

De las irregularidades estructurales

Definiciones. Respuesta sísmica de edificios con irregularidades verticales.

Definiciones

Referencia

Pankaj Agarwal and Manish Shrikhande. *Earthquake Resistant Design of StructuresK. Chapter 14. Effect of Structural Irregularities on the Performance of RC Buildings during Earthquake.* Prentice-Hall, of India Private Limited, New Delhi. 2006.

Al margen de las debilidades de la estructura, imperfecciones en los códigos o errores en el análisis y diseño, la configuración estructural juega un rol vital en la dimensión de una catástrofe. La configuración de la edificación puede ser descrita como **regular** o **irregular** en términos del tamaño y forma de la misma, el arreglo de los elementos estructurales y de la masa.

- Las **configuraciones regulares** respetan la simetría (en planta y elevación), y tienen una distribución uniforme tanto de fuerzas de gravedad como de resistencia lateral.
- Las **configuraciones irregulares** carecen de simetría, y presentan discontinuidades en geometría, masa, o elementos resistentes de carga. Pueden causar interrupción del flujo de fuerzas y concentración de esfuerzos. Las irregularidades de masa y rigideces de elementos, también pueden causar grandes fuerzas de torsión.

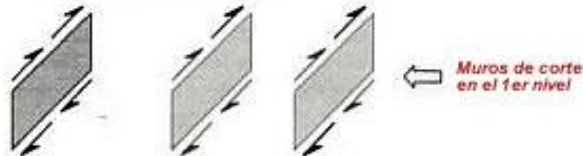
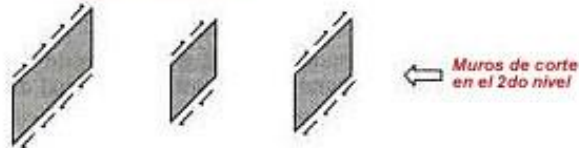
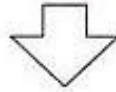
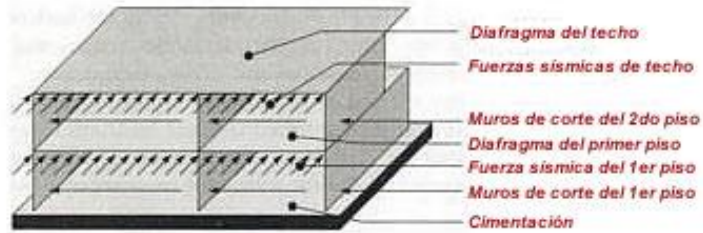
A su vez, las irregularidades pueden distinguirse como verticales u horizontales.

- Las **irregularidades verticales** indican cambios súbitos de resistencia, rigideces, geometría y masa, y conducen a una distribución irregular de fuerzas y deformaciones a lo largo de la altura del edificio.
- Las **irregularidades horizontales** se refieren a formas asimétricas en planta (como F, L, T, U) o discontinuidades en elementos de resistencia horizontal (como cortes, aberturas, esquinas entrantes, u otros cambios abruptos).

Irregularidades verticales

◆ Discontinuidades en relación con la carga

La trayectoria general de cargas sísmicas puede explicarse de la siguiente manera. Las fuerzas sísmicas en todos los elementos del edificio, se transmiten vía las conexiones estructurales a los diafragmas horizontales y a los muros de corte (o columnas y marcos). A través de éstos, a la cimentación. El diagrama simplificado adjunto, tomado de la referencia, ilustra este flujo.



FLUJO DE FUERZAS SÍSMICAS EN LOS ELEMENTOS DE CORTE

Entre los casos de irregularidades de trayectorias de cargas, están:

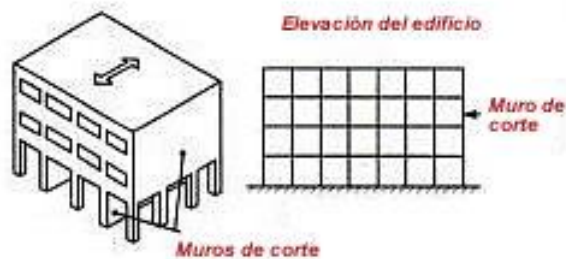


discontinuidades de columnas, de muros de corte, en marcos, o elementos que quedan en una situación flotante. En el caso de columnas o muros de corte que no continúan hacia el terreno, el corte inducido afecta a los otros elementos del piso inferior. Los elementos más críticos se dan en los puntos de conexión, y en las columnas del nivel inferior.

Las figuras adjuntas ilustran estos casos.



Caso de construcción flotante

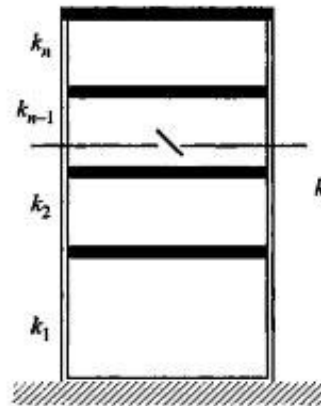


Caso de discontinuidad de muros de corte

EJEMPLOS DE IRREGULARIDAD VERTICALES POR CARGA

♦ Irregularidades en resistencia y rigidez

Un **piso débil** está definido como uno en el cual su resistencia lateral es menos



Un piso es blando cuando

$$k_i < 0.7 k_{i+1}$$

o cuando

$$k_i < 0.8 \left\{ \frac{1}{3}(k_{i+1} + k_{i+2} + k_{i+3}) \right\}$$

del 80% la del piso superior siguiente. La resistencia del piso involucra a la de todos los elementos resistentes que comparten el piso para resistir el corte en la dirección bajo consideración.

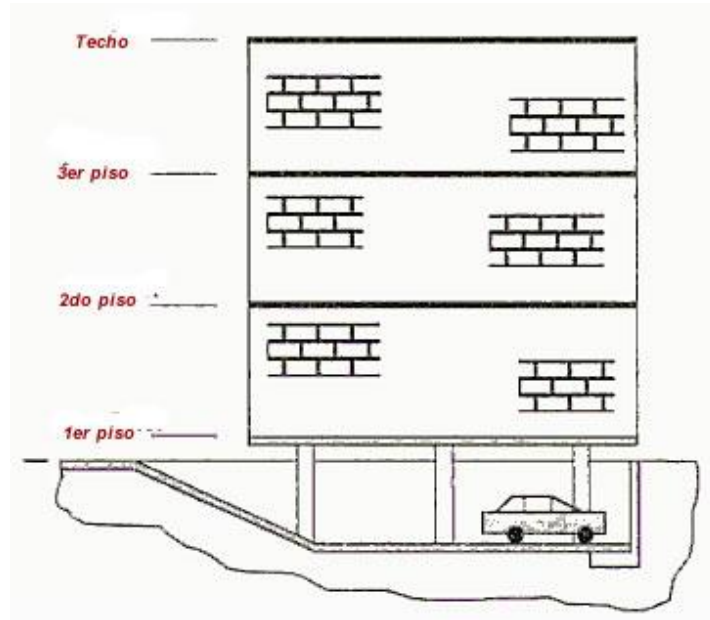
Un **piso blando** se define como aquel cuya rigidez lateral es menos del 70% de

aquella del piso inmediatamente superior, o menos del 80% de la rigidez combinada de los tres pisos por encima.

La discontinuidad del piso blando incrementa la flexibilidad de la estructura, provocando grandes deflexiones en el primer piso, y en consecuencia, concentración de fuerzas en las conexiones del segundo piso.

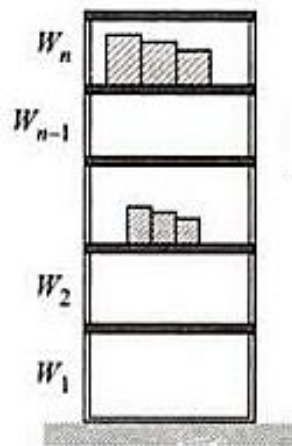
Los códigos consideran las pautas para calcular tanto la resistencia como la flexibilidad.

Los muros de corte pueden ser empleados para incrementar la rigidez cuando es necesario y se desea una distribución uniforme en ambas direcciones.



CASO DE PISO BLANDO

◆ Irregularidades por masa



Irregularidades de masa cuando

$$W_i > 2.0 W_{i-1}$$

o cuando

$$W_i > 2.0 W_{i+1}$$

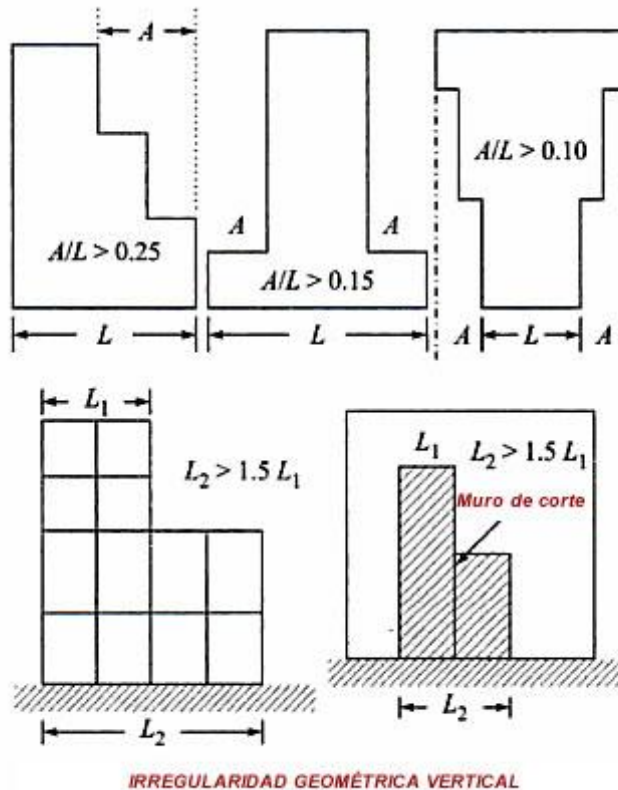
IRREGULARIDADES DE MASA

Se consideran irregularidades por masa cuando la masa efectiva (peso muerto más carga) de cualquier nivel es más del 200% de la masa efectiva de un piso adyacente.

Los excesos de masa pueden incrementar las fuerzas laterales de inercia, incrementan la magnitud de las deformaciones entre pisos, evidenciándose en desfavorables efectos estructurales.

Se requiere de un análisis dinámico para obtener una mejor distribución de las cargas de corte.

◆ Irregularidades por geometría vertical



Se consideran irregularidades de geometría vertical, cuando la dimensión horizontal del sistema de fuerzas laterales resistente en cualquier piso es más del 150% que en el piso adyacente. Se le puede visualizar como una esquina entrante en el sentido vertical.

Se recomienda hacer secciones separadas de la edificación, y que puedan vibrar también en forma separada. En caso contrario, es necesario un análisis dinámico.

◆ Proximidad de edificios adyacentes

Esta proximidad puede conducir al choque de dos edificios próximos. El golpe y los daños pueden ocasionar una respuesta irregular de las edificaciones a diferentes alturas.



EDIFICIOS CONTIGUOS

El daño es mayor cuando los pisos de los edificios tienen diferente nivel, con el riesgo de golpear las columnas. Cuando uno edificio es mayor que otro, el más pequeño actúa como una base para la parte superior del edificio más alto. Surgen complicaciones adicionales al agregarse otros factores, como características dinámicas distintas entre los edificios.

Los daños pueden ser minimizados bajo un control exigente, por la separación de los edificios, y el alineamiento de los pisos en las edificaciones contiguas.

Irregularidades en planta

◆ Irregularidades por torsión



Se aplican al caso de diafragmas rígidos. Se califica la irregularidad por torsión cuando el máximo desplazamiento, calculado con la excentricidad de diseño, en uno de los extremos, es mayor en 1.2 veces el promedio de los desplazamientos entre los dos extremos de la

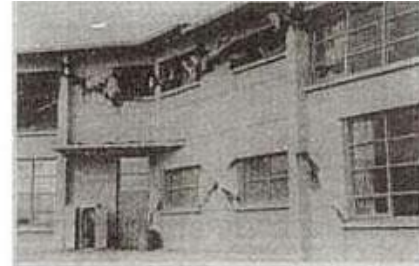
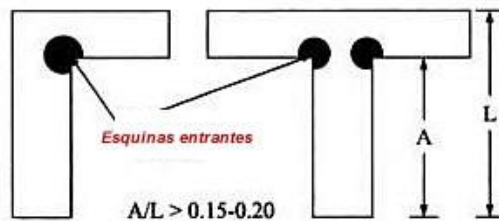
estructura.

La torsión o excesiva deflexión lateral es generada en edificios asimétricos o excéntricos. Es más notoria en los puntos más lejanos del centro de torsión.

Las irregularidades por torsión pueden disminuirse por la ubicación apropiada de elementos resistentes y distribución de masas.

◆ Esquinas entrantes

Esta característica es común en configuraciones que en planta tienen la forma de L, H, T, + (o combinaciones). Producen concentración de esfuerzos. Tienden a producir variaciones de rigidez, y de ahí, movimientos diferenciales entre las



CASO DE ESQUINAS ENTRANTES Y SUS POSIBLES CONSECUENCIAS

diferentes partes del edificio. Además, provocan torsión.

Se recomienda separar las secciones, y en caso contrario, reforzar la capacidad de tensión de la esquina entrante.

◆ Configuración no paralela

Aquí, los elementos verticales que resisten carga, no son paralelos o simétricos



SISTEMAS NO PARALELOS

respecto al mayor eje ortogonal del sistema resistente de fuerzas laterales. Ello puede provocar fuerzas de torsión bajo movimientos sísmicos. El problema es más sensible en formas triangulares, donde la porción más estrecha tiende a ser más flexible que el resto. Se recomienda evitar estas situaciones o incrementar la resistencia a la torsión de las partes agudas.

♦ Diafragmas discontinuos



diafragma de techos.

Esta irregularidad se presenta por abruptas variaciones en la rigidez, incluyendo aquellas provocadas por cortes o aberturas mayores al 50% del área bruta encerrada en el diafragma. El diafragma actúa como una viga horizontal, y sus bordes se comportan como aleros. Por ello, la abertura debilita seriamente la capacidad de carga. Este es un problema común en

Respuesta sísmica de edificios con irregularidades verticales

Referencia

Eggert V. Valmundsson and James M. Nau (North Carolina State University, Raleigh, North Carolina). *Seismic Response of Building Frames with Vertical Structural Irregularities*. Journal of Structural Engineering. Vol 123, N° 1, January, 1997. ASCE.

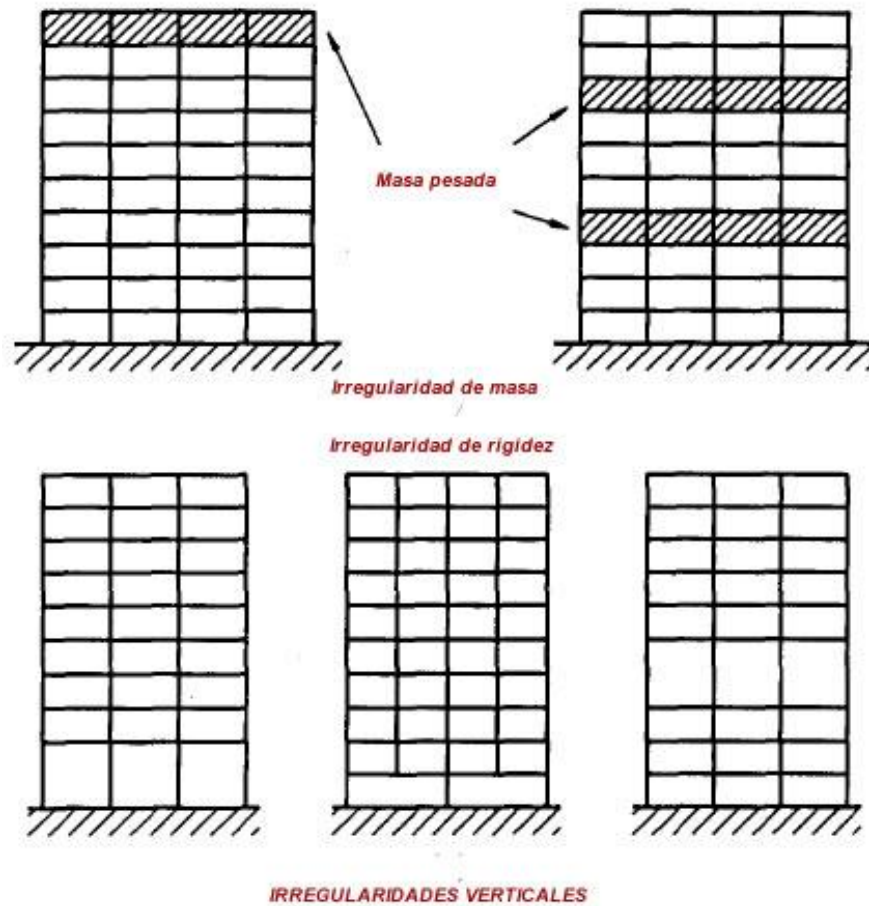
Los códigos establecen criterios para definir estructuras irregulares. El artículo evalúa lo especificado por el Uniform Building Code (UBC) para irregularidades de masa, resistencia, y rigidez. Para evaluar estos criterios, se estudiaron estructuras con 5, 10, y 20 pisos. Las irregularidades son introducidas cambiando las propiedades de un nivel o piso. Las relaciones de masa varían de 0.1 a 5.0, y la rigidez y resistencia para el primer piso varían de 1.0 a 0.5. La respuesta es calculada para diferentes niveles de ductilidad de 1 (elástico), 2, 6, y 10 para cuatro registros de sismos. Las conclusiones corresponden a los efectos de las irregularidades en las fuerzas de corte y las máximas demandas de ductilidad. Se encuentra que los criterios de masa y rigidez del UBC resultan en un incremento moderado al comparar las estructuras irregulares con aquellas regulares. Para el caso del criterio de resistencia, resulta en grandes incrementos respecto a los resultados, y pueden considerarse como no consistentes en comparación con los requerimientos de masa y rigidez. En el artículo se proponen modificaciones a los criterios, incluyendo una fórmula revisada para encontrar el periodo fundamental para edificios con distribución no uniforme de masa.

Introducción

Los códigos sobre diseños ante sismos, suelen aceptar el **equivalente de fuerza lateral** para calcular las fuerzas de diseño. Este equivalente está basado en un análisis lineal, con los efectos de fluencia aproximados por un espectro de aceleración, reducido por un factor de modificación. En segundo lugar, esta aproximación asume que una distribución lineal de fuerzas laterales es razonable y conservadora respecto a una respuesta dinámica. De acuerdo al código UBC, este método es aplicable sólo a los siguientes casos.

- Para estructuras regulares e irregulares con menos de cinco pisos o 19.8 m.
- Para estructuras regulares con menos de 73.2 m.

Con algunas excepciones, **debe usarse el análisis dinámico** para edificios irregulares y para los regulares que excedan los 73.2 m de altura.



Para el mismo código, una estructura es irregular si tiene discontinuidades físicas significativas en su configuración, o en su sistema de resistencia ante fuerzas laterales, estableciendo las siguientes condiciones.

Irregularidad de peso (masa) Es considerada cuando la masa efectiva de cualquier nivel es más del 150% de la masa efectiva de un nivel adyacente.

Irregularidad por rigidez: piso blando Un piso es considerado blando cuando la rigidez lateral es menos del 70% de aquella del piso siguiente, o menos del 80% de la rigidez promedio de los siguientes tres pisos.

Discontinuidad en capacidad: piso débil En un piso débil, su resistencia es menos del 80% de la del piso siguiente. La resistencia del piso es el total de la resistencia de los elementos sismo-resistentes en el piso según la dirección en estudio.

El artículo cita que tales límites tienen un nivel de arbitrariedad que amerita el que se realicen investigaciones para su verificación. El objetivo del estudio es justamente esta evaluación en tres irregularidades verticales: de **masa**, **rigidez** y **resistencia**. **Esto es, por ejemplo, ver si una estructura con irregularidad de**

masa así definida, tiene un comportamiento marcadamente diferente que el obtenido con el equivalente de fuerza lateral.

En relación con la ***irregularidad de masa*** (carga muerta más una porción de carga viva), usualmente ésta se origina por el uso distinto de un piso respecto a otro, como el caso de un nivel destinado a estacionamiento.

Respecto a las ***irregularidades de rigidez y resistencia***, el artículo anota que cambios en estas variables no suelen ser independientes, pese a que el código proporciona criterios diferentes para su medición. Por ejemplo, disminuyendo el momento de inercia se reduce tanto la rigidez como la resistencia de un elemento. Igual pasa al reducir el número de columnas entre dos pisos contiguos. Elementos no estructurales, también pueden reducir tanto la rigidez como la resistencia.

Metodología del estudio

Se utilizaron edificaciones basadas en marcos estructurales planos de 5, 10, y 20 pisos. Se adoptaron sistemas de masas con un grado de libertad por piso. Las vigas fueron consideradas mucho más rígidas que las columnas. Todas las combinaciones condujeron al estudio de 5 mil casos.

Los casos de estructuras regulares fueron analizados según la aproximación del ***equivalente de fuerza lateral (EFL)*** por las siglas en inglés). Para el caso de análisis dinámico, según es requerido por el código para estructuras irregulares, el estudio se basó en los registros históricos, expresados a partir de los acelerogramas, lo que en inglés suele llamarse ***time history (TH) analysis*** o ***time history response***.

La comparación, en el caso de irregularidad de masas, es calculada en el estudio como:

$$Error = \frac{(ELF - TH)}{TH} 100\%$$

Resultados

La comparación entre el análisis bajo *ELF* y el *TH*, condujo a resultados como los siguientes.

- Cuando la relación de masa de un piso respecto al siguiente es 1.5, las fuerzas cortantes obtenidas con las provisiones del código, están sobre el 10% respecto a una estructura con una distribución uniforme de masa.
- Reduciendo la resistencia del primer piso en 20%, se incrementa la demanda de ductilidad entre 100 a 200%. El incremento en demanda de ductilidad es mayor para estructuras de 20 pisos para bajas ductilidades de diseño. El efecto de la ductilidad de diseño es menos significativo en estructuras de 5 y 10 pisos.
- El criterio de piso débil establecido por las previsiones del código, las cuales permiten una estructura con el primer piso 20% más débil (en resistencia) que el piso superior para ser considerado regular, no es consistente con los requerimientos de masa y rigidez. A juicio de los autores, el criterio debe modificarse en el sentido de que el primer piso no debe ser más débil que el piso siguiente (a fin de que la estructura sea considerada regular).