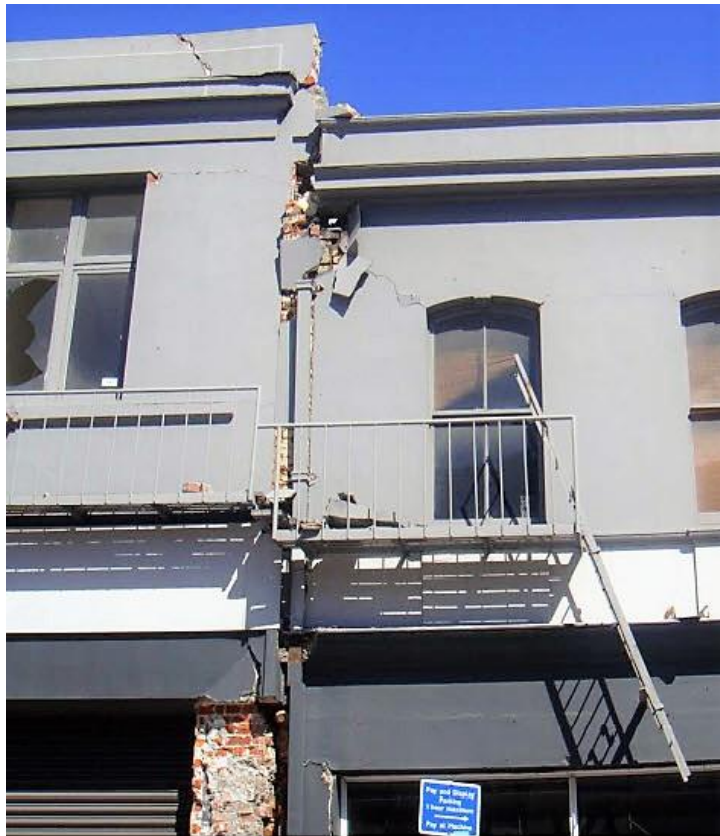


## El problema del golpeteo entre dos estructuras

Una de las causas por las cuales las estructuras pueden sufrir daños durante un terremoto fuerte es el fenómeno conocido como “*golpeteo*” (“*pounding*” en inglés). Como su nombre lo indica, esta situación ocurre cuando dos estructuras que están muy cercanas son sometidas a un sismo fuerte y se impactan unas a otras. El efecto del impacto entre edificios puede ser catastrófico como, por ejemplo, en el caso del Hotel de Carlo en la Ciudad de México durante el sismo de 1985:



O el resultado puede ser menos trágico como el siguiente caso que ocurrió durante el sismo de 2010 en Christchurch, Nueva Zelandia .



El problema del golpeteo entre edificios puede ocurrir cuando:

- las estructuras se construyeron cercanas unas a otras o,
- cuando los edificios están separados por lo que se conoce como una “*junta sísmica*”.

### Las juntas sísmicas

Una *junta sísmica* (“*seismic joint*”) es el espacio creado a propósito para separar unidades de un mismo edificio. Cuando se comenzaron a usar se construían para separar en dos o más unidades edificios con irregularidades en planta. Por ejemplo, un edificio con planta en forma de L se puede separar en dos unidades, cada una con la forma de un rectángulo. Se sabe que estos edificios con irregularidad en planta no se comportan bien durante los sismos porque, además del movimiento de traslación, tienen torsión alrededor del eje vertical. Además, en las esquinas reentrantes (por ejemplo, donde se unen los dos brazos de la L) va a haber concentración de esfuerzos que puede ser el comienzo de una falla. Aunque a comienzos de la década de los sesenta estos problemas eran conocidos por los ingenieros, como los métodos de análisis estructural tenían limitaciones, se prefería evitar el problema usando juntas sísmicas. Hoy en día los programas de análisis estructural sofisticados permiten pronosticar mejor el comportamiento sísmico de estos edificios y se pueden diseñar en forma más segura, aunque los ingenieros más prudentes prefieren aún evitar estas plantas irregulares.



Diseñar y construir una junta sísmica es una tarea complicada y engorrosa. El ancho requerido aumenta de piso en piso y por simplicidad se construyen con la separación requerida para el piso más alto, pero esto tiene un costo asociado. Las juntas requieren cubiertas que deben ser resistentes a las inclemencias

del tiempo, estancas para la lluvia, resistentes al fuego, seguras para el tránsito de las personas cuando son interiores, etc.



Los anchos de las juntas sísmicas se determinaban usando reglas prácticas empíricas como, por ejemplo, 2 pulgadas por cada piso. Hoy en día los anchos mínimos están especificados por los códigos: el objetivo es establecer una separación tal que se evite el impacto cuando los edificios se mueven lateralmente durante un sismo. En otras palabras, *se trata de lograr que las estructuras puedan responder al terremoto en forma individual.*

### Separación mínima entre estructuras

Supongamos que tenemos dos estructuras, a las que llamaremos A y B, que están separadas ya sea por una junta sísmica o por una zona libre. Los códigos modernos proponen calcular la separación mínima que deben tener los dos edificios con la siguiente fórmula (tomada del estándar ASCE 7-16):

$$\delta_{\min} = \sqrt{(\delta_{\max,A})^2 + (\delta_{\max,B})^2} \quad (1)$$

donde  $\delta_{\max,A}$  y  $\delta_{\max,B}$  son los desplazamientos *inelásticos* máximos de las estructuras A y B, respectivamente. Esto ocasiona un problema porque cuando se analizan las estructuras los desplazamientos se calculan suponiendo un comportamiento *elástico* (lineal) pero, como las estructuras se sub-diseñan para cargas sísmicas, van a tener un comportamiento inelástico. Los códigos proponen resolver este problema introduciendo un factor de amplificación  $C_d$  que depende del tipo de estructura (por ejemplo, es igual 5.5 para pórticos especiales resistentes a momentos).

$$\delta_{\max} = \frac{C_d}{I} \delta_{\text{elástico}} \quad (2)$$

donde  $\delta_{\text{elástico}}$  es el desplazamiento crítico elástico, vale decir el que se obtiene del análisis usual de la estructura. El factor  $I$  es un "factor de importancia" mayor o igual a 1 basado en la función de la estructura.

Surge la pregunta: ¿en lugar de usar la raíz cuadrada, no es más razonable sumar los desplazamientos máximos de las dos estructuras en valor absoluto? O sea:

$$\delta_{\min} = |\delta_{\max,A}| + |\delta_{\max,B}| \quad (3)$$

Lo que ocurre es que en general los desplazamientos máximos no van a ocurrir en iguales instantes de tiempo y la ecuación (3) va a dar valores muy conservadores (pero se podría usar si se desea).

Dependiendo del método que se usa para analizar la estructura, los valores del desplazamiento  $\delta_{elástico}$  de la ecuación (2) se calculan usando un espectro de diseño sísmico o varios registros de aceleraciones de sismos apropiados. Por lo tanto, los valores van a ser tan buenos (o tan malos...) como sea la carga sísmica que usamos. Si por alguna razón imprevista, el espectro provisto por el código subestima la intensidad del sismo, aunque sigamos al pie de la letra las fórmulas recomendadas por los códigos puede que ocurra el golpeteo.

### Factores que influyen en el golpeteo

Los principales factores que influyen para que ocurra el golpeteo entre estructuras son:

- Las propiedades dinámicas de la estructura, en particular sus *periodos naturales*. Los sismos afectan de manera diferente a edificios con distintos periodos naturales y es muy probable que no se muevan en fase.
- La *geometría* de las estructuras. Debido al movimiento de torsión que ocurre en edificios irregulares en planta, estos se desplazan más que los edificios regulares (con forma de “caja de zapatos”).
- La capacidad de *disipar energía* de las estructuras (su amortiguamiento). Cuando más energía disipen las estructuras, menor serán sus desplazamientos y la posibilidad de que ocurra el golpeteo.
- Los tipos de *depósitos de suelo* en los que se construyeron las estructuras. Se sabe que los depósitos de suelos blandos amplifican las ondas sísmicas y por lo tanto va a aumentar la aceleración de las fundaciones y con ella los desplazamientos de ambos edificios.
- La *intensidad* del sismo (su aceleración pico o PGA, por ejemplo). Es evidente que un sismo más intenso va a causar mayor movimiento en ambas estructuras.
- El *contenido de frecuencia* y la *duración* del registro sísmico. Si el registro de aceleraciones tiene frecuencias dominantes cercanas a una frecuencia natural de uno de los edificios, el movimiento de esta estructura se va a amplificar. Y a medida que la duración del sismo aumenta, también se incrementa la posibilidad de que ocurra resonancia.

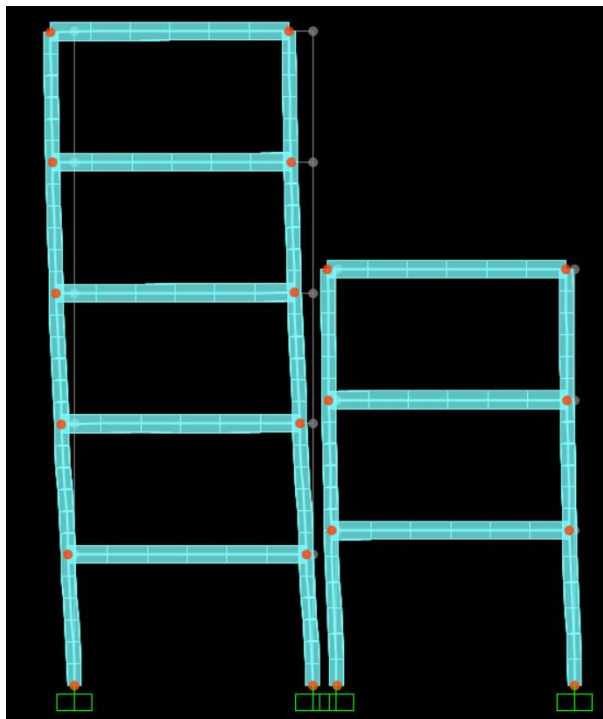
En teoría, el golpeteo no debería ocurrir entre dos edificios idénticos. Sin embargo, aunque las estructuras tengan las mismas alturas, geometría e idénticos elementos estructurales, en la práctica es muy probable que la distribución de masa sea distinta. Esto es suficiente para que las propiedades dinámicas sean levemente distintas y podría ocurrir golpeteo, aunque no tan severo.

El fenómeno de golpeteo no está restringido a edificios. En sismos pasados esto ha ocurrido con frecuencia en puentes. El golpeteo puede ocurrir entre el tablero (“deck”) y el estribo (“abutment”), o en las juntas de expansión. Aún más problemático (si bien por suerte menos frecuente) es el golpeteo entre los llamados “puentes de pórticos múltiples”. En la práctica, estos son dos puentes paralelos entre sí y cercanos uno del otro. Se argumenta que la falla de las columnas en el Viaducto de Mayagüez en la Carretera Nro. 2 ocurrió por el golpeteo entre los dos puentes: el original y el de más reciente construcción.



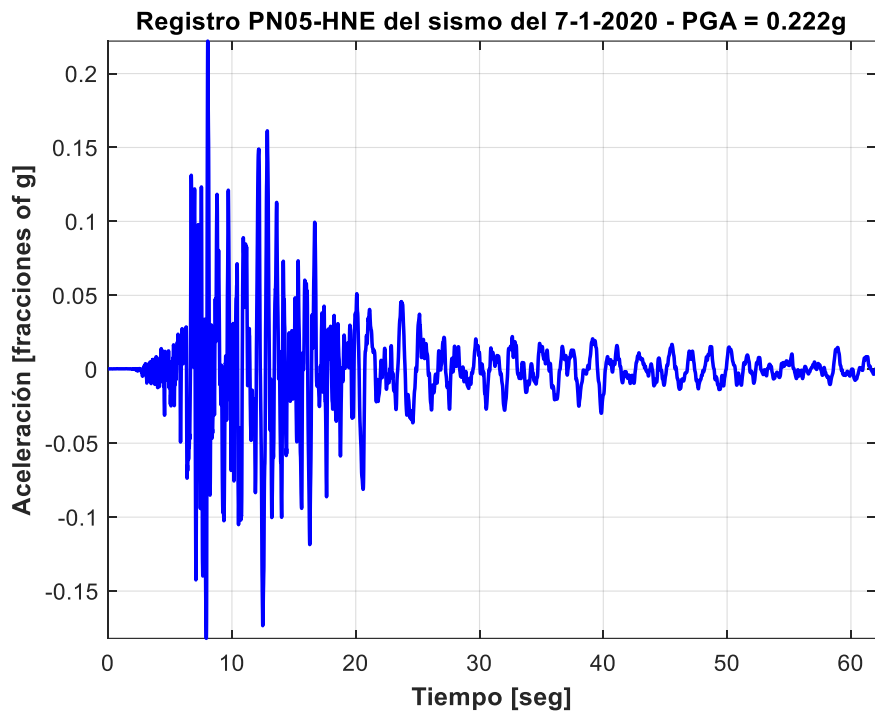
### Simulación del golpeteo

Vamos a simular un caso de golpeteo con el programa SAP2000. Tomemos un modelo de un edificio de cinco pisos y otro de tres pisos donde las columnas tienen distinta altura que el anterior. Ambos son pórticos resistentes a momentos. Por simplicidad los modelos tienen un solo tramo ("bay"). Nótese que el hecho de que las losas de piso de los dos edificios no coincidan es un caso crítico porque al moverse las mismas van a impactar a las columnas y no a las losas del edificio vecino (que son más rígidas).



Si se usa un modelo sencillo donde los edificios simplemente están separados sin ningún elemento entre ellos, es posible que al hacer la simulación observemos que una estructura penetra en la otra. Por supuesto, esto no puede ocurrir y para mejorar el modelo habría que unir los dos modelos de los edificios con lo que se conoce como “gap elements” (elementos de brecha). Esto, sin embargo, es un tema muy avanzado que no se discutirá aquí.

Los periodos naturales fundamentales de los edificios son:  $T_1 = 0.658$  segundos para el de cinco pisos y  $T_1 = 0.469$  segundos para el de tres pisos. Se colocó en la base de ambos edificios el registro del terremoto M6.4 del 7 de enero medido en la Parroquia del Carmen en Ponce, PR. Los edificios están separados 18 pulgadas.



La figura siguiente muestra los desplazamientos del techo del edificio más bajo (nodo 16) y un punto cercano a esta altura del edificio más alto (nodo 10). Los máximos desplazamientos en valor absoluto son:

$$u_{10} = 2.707 \text{ pulgadas en } t = 13.70 \text{ s} \quad ; \quad u_{16} = 0.975 \text{ pulgadas en } t = 12.54 \text{ s}$$

Si se suman estos dos desplazamientos (notemos que, aunque los tiempos en que ocurren estos valores no son exactamente iguales, son similares) para que los edificios no choquen la distancia mínima que los separa debería ser:

$$\delta_{\min} = 2.707 + 0.975 = 3.682 \text{ pulgadas} < 18 \text{ pulgadas}$$

Por lo tanto, bajo estas condiciones no debería haber golpeteo *si los edificios se comportan en forma elástica*. Si se consideran los *desplazamientos inelásticos* usando la aproximación propuesta por los códigos, vale decir la ecuación (3), entonces la distancia segura mínima es:

$$\delta_{\min} = 5.5 \times 2.707 + 5.5 \times 0.975 = 20.25 \text{ pulgadas} > 18 \text{ pulgadas}$$

donde se ha usado un factor de importancia  $I = 1$  y el factor de amplificación  $C_d = 5.5$ . Evidentemente, en este caso habrá golpeteo y una separación de 18 pulgadas no es apropiada.

