es muy difícil ya que son muy pocas las estructuras que tienen instalados acelerógrafos permanentes que puedan registrar el movimiento. Por esta razón se ha elaborado una tabla que se basa en los pocos datos que se han obtenido y en opiniones de gente experta en el tema con valores de ξ para diferentes sistemas estructurales.

Tabla 3.13 Valores de fracción de amortiguamiento recomendadas

Nivel de esfuerzo	Tipo y condición de la estructura	Fracción de amortiguamiento
Esfuerzo de trabajo, menor de aproximadamente la mitad del punto de cedencia	Acero con conexiones soldadas, concreto presforzado, concreto debidamente reforzado (sólo agrietamiento leve)	2-3
	Concreto reforzado con grietas considerables	3-5
	Acero con conexiones atornilladas o remachadas, estructuras de madera con uniones clavadas o atornilladas	5-7
En el punto de cedencia o justo debajo de éste	Acero con conexiones soldadas, concreto presforzado (sin pérdida completa en el presfuerzo)	5-7
	Concreto presforzado con pérdida total del presfuerzo	7-10
	Concreto reforzado	7-10
	Acero con conexiones atornilladas o remachadas, estructuras de madera con uniones atornilladas	10-15
	Estructuras de madera con uniones clavadas	15-20

Fuente: (Chopra, Estimación de las fracciones de amortiguamiento modal, 2012)

Como hemos visto, el amortiguamiento ayuda a la estructura a disipar energía. Con el avance de la tecnología y las experiencias vividas con los sismos alrededor del mundo, se crearon dispositivos que se colocan en las estructuras con el único fin de ayudar a disipar la energía durante un sismo, es decir, brindar mayor amortiguamiento a la estructura. Al momento de disipar mejor la energía, se está brindando mayor seguridad a la estructura y a la gente que hace uso de la misma, en el momento de un sismo de fuerte magnitud se puede salvar las vidas de la gente y reducir los daños en los elementos estructurales y no estructurales. El aspecto de reducir los daños en la estructura mediante disipadores de energía está directamente relacionado con ahorro de dinero ya que pueden existir daños al momento de un sismo pero que pueden ser reparables, mientras que en otro escenario donde no existan disipadores de energía los daños serán mayores y la reparación puede ser muy costosa o puede hasta llegar al punto de la demolición de la estructura lo cual es una pérdida económica. A continuación se presentan algunos dispositivos para la disipación de energía.

Amortiguadores de fluido viscoso

Consiste en un líquido generalmente a base de silicona que es forzado a fluir a través de pequeños orificios dentro de un recipiente cerrado, la energía se disipa debido a la fricción que existe entre el fluido y las paredes del orificio. (Chopra, Amortiguadores de fluido viscoso y viscoelásticos, 2012)

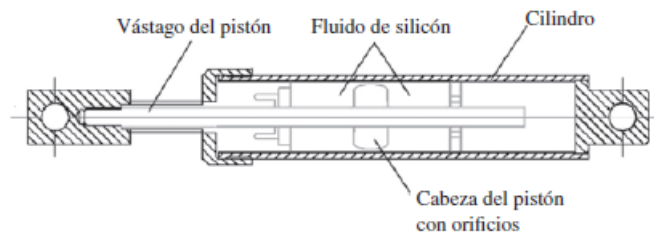


Figura 3.25 Esquema de amortiguador viscoso

Fuente: (Chopra, Amortiguadores viscosos, 2012)



Figura 3.26 Amortiguador viscoso

Fuente: (Chopra, Amortiguadores viscosos, 2012)

Amortiguadores metálicos

Este tipo de amortiguadores disipan energía mediante la deformación del acero, el dispositivo consta de un núcleo de acero confinado en un tubo del mismo material relleno de mortero. El núcleo de acero resiste las cargas axiales mientras que el mortero proporciona soporte lateral impidiendo la deformación. (Chopra, Amortiguadores metálicos histeréticos, 2012)

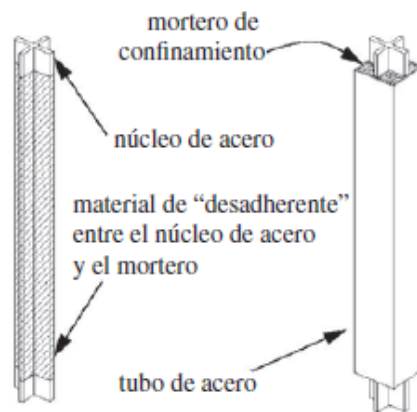


Figura 3.27 Esquema de amortiguador metálico

Fuente: (Chopra, Amortiguadores metálicos, 2012)

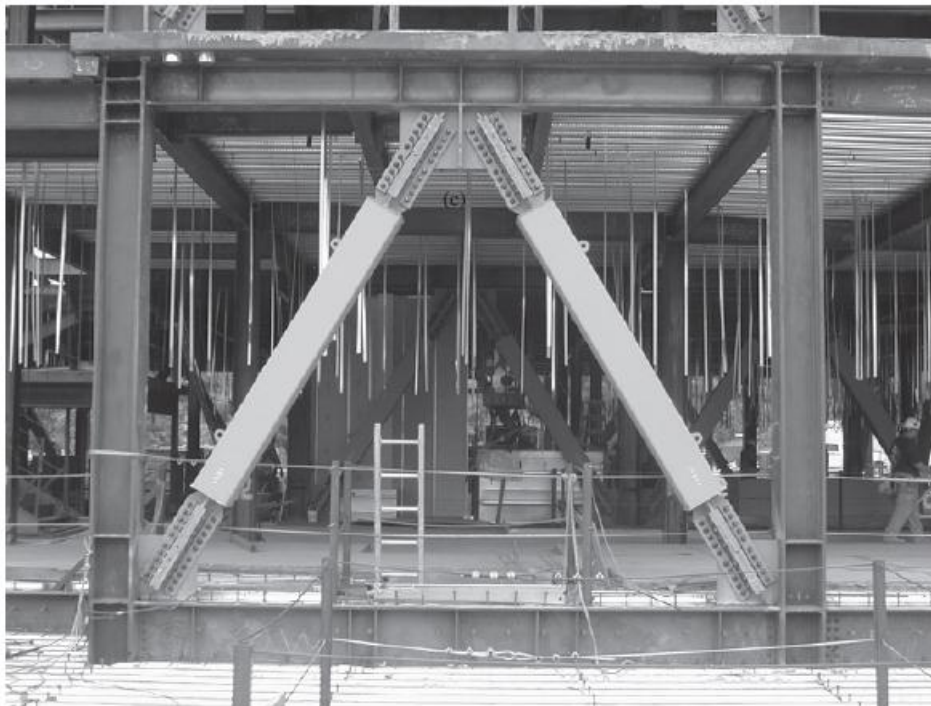


Figura 3.28 Amortiguador metálico

Fuente: (Chopra, Amortiguadores metálicos, 2012)

Amortiguadores de fricción

Este tipo de amortiguadores utilizan la fricción para disipar energía, este sistema se refiere a la conexión atornillada o empernada con ranuras. Al momento de producirse un sismo, las vibraciones que se producen en la estructura se van amortiguando reduciendo la amplitud

mediante el roce o fricción que existe en la conexión apernada con ranura. (Chopra, Amortiguadores de fricción, 2012)

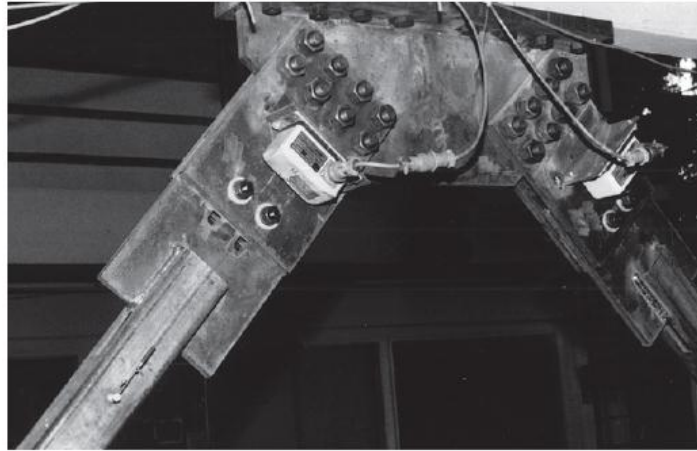


Figura 3.29 Amortiguador de fricción

Fuente: (Chopra, Amortiguadores de fricción, 2012)

Una vez que hemos visto y entendido los factores que se encuentran en la ecuación del movimiento, podemos entrar en el tema de generación de espectros de respuesta.

Para la generación de espectros de respuesta existen algunos métodos como la integral de Duhamel y el método de Newmark. En este caso utilizaré el método de Newmark debido a que su programación en el Matlab es menos compleja que la integral de Duhamel.

Método de Newmark

En el año de 1959, Newmark mediante años de investigación desarrolló este método que nos ayuda a saber la respuesta de las estructuras ante fuerzas externas como los sismos. Las respuestas incluyen desplazamientos, velocidades y aceleraciones. Se toma los valores máximos de las respuestas de desplazamiento, velocidad y aceleración y se los grafica para obtener los espectros de respuesta. (Chopra, Método de Newmark, 2012)

Para empezar su método, Newmark se basa en una supuesta respuesta de aceleraciones de una estructura y toma un intervalo Δt de la respuesta. En este intervalo de Δt , Newmark plantea dos posibilidades, la primera que la aceleración es constante debido al intervalo tan pequeño que se tomó para el análisis y la segunda que la aceleración varía linealmente durante el intervalo.

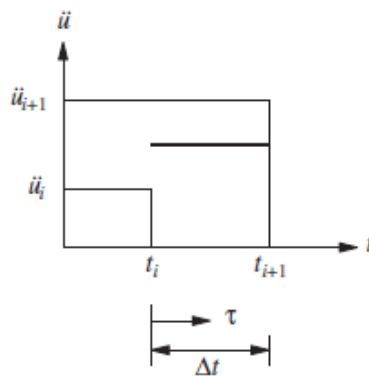


Figura 3.30 Aceleración constante

Fuente: (Chopra, Método de Newmark, 2012)

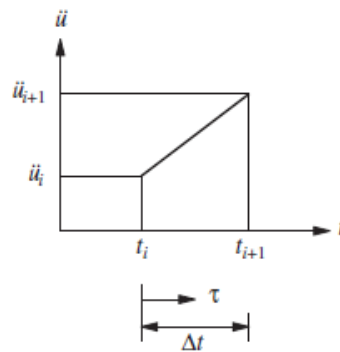


Figura 3.31 Variación lineal de la aceleración

Fuente: (Chopra, Método de Newmark, 2012)

Para el caso de que la aceleración sea constante (Figura 3.12), Newmark describe la aceleración como un promedio entre las dos aceleraciones en el tiempo t_i y t_{i+1} :

$$\ddot{u}(\tau) = \frac{1}{2}(\ddot{u}_{i+1} + \ddot{u}_i) \quad \text{Ecuación 1}$$

Y en el caso de que la aceleración varíe linealmente, la expresa de la siguiente manera:

$$\ddot{u}(\tau) = \ddot{u}_i + \frac{\tau}{\Delta t}(\ddot{u}_{i+1} - \ddot{u}_i) \quad \text{Ecuación 2}$$

Mediante un proceso de integraciones y de reemplazos de las ecuaciones 1 y 2, Newmark obtiene las siguientes ecuaciones:

Para aceleración constante:

$$u_{i+1} = u_i + \dot{u}_i \Delta t + \frac{(\Delta t)^2}{4} (\ddot{u}_{i+1} + \ddot{u}_i) \quad \text{Ecuación 3}$$

Para aceleración variable linealmente:

$$u_{i+1} = u_i + \dot{u}_i \Delta t + (\Delta t)^2 \left(\frac{1}{6} \ddot{u}_{i+1} + \frac{1}{3} \ddot{u}_i \right) \quad \text{Ecuación 4}$$

Las ecuaciones 3 y 4 demuestran los valores de γ y de β que se encuentran en las ecuaciones planteadas por Newmark. γ y β definen la variación de la aceleración durante un intervalo de tiempo y son determinantes en la precisión del método. (Chopra, Método de Newmark, 2012)

Sistemas lineales

Las 3 ecuaciones más importantes en donde se basa el método de Newmark para sistemas lineales son las siguientes:

$$m \ddot{u}_{i+1} + c \dot{u}_{i+1} + k u_{i+1} = p_{i+1} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + [(1-\gamma)\Delta t] \ddot{u}_i + (\gamma \Delta t) \ddot{u}_{i+1} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$u_{i+1} = u_i + (\Delta t) \dot{u}_i + [(0.5 - \beta) (\Delta t)^2] \ddot{u}_i + [\beta(\Delta t)^2] \ddot{u}_{i+1} \quad \text{Ecuación 7}$$

Para los sistemas lineales se puede modificar el procedimiento original de Newmark para poder resolver las ecuaciones 5, 6 y 7 sin iteraciones.

Para lo cual de la ecuación 7, \ddot{u}_{i+1} expresamos en términos de u_{i+1} :

$$\ddot{u}_{i+1} = \frac{1}{\beta(\Delta t)^2} (u_{i+1} - u_i) - \frac{1}{\beta\Delta t} \dot{u}_i - \left(\frac{1}{2\beta} - 1\right) \ddot{u}_i \quad \text{Ecuación 8}$$

Remplazamos la ecuación 8 en la ecuación 6, resulta

$$\dot{u}_{i+1} = \frac{\gamma}{\beta\Delta t} (u_{i+1} - u_i) + \left(1 - \frac{\gamma}{\beta}\right) \dot{u}_i + \Delta t \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right) \ddot{u}_i \quad \text{Ecuación 9}$$

Las ecuaciones 8 y 9 se remplazan en la ecuación del movimiento 5 en el instante $i+1$, debido a que la ecuación resulta muy larga se representa de la siguiente manera

$$\hat{k} u_{i+1} = \hat{p}_{i+1} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde

$$\hat{k} = k + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} c + \frac{1}{\beta (\Delta t)^2} m \quad \text{Ecuación 11}$$

$$\hat{p}_{i+1} = p_{i+1} + \left(\frac{1}{\beta (\Delta t)^2} m + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} c \right) u_i + \left[\frac{1}{\beta \Delta t} m + \left(\frac{\gamma}{\beta} - 1 \right) c \right] \dot{u}_i + \left[\left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) m + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) c \right] \ddot{u}_i \quad \text{Ecuación 12}$$

Los coeficientes del Sistema m , k y c son conocidos, son propiedades de la estructura.

El desplazamiento en el tiempo $i+1$ se calcula como:

$$u_{i+1} = \frac{\hat{p}_{i+1}}{\hat{k}} \quad \text{Ecuación 13}$$

Una vez que obtenemos la ecuación 13 ya completamos las 3 ecuaciones de desplazamiento, velocidad (ecuación 9) y aceleración (ecuación 8) que son necesarias para obtener la respuesta de la estructura. (Chopra, Método de Newmark, 2012)

Los espectros de deformación, pseudo velocidad y pseudo aceleración para un evento sísmico dado, contienen la misma información solo que se representan de diferente formas y es por esta razón que A.Veletsos y N.Newmark en 1960 crearon el espectro tripartito donde se grafican y se muestran las 3 cantidades espectrales. (Chopra, Espectro combinado D-V-A, 2012)

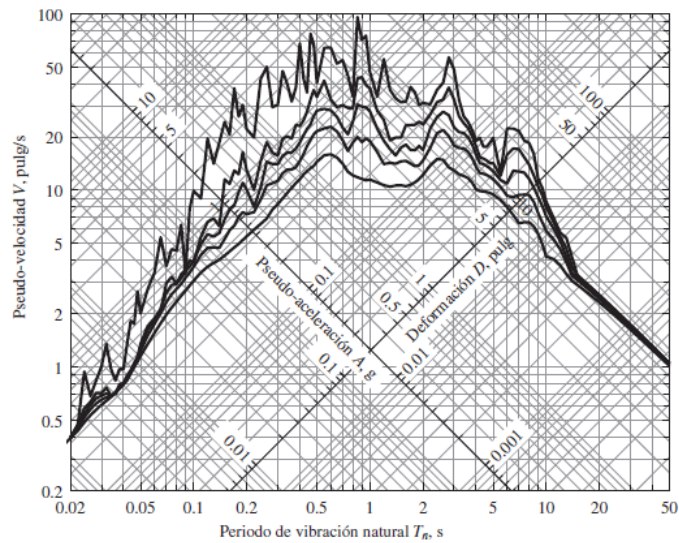


Figura 3.32 Espectro de respuesta combinado D-V-A para el movimiento de un terreno con $\zeta=0.2, 5, 10$ y 20%

Fuente: (Chopra, Espectro combinado D-V-A, 2012)

3.4. MATLAB como herramienta de programación.

Matlab es una herramienta computacional de software matemático con un lenguaje de programación propio que permite al usuario el desarrollo de un sin número de programas. Fue creado por el matemático Cleve Moler en el año de 1984 con el principal objetivo de leer rutinas escritas en otros lenguajes como Fortran y servir de ayuda computacional en cursos de algebra lineal y análisis numérico. (MathWorks, 2004)

Sus principales funciones son:

- Cálculos con el uso de matrices, por eso su nombre MATrix LABoratory (laboratorio de matrices)
- Implementación de algoritmos
- Creación de interfaces de usuario
- Comunicación con programas en otros lenguajes computacionales

3.4.1. Desarrollo de interfaz de ingreso de datos.

Para la conformación del programa PUCEstruct utilizaré GUIDE que es una función muy útil que nos brinda Matlab. GUIDE es un espacio que nos provee de varias herramientas para la creación de interfaces de usuario. Estas herramientas nos simplifican el proceso de programar interfaces de usuario. En GUIDE podemos crear componentes de interfaces de usuario como gráficos, botones, menus, espacios de texto, listas desplegables y muchas cosas más. A todos los componentes les podemos dar la apariencia que nosotros queramos en cuanto a color y forma para hacerlo más amigable con la gente que va a utilizar el programa, es decir, con el usuario.

3.4.2. Desarrollo de procesos de cálculo.

Cuando el usuario presiona algún componente del interfaz de usuario, GUIDE automáticamente ejecuta rutinas de Matlab que se programan en los diferentes componentes mediante la función “callbacks”. Los “callbacks” son funciones que se ejecutan cuando el usuario interactúa con los componentes del interfaz de usuario.

3.4.3. Desarrollo de interfaz de salida de datos.

Una vez que el usuario haya seleccionado cualquiera de las opciones que aparecen en la pantalla del programa PUCEstruct y GUIDE haya ejecutado las rutinas programadas, el programa nos irá guiando y deberemos introducir algunos datos que nos pedirá para posteriormente entregarnos el resultado que solicitamos al momento de presionar cualquier componente del interfaz de usuario.

3.5 Ejemplo de verificación

3.5.1 Aplicación de la norma NEC-SE-DS usando módulo del programa PUCEstruct.

Para la comprobación del funcionamiento del programa PUCEstruct, a continuación realizaré un ejemplo de aplicación del capítulo de peligro sísmico de la NEC – 15 donde calcularé el cortante basal de una estructura.

The screenshot displays the PUCEstruct software interface with the following elements:

- Input Field 1:** "Ingrese el valor de la altura total del edificio en metros :". The value entered is 36.
- Input Field 2:** "El periodo de vibración de la estructura es :". The value entered is 1.26583 seg.
- Form Section:** "Tipo de estructura".
 - Estructuras de acero** (Section Header)
 - Sin arriostramientos
 - Con arriostramientos
 - Pórticos especiales de hormigón armado** (Section Header)
 - Sin muros estructurales ni diagonales rigidizadoras
 - Con muros estructurales o diagonales rigidizadoras y para otras estructuras basadas en muros estructurales y mampostería estructural

A "SIGUIENTE" button is located at the bottom right of the interface.

En primer lugar se debe obtener el periodo de vibración de la estructura para encontrar los límites t_0 y t_c del espectro de diseño. En la siguiente pantalla del programa se debe escoger la zona sísmica y el tipo de suelo donde se va a construir y encontrar el valor de la pseudo aceleración S_a .

Vamos a suponer que la estructura de 10 plantas se va a construir en la ciudad de Quito, entonces escogemos la zona de peligro sísmico número V que es para Quito y escogemos un tipo de suelo. Además debemos escoger el valor de η_a para provincias de la Sierra.

Zona sísmica

- Zona I $z = 0.15$
- Zona II $z = 0.25$
- Zona III $z = 0.30$
- Zona IV $z = 0.35$
- Zona V $z = 0.40$
- Zona VI $z = 0.50$

Perfil de suelo

- Suelo tipo A : Perfil de roca competente
- Suelo tipo B : Perfil de roca de rigidez media
- Suelo tipo C : Perfiles de suelos muy densos o roca blanda
- Suelo tipo D : Perfiles de suelos rígidos
- Suelo tipo E : Perfil donde $V_s < 180\text{m/s}$
- Suelo tipo F : Perfil de turbas y arcillas orgánicas

Valores de η_a

- Provincias de la Costa (excepto Esmeraldas)
- Provincias de la Sierra, Esmeraldas y Galápagos
- Provincias del Oriente

Valor de η_a

$\eta_a = 2.48$

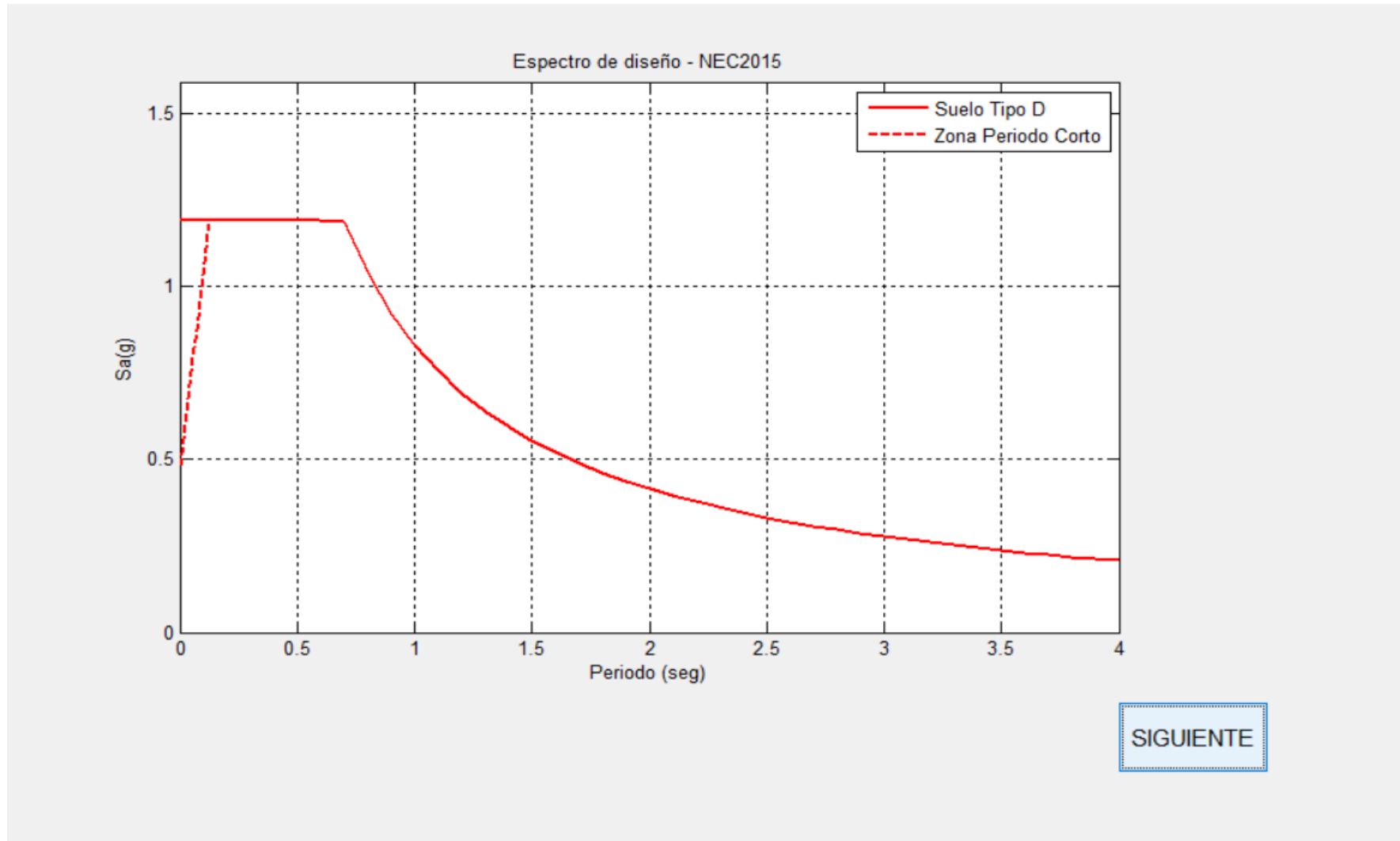
Los factores de suelo son :

$F_a = 1.2$
 $F_s = 1.28$
 $F_d = 1.19$
 $T_0 = 0.12693$
 $T_c = 0.698133$
 $S_a = 0.656533$

CALCULAR

SIGUIENTE

Una vez conocidos los valores de los factores de suelo, el programa nos grafica el espectro de diseño de la estructura.



En la siguiente pantalla se debe escoger el coeficiente de importancia que depende de la función que va a cumplir la edificación. En este caso es un edificio residencial.

Coeficiente de importancia

- Edificaciones esenciales : hospitales, clínicas, centros de salud, instalaciones militares, de policía, bomberos, estructuras que albergan depósitos tóxicos, explosivos, químicos.
- Estructuras de ocupación especial : museos, iglesias, escuelas, centros de educación o deportivos que alberguen más de 300 personas o todas las estructuras que alberguen más de 5000 personas.
- Otras estructuras : todas las estructuras de edificación y otras que no clasifiquen en las anteriores.

Coeficiente de importancia

coeficiente de
importancia = 1.0

SIGUIENTE

Posteriormente se debe escoger el sistema estructural, en este caso la estructura consta de vigas y columnas de acero y losas y muros de hormigón armado.

Sistemas estructurales

Sistemas estructurales dúctiles

Sistemas duales

- Pórticos especiales sismo resistentes, de hormigón armado con vigas descolgadas y con muros estructurales de hormigón armado o con diagonales rigidizadoras.
- Pórticos especiales sismo resistentes de acero laminado en caliente, sea con diagonales rigidizadoras o con muros estructurales de hormigón armado.
- Pórticos con columnas de hormigón armado y vigas de acero laminado en caliente con diagonales rigidizadoras.
- Pórticos especiales sismo resistentes, de hormigón armado con vigas banda, con muros estructurales de hormigón armado o con diagonales rigidizadoras.

Pórticos resistentes a momento

- Pórticos especiales sismo resistentes, de hormigón armado con vigas descolgadas.
- Pórticos especiales sismo resistentes, de acero laminado en caliente o con elementos armados de placas.
- Pórticos con columnas de hormigón armado y vigas de acero laminado en caliente.

Otro sistemas estructurales para edificaciones

- Sistemas de muros estructurales dúctiles de hormigón armado.
- Pórticos especiales sismo resistentes de hormigón armado con vigas banda.

Sistema estructurales de ductilidad limitada

Pórticos resistentes a momento

- Hormigón armado con secciones de dimensión menor a la especificada en la NEC-SE-HM limitadas a viviendas de hasta 2 pisos con luces de hasta 5m.
- Hormigón armado con secciones de dimensión menor a la especificada en la NEC-SE-HM con armadura electrosoldada de alta resistencia.
- Estructuras de acero conformado en frío, aluminio, madera, limitadas a 2 pisos

Muros estructurales portantes

- Mampostería no reforzada, limitada a 1 piso.
- Mampostería reforzada, limitada a 2pisos.
- Mampostería confinada, limitada a 2 pisos.
- Muros de hormigón armado, limitados a 4 pisos.

Factor de reducción de resistencia R :

R = 8.0

SIGUIENTE

En la siguiente pantalla que se despliega del programa debemos elegir entre las opciones de irregularidades en planta y en elevación. El edificio tiene irregularidad geométrica en planta y elevación por lo que se elige la opción que toma en cuenta irregularidades.

Coeficiente de regularidad en planta

Irregularidad torsional, retrocesos excesivos en las esquinas, discontinuidades en el sistema del piso, ejes estructurales no paralelos.

No tiene irregularidades

Coeficiente de regularidad en planta :

fip = 0.90

Coeficiente de regularidad en elevación

Piso flexible, distribución de masa, irregularidad geométrica.

No tiene irregularidades

Coeficiente de regularidad en elevación :

fie = 0.90

SIGUIENTE

También se debe ingresar el peso de la estructura, que sería el último dato necesario para encontrar el cortante basal. Se programó el Software para calcular el peso muerto de una estructura de hormigón con 1Ton/m² incluyendo vigas y columnas y para estructura metálica 0.5 Ton/m².

Peso de la estructura (w)

Ingrese el número de plantas de la edificación:

Ingrese el valor del área promedio de las plantas (m²):

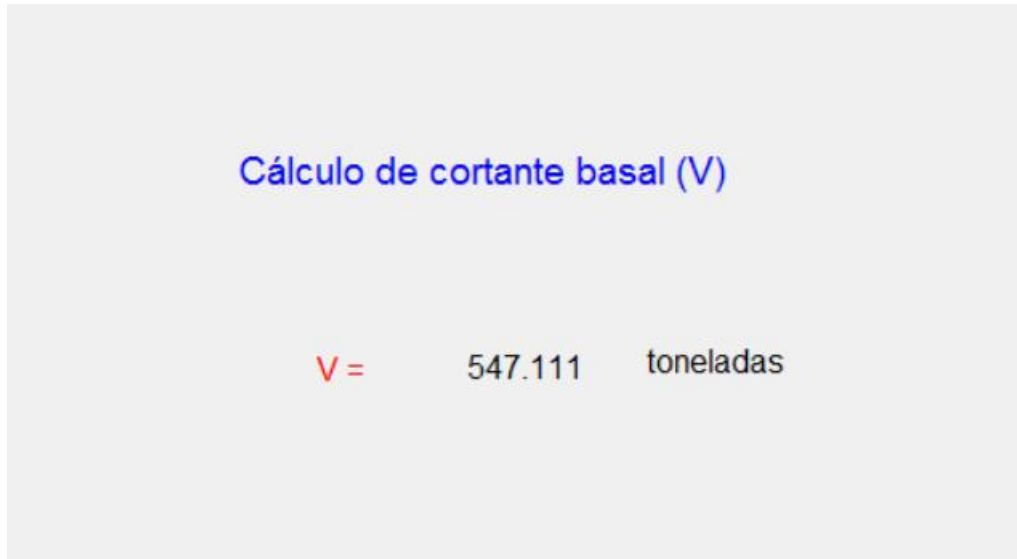
Elija el material de la estructura:

Estructura de hormigón armado

Estructura metálica

Peso total de la estructura (ton):

Finalmente el programa despliega en la pantalla el resultado final del cortante basal.



4. CONCLUSIONES

- Para complementar la información que se encuentra en la NEC – 15 sería de gran ayuda implementar capítulos de comentarios como se lo hizo en la ASCE 7-10, estos capítulos ayudan al lector a comprender mejor la información.
- El programa PUCEstruct está basado únicamente en la NEC – 15, ya que es el documento aprobado por el ministerio de desarrollo y por la CAMICON para su uso obligatorio en el diseño sismo resistente de estructuras.
- Los programas computacionales son de mucha ayuda para los ingenieros civiles y el programa PUCEstruct es una innovación a la aplicación de la norma ecuatoriana de la construcción.
- El programa PUCEstruct fue creado para que sea de fácil manejo por el usuario por lo que se organizó la información de acuerdo a temas que se relacionan y no de acuerdo a los capítulos que encuentran en la NEC – 15.
- La fácil interpretación del programa es la clave para que sea útil para el usuario y en este caso se intentó hacer lo más didáctico posible el programa, habiendo atrás de todo unas largas y complejas rutinas que el programa las va ejecutando.
- Se ha logrado realizar un programa que sea de fácil interpretación con resultados confiables para que sirva de apoyo a profesionales, docentes y estudiantes.
- Es indispensable realizar un diseño sismo resistente de las estructuras que se van a construir debido a que Ecuador está ubicado en una zona de alto riesgo sísmico y el programa PUCEstruct nos entrega datos que son necesarios para realizar dicho diseño.

- Uno de los deberes de los ingenieros civiles es construir estructuras seguras que se comporten de manera adecuada durante un sismo ya que hay gente que hace uso de las mismas y debemos velar por sus vidas.

5. RECOMENDACIONES

- Se recomienda estar en permanente actualización de la Norma Ecuatoriana de la Construcción debido a que cada vez se realizan más investigaciones las cuales sirven para mejorar el diseño sismo resistente de las estructuras. Estas actualizaciones de la NEC también pueden ser modificadas en las rutinas del programa y así mejorar el programa PUCEstruct.
- El programa PUCEstruct puede servir como el inicio de un gran programa que se puede lograr complementándolo con otros temas como puede ser diseño de elementos estructurales o con otros capítulos de la NEC – 15 que al igual que el capítulo de peligro sísmico son de uso obligatorio para el diseño de estructuras.
- Se recomienda optimizar las rutinas de las aplicaciones que tiene el programa PUCEstruct, de esa manera se puede reducir el espacio que ocupa el programa en la computadora y aumentar otras aplicaciones sin problema.

6. BIBLIOGRAFÍA

- American Society of Civil Engineers. (2010). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. Virginia: American Society of Civil Engineers.
- AstroCiencias. (21 de Abril de 2016). *Principales Terremotos en el Ecuador*. Obtenido de <http://astrocienciasecu.blogspot.com/2016/04/principales-terremotos-en-el-ecuador.html>
- Bachmann, H. (2002). *Seismic Conceptual Design of Buildings - Basic principles for engineers, architects, building owners, and authorities*. Zurich: Swiss Federal Office for Water and Geology.
- Barberá, J. C. (21 de Enero de 2013). *Escalas sísmicas*. Obtenido de <https://aulablogdebiologia2.wordpress.com/2013/01/21/escalas-sismicas/>
- Bassler, G. (29 de Junio de 2014). *Las ondas de Schumann*. Obtenido de <https://millenio.wordpress.com/2014/06/29/la-resonancia-schumann-o-el-latido-de-la-tierra/>
- Bolt, B. (2003). Terremotos. En B. Bolt, *Terremotos* (pág. 51). Barcelona: Reverté.
- Bonett, R. (2002). *Generacion de acelerogramas artificiales compatibles con un espectro de respuesta*.
- Chopra, A. (2012). Amoriguadores metálicos histeréticos. En A. Chopra, *Dinámica de estructuras* (pág. 287). California: Pearson education.
- Chopra, A. (2012). Amortiguadores de fluido viscoso y viscoelásticos. En A. Chopra, *Dinámica de estructuras* (págs. 284-286). California: Pearson education.
- Chopra, A. (2012). Amortiguadores de fricción. En A. Chopra, *Dinámica de estructuras* (pág. 287). California: Pearson education.
- Chopra, A. (2012). Amortiguadores metálicos. En A. Chopra, *Dinámica de estructuras* (pág. 286). California: Pearson education.
- Chopra, A. (2012). Amortiguadores viscosos. En A. Chopra, *Dinámica de estructuras* (pág. 285). California: Pearson education.
- Chopra, A. (2012). Espectro combinado D-V-A. En A. Chopra, *Dinámica de estructuras* (pág. 212). California: Pearson education.
- Chopra, A. (2012). Espectro combinado D-V-A. En A. Chopra, *Dinámica de estructuras* (pág. 213). California: Pearson education.
- Chopra, A. (2012). Estimación de las fracciones de amortiguamiento modal. En A. Chopra, *Dinámica de estructuras* (pág. 454). California: Pearson education.

- Chopra, A. (2012). Método de Newmark. En A. Chopra, *Dinámica de estructuras* (pág. 175). California: Pearson education.
- Chopra, A. (2012). Método de Newmark. En A. Chopra, *Dinámica de estructuras* (pág. 175). California: Pearson education.
- Chopra, A. (2012). Método de Newmark. En A. Chopra, *Dinámica de estructuras* (págs. 175-177). California: Pearson education.
- Chopra, A. (2012). Relación fuerza-desplazamiento. En A. Chopra, *Dinámica de estructuras* (pág. 8). California: Pearson education.
- Chopra, A. (2012). Sistema de un grado de libertad. En A. Chopra, *Dinámica de estructuras* (págs. 7-8). California: Pearson Education.
- Chopra, A. (2012). Vibración libre viscosamente amortiguada. En A. Chopra, *Dinámica de estructuras* (pág. 48). California: Pearson education.
- Convergencia y divergencia*. (3 de Abril de 2013). Obtenido de <http://csdelatierraconcordia.blogspot.com/2013/04/bordesconvergentes-divergencia-y.html>
- Crisafulli, F. (2002). *Espectros de respuesta y de diseño*.
- Escobar, C. (20 de Mayo de 2013). *Como actúan las ondas sísmicas en un terremoto*. Obtenido de <http://emergenciasismica.blogspot.com/2013/05/como-actuan-las-ondas-sismicas-en-un.html>
- ESPOL. (Noviembre de 2009). *Diseño basado en desplazamientos, una alternativa racional al diseño basado en fuerzas*. Obtenido de <http://learningobjects2006.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/article/viewFile/130/74>
- Fitzpatrick Engineering Group. (25 de Marzo de 2012). *Seismic Response Modification Factor - R*. Obtenido de <http://www.fegstructural.com/announcements/seismic-response-modification-factor-r>
- Gore, S. (31 de Octubre de 2012). *Física-Ondas*. Obtenido de <http://fisicaiicamacho.blogspot.com/2012/10/onda-senoidal-una-senoidal-esta-por-un.html>
- Goytia, I., & Villanueva, R. (2001). Vibración libre con amortiguamiento viscoso. En I. Goytia, & R. Villanueva, *Texto guía de Ingeniería Antisísmica* (pág. 33).
- IES-SUEL. (15 de Octubre de 2009). *Fallas geológicas*. Obtenido de <http://www.slideshare.net/iessuel/fallas-geologicas>
- INOCAR. (s.f.). *Eventos en el Ecuador*. Obtenido de <http://www.inocar.mil.ec/web/index.php/que-son-los-tsunamis/73-eventos-en-el-ecuador>

- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (1976). Guía popular de construcción sismo resistente. En I. E. Normalización, *Guía popular de construcción sismo resistente* (págs. 1-2). Quito: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- Instituto Geofísico. (s.f.). *Red Nacional de Acelerógrafos*. Obtenido de <http://www.igepn.edu.ec/red-nacional-de-acelerografos>
- Instituto Geofísico. (s.f.). *Red Nacional de Sismógrafos*. Obtenido de <http://www.igepn.edu.ec/red-nacional-de-sismografos>
- International Siesmic Application Technologies. (2014). *Seismic Ground Motion Values*. Obtenido de <http://www.isatsb.com/Seismic-Ground-Motion-Values.php>
- Kramer, S. (1996). Earthquake Energy. In S. Kramer, *Geotechnical Earthquake Engineering* (p. 50). New Jersey: MEG WEIST.
- Lutgens, T. &. (2001). *Diferencia entre magnitud momento y magnitud Richter*. Obtenido de <http://rsn.ucr.ac.cr/index.php/faq/sismologia/2326-cual-es-la-diferencia-entre-magnitud-momento-y-magnitud-richter>
- MathWorks. (2004). *The origins of MATLAB*. Obtenido de <https://www.mathworks.com/company/newsletters/articles/the-origins-of-matlab.html>
- Muñoz, D. (1989). *Conceptos básicos en riego sísmico*. Obtenido de <https://revistas.ucm.es/index.php/FITE/article/download/.../12605>
- Muñoz, J. A. (2001). *Movimientos sísmicos*. Obtenido de <http://recursostic.educacion.es/ciencias/biosfera/web/alumno/4ESO/MedioNatural2/contenido2.htm>
- Murota, T. (Marzo de 2004). *Concepto de la regulacion del diseño sísmico de construcciones en Japón*. Obtenido de <http://cidbimena.desastres.hn/docum/crid/Marzo2004/pdf/eng/doc11818/doc11818-c.pdf>
- Norma Ecuatoriana De La Construcción. (2015). Alcances del capítulo y objetivos de seguridad sísmica. En N. E. Construcción, *Norma Ecuatoriana De La Construcción* (pág. 24). Quito: MIDUVI.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2015). Categoría de edificaciones y coeficiente de importancia I. En N. E. Construcción, *Peligro Sísmico* (pág. 39). Quito: MIDUVI.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2015). Coeficientes de perfil de suelo. En N. E. Construcción, *Peligro Sísmico* (págs. 31-32). Quito: MIDUVI.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2015). Curvas de peligro sísmico. En N. E. Construcción, *Peligro Sísmico* (pág. 111). Quito: MIDUVI.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2015). Diseño basado en fuerzas. En N. E. Construcción, *Peligro Sísmico* (pág. 62). Quito: MIDUVI.

- Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2015). Ductilidad y factor de reducción de resistencia sísmica R. En N. E. Construcción, *Norma Ecuatoriana de la Construcción* (pág. 65). Quito: MIDUVI.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2015). Espectro elástico de respuesta. En N. E. Construcción, *Peligro Sísmico* (pág. 33). Quito: MIDUVI.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2015). *Peligro Sísmico*. Quito: MIDUVI.
- Norma Ecuatoriana De La Construcción. (2015). *Peligro Sísmico*. Quito: MIDUVI.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2015). Procedimiento de cálculo del DBF. En N. E. Construcción, *Norma Ecuatoriana de la Construcción* (págs. 60-61). Quito: MIDUVI.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2015). Regularidad/configuración estructural. En N. E. Construcción, *Peligro Sísmico* (págs. 50-51). Quito: MIDUVI.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2015). Tipos de perfiles de suelos para el diseño sísmico. En N. E. Construcción, *Peligro Sísmico* (pág. 30). Quito: MIDUVI.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2015). Zonificación sísmica y factor de zona z. En N. E. Construcción, *Peligro Sísmico* (pág. 27). Quito: MIDUVI.
- Olshansky, R. (1998). *Promoting the Adoption and Enforcement of Seismic Building Codes*. Illinois: Otto-Walker Communications.
- Pacific Earthquake Engineering Research Center. (2007, Abril 18). *Background of Seismic Codes and Performance Expectations*. Retrieved from http://peer.berkeley.edu/tbi/wp-content/uploads/2010/09/performance_background.pdf
- Pascual. (13 de Octubre de 2014). *Escala sismológica de magnitud de momento*. Obtenido de <http://www.esascosas.com/escala-sismologica-de-magnitud-de-momento/>
- Rossetto, T. (s.f.). *Earthquake Engineering*. Obtenido de <http://www.ucl.ac.uk/EarthSci/people/sammonds/17%20Earthquake%20engineering.pdf>
- Sistema de alerta temprana de sismos Escuela Industrial . (2014). *Ondas sísmicas*. Obtenido de http://www.oni.escuelas.edu.ar/2014/SAN_JUAN/1882/Ondas%20S%C3%ADsmicas.html#
- U.S. Geological Survey . (s.f.). *Plate Tectonics and the Hawaiian Hot Spot*. Obtenido de <http://geology.com/usgs/hawaiian-hot-spot/>
- Velazquez, V. (17 de Junio de 2012). *Geografía y medio ambiente*. Obtenido de <http://geografiaymedioambiente.blogspot.com/2012/06/1.html>