

## Comentarios sobre el análisis y diseño sísmico de estructuras

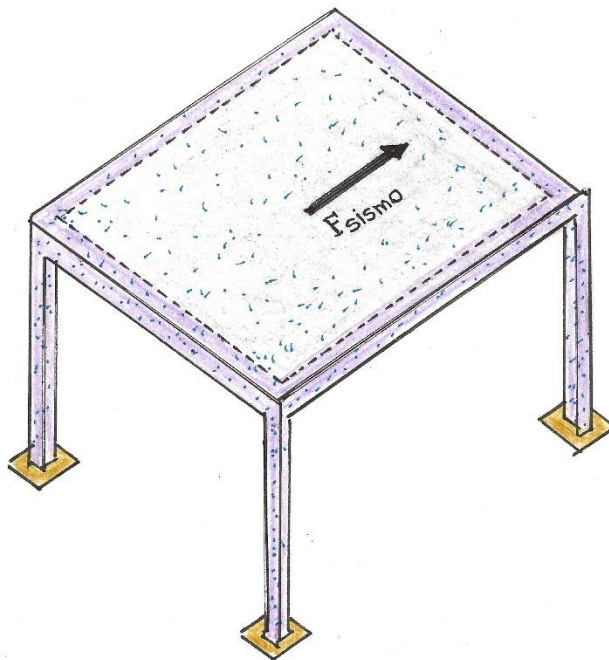
En los últimos días, y con relación a la situación de las escuelas, hay una controversia porque algunos ingenieros se niegan a garantizar que los edificios pueden resistir un terremoto intenso basado en una inspección visual.

Vamos a comentar sobre la filosofía del análisis y diseño sísmico para tratar de aclarar esto. El proceso se va a presentar de forma simplificada porque las explicaciones y metodologías de análisis rigurosas se dan en los cursos graduados de ingeniería estructural. No es un tema tan sencillo como parece.

Para la explicación vamos a suponer que usted necesita que le diseñen su casa o edificio y que este tiene solo un piso. Para diseñar su estructura usando esta metodología simplificada necesitamos una fuerza horizontal  $F_{sismo}$  la cual representa la demanda por el terremoto la cual se va a aplicar en el techo de un modelo de la casa. Esta fuerza la vamos a obtener usando la segunda ley de Newton: Fuerza = masa \* aceleración en donde la masa es la de la estructura. Esta se calcula tomando el peso  $W$  de la estructura y dividiéndolo por la aceleración de la gravedad  $g$ . Matemáticamente la fórmula para calcular la fuerza  $F_{sismo}$  debido al terremoto es:

$$F_{sismo} = \frac{W}{g} Sa$$

donde  $Sa$  es la aceleración del techo de la casa causada por el sismo.

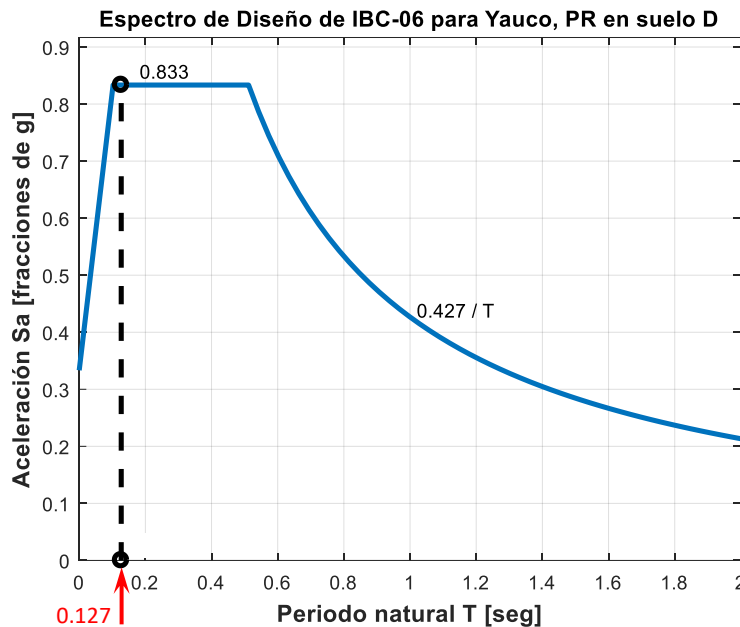


La aceleración  $Sa$  depende de tres cosas: del sismo, de las condiciones del suelo donde está la casa, y de las propiedades de la estructura. La propiedad de la estructura que nos interesa es lo que se conoce como el periodo natural  $T$ . Este se puede estimar de varias maneras y la más simple es usando una fórmula aproximada provista por los códigos.

Supongamos que su casa tiene  $h = 10 \text{ ft}$  de altura y se va a construir con vigas y columnas de hormigón (sin paredes de hormigón reforzado). En este caso usando una fórmula provista por los códigos el periodo natural  $T$  de la futura casa sería:

$$T = C_t (h)^x = 0.016 * (10)^{0.9} = 0.127 \text{ segundos}$$

Ahora nos falta conocer la información del sismo para conocer la aceleración  $S_a$  a que debemos usar. Esta se provee en un gráfico que se conoce como “*espectro de diseño*”. Supongamos que nuestra casa se va a construir en Yauco, PR, y que las propiedades del depósito del suelo no se conocen. Un código de diseño como el IBC-06 nos dice que el espectro a usar es el siguiente:



Este espectro (el gráfico anterior) en teoría tiene en cuenta todas las posibles fallas activas que pueden producir un movimiento sísmico del terreno significativo en el sitio de la estructura. Cada falla es capaz de generar sismos de distinta magnitud y cada una está a una distancia diferente de la estructura. Todo lo anterior se debería haber tenido en cuenta para crear el espectro de diseño sísmico. ¿Y si se descubre una falla nueva que no se conocía? Entonces hay que estudiar si hay que modificar este espectro de diseño o no. Así avanza la ingeniería sísmica: los ingenieros y sismólogos no son titanes sobrehumanos. Hacen lo mejor que se puede con lo que se conoce hasta el momento. Lo que las agencias del gobierno podrían hacer para ayudar es proveer fondos necesarios para que los expertos estudien estas nuevas fallas, si hay sospechas de que existen.

Dejando de lado esto, y continuando con los cálculos, hay que entrar al gráfico anterior con el periodo de nuestra estructura,  $T = 0.127 \text{ seg}$ . De allí se obtiene que la aceleración  $S_a$  es  $0.833g$ . Supongamos además que el peso  $W$  de la casa es  $50,000 \text{ lb}$ . Sustituyendo  $S_a$  y  $W$  en la fórmula de la fuerza  $F_{sismo}$  tenemos:

$$F_{sismo} = \frac{50,000}{g} \times 0.833 g = 41,650 \text{ lb}$$

Ahora le colocamos esta fuerza en el techo del modelo de la estructura (ver primera figura) y con los resultados de un análisis diseñamos la estructura. Para nuestra casa de hormigón del ejemplo, diseñar significa escoger las dimensiones de las vigas y columnas, la cantidad, tamaño y posición de las varillas de acero que van a lo largo de estos elementos (se llaman refuerzo longitudinal) y los aros o estribos (refuerzo transversal), incluyendo la separación de estos, etc., etc. Al menos en teoría, si ocurre el sismo para el cual diseñamos (el del gráfico anterior) a su casa no le debería pasar casi nada. El procedimiento para el diseño debería cubrirse en un curso de ingeniería civil sobre diseño de estructuras de hormigón: en algunas universidades que están en zonas no sísmicas no se cubre, por lo que no hay garantía que un ingeniero con bachillerato los conozca.

Pero, y aquí viene la sorpresa para mucha gente, **así no se diseña**. La razón es que la ocurrencia de un terremoto es un evento excepcional. El hecho de que hubo actividad sísmica de intensidad moderada a fuerte hace algunos días en el suroeste de Puerto Rico no lo hace menos excepcional: el terremoto fuerte anterior a estos recientes ocurrió hace un poco más de 100 años. En otras palabras, es muy probable que su casa durante su vida útil no experimente ningún sismo. Por lo tanto, y por razones económicas, vamos a disminuir la fuerza  $F_{sismo}$  anterior de 41,650 lb. Esto debe hacerse con mucho cuidado y los códigos nos dicen cómo: vamos a dividir la fuerza  $F_{sismo}$  que calculamos antes por un coeficiente  $R$  mayor que 1:

$$F_{reducida} = \frac{F_{sismo}}{R}$$

Este coeficiente  $R$  depende del tipo de estructura y del material (si es un pórtico de hormigón con vigas y columnas, o si es de acero, o si tiene paredes de hormigón reforzado, etc.). Para nuestro ejemplo el código dice que se puede usar un valor de  $R = 8$  si se diseña y construye siguiendo ciertas reglas. Entonces la nueva fuerza para el diseño  $F_{reducida}$  es:

$$F_{reducida} = \frac{41,650 lb}{8} = 5,206 lb$$

Aquí puede surgir la pregunta: ¿y si ahora viene el sismo fuerte cuyo espectro es el anterior, la estructura va a sufrir daño? Por supuesto que sí, porque se ha sub-diseñado. ¿Cuánto daño va a sufrir? Esto es difícil de cuantificar, pero a base de la experiencia de expertos acumulada por años (y basada en experimentos, en análisis, en observaciones de campo, etc.), si se siguen las especificaciones del código la estructura NO DEBE COLAPSAR sino fallar en forma no súbita sino gradual. Si falla de esta manera los ocupantes deberían poder desalojarla, y tal vez haya que demolerla, pero no debería haber víctimas por los daños que ocurrirán (si los ocupantes toman las precauciones usuales que se recomiendan y que ya todos seguramente conocen).

Por supuesto, el cliente puede pedirle al diseñador que use  $R = 1$  y en ese caso, en teoría, la casa no tendría prácticamente daño luego del sismo. Pero por supuesto, esto encarecería los costos porque habría que usar secciones mayores, etc. Esto podría ser aceptable para estructuras de suma importancia que se requiere que permanezcan operacionales luego de un sismo fuerte. En los casos de instalaciones esenciales, se multiplica el valor de  $F_{reducida}$  por un coeficiente  $I$  mayor que 1 llamado factor de importancia.

Ahora bien, para terminar:

- Si un ingeniero examina una estructura que NO ha sufrido nada de daño luego de un sismo fuerte, y le preguntan. ¿Qué va a pasar si viene otro sismo de intensidad menor o igual al primero? La respuesta es: no va a pasar nada.
- Otra pregunta: ¿Y si viene uno de MAYOR intensidad? La respuesta correcta debería ser: no sabemos. Para esto habría que revisar cómo se hizo el diseño, qué código se usó para predecir las aceleraciones del sismo, etc.
- Si la pregunta es: ¿y si hubiera daño? ¿Cuánto daño habría? Esto es todavía más difícil de responder. Habría que hacer un estudio considerando el comportamiento inelástico de la estructura y pocos especialistas saben hacerlo, además de que lleva bastante tiempo.

**Conclusión:** aunque tal vez suframos una desilusión porque a lo mejor nuestras expectativas eran muy altas, esta es la realidad del diseño estructural sismo-resistente actual.