



Configuración y Diseño

Arq. Eduardo Rodríguez Cimino

Estructuras III A

Prof. Titular:

Eduardo Rodríguez Cimino

Prof. Adjunta:

Julieta Mansilla

Prof. Asistentes:

Leonel Ghiglione

Horacio Altamirano

Anabella Cardellino

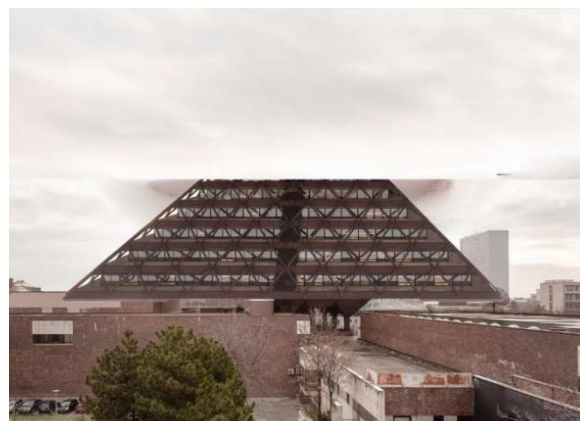
Ana Ostera

Madeleine Ledezma Orozco

6 CONFIGURACION Y DISEÑO SISMORRESISTENTE

6.1 EL DISEÑO SISMORRESISTENTE

Supongamos que una empresa solicita para su sede un proyecto de un edificio que debe tener forma piramidal, sin importar su orientación. El arquitecto a cargo del diseño realiza dos proyectos alternativos: uno con la base de la pirámide hacia abajo, y otro invertido, con la base hacia arriba.



Izq: Edificio Slovak Radio Tower, Bratislava. Fotografía de Alexandra Timpau,
Fuente: Archdaily. Der.: Fotomontaje

Para evaluar las opciones, agreguemos ahora un condicionante: La zona sísmica. ¿Qué edificio es más vulnerable? Solo con imaginar el efecto del momento de vuelco, sin dudas es más vulnerable el edificio de la izquierda, que presenta un centro de masa más elevado, y una menor base de apoyo. Esta condición de vulnerabilidad está implícita en el diseño, y no es posible eliminarla con un cálculo estructural que pudiera realizarse posteriormente. Aunque tengamos la tecnología para construir un edificio con forma de pirámide invertida en zona sísmica, su construcción será más costosa y menos eficiente que si se hubiera optado por la opción de la derecha.

El desempeño de una estructura frente a las acciones sísmicas está en gran medida caracterizado por la configuración de la construcción, definida desde las primeras etapas del proceso de diseño. Sin embargo, el diseño estructural como variable dentro del proceso de diseño arquitectónico, en muchas ocasiones queda relegado a otro profesional que introduce una estructura posterior a un proyecto ya definido. Dice el Arq. Horacio Saleme: "La seguridad contra el sismo no se resuelve transfiriendo al ingeniero el cálculo de la estructura. Fundamentalmente es un problema de diseño, pues no hay buen reglamento ni buen cálculo que pueda salvar a un edificio mal concebido."

Si un proyecto cuenta desde su inicio con una configuración inadecuada para zonas sísmicas, todo lo que el ingeniero puede hacer posteriormente es "parchar" lo mejor posible una solución deficiente. Por el contrario, un buen planteo geométrico inicial no requerirá siquiera de un cálculo minucioso para lograr un buen resultado.

Cuando el arquitecto concibe la configuración del edificio, influye o incluso determina el tipo de estructura que es posible utilizar y las dimensiones que serán requeridas para lograr obtener una adecuada rigidez y resistencia.

La peligrosidad sísmica de un territorio, debe ser considerada un condicionante más para cualquier diseño arquitectónico, tal como lo son el clima, asoleamiento, iluminación, ventilación, etc. Para lograr un adecuado nivel de seguridad sísmica es necesario que, tanto del ingeniero como del arquitecto intervinientes en el proyecto, apliquen los principios del diseño sismorresistente desde los primeros croquis del proceso de diseño.

Variables como la configuración en planta y en altura, sus proporciones, presencia de entrantes o irregularidades, la esbeltez, la distribución de masas y rigideces, la presencia y características de diafragmas horizontales, y la cantidad, continuidad y rigidez de los planos resistentes verticales, son determinantes en el desempeño de una estructura sometida a la acción del sismo.

6.2 VULNERABILIDAD SÍSMICA

La vulnerabilidad sísmica de un edificio o grupo de edificaciones, es el grado de daño que pudiera sufrir por la ocurrencia de un movimiento sísmico de una intensidad dada. Es una característica intrínseca de toda construcción, y depende de la configuración geométrica con la que hayan sido diseñados tanto sus componentes estructurales como los no estructurales.

Por configuración entendemos tanto al tamaño y la geometría general del edificio, como al tipo, ubicación y dimensiones de los elementos estructurales y no estructurales que lo componen.

Algunos de los aspectos de la configuración que determinan el grado de vulnerabilidad de un edificio son:

Configuración Geométrica:

- Configuración en planta
- Configuración en altura
- Edificios adyacentes
- Ubicación de los apoyos
- Presencia de elementos salientes
- Ubicación de cerramientos rígidos

Configuración Estructural:

- Configuración de los planos horizontales
- Configuración de los planos resistentes verticales
- Redundancia
- Excentricidad torsional
- Diseño de fundaciones. Arriostramientos.

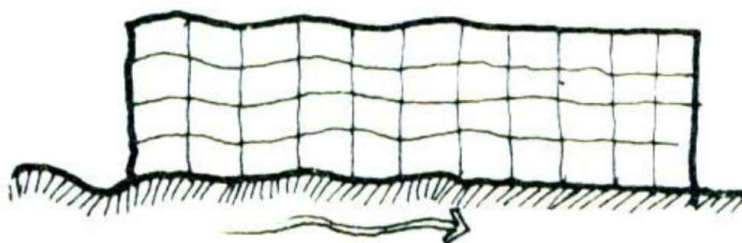
6.3 PAUTAS DE DISEÑO PARA ARQUITECTURA EN ZONA SÍSMICA

6.3.1 La configuración en planta

- **Longitud**

Cuando la longitud de la planta se vuelve excesivamente grande, el edificio puede tener dificultad para responder como una unidad a los movimientos sísmicos, dificultando su análisis con los métodos e hipótesis habituales.

Para determinar las fuerzas sísmicas, usualmente se supone que la estructura vibra de manera uniforme, y que todos los puntos ubicados en un mismo nivel se desplazan en simultáneo, con el mismo movimiento. Como la propagación de las ondas no es instantánea, sino que demora cierto tiempo en desplazarse de un punto a otro, un edificio de extremada longitud comenzará a estar afectado por el sismo primero en un extremo y luego en el resto, a medida que se propagan las ondas, produciendo una vibración asincrónica de sus elementos que causan esfuerzos adicionales de tracción-compresión.



Propagación de la onda sísmica por debajo de un edificio de extremada longitud

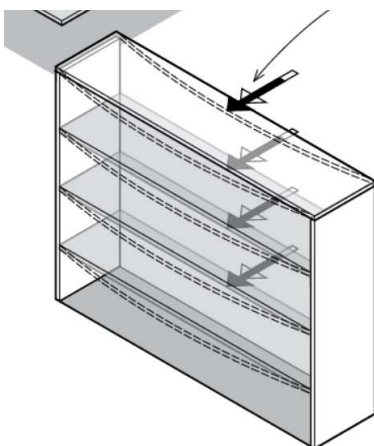
Es recomendable diseñar edificios que no tengan una excesiva longitud, y en el caso de requerirse esta condición, colocar juntas sísmicas que lo dividan en 2 o 3 edificios consecutivos separados de tal manera que las vibraciones de uno no afecten al siguiente.

- **Proporción**

Los planos horizontales son los encargados de distribuir las acciones del sismo entre los planos resistentes verticales, comportándose como vigas horizontales. Al aumentar su longitud esta viga pierde rigidez y con ello su capacidad de repartir de manera homogénea la fuerza sísmica.

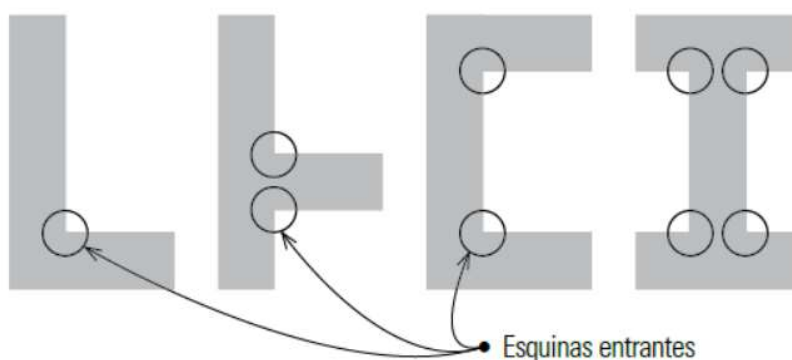
Cuando la **longitud** en planta es notoriamente mayor que el ancho, la edificación suele tener problemas para responder como una unidad ante movimientos sísmicos. Los extremos de este tipo de configuraciones vibran de manera asincrónica, con diferentes aceleraciones, generando tensiones de compresión longitudinal adicionales.

En general, relaciones de largo/ancho mayores a 5 pueden considerarse flexibles, generando inconvenientes en la edificación para responder como una unidad.



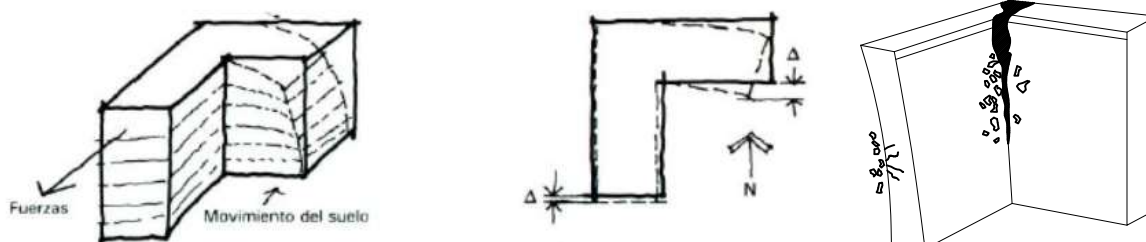
- **Forma geométrica**

La figura geométrica de la planta debe ser preferentemente convexa, sin entrantes o salientes. Figuras complejas como con forma de L, T, U, H, o X producen variaciones de rigidez y, por lo tanto, movimientos diferenciales entre diversas partes del edificio, provocando concentraciones de tensiones en las esquinas entrantes.

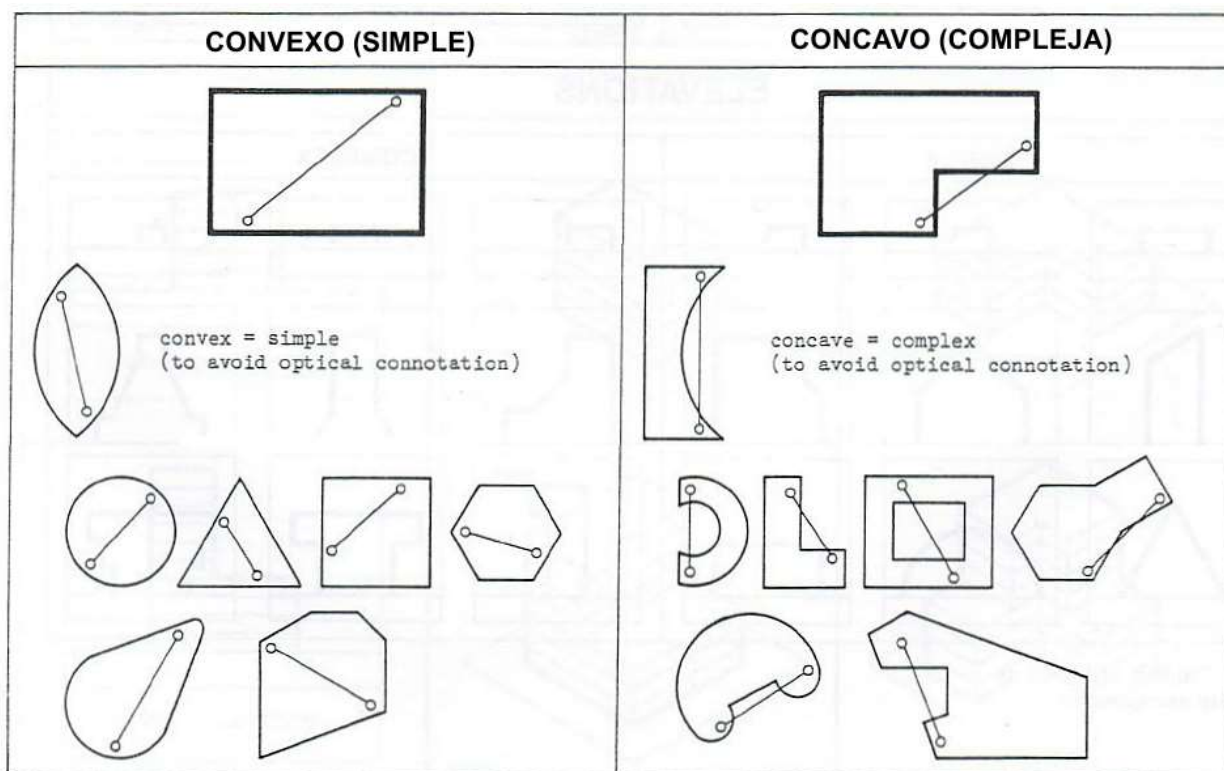


Plantas con formas geométricas con esquinas entrantes

En una planta en L, el ala paralela a la acción sísmica tiene mayor rigidez que el ala perpendicular, que por lo tanto tendrá mayor deformación, generando compresiones adicionales en el punto de unión de ambas alas.

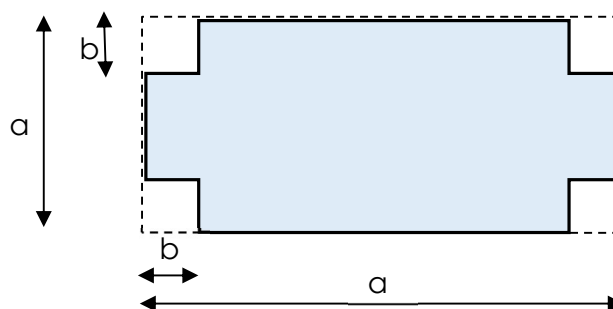


Alas de una planta en L con movimientos diferentes debido a sus rigideces distintas.



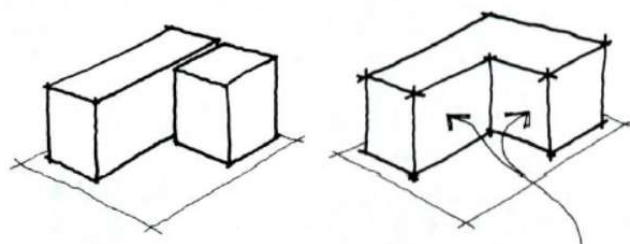
Figuras simples y complejas de planta. Fuente: Configuración y diseño sísmico, Arnold & Reitherman.

El reglamento CIRSOC 103:2013 – Parte I, indica en la tabla 2.3 que pueden considerarse regulares las estructuras de esquinas entrantes “cuando la proyección de la planta se extiende más allá de la esquina entrante una longitud menor al 15% de las dimensiones de la planta en las direcciones de análisis”



Condición de regularidad: $b \leq a \cdot 0,15$

Cuando se trabaje en proyectos cuya funcionalidad o situación requiera el uso de figuras complejas, la solución es dividir estructuralmente el edificio en formas más sencillas, creando juntas sísmicas para que cada una de las partes pueda deformarse y resistir el sismo independientemente de las demás.



Junta sísmica que divide el edificio en L en dos alas independientes Fuente: Configuración y diseño sísmico, Arnold & Reitherman.

Otra opción es arriostrar las alas con elementos rígidos que las vinculen, y puedan resistir las tensiones producidas por los movimientos diferenciales entre ellas.



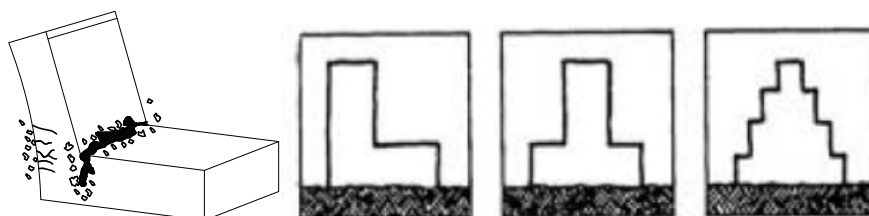
Edificio con planta en C, con sus dos alas arriostradas por vigas.

6.3.2 La configuración en altura

- **Retranqueos**

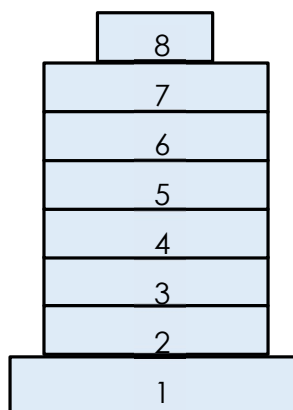
Consiste en una o más reducciones bruscas de tamaño entre dos pisos consecutivos. Al igual que para las configuraciones de planta irregular, los alzados con esta particularidad geométrica producen variaciones de rigidez importantes de un piso a otro, lo que produce concentración de tensiones en el nivel donde aparece la irregularidad.

En una elevación en forma de L, la porción superior más flexible tiende a vibrar con un periodo diferente al basamento de gran rigidez, concentrando tensiones en la unión entre ambos.



Retranqueo en altura y concentración de tensiones

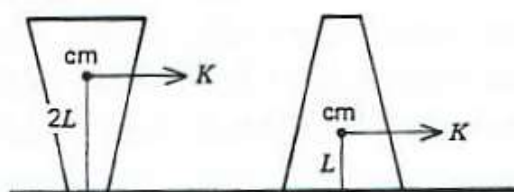
El reglamento CIRSOC 103:2013 – Parte I considera una estructura con regularidad de masas “cuando las masas de cada nivel varían menos del 30% respecto de los niveles adyacentes”



Control de regularidad:

$$\frac{W_8}{W_7} \leq 1,3 \quad \frac{W_1}{W_2} \leq 1,3$$

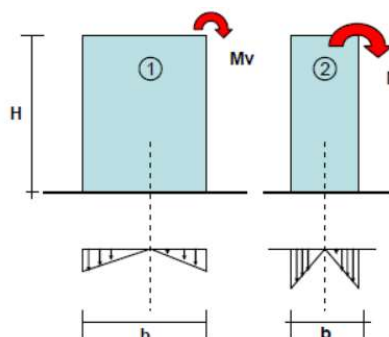
Si el escalonamiento se da de forma invertida, aumentando el tamaño de la planta en los niveles superiores, trae además aparejado un aumento de momento de vuelco debido a una posición más alta del centro de masa del edificio, y un menor brazo de palanca para el momento equilibrante, debido a la reducción del ancho de la base.



Momento de vuelco y momento equilibrante de configuraciones irregulares en altura.

- **Esbellez**

La relación entre ancho y alto es de mayor incidencia en el desempeño sísmico que la propia altura máxima del edificio. Mientras mayor sea la esbeltez, más severos son los efectos del momento de vuelco, debido al menor brazo de palanca del momento equilibrante, lo que produce una mayor sollicitación de compresión en las columnas exteriores.



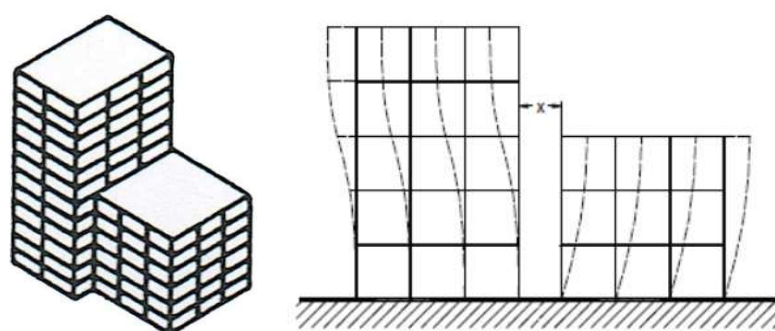
Momento de vuelco y momento equilibrante

En zonas de moderada actividad sísmica se recomienda una relación altura / ancho entre 3,5 a 5 como máximo, dependiendo del tipo de suelo.

6.3.3 Edificios adyacentes

Si dos edificaciones, funcionalmente independientes, se encuentran demasiado próximas entre sí, puede ocurrir que al oscilar durante un sismo entren en contacto, produciendo esfuerzos no previstos y cambiando el comportamiento dinámico de ambas estructuras que fuera considerado en el análisis. Esto puede agravarse en casos en los cuales no coincida el nivel de losas de los edificios contiguos, produciéndose un efecto de golpeteo de la losa de uno contra las columnas del otro.

Para evitar este problema, existen dos alternativas: separar las edificaciones la distancia suficiente que evite que entren en contacto (para lo cual debiera evaluarse con precisión la rigidez y desplazamiento máximo de cada uno); o unir las y analizar su comportamiento actuando en conjunto, previendo los refuerzos necesarios para resistir los esfuerzos adicionales que pudieran surgir.

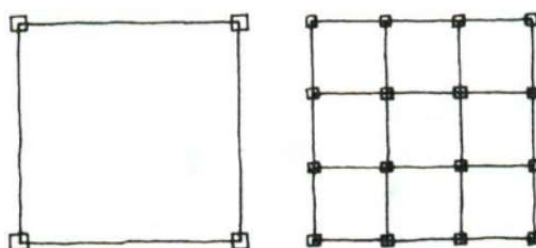


Edificaciones adyacentes.

6.3.4 Distribución de los apoyos

- **Cantidad**

Si analizamos dos plantas del mismo tamaño, materiales y área total de apoyo, una configuración con mayor cantidad de columnas, y por ende de vigas más cortas tiene mejor comportamiento que utilizar pocos apoyos y vigas largas.



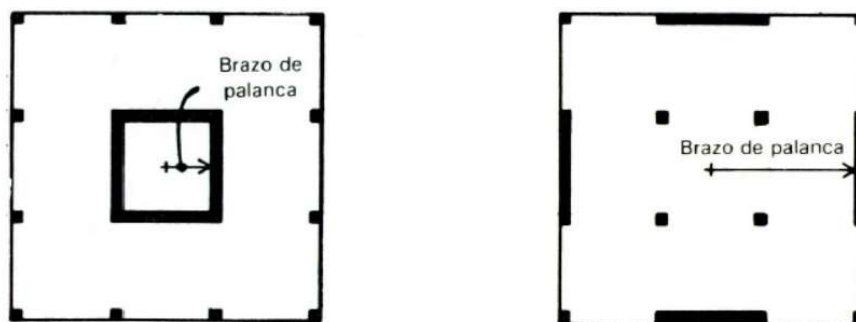
La distribución de apoyos de la planta de la derecha, tiene mejor comportamiento ante acciones sísmicas que la planta izquierda con solo 4 columnas. Fuente: Configuración y diseño sísmico de edificios. Arnold – Reitherman

Cuando existen múltiples apoyos, al comenzar a fallar uno de ellos, permite que muchos otros que puedan proporcionar la resistencia necesaria, al menos para mantener el equilibrio.

- **Ubicación perimetral**

Dos de las principales sollicitaciones producidas por el sismo que deben resistir las estructuras son el momento de vuelco y el momento torsor, debidos a la distancia entre la masa y sus apoyos, tanto en planta como en altura.

Para resistir estos momentos la estructura cuenta con las reacciones que pueden producir sus apoyos, y la distancia entre ellos como brazo de palanca. Es por ello que resultará más eficiente una configuración que presente a los elementos verticales más rígidos (por lo general muros) en el perímetro de la planta.



Alternativas de distribución de muros, con diferentes brazos de palanca.

Las plantas circulares con apoyos perimetrales son las geométricamente más eficientes para resistir los efectos del sismo, dado que sus elementos verticales presentan la mayor cantidad de material ubicado a la máxima distancia entre ellos, otorgando un máximo brazo de palanca para todas las direcciones en que pudiera presentarse el movimiento del suelo.

6.3.5 Elementos salientes

Si bien estos elementos no comprometen a la seguridad integral de la propia estructura, su colapso o desprendimiento puede ocasionar accidentes o lesiones a las personas.

El 11 de mayo de 2011 ocurrió en Lorca (España), un sismo de 5,1 grados de magnitud Richter, el máximo registrado desde 1956. Estudios posteriores comprobaron que las estructuras construidas en los últimos 50 años antes del evento, soportaron una aceleración sísmica del tripe prevista por la norma NCSE-02, pero por el contrario los elementos salientes de mampostería como parapetos y cerramientos produjeron enormes daños materiales y personales.

Elementos tales como chimeneas, tanques de agua, parapetos o cartelería deben ser dotados de una subestructura propia y asegurar su adecuado anclaje a la estructura principal, de manera de garantizar su estabilidad durante un sismo.

6.3.6 Cerramientos

A la hora de realizar el dimensionado de la estructura, el aporte de resistencia de la mampostería no portante no debe tenerse en cuenta, pero la rigidez de estos elementos sí puede afectar considerablemente al comportamiento dinámico del edificio, alterando la magnitud de las acciones y la distribución de esfuerzos, y por lo tanto deben considerarse durante el análisis sísmico.

El caso más frecuente es la rigidización de pórticos mediante el relleno de sus vanos con mampostería no portante, lo que incrementa su rigidez real, correspondiéndole un mayor porcentaje de acciones sísmicas en la distribución de esfuerzos.

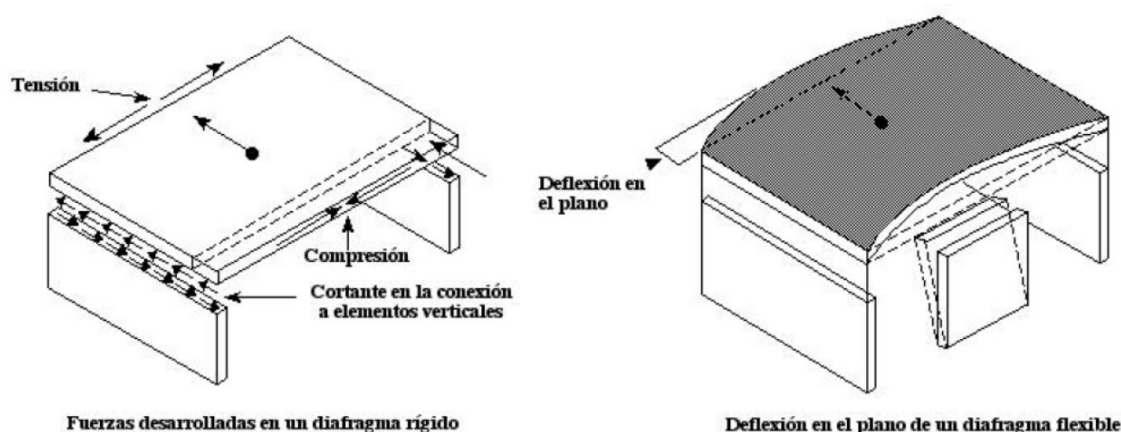
Si esta situación no es contemplada en el análisis estructural, podrían producirse también efectos de torsión no previstos que incrementan aún más las solicitaciones consideradas en los planos resistentes verticales.

6.3.7 Configuración de los planos horizontales

Ante acciones sísmicas, el plano horizontal se comporta como un diafragma que vincula a todos los planos resistentes verticales, transfiriéndoles las fuerzas que actúan sobre él. La forma en que esta transferencia se produzca dependerá principalmente de la rigidez de dicho diafragma.

Un plano horizontal rígido, puede considerarse como un elemento indeformable, que vinculará de manera eficaz a los planos resistentes verticales, distribuyendo las acciones sísmicas en todos ellos, proporcionalmente a la rigidez de cada uno.

Por el contrario, un plano horizontal flexible producirá que las deformaciones laterales no sean uniformes, lo que perjudica a los elementos no estructurales, y produce una distribución de las acciones sísmicas en los planos resistentes verticales sea más irregular y difícil de predecir.



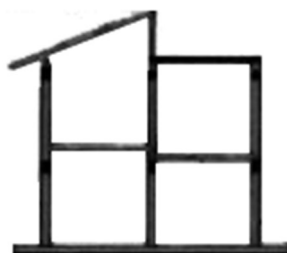
Comportamiento rígido y flexible del plano horizontal. Fuente: Fundamentos para la mitigación de desastres en el área de la salud. Organización panamericana de la salud.

El comportamiento del diafragma puede asemejarse al de una viga horizontal de gran altura, y para garantizar su rigidez es necesario que cumpla con ciertas características geométricas, referidas principalmente a sus proporciones, continuidad y perforaciones.

Las perforaciones de gran tamaño en el plano horizontal, ocasionan la aparición de zonas flexibles dentro del diafragma, las cuales impiden el ensamblaje rígido de los planos verticales. De igual forma, la discontinuidad producida por entrepisos, medios niveles, o cubiertas inclinadas en distintos sentidos, dificultan la correcta distribución de esfuerzos sísmicos a los planos verticales.



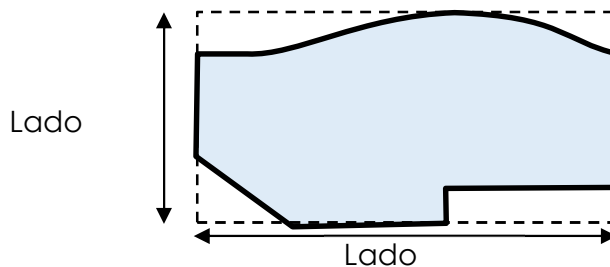
Deformación de un diafragma regular, y aparición de distorsiones debidas a perforaciones



Discontinuidad de diafragma

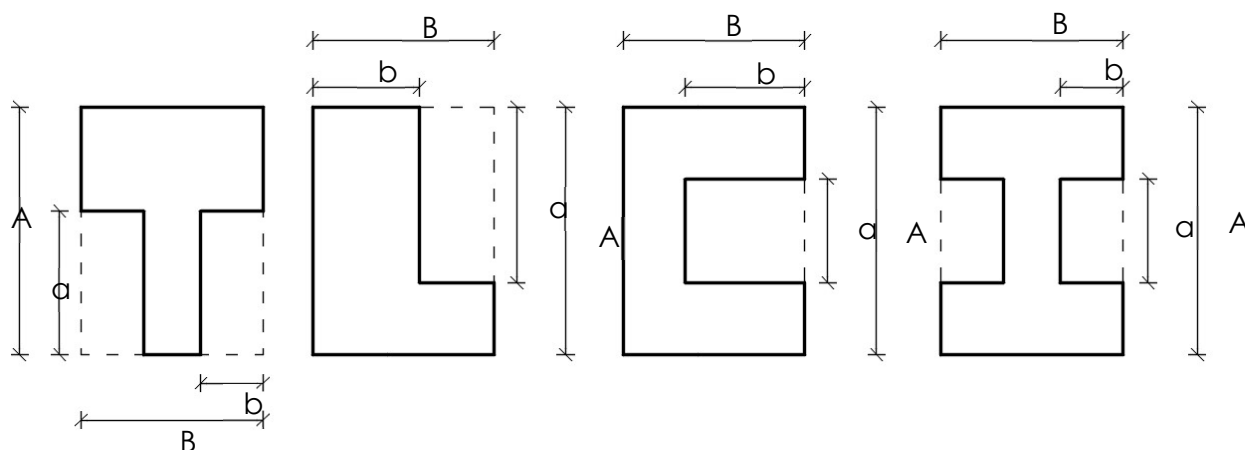
El reglamento CIRSOC 103:2013 – Parte I, en su apartado 8.2.1.1 indica las condiciones que deben cumplirse para poder considerar al plano horizontal como un diafragma rígido:

- La relación del lado mayor y el lado menor del rectángulo que circunscribe la planta debe ser menor a 3



$$\frac{\text{Lado mayor}}{\text{Lado menor}} \leq 3$$

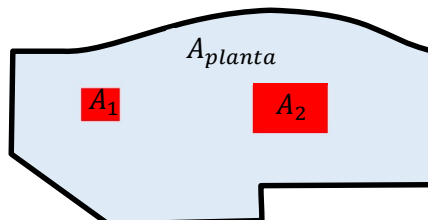
- Para el caso de plantas irregulares, las entrantes deben medir menos que el 25% de la longitud paralela del rectángulo que inscribe la planta



Magnitud de entrantes

$$\frac{a}{A} \leq 0,25 \quad \frac{b}{B} \leq 0,25$$

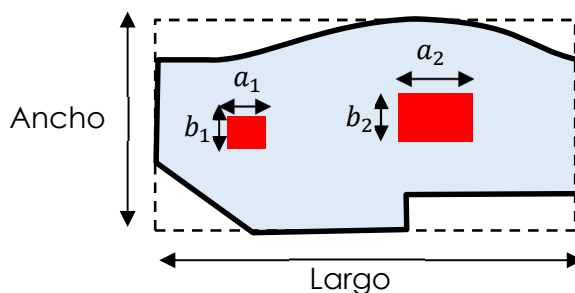
- El área de la suma de todos los huecos del diafragma no debe superar el 10% de la superficie total de la planta.



Perforaciones en el diafragma

$$\frac{A_1 + A_2}{A_{planta}} \leq 0,10$$

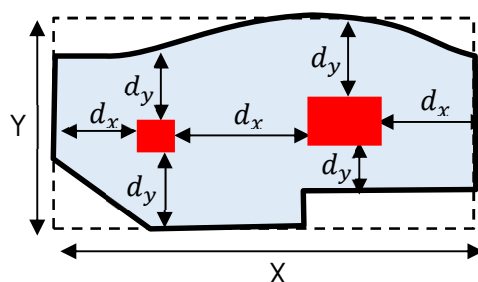
- La suma de la dimensión máxima de todos los huecos en una dirección, no debe superar 1/3 de la dimensión de la planta paralela a esa dirección.



Perforaciones en el diafragma

$$\frac{a_1 + a_2}{Largo \ A} \leq 0,33 \quad \frac{b_1 + b_2}{Ancho \ B} \leq 0,33$$

- Cualquier hueco debe estar separado de los bordes de la planta o de otros huecos como mínimo 1/4 de la dimensión de la planta en esa dirección.



Separación de perforaciones en el diafragma

$$\frac{d_x}{X} \geq 0,25 \quad \frac{d_y}{Y} \geq 0,25$$

6.3.8 Configuración de los planos resistentes verticales

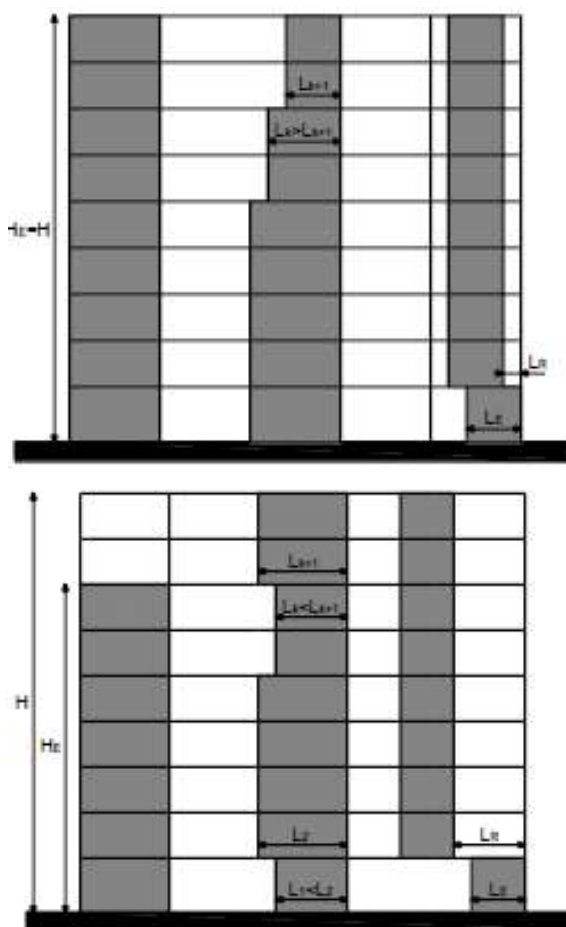
Al igual que para la configuración en planta y altura, es conveniente que exista regularidad en la estructura vertical, para ello se aconseja:

- Mantener una distribución uniforme de los elementos de apoyo.

- Continuidad en todos los niveles de los elementos verticales, evitando cambios bruscos de su sección.
- Alinear sobre un mismo eje a las columnas y vigas de cada pórtico.
- Evitar variación brusca de secciones en los distintos tramos de vigas.

Un cambio repentino de rigidez en altura del edificio, puede producir que se modifique la distribución de esfuerzos entre los elementos verticales y que sus solicitaciones difieran de las previstas en el análisis estructural.

En la tabla 2.4 del reglamento CIRSOC 103:2013 – Parte I se indica que pueden considerarse regulares las estructuras “cuando los elementos verticales son continuos en altura o los retranqueos en su plano son inferiores a la longitud del elemento. Las dimensiones de los componentes son constantes o crecientes hacia abajo”



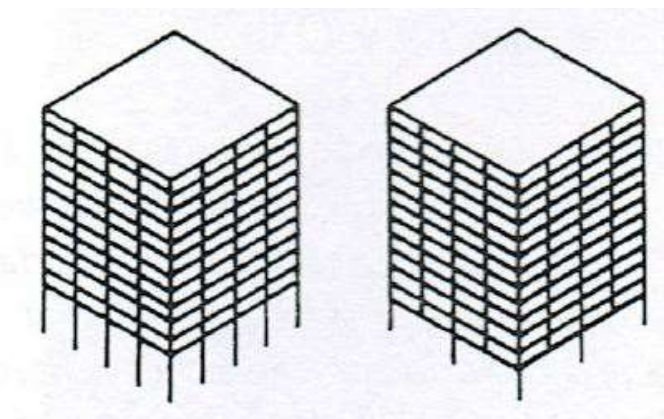
Regularidad en altura – Reglamento CIRSOC 103:2013 – Comentarios a la parte I

$$\frac{\text{longitud del retranqueo}}{\text{long. del elemento}} \leq 1$$

• Piso débil

Un caso frecuente de variación brusca de rigidez y resistencia es el denominado piso débil, que consiste en la presencia de un nivel con elementos verticales de menor rigidez que los superiores. Esta condición puede surgir por la disminución de la cantidad de columnas, o por el aumento de la altura de las mismas, o por la presencia de mampostería de cerramiento dentro de los vanos de un pórtico. Todas estas situaciones son muy frecuentes en la planta baja de los edificios, donde

usualmente se requiere una mayor permeabilidad y un acceso jerarquizado, pero puede suceder en cualquier nivel.



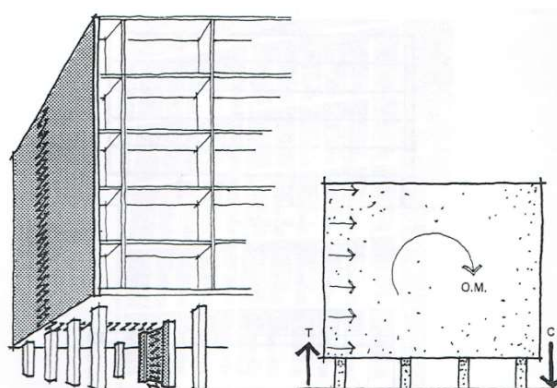
Piso débil por aumento de altura o reducción de la cantidad de columnas en planta baja

Cuando esta irregularidad se presenta, la mayor parte de las solicitaciones producidas por el sismo, y las deformaciones consecuentes, tenderán a concentrarse en el piso más débil o en el punto de discontinuidad, en lugar de distribuirse uniformemente entre todos los niveles.

- **Discontinuidad de muros**

Este es un caso especial de piso débil. Los muros o tabiques son los principales elementos resistentes a fuerzas horizontales, y presentan altas solicitaciones durante el evento sísmico. Si dichos elementos no llegan hasta la fundación, las solicitaciones producidas generan una sobrecarga en el punto de discontinuidad.

El objetivo de los muros o tabiques es recibir las cargas de los diafragmas de los distintos niveles y transmitirlos lo más directa y eficientemente posible hasta la fundación. Interrumpir la transmisión de estas cargas con elementos de menor rigidez como un pórtico, representa el peor caso de piso débil, y genera una gran concentración de tensiones en sus columnas.

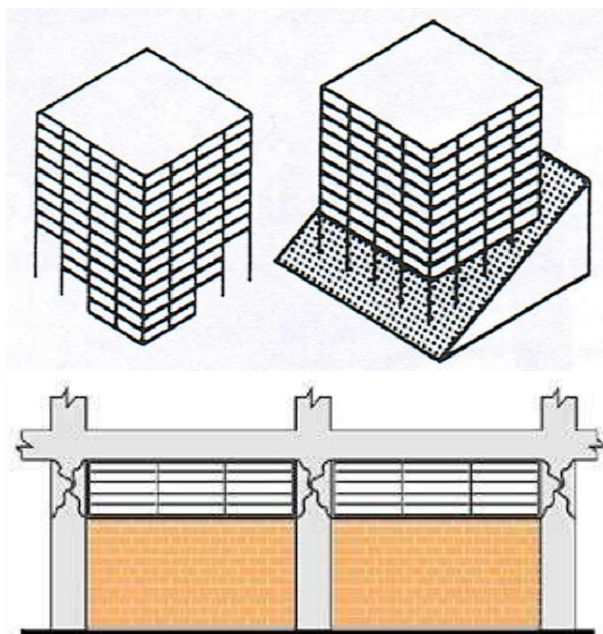


Discontinuidad de tabiques. Fuente: Configuración y diseño sísmico, Arnold & Reitheman.

- **Columna corta**

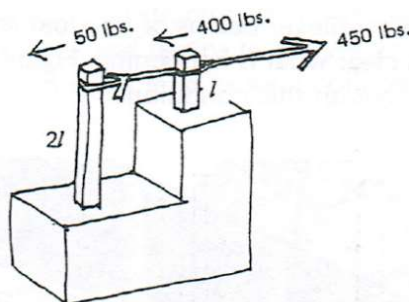
Se denomina efecto de "columna corta" a la presencia de una o varias columnas que poseen considerablemente menos altura e igual sección que el resto de las columnas del mismo nivel.

Esta situación comúnmente ocurre cuando el edificio se encuentra ubicado en un terreno de gran desnivel, o cuando la posición de los aventanamientos requiere la incorporación de mampostería de cerramiento que confina lateralmente una porción de la columna.



Columnas cortas. Fuente: Configuración y diseño sísmico, Arnold & Reitherman.

La rigidez flexional de una columna aumenta al disminuir su longitud, es decir que una columna que disminuya considerablemente su altura en relación a las demás, tendrá una rigidez mayor, a pesar de que tenga igual sección. Como la distribución de las fuerzas horizontales se produce proporcionalmente a la rigidez de los elementos, la columna corta recibirá una porción más grande de la acción sísmica, pero teniendo la misma capacidad resistente que el resto.

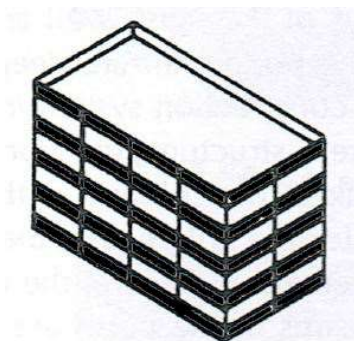


*Distribución de una fuerza horizontal entre columnas de distinta longitud.
Fuente: Configuración y diseño sísmico, Arnold & Reitherman.*

- **Rigidez relativa entre vigas y columnas**

Cuando las cargas sísmicas llevan a una viga a alcanzar su máxima resistencia a flexión, comienzan a producirse deformaciones plásticas permanentes que disipan energía del sismo, absorbiendo parte de las fuerzas sin producir el colapso. En cambio, si esta plastificación sucede en columnas, la deformación puede generar inestabilidad y la estructura colapsa rápidamente.

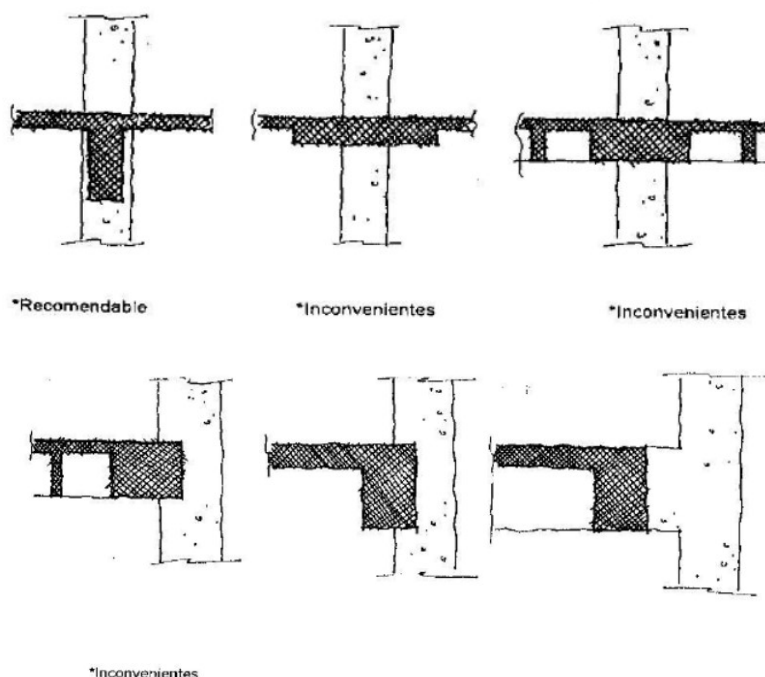
Un diseño estructural con columnas de mayor rigidez que las vigas, permitirá una mayor disipación de energía sin producir el colapso.

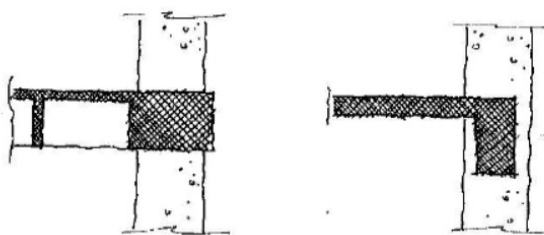


Diseño incorrecto de vigas fuertes y columnas débiles. Fuente: Configuración y diseño sísmico, Arnold & Reitherman.

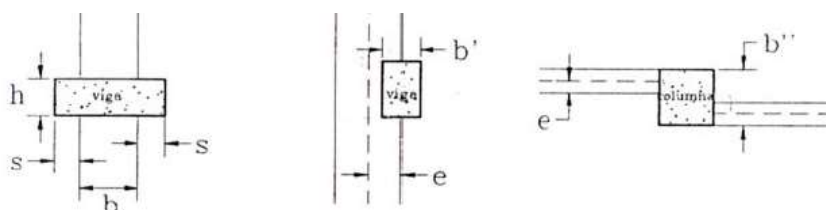
- **Nudos y conexiones**

La adecuada materialización de los nudos es un punto clave en el funcionamiento de las estructuras aporricadas. Para ello debe establecerse una correcta continuidad entre los elementos, con vigas y columnas de anchos similares que eviten puntos irregulares con concentración de tensiones y faciliten la construcción de las uniones.





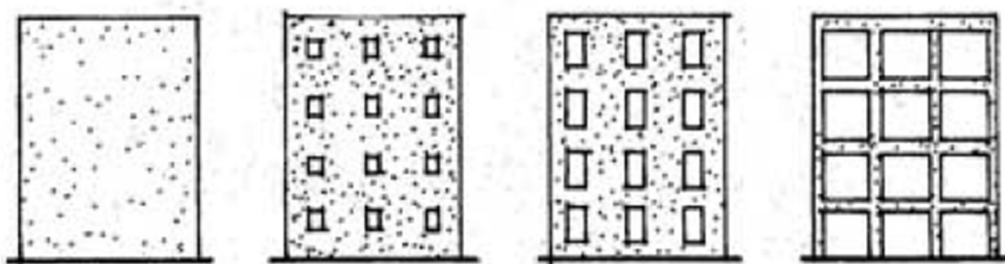
*Recomendables



Nudos irregulares entre vigas y columnas

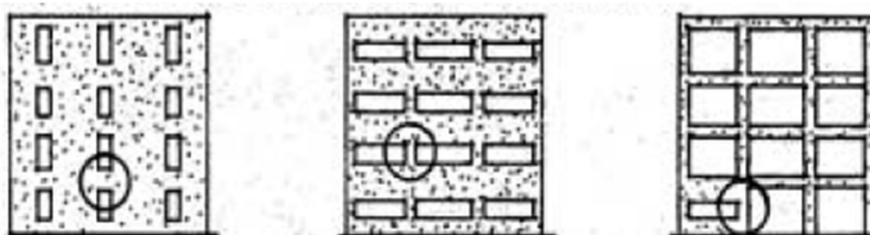
- **Aventanamientos**

Cuando un muro de hormigón armado comienza a perforarse para producir aventanamientos cada vez más grandes, llega un punto en el que estructuralmente deja de comportarse como muro, para pasar a hacerlo como un pórtico.



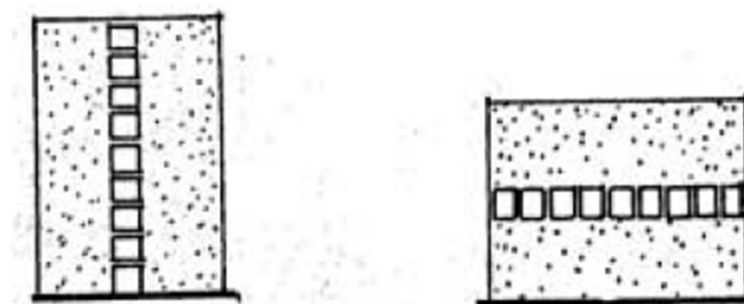
Muro de hormigón armado que incorpora perforaciones regulares hasta convertirse en pórtico. Fuente: Configuración y diseño sísmico, Arnold & Reitherman.

Las formas en que el muro es perforado o reducido a un pórtico, pueden producir áreas de concentración de tensiones, efectos de columna corta, o de piso blando. Si la distribución de aberturas se hace muy errática, se crea un sistema de muy baja resistencia.



Muros con perforaciones que producen importantes concentraciones de tensiones en puntos determinados. Fuente: Configuración y diseño sísmico, Arnold & Reitherman.

El mismo efecto se puede producir por el camino inverso, ante la existencia de dos muros de hormigón muy próximos, si se vinculan con una viga en cada nivel, se produce el mismo efecto que un diseño de columna débil y viga fuerte, solo que girado 90°.



Tabiques vinculados, y su analogía a un pórtico de vigas muy fuertes y columnas muy débiles.

Cuando se presenta el caso de un muro de hormigón conectado mediante vigas a un pórtico, se produce una transferencia de solicitaciones conocida como interacción pórtico-tabique. Dado que el tabique es un elemento de gran rigidez y por lo tanto posee solicitaciones de mayor importancia que los pórticos, pueden producirse concentración de tensiones en algunos elementos. En general las opciones más adecuadas para estos casos son desconectar completamente los tabiques, o vincularlos con elementos fuertes como vigas rígidas.

6.3.9 Redundancia

Se denomina redundancia a la presencia de elementos estructurales que en condiciones normales no desempeñan función resistente, o están subesforzados, pero que son capaces de resistir fuerzas laterales si fuera necesario, brindando un sistema alternativo de resistencia. Proporcionan seguridad en los puntos donde pudiera haber cierta incertidumbre en el análisis.

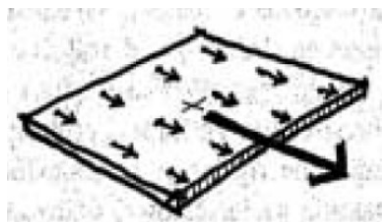
Un mayor número de elementos resistentes mejora las posibilidades de redistribución de esfuerzos, y aumenta la cantidad de puntos donde es posible la formación de rotulas plásticas, que permiten disipar energía sin producirse el colapso. Las estructuras con elevado grado de hiperestaticidad poseen considerables reservas, ya que en ellas se requiere la falla de un mayor número de piezas o elementos estructurales para alcanzar el colapso total.

6.3.10 Excentricidad torsional

La existencia de excentricidad es quizá uno de los aspectos más perjudiciales del diseño de una estructura para zona sísmica, dado que genera solicitaciones adicionales en los planos resistentes, lo que lleva a un incremento de costos, reducción de eficiencia y alta vulnerabilidad. Por ello nos detendremos en este punto para recordar algunos conceptos.

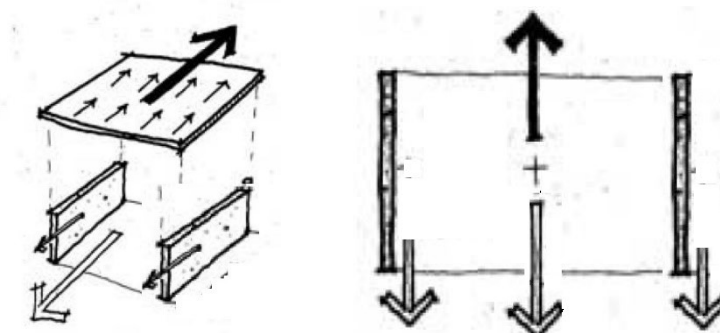
Cuando una estructura es alcanzada por un sismo, sus partículas de masa se aceleran horizontalmente debido a su inercia, lo que puede asemejarse a una pequeña fuerza

empujando a cada una de ellas. La resultante de esta fuerza tendrá una magnitud igual a la acción sísmica y estará ubicada en el centro de masa de cada plano horizontal, ya que es allí donde se encuentra concentrada la mayor parte de la masa de cada nivel.



Aceleración horizontal de las partículas de una losa, y su resultante en el centro de masa

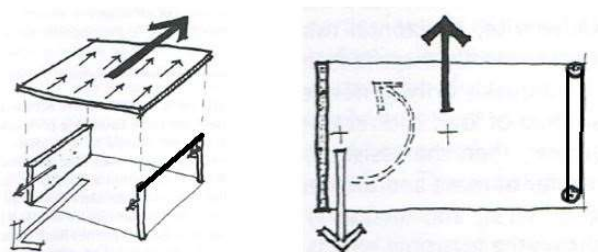
Para equilibrar esta fuerza, el plano horizontal se apoya en los planos resistentes verticales, transfiriéndole la acción sísmica a ellos, de manera proporcional a la rigidez de cada uno (considerando que nuestro plano horizontal se comporta como un diafragma rígido).



Acción sísmica en centro de masa y reacción en centro de rigidez

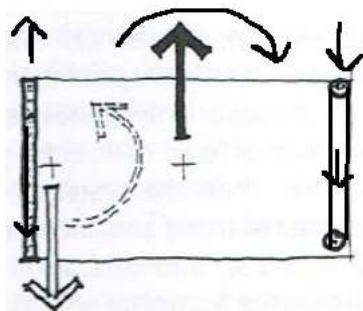
Si los planos resistentes verticales son iguales, sus reacciones también lo serán, su resultante estará ubicada en medio de ellas y tendrá una magnitud igual a la acción sísmica, equilibrando el sistema. El punto de aplicación de la resultante de las reacciones se denomina centro de rigidez y en este caso coincide en la misma recta de acción que el centro de masa. No hay excentricidad.

Ahora bien, si los planos resistentes están dispuestos de tal manera que el centro de rigidez no coincide con el centro de masa, la fuerza sísmica no tendrá la misma recta de acción que la resultante de las reacciones, produciendo una cupla que da lugar a la aparición de un momento torsor cuyo brazo de palanca es la distancia entre el centro de masa y el centro de rigidez denominada excentricidad.



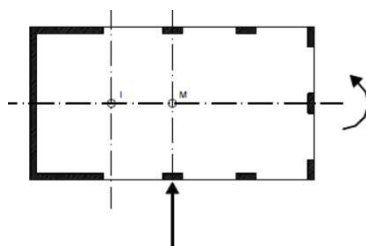
Momento torsor debido a excentricidad entre centro de masa y rigidez

Este último sistema aún no está en equilibrio, dado que la suma de momentos no es igual a 0. Necesitamos entonces incorporar un momento equilibrante igual y de sentido contrario al momento torsor, formado por reacciones adicionales de los planos resistentes verticales.



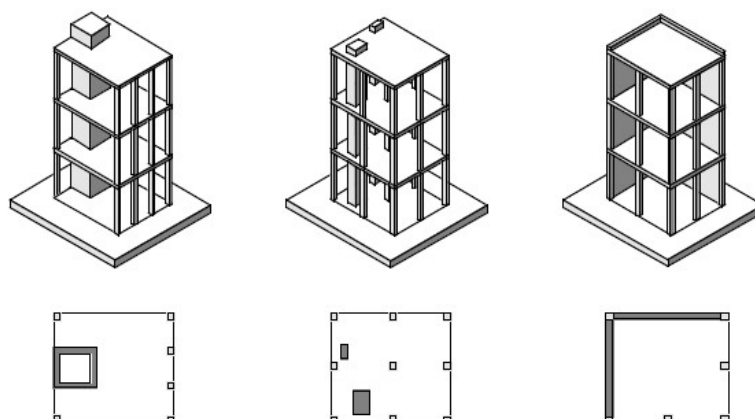
Cada plano resistente vertical deberá ahora resistir un esfuerzo de corte producido directamente por la fuerza sísmica (corte directo) más el producido por el momento torsor (corte indirecto).

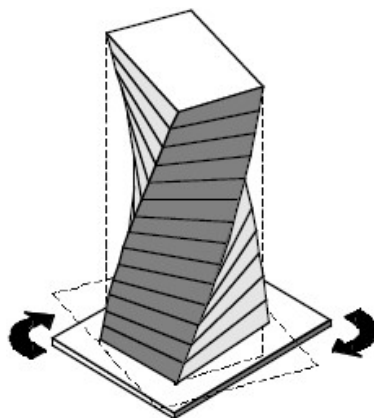
La excentricidad puede aparecer independientemente para cada dirección que se considere aplicada la fuerza sísmica. Lo habitual para configuraciones con planos resistentes verticales dispuestos en dos direcciones ortogonales, es realizar el análisis de torsión para cada una de esas dos direcciones.



Configuración sin excentricidad si consideramos la fuerza sísmica actuando en dirección X, y con excentricidad si la consideramos actuando en dirección Y.

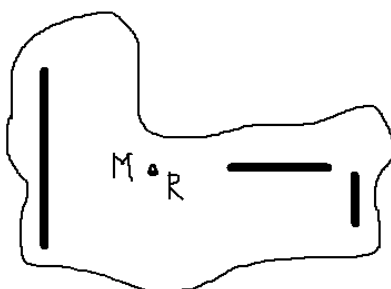
Algunos factores del diseño que frecuentemente ocasionan torsión son: la ubicación de los núcleos de circulación vertical rodeados de muros rígidos y lejos del centro de masa, y el uso de muros ciegos en las medianeras de los edificios en esquina, en contraposición con los planos resistentes de fachada más permeables.





Configuraciones estructurales con excentricidad. Fuente: Fundamentos para la mitigación de desastres en establecimientos de la salud – OPS/OMS

La ausencia de torsión es frecuentemente asociada a la condición de simetría en el diseño de proyecto, pero cabe aclarar que esto no es un requisito. Puede lograrse la coincidencia de los centros de masa y rigidez en diseños asimétricos, ya que lo que debe lograrse para anular la torsión no es una simetría geométrica, sino una adecuada distribución de las rigideces con respecto a los ejes baricéntricos del plano horizontal.



Coincidencia de centros de masa y rigidez en un diseño geoméricamente asimétrico

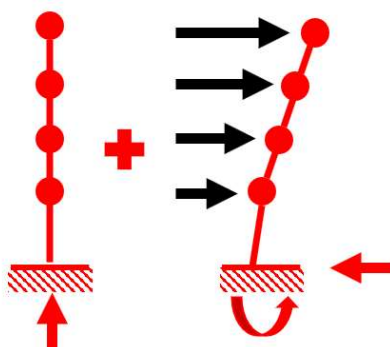
6.3.11 Fundaciones

La respuesta de la estructura bajo acciones sísmicas, depende tanto de sus propiedades dinámicas como de las del suelo donde se apoya y la forma en que se produce la interacción entre ambos. El periodo de vibración de un suelo blando es diferente al de uno rocoso, y es conveniente que la rigidez de la estructura sea aquella que le otorgue un periodo de vibración distinto al del suelo, evitando que se produzca el fenómeno de resonancia.

Así en términos generales se puede decir que terrenos blandos resultará más adecuada una construcción rígida (muros o pórticos con diagonales de arriostramiento), y en terrenos rocosos una más flexible (pórticos).

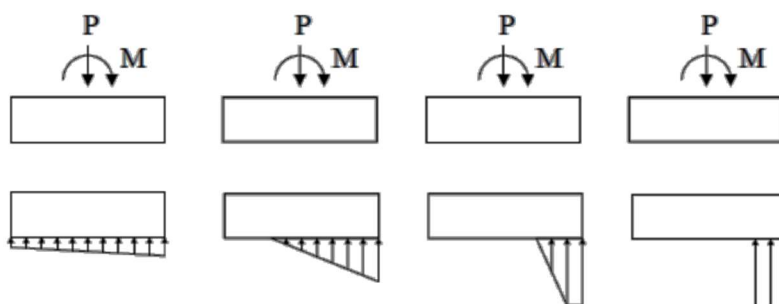
La presencia de acciones horizontales requiere que las fundaciones brinden, además de la reacción vertical para acciones gravitatorias, una reacción horizontal y un momento que equilibren la fuerza sísmica. Es recomendable no fundar en sitios

próximos a barrancos o grandes pendientes que puedan facilitar los deslizamientos, y, tal como se vio anteriormente, que el diseño en altura posea un basamento suficientemente ancho para facilitar el empotramiento.



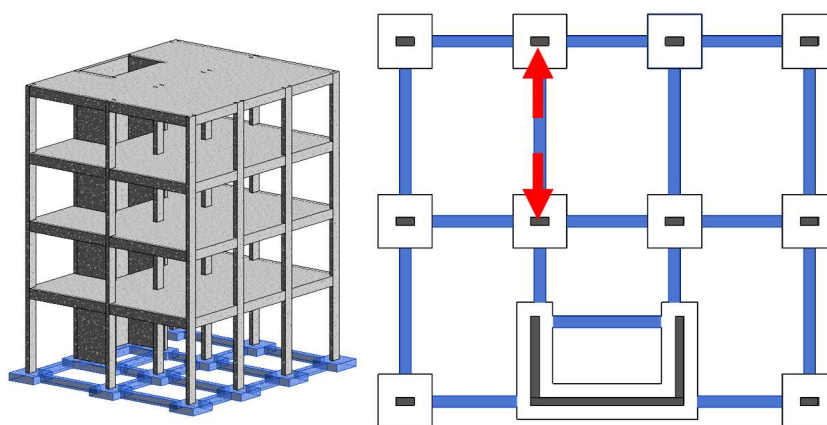
Reacciones de apoyo para acciones verticales y horizontales

En las bases de fundación, la interacción entre el momento y la carga axial produce un diagrama de presiones no homogéneo contra el suelo, lo que puede llevar a requerir una mayor superficie de contacto para evitar que se sobrepasen las tensiones máximas admisibles.



Diferentes diagramas de tensiones sobre el suelo, a medida que se incrementa el valor de momento en relación a la carga normal.

En toda fundación en zona sísmica se debe disponer además de un sistema de arriostramientos que conforme un plano horizontal inferior capaz de impedir diferentes desplazamientos relativos entre los apoyos. El acercamiento o alejamiento de dos bases entre sí genera esfuerzos adicionales en los elementos verticales que se apoyan sobre ellas.



Arriostramientos entre bases de fundacion

Si se otorga a las riostras de la rigidez suficiente, estas también cumplen la función de colaborar con el empotramiento que deben garantizar las bases, actuando como "brazos" que se apoyan a una mayor distancia aumentando el brazo de palanca de la cupla del momento equilibrante.

