

Universidad Latina de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Civil
Estructuras de Concreto II (LIC 25)

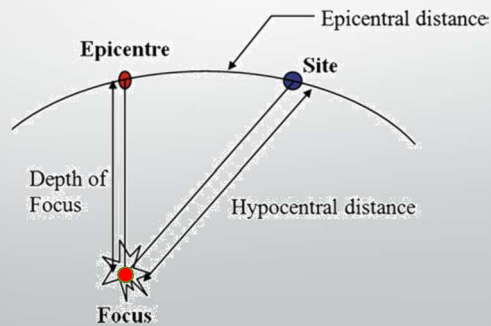


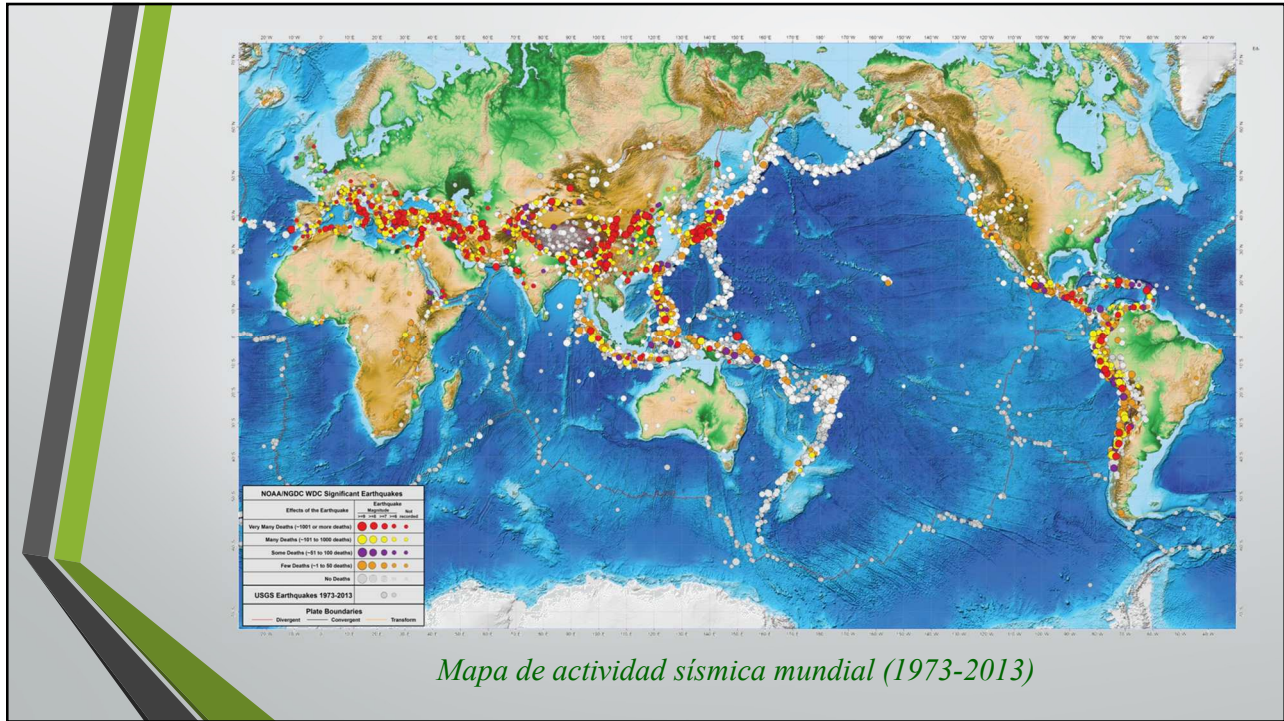
Prof.: Ing. Ronald Jiménez Castro
III Cuatrimestre, 2022

Conceptos básicos de sismología

Los sismos o terremotos, son súbitas liberaciones de energía en el foco o hipocentro que se acumula bajo la corteza terrestre como consecuencia de las fuertes presiones en su interior y que se manifiestan en forma de vibraciones y desplazamientos de la superficie terrestre (epicentro) sobre la cual se cimentan las estructuras.

A principios del siglo XX, se establecieron las primeras estaciones sismológicas en varios países alrededor del mundo mediante instrumentos sensibles, iniciándose así el registro instrumental de las ondas sísmicas generadas por terremotos lejanos. Con el tiempo se fue dibujando un mapa sobre la distribución de los sismos y sobre la actividad sísmica en el mundo.



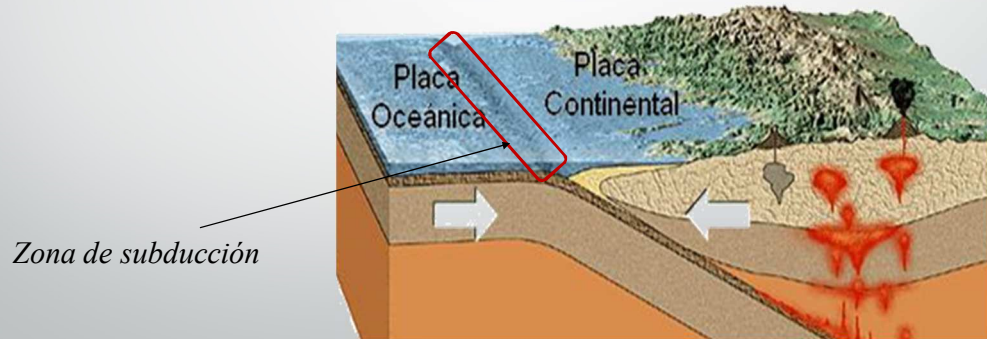


Procesos tectónicos

De acuerdo con la Teoría de la Tectónica de Placas, la corteza terrestre está dividida en placas que se desplazan lateralmente unas respecto a otras.

La mayor parte de la actividad sísmica en el mundo está asociada, directa o indirectamente, con el movimiento relativo de las placas litosféricas y con su interacción a lo largo de las zonas de contacto.

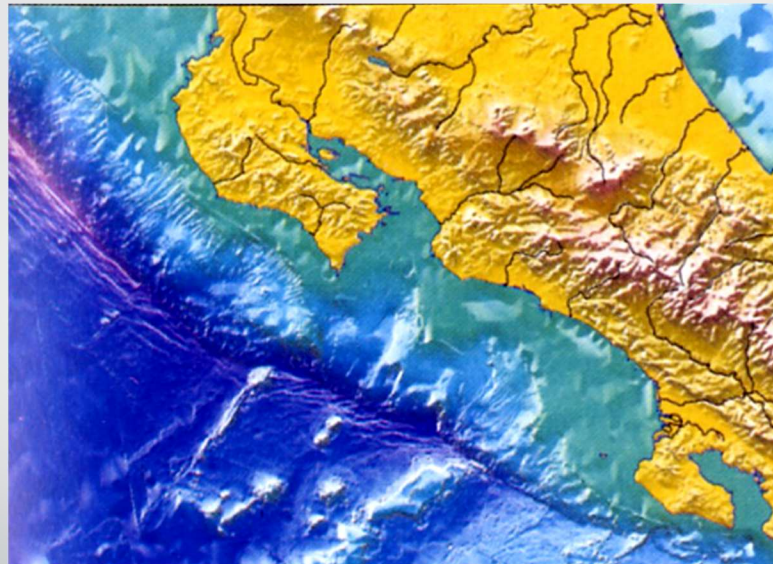
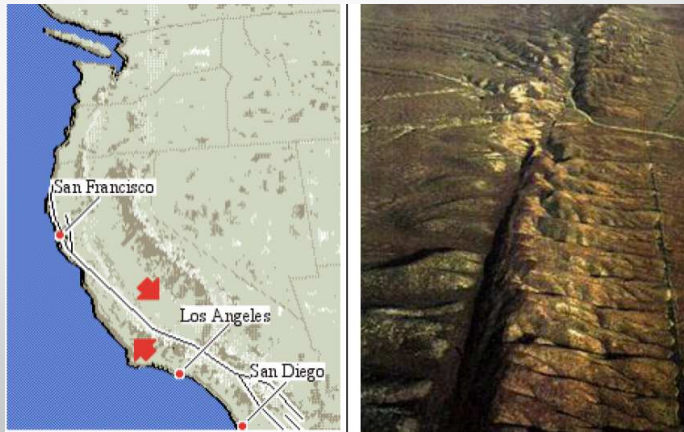
La actividad sísmica es mayor en las zonas de subducción donde ocurren los sismos de mayor magnitud.



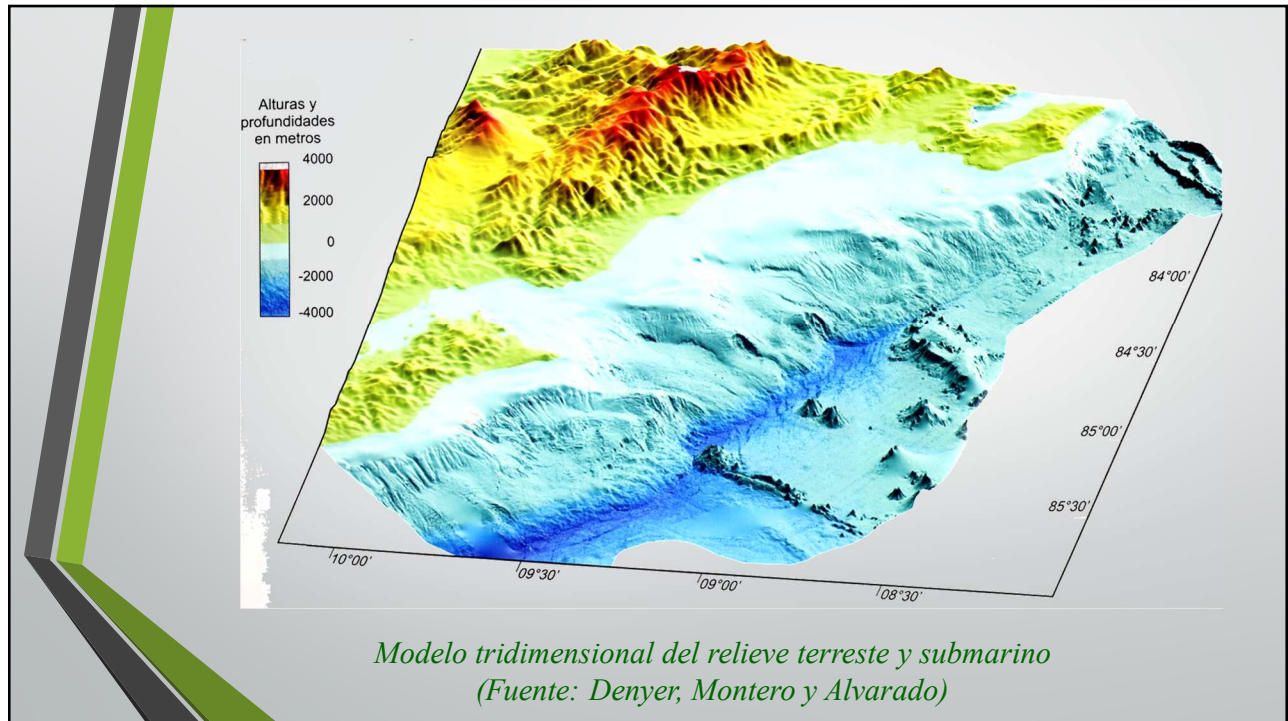
Una de las teorías mas aceptadas sobre el origen de los sismos en Costa Rica indica que esta zona está expuesta permanentemente a la subducción de la placa Cocos debajo de la Caribe, produciendo gran concentración de fuerzas.

Cuando los esfuerzos causados por este fenómeno exceden cierto límite, la presión liberada por un movimiento fuerte de la placa genera el sismo.

Exposición de la falla en la superficie terrestre (California, Estados Unidos)



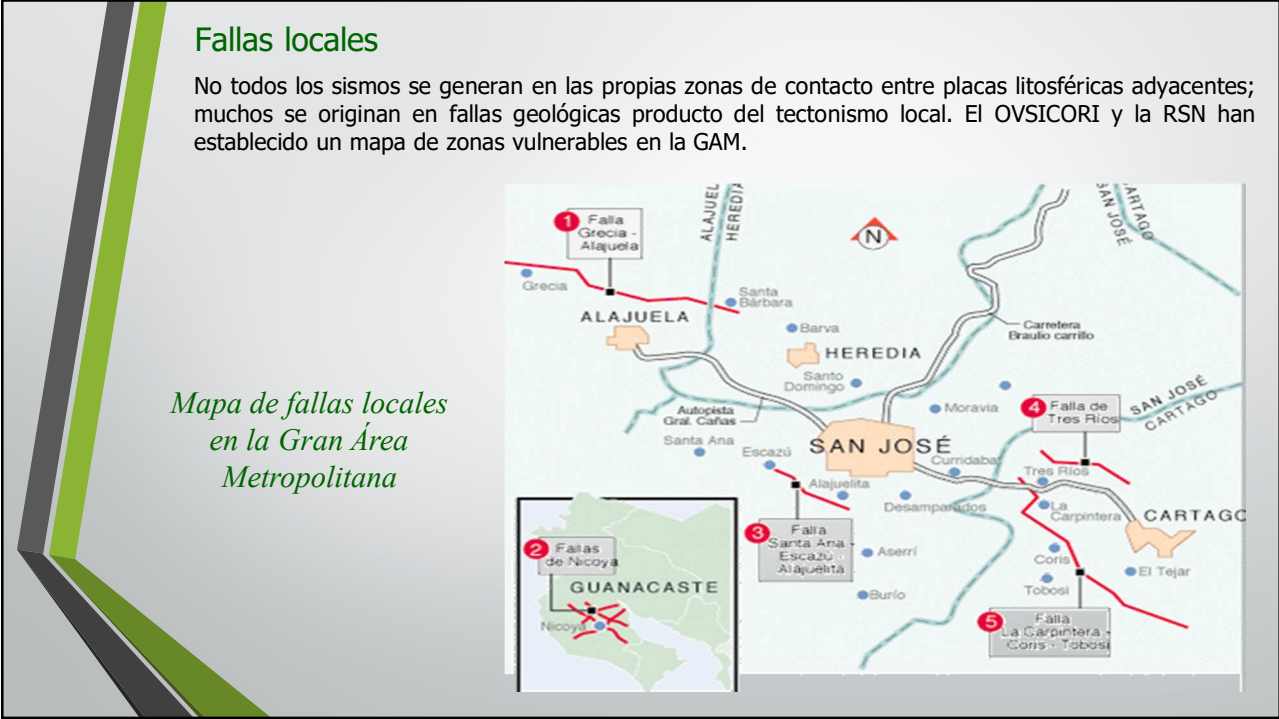
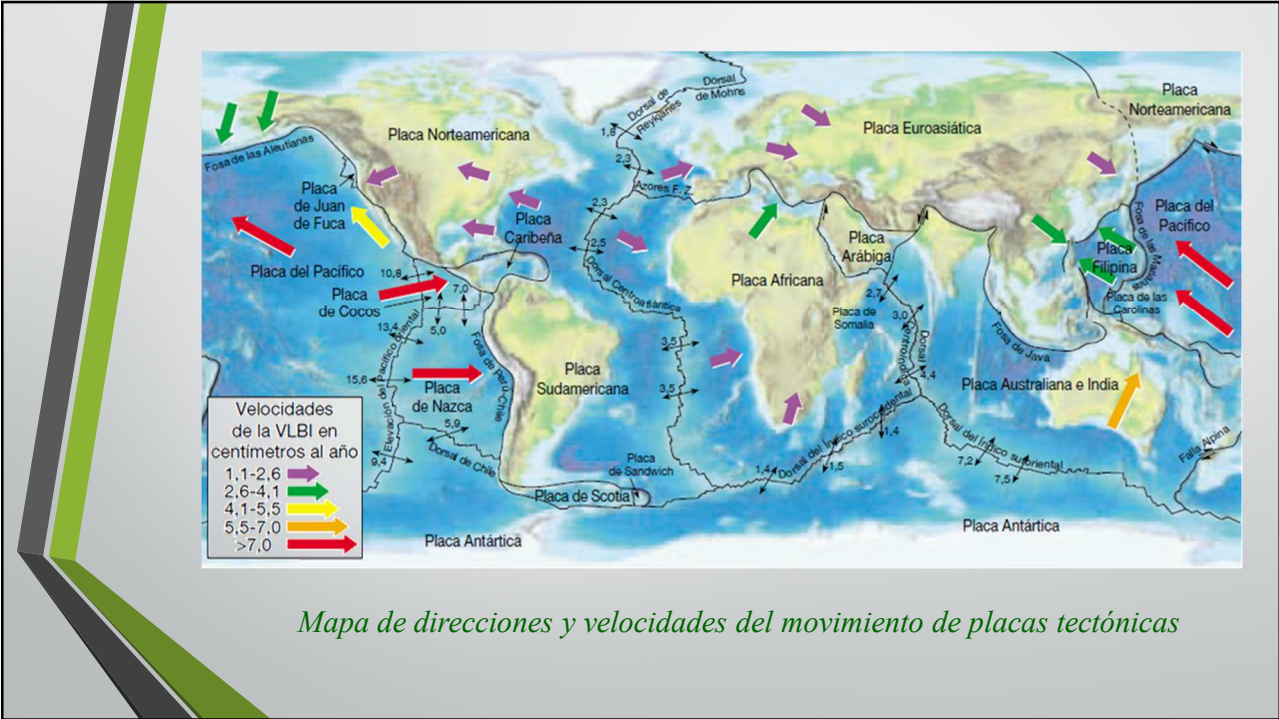
Modelo digital del terreno frente a la costa pacífica de Costa Rica donde se observa la zona de subducción (Placas Cocos y Caribe)



Si el epicentro se localia en el océano, pueden generarse grandes olas denominadas maremotos o tsunamis.

Imagen del Tsunami que afectó a
Japón (Marzo, 2011)

El desplazamiento de las placas litosféricas alcanza velocidades del orden de varios centímetros por año y el movimiento relativo entre las mismas puede ser de expansión o separación, de sumersión o subducción, puede conducir a la colisión frontal, o sea simplemente un desplazamiento lateral paralelo a la falla (zona de fractura) que separa las placas.



Desde el punto de diseño estructural, los sismos que más nos conciernen son los de foco superficial pues son los que causan mayor daño y destrucción y contribuyen con un 75% del total de energía sísmica liberada anualmente.

La profundidad del foco tiene por lo tanto, mucha importancia pues un sismo de magnitud moderada pero de foco superficial puede causar grave destrucción si se localiza cerca de centros urbanos (Terremoto de Managua en 1972, 10 km). En cambio, un evento de gran magnitud puede no causarlo y no tener consecuencias fatales, si su foco es profundo (Terremoto de Valdivia, profundidad superior a los 30km).

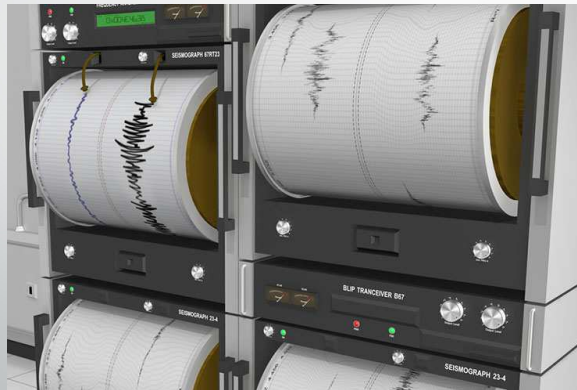
Daños en viviendas debido al Terremoto de Turquía, profundidad de 6.7km (Enero, 2020)



Medición instrumental

Los sismógrafos son los instrumentos que registran las ondas sísmicas con la finalidad de medir y analizar el movimiento producido por un sismo.

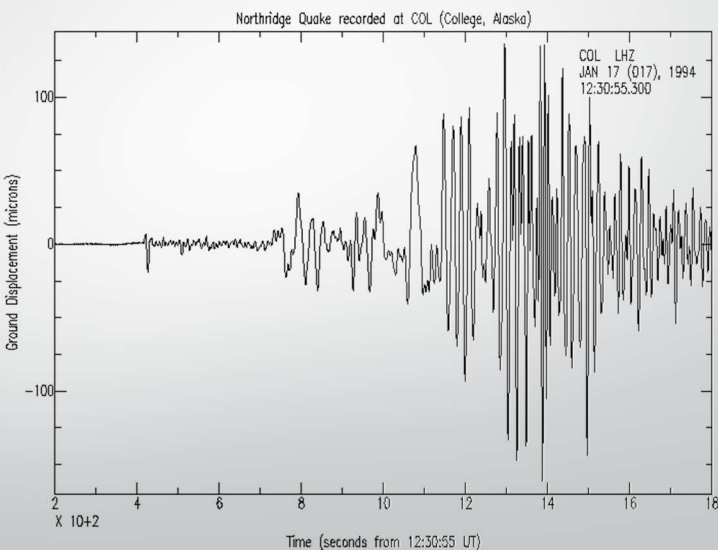
El principio básico de estos instrumentos consiste en una masa libremente suspendida de un marco rígido fijado al terreno y que puede oscilar en forma independiente del marco como un péndulo y el movimiento diferencial es registrado sobre un papel.



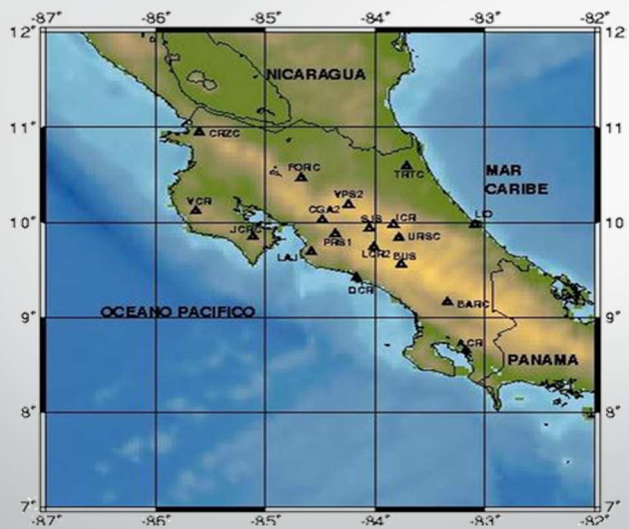
Sismógrafo analógico

El registro resultante se denomina sismograma, que es un gráfico de las ondas sísmicas, o sea una medida o representación amplificada del movimiento del terreno.

Sismograma asociado al Terremoto de Northridge (Enero, 1994)



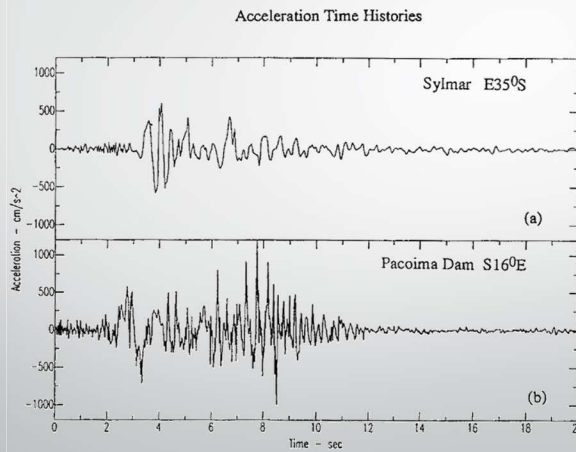
En Costa Rica funciona una Red Sismológica Nacional (RSN) y también existe una red sismográfica mundial donde las señales son transmitidas a través de satélites a estaciones sismográficas.



Ubicación de algunas estaciones de registro sísmico en Costa Rica.

Existen instrumentos tan sensibles que detectan movimientos de terreno muy pequeños, por lo que la señal es amplificada miles de veces para poder visualizarla.

Dentro de los llamados sismógrafos, el más conocido es el acelerógrafo, que registra la aceleración del terreno en función del tiempo: acelerograma.



Registros sísmicos de aceleración (acelerogramas) de dos estaciones diferentes asociados a un mismo evento.

Los edificios tienen un período natural de vibración T que depende de la rigidez k y de su peso (masa m).

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

Los edificios bajos y rígidos tienen períodos de vibración cortos y los edificios altos y flexibles tienen períodos de vibración largos. Por lo tanto, cerca del epicentro las ondas son de bajo período y hacen vibrar más intensamente los edificios bajos y rígidos.

A distancias largas, las ondas son de período largo causando más intensidad de movimiento en los edificios altos y flexibles.

Si el período natural de la estructura coincide con el período de vibración del terreno, se puede producir un efecto altamente dañino llamado resonancia.

Magnitud:

Es una medida cuantitativa e instrumental del tamaño del evento, relacionada con la energía sísmica liberada durante el proceso de ruptura en la falla. La magnitud es una constante única que se asigna a un sismo dado y es independiente del sitio de observación

La magnitud se determina midiendo la máxima amplitud de las ondas registradas en el sismograma correspondiente al evento.

Intensidad:

La intensidad se define como la medida de la fuerza del movimiento del terreno causado por un evento sísmico y del grado en que la vibración es sentida y registrada en una determinada localidad. Depende del sitio de observación y disminuye en función de la distancia a la fuente sísmica.

Hay dos formas de medir la intensidad:

- Apreciación subjetiva, no instrumental de los efectos aparentes producidos por el evento sísmico en un sitio dado. Es una escala de tipo cualitativo que se basa en la severidad de los daños producidos, en la violencia con que es sentido por las personas y en cambios producidos en la superficie del terreno.

La escala de intensidades más usada es la de Mercalli Modificada.

- Medición instrumental: Es una medida instrumental de la amplitud del movimiento del terreno y para esto se emplean parámetros de aceleración, velocidad y desplazamiento, los cuales se obtienen de los acelerógrafos.

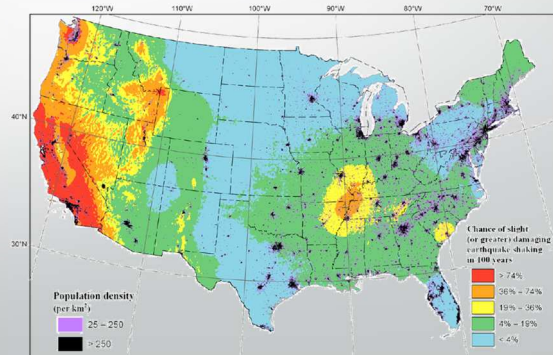
De estos tres parámetros, la aceleración es el de mayor uso para evaluar las fuerzas sísmicas inducidas en las estructuras.

Aceleración: parámetro de diseño sismorresistente

La aceleración se puede considerar como la medida instrumental de la intensidad y es el parámetro más usado para el diseño de edificios, pues nos permite estimar su respuesta.

La aceleración máxima nos permite determinar el riesgo sísmico y se emplea para elaborar mapas de zonificación sísmica y así poder calcular las fuerzas de sismo a las que van a estar expuestas las estructuras. Estos modelos se basan en la información disponible sobre la sismicidad histórica, del tipo de suelo, de los registros instrumentales, de la geología local y de las características tectónicas regionales.

Mapa de riesgo sísmico para Estados Unidos (Año 2018)



Efectos sísmicos en los edificios

Fuerzas de inercia

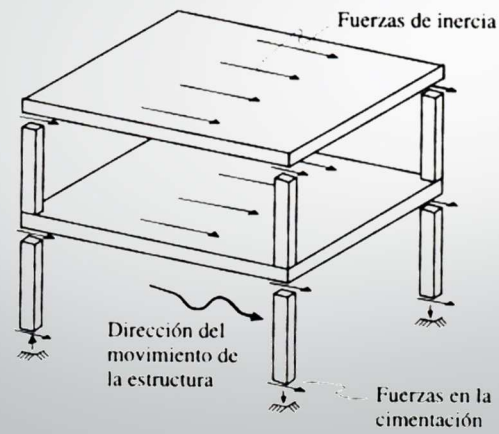
El movimiento del suelo se transmite a los edificios que se apoyan sobre éste. La base del edificio tiende a seguir el movimiento del suelo, mientras que por inercia, la masa del edificio se opone a ser desplazada dinámicamente y a seguir el desplazamiento de la base. Las fuerzas que se inducen en la estructura no son función solamente de la intensidad del movimiento del suelo, sino dependen de manera importante de las propiedades de la estructura misma.

La masa, tamaño y forma del edificio (configuración) determinan en buena parte la naturaleza de estas fuerzas de inercia y de que manera serán resistidas por el edificio.

Las fuerzas de inercia son el producto de la masa por la aceleración ($F=m*a$). La aceleración es función de la naturaleza del temblor mientras que la masa es una característica inherente al edificio.

Como las fuerzas que se generan son de inercia, por lo general un aumento en la masa produce un aumento en la fuerza. Por eso el uso de materiales ligeros en una obra puede favorecer su comportamiento ante un sismo.

Las fuerzas de inercia que se generan por la vibración en los lugares donde se encuentran las masas del edificio (mayormente en los entrepisos) se transmiten a través de la estructura por trayectorias que dependen de la configuración estructural. Este flujo de fuerzas en la estructura, resulta crítico en las uniones entre los elementos estructurales, las fuerzas cortantes en las columnas y la transmisión de dichas fuerzas a los cimientos.



Fuerzas inerciales inducidas en una estructura de dos plantas

Período de una estructura

Se denomina período al intervalo de tiempo necesario para que el sistema efectúe un ciclo completo de movimiento que puede ser de traslación o de rotación.

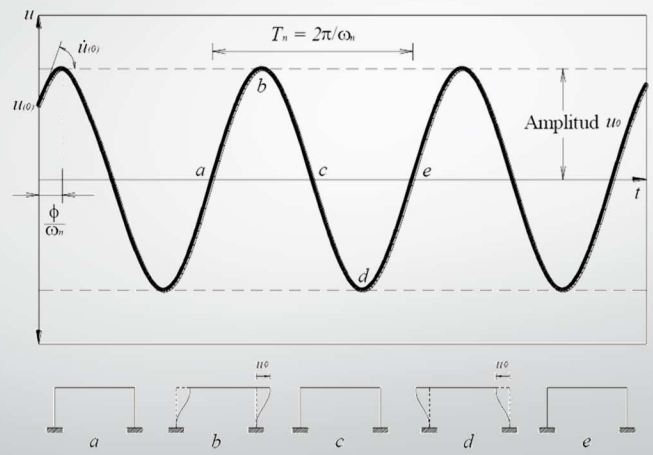


Gráfico desplazamiento vs tiempo correspondiente a un marco de un nivel sometido a un movimiento armónico

Los períodos fundamentales de los edificios varían desde 0.1 segundos para un marco sencillo de un piso, hasta un gran puente colgante que puede tener un período de cerca de 6 segundos.

Usualmente los períodos naturales del suelo son entre 0.5 y 1.0 segundo, de tal manera que es posible que el edificio y el suelo tengan el mismo período fundamental. Por lo tanto hay una alta posibilidad de que el edificio se aproxime a un estado de resonancia parcial, que se denomina cuasi-resonancia.

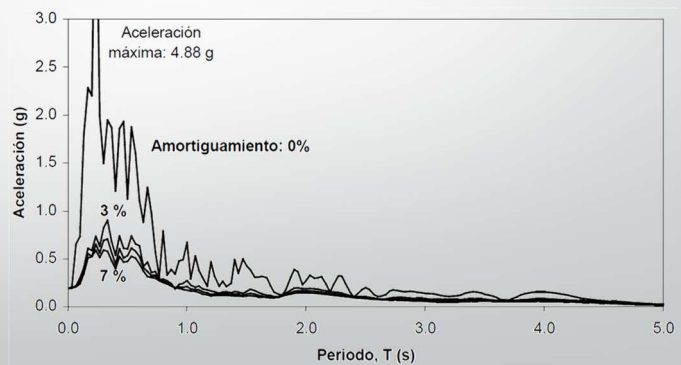


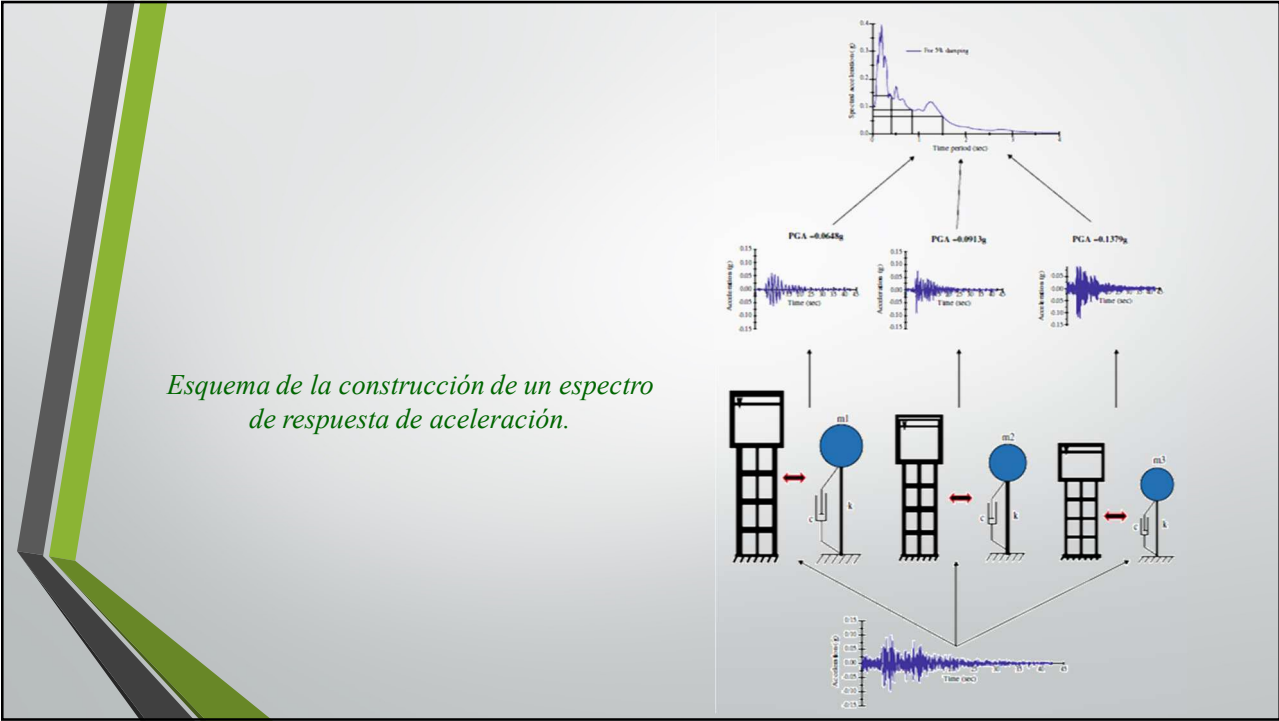
Los períodos fundamentales de vibración natural del Puente Golden Gate son: 18.2s (dirección transversal) y 10.9s (dirección vertical) y 3.81 (dirección longitudinal)

Al diseñar un edificio es conveniente calcular los períodos fundamentales tanto del edificio como del lugar, con la finalidad de ver si existe la posibilidad de que se presente la cuasi-resonancia. De ser así se debe cambiar las características dinámicas del edificio (masa y/o rigidez).

En el diseño estructural resulta de suma importancia contar con Espectros de Respuesta que son gráficos que gráfico de la respuesta máxima (desplazamiento, velocidad o aceleración) que produce una determinada acción (por lo general una excitación sísmica en la base) en una estructura de un grado de libertad .

Ejemplo de un espectro de aceleración para distintos valores de amortiguamiento





Para variar el período de vibración de un edificio se puede cambiar el peso de la estructura y la distribución de la masa. También se puede cambiar el tipo de diseño en cuanto a configuración y materiales: si se va a diseñar un edificio alto o bajo, o si se va a usar una estructura de acero o de concreto.

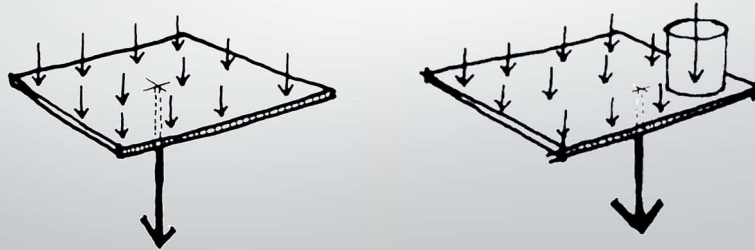
El grado de amplificación depende del amortiguamiento propio de la edificación y de la relación entre el período de la estructura y el período dominante del suelo. El grado de amortiguamiento en un edificio depende de las conexiones, de los elementos no estructurales y de los materiales empleados en la construcción.

Conexión viga-columna en estructura de acero

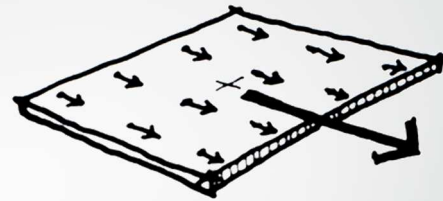
Torsión

El centro de masa o gravedad de un cuerpo es similar al punto por donde pasaría la fuerza resultante de un sistema de fuerzas (como las cargas distribuidas), pero visto desde el punto de vista de los pesos involucrados.

Una masa uniformemente distribuida produce coincidencia de su centro geométrico de planta con el centro de masa mientras que una distribución excéntrica de masa, o sea si la masa se encuentra concentrada en cierto punto lejos del centro geométrico, igualmente la fuerza de gravedad será mayor en ese punto y en este caso el centro geométrico no coincide con el centro de masa.



Cuando las partículas de masa se aceleran en forma horizontal debido a las fuerzas de inercia de un sismo, se crean fuerzas que se asemejan a las de la gravedad, solo que horizontales. Igualmente la resultante de este sistema de fuerzas pasará por el centro de geométrico si la masa es uniformemente distribuida.



Se considera que las cargas de inercia se aplican en la losa lateralmente pues concentran grandes cantidades de masa, de manera que a mayor masa, mayor es la fuerza interna de inercia generada en esa zona.

Si la resultante de la resistencia (proporcionada por los muros y marcos) pasa a través del mismo punto por donde pasa la resultante de las inercias, coincidiendo ambas resultantes, se mantiene un equilibrio dinámico de traslación y por tanto no existirá torsión.

Si la masa está colocada excéntrica, la carga sísmica también será excéntrica, puesto que el sismo solo genera cargas con la presencia de masas y la cantidad de cargas es directamente proporcional a la cantidad de masa.

Entonces para evitar torsión cuando la carga es excéntrica, entonces también la resistencia debe ser excéntrica, de manera tal que la localización del centro de masa, coincida con la resultante de la resistencia horizontal (centro de rigidez). Por lo tanto se presentará torsión cuando una fuerza lateralmente distribuida no está siendo resistida por una resistencia lateral uniformemente distribuida.

En otras palabras, se produce torsión cuando el centro de masa no coincide con el centro de rigidez.

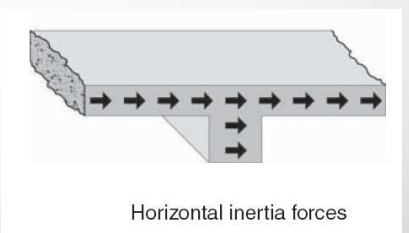
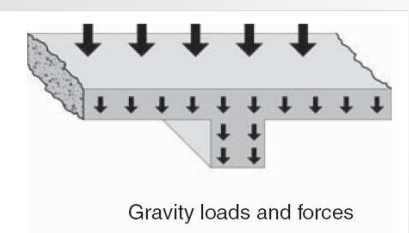
FUERZAS SÍSMICAS

Las fuerzas de sismo son fuerzas de inercia. Cuando una estructura experimenta una aceleración en su base, se genera una fuerza de naturaleza inercial cuando su masa resiste o se opone a la aceleración.

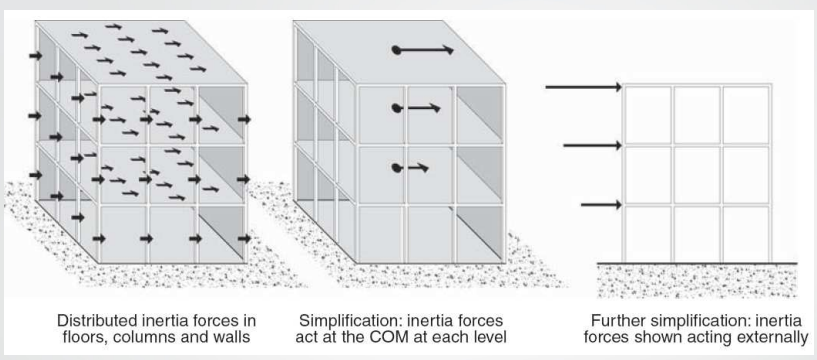
Las fuerzas inerciales actúan a lo interno de la edificación. Cuando el terreno de cimentación se oscila lateralmente, aceleraciones horizontales se propagan hacia "arriba" de la estructura y por tanto, generan fuerzas internas de inercia.

Cada metro cuadrado de construcción, como de entrepiso o un muro posee peso y por ende masa.

De la misma forma que la fuerza de gravedad actúa verticalmente y está distribuida, así la fuerza sísmica se aplica en los elementos, excepto que ésta actúa horizontalmente.



Como la resultante de las fuerzas gravitacionales (pesos) se asume que actúan en el *Centro de Masa CM*, las fuerzas inerciales se asocian al mismo punto. Debido a que la mayoría del peso total de un edificio se concentra en los niveles de entrepiso y techo, por simplicidad, los diseñadores suponen que las fuerzas de inercia actúan en el *CM* de cada nivel.



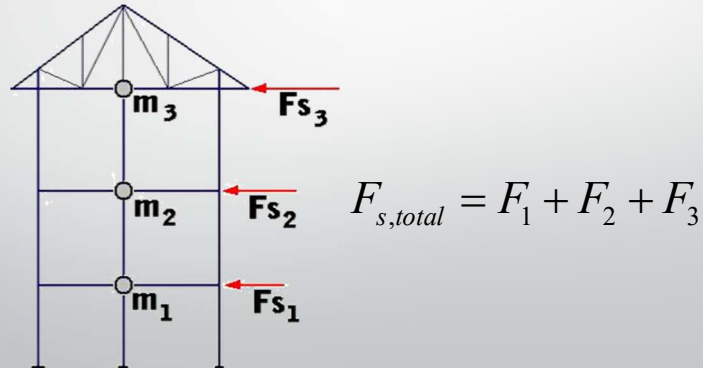
Como se observa en la figura de la derecha, las fuerzas sísmicas se consideran aplicadas externamente en cada nivel del edificio.

Cálculo de fuerzas sísmicas (Método Estático del CSCR-10)

Este método cuantifica los efectos del sismo sobre la edificación mediante un conjunto de fuerzas estáticas aplicadas en cada uno de sus niveles (entrepisos y techo).

Dichas fuerzas son proporcionales a:

- ✓ Peso asociado a ese nivel
- ✓ Altura del nivel respecto al suelo.



$$F_{s,total} = C_{sis} \cdot W_{tot}$$

Como se observa en la anterior fórmula, la fuerza sísmica total que impacta a una estructura depende de su peso total. Es decir, entre más pesada sea una estructura, mayor será su empuje sísmico.

Por su parte, el factor C_{sis} se denomina coeficiente sísmico y es un parámetro adimensional característico de una edificación. Se calcula con la fórmula:

$$C_{sis} = \frac{a_{ef} \cdot FED \cdot I}{SR}$$

Donde los valores FED , I y SR dependen del tipo de sistema estructural y de la importancia de la misma.

➤ **Coeficiente sísmico C_{sis}**

Es un parámetro que puede interpretarse como el porcentaje del peso total del edificio que debe emplearse como carga lateral.

Depende de una serie de factores, de los cuales los más importantes a considerar son:

- Importancia de la edificación: I
- Regularidad en planta y elevación de la estructura
- Aceleración del terreno a_{ef} (que depende de la zona sísmica donde se ubique la estructura y del tipo de suelo sobre el cual esté cimentada)
- Sistema estructural (tipo marco, tipo muro, etc.)

▪ **Aceleración del terreno a_{ef}**

Depende a su vez de 2 parámetros:

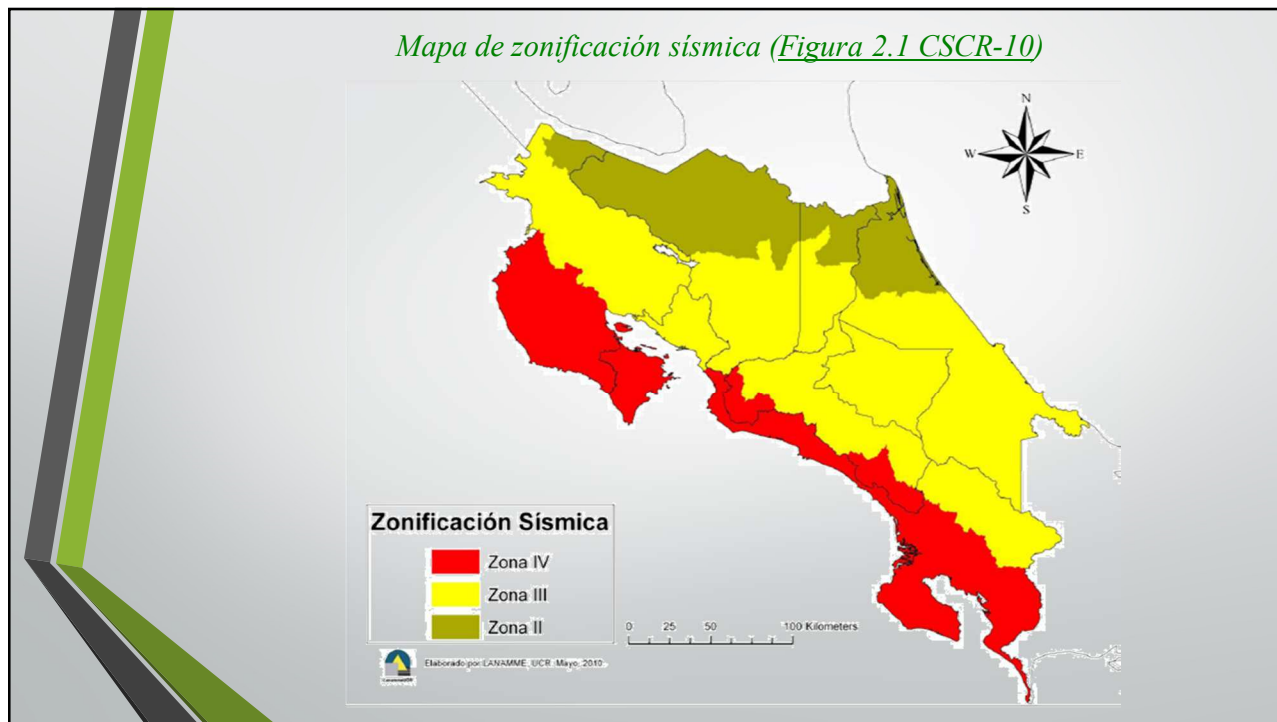
1. La zona sísmica (lugar donde se construirá el proyecto)
2. Tipo de suelo donde se vaya a cimentar la estructura

La zona sísmica está definida para cada punto del territorio nacional, según se muestra en la Figura 2.1.

Por su parte, el tipo de suelo tiene que ver con sus características geotécnicas tales como N_{SPT} , velocidad de onda cortante y resistencia al corte.

La aceleración se obtiene de la Tabla 2.3 del Código Sísmico

Tipo de sitio	Zona II	Zona III	Zona IV
S ₁	0.20	0.30	0.40
S ₂	0.24	0.33	0.40
S ₃	0.28	0.36	0.44
S ₄	0.34	0.36	0.36



Tipo de suelo

i) Sitio Tipo S₁
 Un perfil de suelo con alguna de las siguientes características:
 Un material semejante a la roca, caracterizado por una velocidad de onda cortante superior a 760 m/s o por otros medios adecuados de clasificación.
 Condiciones de suelo rígido o denso, donde la profundidad del suelo es menor de 50 m.

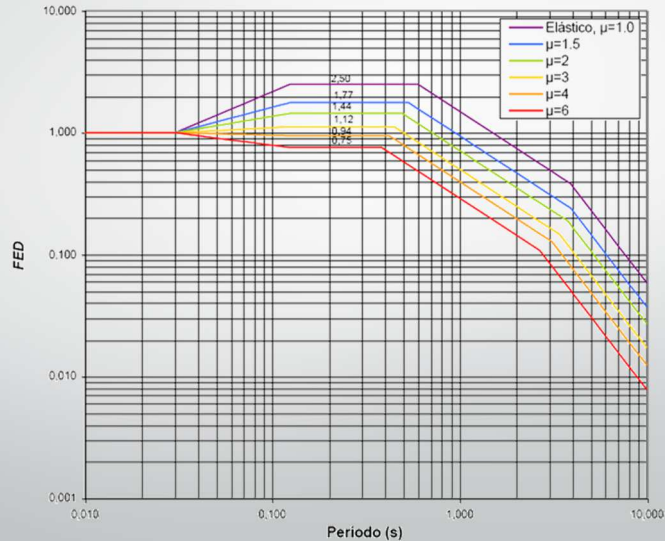
ii) Sitio Tipo S₂
 Un perfil de suelo con condiciones predominantemente de medianamente denso a denso o de medianamente rígido a rígido, cuya profundidad excede los 50 m.

iii) Sitio Tipo S₃
 Un perfil de suelo con más de 6 m de arcilla de consistencia de suave a medianamente rígida o de suelos no cohesivos de poca o media densidad. No incluye perfiles de más de 12 m de arcilla suave.

iv) Sitio Tipo S₄
 Un perfil de suelo caracterizado por una velocidad de onda cortante menor de 150 m/s o con más de 12 m de arcilla suave.

Factor Espectral Dinámico FED

Es un parámetro adimensional que define características dinámicas de la estructura y que se obtiene de los Espectros de Diseño del Código Sísmico (*Figuras 5.1 a 5.12*, una por cada valor de aceleración).



Para hallar el FED , en estos gráficos se "ingresa" con dos valores característicos de la estructura: período T y ductilidad μ .

El período (en segundos) se puede estimar con las siguientes expresiones propuestas por el CSCR-10 (*Sección 7.4.5*) y donde N es el número de pisos:

$$\left\{ \begin{array}{l} T = 0.1N : \text{Edificios tipo } \underline{\text{marco}} \text{ formados exclusivamente por marcos de concreto} \\ T = 0.08N : \text{Edificios tipo } \underline{\text{dual}} \text{ (marcos + muros de corte)} \\ T = 0.05N : \text{Para edificios tipo } \underline{\text{muro}} \text{ (muros de corte)} \end{array} \right.$$

Por su parte, la ductilidad depende de una serie de características tales como: sistema estructural, regularidad y ductilidad local (detallado de los elementos).

Ductilidad global asignada μ
(Tabla 4.3 CSCR-10)

Sistema estructural tipo marco					
Tipo	Regular	Irregular moderado	Ductilidad local óptima	Ductilidad local moderada	Ductilidad global asignada
marco a	X		X		6.0
marco b	X			X	3.0
marco c		X	X		3.0
marco d		X		X	2.0

Sistema estructural tipo dual					
Tipo	Regular	Irregular moderado	Ductilidad local óptima	Ductilidad local moderada	Ductilidad global asignada
dual a	X		X		4.0
dual b	X			X	3.0
dual c		X	X		3.0
dual d		X		X	2.0

Sistema estructural tipo muro					
Tipo	Regular	Irregular moderado	Ductilidad local óptima	Ductilidad local moderada	Ductilidad global asignada
muro a	X		X		3.0
muro b	X			X	2.0
muro c		X	X		2.0
muro d		X		X	1.5

Sistema estructural tipo voladizo					
Tipo	Regular	Irregular	Ductilidad local óptima	Ductilidad local moderada	Ductilidad global asignada
voladizo a	X		X		1.5
voladizo b	X			X	1.0
voladizo c		X	X		1.0
voladizo d		X		X	1.0

Sistema estructural tipo otros					
Tipo	Regular	Irregular	Ductilidad local óptima	Ductilidad local moderada	Ductilidad global asignada
otros a	X		X		1.0
otros b	X			X	1.0
otros c		X	X		1.0
otros d		X		X	1.0

▪ Factor de importancia *I*

Se obtiene de la tabla 4.1 del CSCR-10

Grupo	Descripción	Ocupación o función de la edificación	Factor <i>I</i>
A	Edificaciones e instalaciones esenciales	Hospitales e instalaciones que poseen áreas de cirugía o atención de emergencias. Estaciones de policía y bomberos. Garajes y refugios para vehículos o aviones utilizados para emergencias. Instalaciones y refugios en centros de preparación para emergencias. Terminales aeroportuarias y torres de control aéreo. Edificaciones y equipo en centros de telecomunicaciones y otras instalaciones requeridas para responder a una emergencia. Generadores de emergencia para instalaciones pertenecientes al grupo A. Tanques de almacenamiento de agua y productos esenciales. Estructuras que contienen bombas u otros materiales o equipo para suprimir el fuego.	1.25
B	Edificaciones e instalaciones riesgosas	Obras e instalaciones utilizadas para la producción, almacenamiento y trasiego de sustancias o químicos tóxicos o explosivos. Obras que contienen o soportan sustancias tóxicas o explosivas. Obras cuya falla pueda poner en peligro otras edificaciones de los grupos A y B.	1.25
C	Edificaciones de ocupación especial	Edificaciones para actividades educativas con una capacidad mayor que 300 estudiantes. Edificios usados para colegios o para educación de adultos con una capacidad mayor que 500 estudiantes. Edificios para centros de salud con 50 o más pacientes residentes incapacitados, pero no incluidas en el grupo A. Todas las edificaciones con una ocupación mayor que 5000 personas no incluidas en los grupos A o B.	1.00
D	Edificaciones de ocupación normal	Edificaciones y equipo en estaciones de generación de energía y otras instalaciones públicas no incluidas en el Grupo A y requeridas para mantener operación continua.	1.00
E	Edificaciones misceláneas	Todas las obras de habitación, oficinas, comercio o industria y cualquier otra edificación no especificada en los grupos A, B, C o E.	0.75
		Construcción agrícola y edificios de baja ocupación. Galpones y naves de almacenamiento de materiales no tóxicos y de baja ocupación. Tapias y muros de colindancia (ver nota). Obras e instalaciones provisionales para la construcción.	0.75

Finalmente, la sobre-resistencia **SR**, toma los siguientes valores (*Sección 5 de CSCR-10*):

$SR = 2.0$: Para estructuras tipo marco, dual o muro.

$SR = 1.2$: Para estructuras tipo voladizo u otros.

Una vez que se ha calculado el peso de cada nivel, y para facilitar el cálculo de las fuerzas sísmicas, conviene tabular los datos como se muestra a continuación:

TABLA PARA EL CÁLCULO DE LAS FUERZAS SÍSMICAS
(MÉTODO ESTÁTICO)

Nivel	h m	W _{CP} Ton	W _{CT} Ton	W _{TOT} Ton	W _{TOT} *h Ton*m	F _{SIS} Ton
				$\sum W_{tot}$	$\sum_{k=1}^N W_k \cdot h_k$	$\sum F_{SIS}$

$V_{base} = C_{sis} \cdot \sum W_{tot}$ ← Deben coincidir → $\sum F_{SIS}$

h : Altura del nivel (medida respecto al suelo)

W_{CP}, W_{CT} : Pesos del nivel asociados a las cargas permanente y temporal, respectivamente.

$W_{TOT} = W_{CP} + \beta \cdot W_{CT}$: Peso total correspondiente al nivel

β : Factor de participación de carga temporal (*Sección 6.1.3 CSCR-10*)

Factor β	Tipo de carga
1.00	Equipo e instalaciones fijas a la estructura
0.25	Bodegas
0.15	Edificios
0.00	Cargas en azoteas, marquesinas y techos

F_i : Fuerza sísmica (horizontal) aplicada en el Centro de Masa del nivel i

$$F_i = V_{base} \frac{W_i \cdot h_i}{\sum_{k=1}^N W_k \cdot h_k}$$

➤ Revisión de derivas

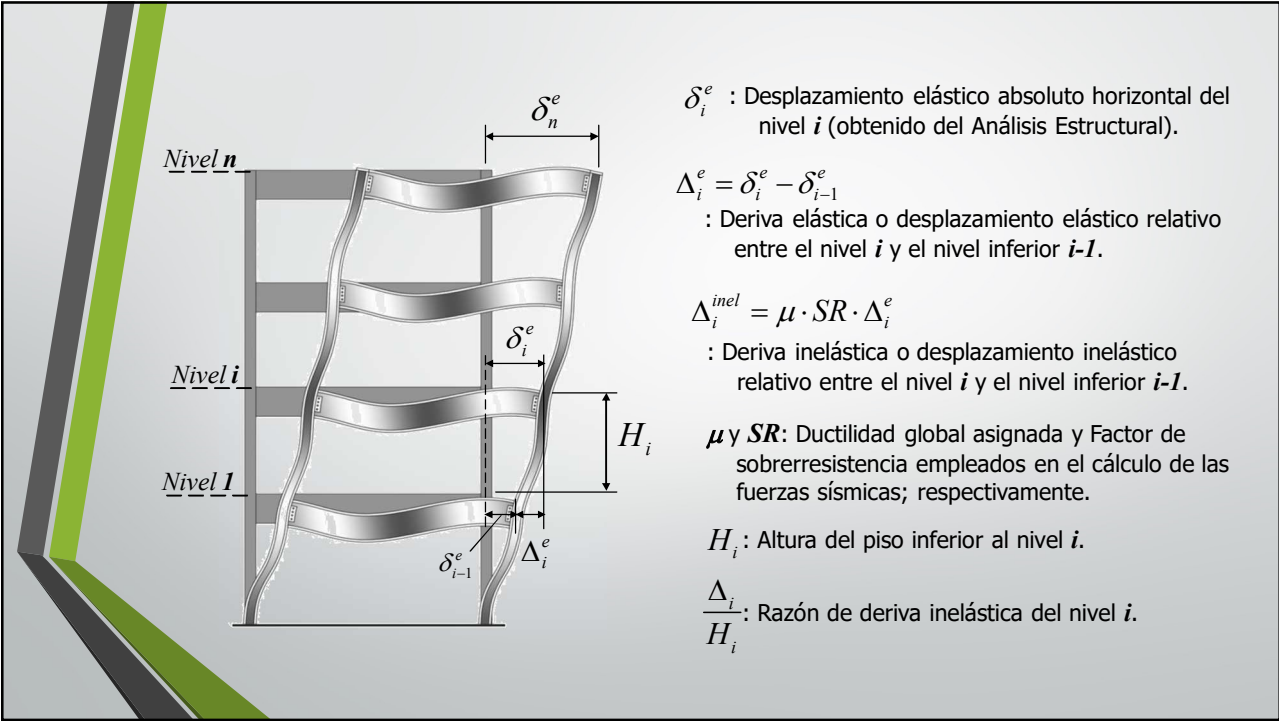
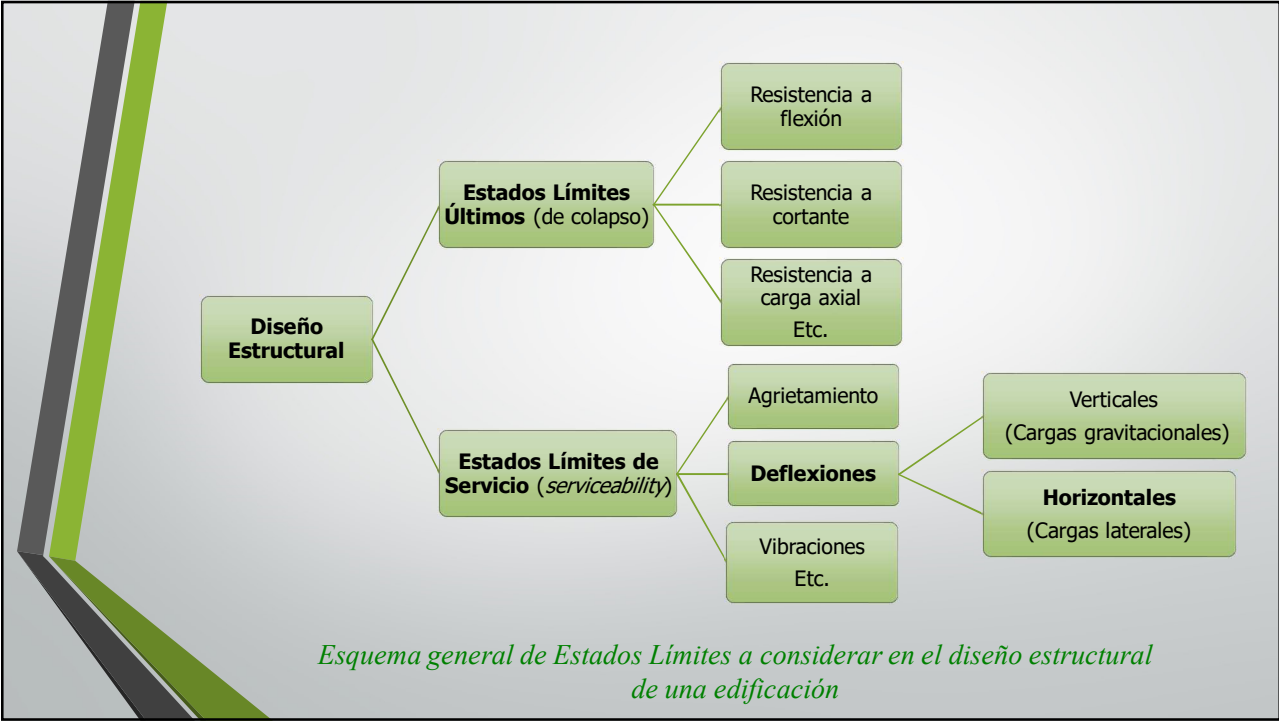
Adicional a los estados límites últimos o de colapso (resistencia a flexión, cortante, carga axial, etc.), toda estructura debe satisfacer los estados límite de servicio (*serviceability*) que se refieren a aquellos que se dan bajo condiciones normales de carga y que de no satisfacerse pueden comprometer la operación del inmueble sea parcial o totalmente.

Ejemplos:

- ✓ Agrietamiento en tanques de almacenamiento
- ✓ Vibraciones en entrepisos y puentes (Caso del Millenium Bridge en Londres)
- ✓ Etc.

Con respecto a las cargas sísmicas, el Código Sísmico establece los valores máximos de razones de deriva inelástica que no deben ser excedidos en ningún piso de la edificación.

Estos límites procuran una rigidez lateral de la estructura de manera que se limite el daño en elementos no estructurales como cielos, tuberías, fachadas, etc.



Una vez calculadas las razones de deriva inelástica, éstas se deben comparar con los límites superiores dados en la **Tabla 7.2** del CSCR-10 los cuales dependen de la importancia y del sistema estructural.

TABLA 7.2. Límite superior de la razón de deriva, Δ_i / H_i ⁽¹⁾, según categoría de edificación y sistema estructural.

Sistema estructural (según artículo 4.2)	Edificaciones A y C (Limitación severa según artículo 4.1)	Edificaciones B, D y E (Limitación normal según artículo 4.1)
tipo marco	0.0125	0.020
tipo dual	0.0125	0.018
tipo muro	0.0100	0.010
tipo voladizo	0.0125	0.020
tipo otros	0.0065	0.010

⁽¹⁾Nota: $H_i = h_i - h_{i-1}$, altura entre el nivel del piso i y el nivel inferior.

Esta verificación se deberá efectuar para todos los niveles y para ambas direcciones ortogonales de sismo X y Y .

Los límites dados en la tabla (limitación severa y normal) corresponden respectivamente a los niveles de desempeño Operativo O y de Seguridad de Vida SV que establece el CSCR-10 en la *Sección 4.1.2*.



- OI:** Operación inmediata
- SV:** Seguridad de Vida
- PC:** Prevención del Colapso

La fuerza que se indica en el eje vertical, usualmente corresponde al cortante basal V_b , mientras que la deformación se asocia al deflexión lateral en el nivel superior.

Este gráfico es de gran importancia en un **Análisis Estático No Lineal**, llamado comúnmente *Pushover Analysis*. Este método consiste en aplicar carga lateral a la estructura de manera incremental con un patrón definido hasta que ésta alcance un estado limite. Las cargas laterales son aplicadas en incrementos que permitan al ingeniero rastrear el desarrollo de mecanismos inelásticos (rótulas plásticas en vigas y columnas) y a su vez la degradación gradual de la rigidez de la estructura.