



RESPUESTA DINAMICA

Arq. Eduardo Rodríguez Cimino

Estructuras III A

Prof. Titular:

Eduardo Rodríguez Cimino

Prof. Adjunta:

Julieta Mansilla

Prof. Asistentes:

Leonel Ghiglione

Horacio Altamirano

Anabella Cardellino

ESTRUCTURASTRESA

1 RESPUESTA DINÁMICA ESTRUCTURAL

Cuando las ondas sísmicas alcanzan una edificación, ésta puede responder de distintas formas dependiendo, por un lado, de las características y duración del movimiento del suelo, y por otro, de las propiedades dinámicas de la estructura, tales como la masa, rigidez y amortiguamiento.

Para conocer la respuesta dinámica de una estructura tendremos que determinar el desplazamiento, velocidad y aceleraciones que experimenta su masa cuando está sometida a una fuerza lateral o a un movimiento sísmico en su base.

1.1 OSCILADOR DE 1 GRADO DE LIBERTAD

Comenzaremos analizando el caso más sencillo que consiste en una estructura similar a un péndulo invertido, compuesta por una masa sostenida por un soporte elástico empotrado en el suelo. Se considera solo su análisis en dos dimensiones, por lo cual el único movimiento posible de la masa es en dirección X, de allí que se denomine que posee un único grado de libertad.

Si analizamos la respuesta a un único impulso inicial, se denomina oscilación libre. Si por el contrario consideramos un movimiento permanente de su base que continúa ingresando acciones a la estructura, como en el caso de un sismo, se produce la oscilación forzada.



Esquema estructural del oscilador

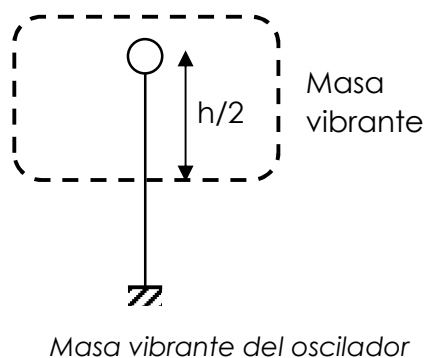
Antes de estudiar el comportamiento dinámico repasaremos algunos conceptos que necesitaremos para describirlo.

1.1.1 Características del oscilador:

- Masa

Recordemos que la masa es una magnitud física que expresa la cantidad de materia de un cuerpo. Su unidad de medida es el kg masa (unidad del sistema métrico legal argentino, SIMELA) y no debe ser confundida con el kg fuerza (unidad del sistema técnico) cotidianamente utilizado para medir peso.

La masa vibrante del oscilador se considera ubicada en su extremo superior, pero está compuesta por toda la materia ubicada desde la mitad del péndulo hacia arriba.



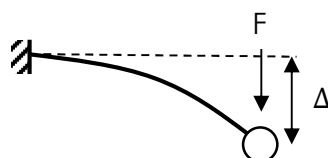
- Rigidez

La rigidez (k) es la capacidad de un objeto o un material de no adquirir grandes deformaciones cuando se le aplica una fuerza externa. Se mide mediante la relación entre la fuerza que se aplica (F) y la deformación que se obtiene (Δ):

$$k = \frac{F}{\Delta}$$

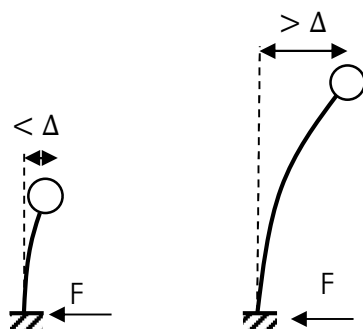
Al igual que una viga en voladizo, la rigidez de un oscilador empotrado en su base está dada por la rigidez flexional de su soporte, y dependerá del módulo de elasticidad de su material, el momento de inercia de su sección, y de su longitud:

$$k = \frac{E \cdot I}{L}$$



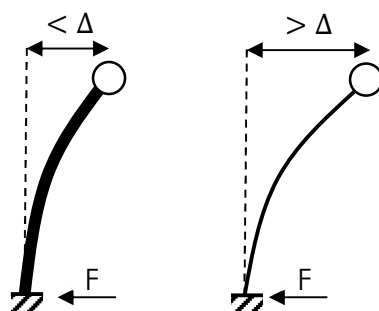
Rigidez de una viga en voladizo

Cuanto más largo sea el oscilador, éste tendrá menos rigidez, y por lo tanto mayor será el desplazamiento de su masa al moverse su base con igual intensidad.



Rigidez de osciladores de distinta altura

Igual efecto se produce si reducimos la inercia de la sección del soporte.



Rigidez de osciladores de distinta sección

- Elasticidad / Plasticidad

La elasticidad es la capacidad de un material de recuperar su forma original luego de haber sido deformado por acción de una fuerza exterior.

La plasticidad es la capacidad de un material de deformarse permanente e irreversiblemente cuando se encuentra sometido a tensiones por encima de su límite elástico.

En general los materiales se comportan elásticamente a tensiones bajas, y plastifican cuando se supera la tensión denominada de fluencia o límite elástico.

- Ductilidad / Fragilidad

La ductilidad es la capacidad de un material de adquirir grandes deformaciones plásticas sin romperse. Es una propiedad común de las aleaciones metálicas o asfaltos. Por el contrario, materiales como el hormigón, la cerámica o el vidrio, se rompen con deformaciones muy bajas, y se denominan "frágiles".

El acero se caracteriza por comportarse de manera elástica cuando se le aplican tensiones menores a la de fluencia (f_y). En esta etapa las deformaciones son proporcionales a las tensiones y al cesar la fuerza aplicada el material retoma su geometría original. Cuando se alcanza la tensión de fluencia se producen deformaciones plásticas permanentes, el material ya no recupera su forma inicial, pero gracias a su ductilidad no se llega a la rotura hasta que estas deformaciones sean considerablemente grandes.

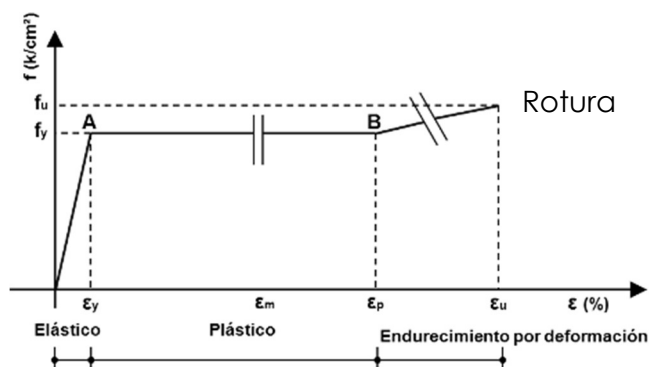
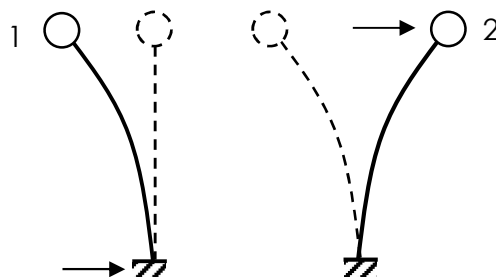


Diagrama de tensiones (f) y deformaciones específicas (ϵ) del acero

Si nuestro oscilador entrara en fluencia, se producirían deformaciones plásticas permanentes, disminuyendo la rigidez y modificando sus propiedades dinámicas. Este proceso consume parte de la energía que ingresa al oscilador por el movimiento del suelo, por lo que se reduce su respuesta. Mas adelante veremos la gran ventaja que esto representa en las estructuras sometidas a sismos.

1.1.2 Movimiento oscilatorio libre

Al producirse un desplazamiento del suelo, por el principio de inercia, la masa tiende a permanecer en su posición, la estructura se aparta de su posición de equilibrio y se deforma elásticamente hasta la posición (1) donde se detiene, acumulando energía potencial. El soporte que adquirió una deformación elástica intentará volver a su posición original moviendo la masa hacia la derecha, y transformando la energía potencial en cinética. Cuando el péndulo pasa por la posición de equilibrio, el desplazamiento es nulo y la velocidad máxima, por lo cual la estructura continúa moviéndose hasta que toda la energía cinética se convierte nuevamente en potencial en la posición 2. El ciclo se repite iniciando así la oscilación.



Oscilación inducida en la estructura al desplazarse su base, por efecto de la inercia y el intercambio de energía potencial y cinética.

- Periodo

El tiempo que demora la estructura en hacer una oscilación completa, (ir desde la posición 1 a la 2 y retornar a 1) se denomina periodo (T). Su valor depende de la masa y de la rigidez de la estructura y se mantiene constante sin importar la amplitud de la oscilación.

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

- Frecuencia

Para medir la velocidad del movimiento se utiliza la frecuencia (F), que indica la cantidad de oscilaciones que realiza la estructura por unidad de tiempo. Es la inversa del período y puede obtenerse con la ecuación

$$F = \frac{1}{T}$$

- Amortiguamiento

El amortiguamiento es la disipación de energía por medio de la fricción interna que se produce en el material cuando está en vibración.

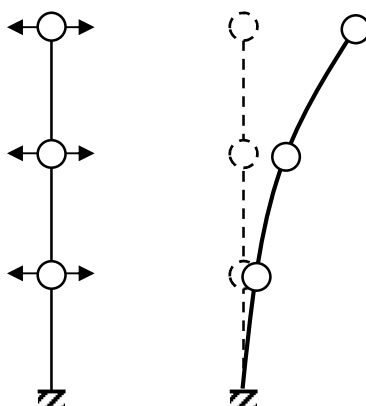
En cada oscilación, parte de la energía cinética va consumiéndose por efecto del amortiguamiento, lo que da lugar a una reducción progresiva de la amplitud hasta detenerse.

Si la estructura se detiene sin completar un ciclo completo se dice que posee un amortiguamiento crítico. Las estructuras de edificación poseen generalmente un amortiguamiento cercano al 5% del crítico.

1.2 OSCILADOR DE VARIOS GRADOS DE LIBERTAD: MODOS DE VIBRACIÓN

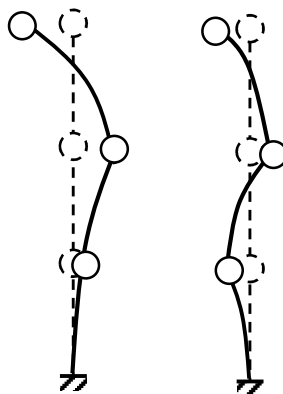
Analicemos ahora un oscilador que posea un mayor número de masas. Cada una de ellas podrá desplazarse en dirección X (continuamos con un análisis sólo en 2 dimensiones), por lo cual habrá un grado de libertad por cada masa que tenga la estructura.

La forma que adquiere la estructura al vibrar se denomina modo de vibración. El primer modo, o modo fundamental se produce cuando todas las masas se desplazan en la misma dirección, coincidiendo con la forma del oscilador de un único grado de libertad.



Oscilador de 3 grados de libertad y su modo fundamental de vibración

Pero puede ocurrir que las masas se desplacen en sentidos opuestos, dando lugar a los modos superiores de vibración. Cada uno de ellos posee su periodo propio.



Segundo y tercer modo de vibración del oscilador de 3 grados de libertad

1.3 OSCILACIÓN FORZADA

Hasta ahora se analizaron estructuras vibrando libremente, pero las acciones dinámicas provocan vibraciones forzadas, producto de la aplicación sucesiva de fuerzas en el tiempo.

Dependiendo de la frecuencia con que se aplique la excitación, la estructura podrá responder en el primer modo, en los modos superiores de vibración, o incluso en una combinación de ellos.

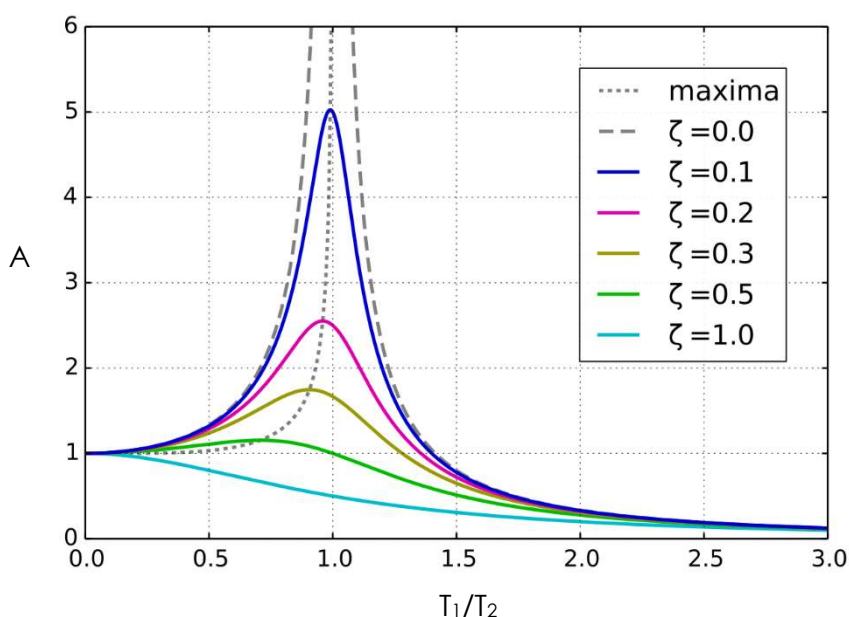
La respuesta de la estructura dependerá ahora, además de las características dinámicas del oscilador, de la intensidad y frecuencia con que se excita la estructura, lo que implica la aparición de uno de los principales problemas de la dinámica estructural: la resonancia.

1.3.1 El fenómeno de resonancia

Todo el que se haya subido a una hamaca alguna vez ha experimentado este fenómeno, y conoce que la única forma de lograr hacerlo con facilidad es dar un único impulso por cada ciclo, en el momento justo. De esa forma se está haciendo coincidir el periodo propio del columpio con el de la aplicación de la fuerza, produciéndose la máxima respuesta dinámica.

La resonancia es un incremento de la amplitud de una oscilación producida cuando la frecuencia de la excitación aplicada es igual o cercana a la frecuencia natural del sistema en el cual actúa.

En el siguiente grafico se representa en el eje de ordenadas la amplitud de la respuesta, y en abscisas la relación entre la frecuencia de la fuerza aplicada T_1 y la frecuencia de la estructura T_2 . Las distintas curvas corresponden a diferentes valores de amortiguamiento.



Curvas de resonancia

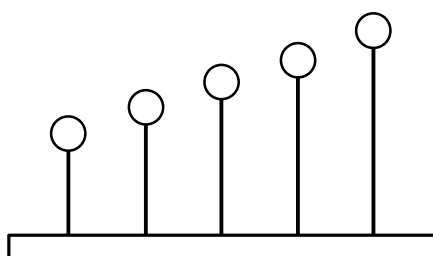
Cuando $T_1/T_2 = 1$, la frecuencia de las fuerzas actuantes es igual a la frecuencia natural de la estructura. En ese punto se observa como se incrementa la respuesta, siendo la curva mas empinada cuando el amortiguamiento es menor.

1.3.2 Espectros de respuesta elástica

Dijimos al comenzar el capítulo que para conocer la respuesta de la estructura necesitábamos determinar su desplazamiento, aceleración y velocidad. En la práctica, conociendo una de las tres variables quedan determinadas las otras dos.

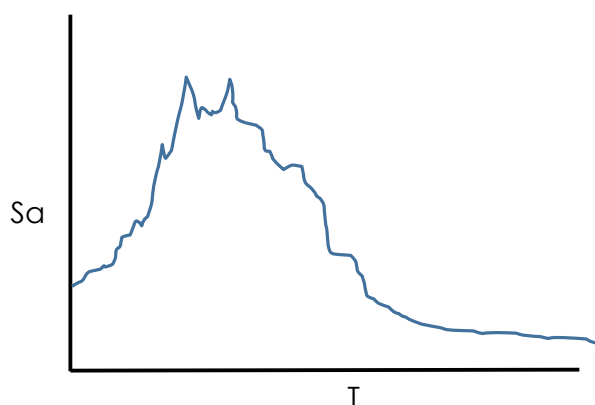
La herramienta más utilizada para realizar esta tarea es a través de los espectros de respuesta, que consisten en un diagrama que describe la respuesta de un amplio rango de osciladores de diferentes periodos de vibración frente a la excitación del sismo.

El principio del espectro de respuesta, desarrollado en 1931 por M. Biot, consiste en colocar una serie de péndulos de diferentes periodos de vibración, empotrados en una misma base, a la cual se le aplica un movimiento idéntico al producido por un sismo determinado.



Péndulos de diferentes periodos de vibracion para construcción de espectro de respuesta

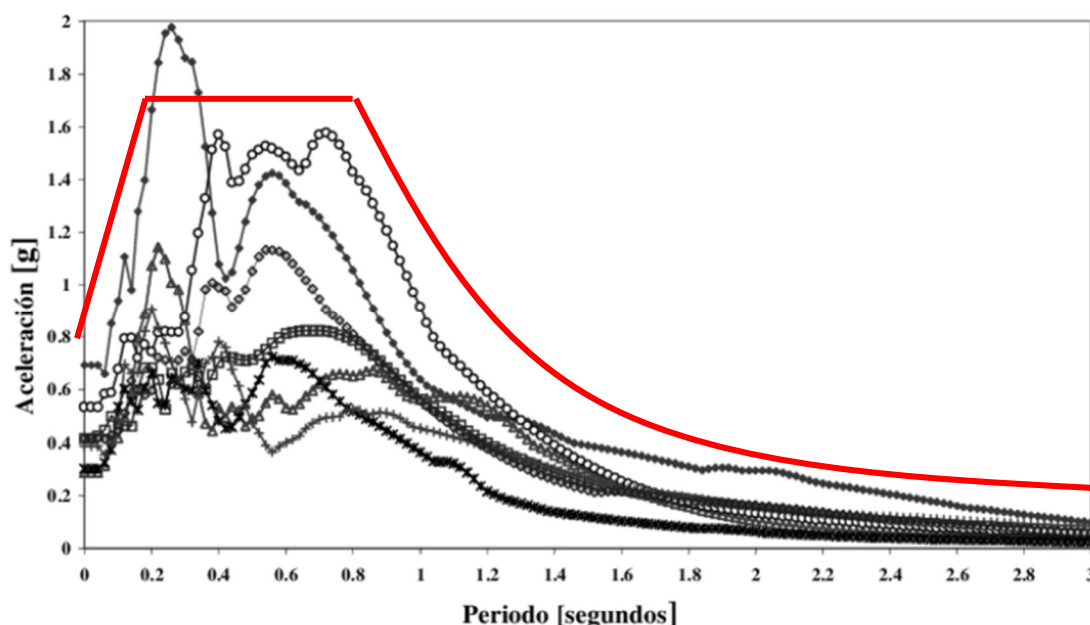
Si medimos la máxima aceleración producida en cada péndulo y la graficamos en función de sus periodos propios, se obtiene una curva denominada espectro de respuesta, similar a la siguiente:



Espectro de respuesta en función del período de vibración de la estructura

En el eje de ordenadas se representa la aceleración de la masa, medida en relación a la base, por lo cual se denomina pseudoaceleración, y en el eje de abscisas el valor del periodo de vibración de la estructura, en segundos.

Este proceso se repite para un número de sismos que sean representativos de los movimientos del suelo esperados para un determinado lugar, obteniéndose varias curvas sobre las cuales se traza una envolvente, cuya geometría es la siguiente:



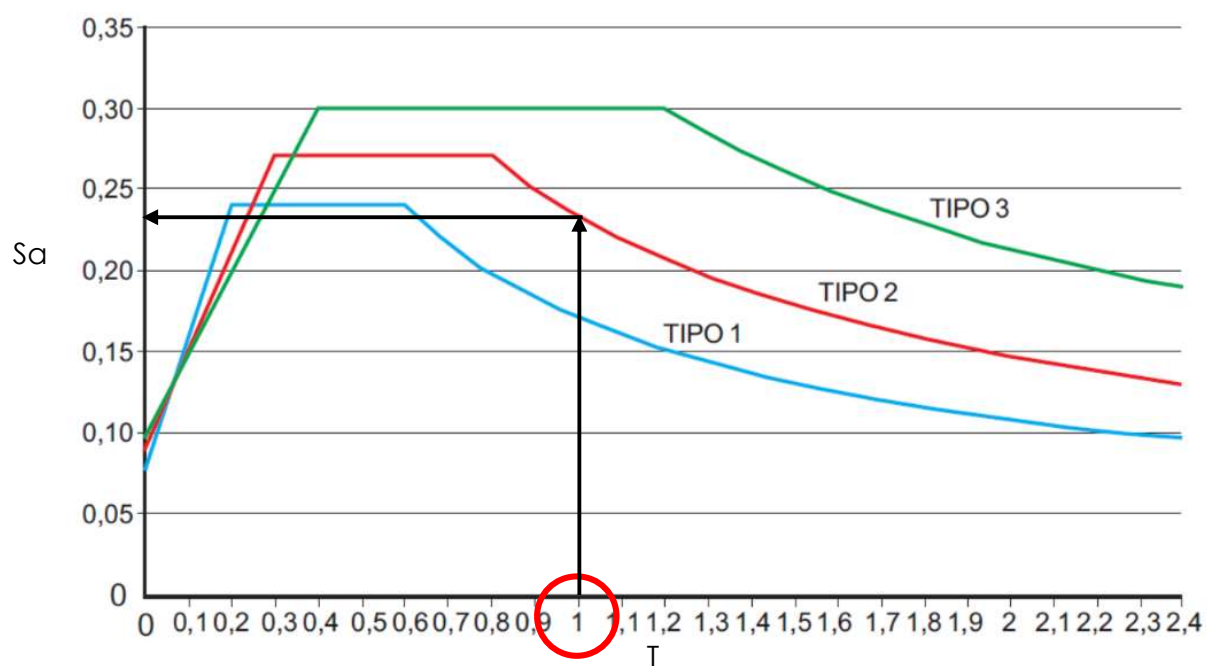
Curvas de respuesta y su envolvente

Analizando la curva podemos observar que las construcciones muy rígidas (al inicio de la gráfica) tienen una respuesta prácticamente igual a la del suelo. A partir de allí, a medida que aumenta el periodo de vibración, la aceleración también se incrementa de manera proporcional (pendiente recta inicial) hasta llegar a una zona de la gráfica en la que aparece plafón horizontal que indica el rango de periodos para los cuales se produce la máxima respuesta (resonancia). Luego para las estructuras más flexibles con periodo de vibración más largo, su respuesta disminuye sustancialmente, por lo que para los edificios de gran altura el sismo puede no ser el principal problema a resolver.

Este espectro de respuesta es válido solo para un sitio determinado, en el cual se tomaron las características del movimiento que se espera experimente el suelo durante un sismo. Cada país recoge entonces, en su propia normativa, los espectros de respuesta para cada zona según su peligrosidad sísmica, y para cada tipo de suelo según su rigidez.

Para conocer la respuesta de una estructura ante un sismo, bastará entonces con calcular su periodo propio de vibración, y con este valor leer la aceleración en la curva del espectro que corresponda al tipo de suelo y zona sísmica donde se ubica dicha estructura.

Por ejemplo, en el espectro de respuesta elástica para la Zona sísmica 1 de Argentina, a una estructura con un periodo de vibración de 1 seg., le corresponde una aceleración de 0,23 g si el suelo donde se encuentra es del tipo 2.



Espectro de respuesta elástica para Zona Sísmica 1 de Argentina