

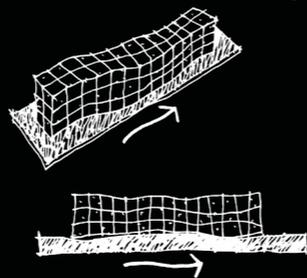
RECOMENDACIONES DE DISEÑO PARA ARQUITECTURA EN ZONA SISMICA

Eduardo Rodríguez Cimino

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 la respuesta de una estructura sometida a un sismo, usualmente se supone que ésta vibra de manera uniforme, y que todos los puntos ubicados en un mismo nivel se desplazan en simultaneo, 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.

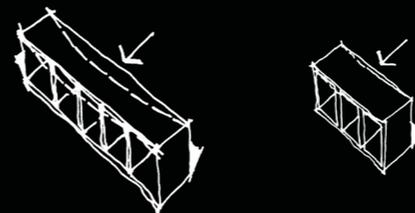


Propagación de la onda sísmica por debajo de un edificio de extremada longitud

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 partes, separados de tal manera que las vibraciones de uno no afecten al siguiente.

• Proporción

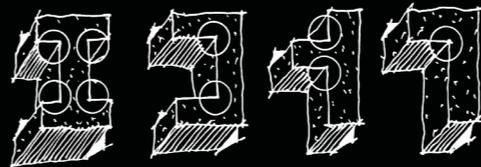
Los planos horizontales al desplazarse se apoyan sobre los planos resistentes verticales, comportándose como grandes vigas en posición horizontal. Al aumentar su longitud pierden rigidez y con ello su capacidad de vincular a los planos resistentes verticales. Cuando la longitud en planta es notoriamente mayor que el ancho, la edificación puede tener problemas para responder como una unidad ante movimientos sísmicos. En general, relaciones de largo/ancho mayores a 5 no tienen rigidez suficiente como para que la estructura responda como una unidad.



Incidencia de la proporción

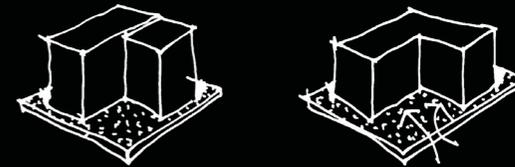
• Forma geométrica

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.



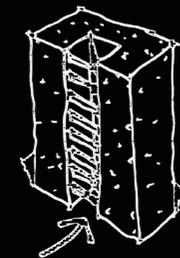
Plantas con formas geométricas con esquinas entrantes

Cuando se trabaje en proyectos cuya funcionalidad o geometría del sitio de implantación 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

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

2. LA CONFIGURACIÓN EN ALTURA

• Retranqueos

El retranqueo 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

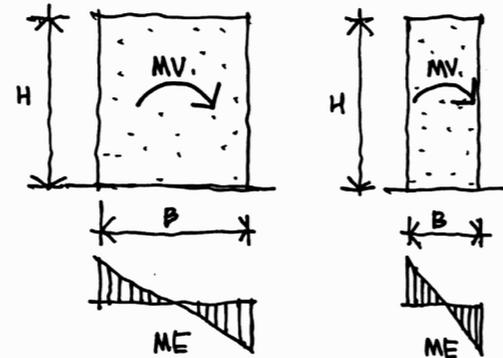
Si el escalonamiento se da de forma invertida, aumentando el tamaño de la planta en los niveles superiores, trae además aparejado un aumento de momento de vuelco debido a una posición más alta del centro de masa del edificio, y un menor brazo de palanca para el momento equilibrante, debido a la reducción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



Momento de vuelco de configuraciones irregulares en altura

• Esbeltez

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.



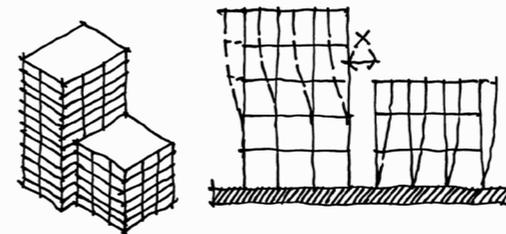
Momento de vuelco y momento equilibrante

En zonas de moderada actividad sísmica se recomienda una relación altura / ancho entre 3.5 a 5 como máximo, dependiendo del tipo de suelo.

3. EDIFICIOS ADYACENTES

Si dos edificaciones 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.



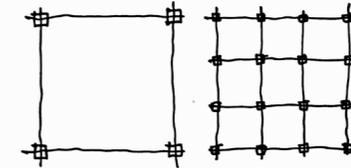
Edificaciones adyacentes

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.



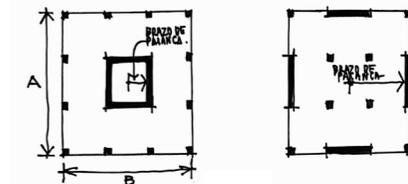
Diferentes distribución de apoyos en planta. La distribución de apoyos de la planta de la derecha, tiene mejor comportamiento ante acciones sísmicas que la planta izquierda con solo 4 columnas

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

• Ubicación

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.

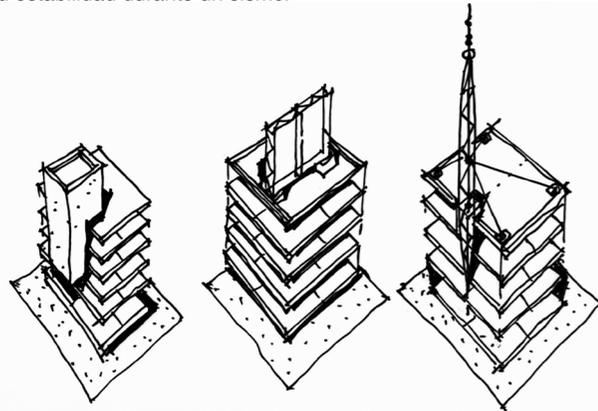


Alternativas de distribución de muros, con diferentes brazos de palanca

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.

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



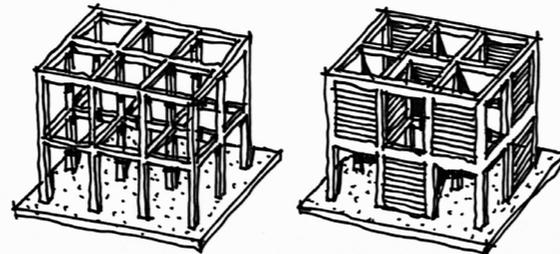
Construcciones con salientes

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, modificando la distribución de esfuerzos, y por lo tanto deben incluirse en 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, y con ello su participación 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.



Vanos de pórticos rigidizados con mampostería

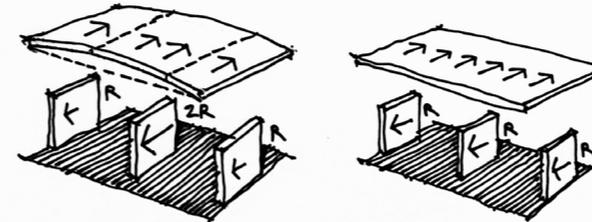
7. CONFIGURACIÓN DE LOS PLANOS HORIZONTALES

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

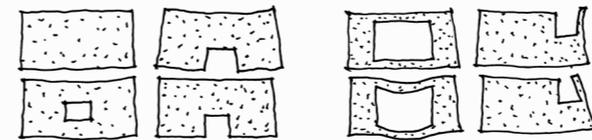
deformaciones laterales no sean uniformes, lo que perjudica a los elementos no estructurales, y produce una distribución de las acciones sísmicas en los planos resistentes verticales más irregular y difícil de predecir.



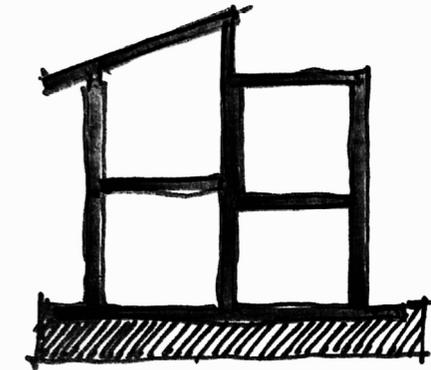
Comportamiento rígido y flexible del plano horizontal

El comportamiento del diafragma puede asemejarse al de una viga horizontal de gran canto, 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

8. CONFIGURACIÓN DE LOS PLANOS RESISTENTES VERTICALES

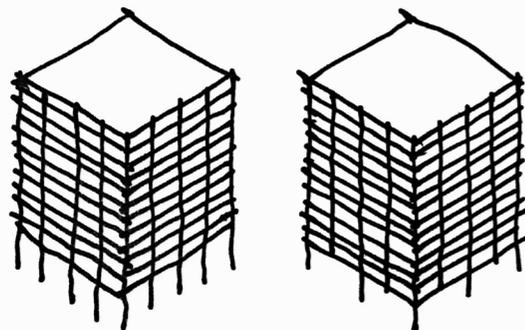
Al igual que para la configuración en planta y altura, es conveniente que exista regularidad en la estructura vertical, para ello se aconseja:

- Distribuir uniformemente los elementos de apoyo.
- Mantener la continuidad de los elementos verticales en todos los niveles, 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.

• **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 o aumento de la altura de las columnas, o por la discontinuidad de elementos rígidos de un nivel a otro. Estas situaciones son muy frecuentes en la planta baja de los edificios, donde se requiere una mayor permeabilidad y un acceso jerarquizado, pero puede suceder en cualquier nivel.



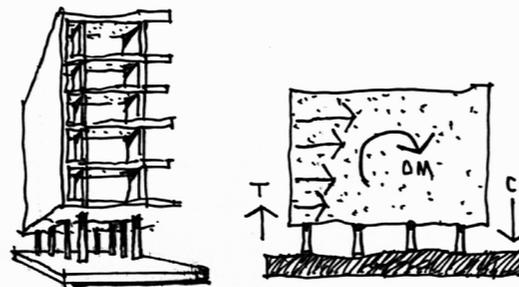
Piso débil por aumento de altura o reducción de la cantidad de columnas en planta baja

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 (ya sean de hormigón armado o mampostería) 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 grandes exigencias en el punto de discontinuidad.

El objetivo de los muros 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 de un elemento de menor rigidez como un pórtico, representa el peor caso de piso débil y genera una gran concentración de tensiones en las columnas que poseen una resistencia significativamente menor.

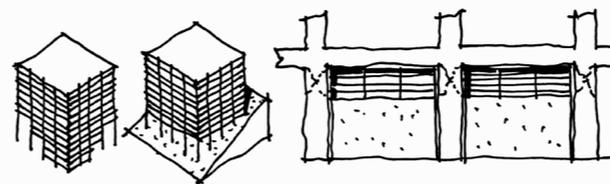


Discontinuidad de muros

• **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.

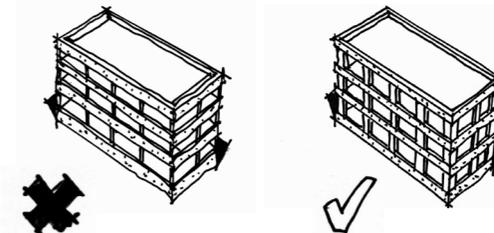


Columnas cortas

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 sísmicas se produce proporcionalmente a la rigidez de los elementos, la columna corta recibirá una porción más grande, pero teniendo la misma capacidad resistente que el resto.

• **Rigidez relativa entre vigas y columnas**

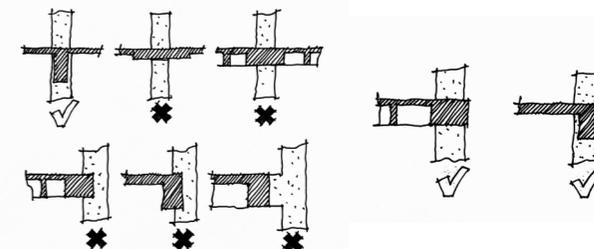
Cuando las acciones sísmicas llevan a una viga a alcanzar su máxima resistencia a flexión, comienzan a producirse deformaciones plásticas permanentes que disipan la energía del sismo, absorbiendo parte de esas acciones sin producir el colapso. En cambio, si esta plastificación sucede en los extremos de las 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 y correcto de columnas fuertes y vigas débiles

• **Nudos y conexiones**

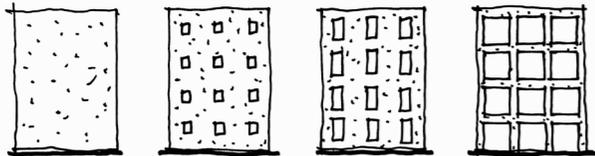
La adecuada materialización de los nudos es un punto clave en el funcionamiento de las estructuras aporticadas. Para ello debe establecerse una correcta continuidad entre los elementos, con vigas y columnas de anchos similares que eviten puntos irregulares con concentración de tensiones y faciliten la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



Nudos irregulares y regulares entre vigas y columnas

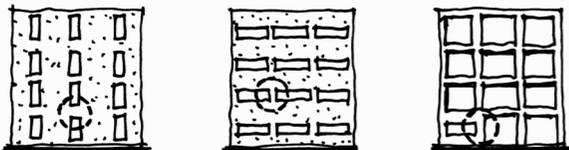
• **Aventanamientos**

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.



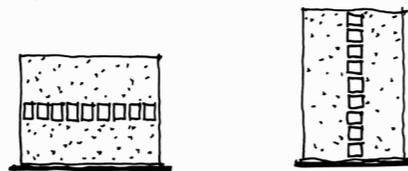
Muro de hormigón armado que incorpora perforaciones regulares hasta convertirse en pórtico.

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.

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 tabique 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 tanto, posee solicitaciones de mayor importancia que los pórticos, pueden producirse concentración de tensiones en algún elemento. En general las opciones más adecuadas para estos casos son desconectar completamente los tabiques o vincularlos con elementos fuertes.

9. REDUNDANCIA ESTRUCTURAL

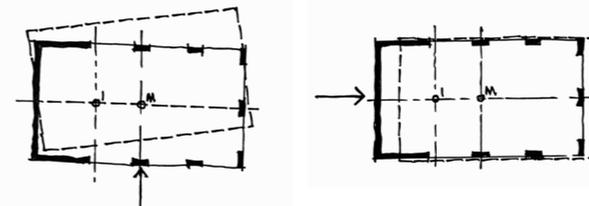
Se denomina redundancia a la presencia de elementos estructurales que en condiciones normales no desempeñan función resistente, o están subesforzados, pero que son capaces de resistir fuerzas laterales si fuera necesario, brindando un sistema alternativo de resistencia. Proporcionan seguridad en los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

10. EXCENTRICIDAD TORSIONAL

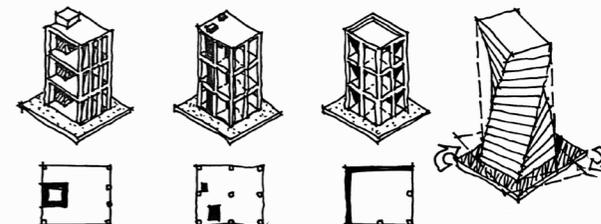
La existencia de excentricidad es quizá uno de los aspectos más perjudiciales del diseño de una estructura para zona sísmica, dado que genera solicitaciones adicionales en los planos resistentes, lo que lleva a un incremento de costos, reducción de eficiencia y alta vulnerabilidad.

Cuando la recta de acción de la fuerza estática equivalente al sismo (ubicada en el centro de masa) no coincide con la recta de acción de la resultante de las reacciones (ubicada en el centro de rigidez) se produce un movimiento de torsión que debe equilibrarse con reacciones adicionales de los planos resistentes verticales, que se suman a las reacciones ya consideradas debidas al movimiento de traslación.



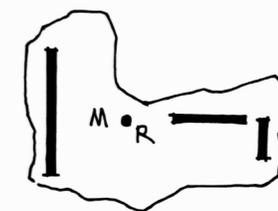
Configuración con excentricidad en una dirección y sin excentricidad en la otra

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



Configuraciones estructurales con excentricidad.

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



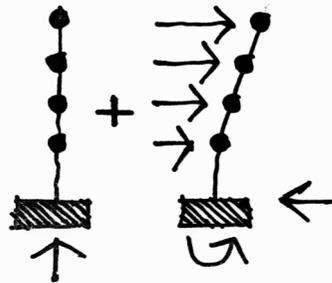
Coincidencia de centros de masa y rigidez en un diseño geoméricamente asimétrico

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 de la forma en la 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.

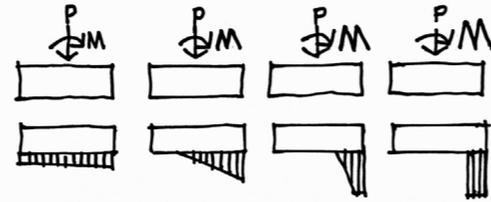
Así en términos generales se puede decir que en terrenos blandos resultará más adecuada una construcción rígida (muros o pórticos con diagonales de arriostramiento) y, en terrenos rocosos una más flexible (pórticos).

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 los efectos del sismo. 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.



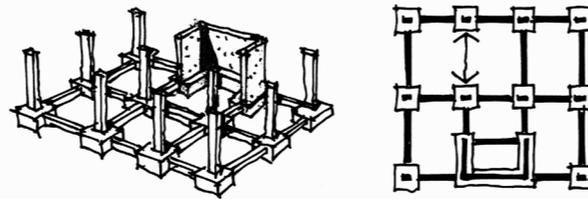
Reacciones de apoyo para acciones verticales y horizontales

En las bases de fundación, la interacción entre el momento y la carga normal 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.



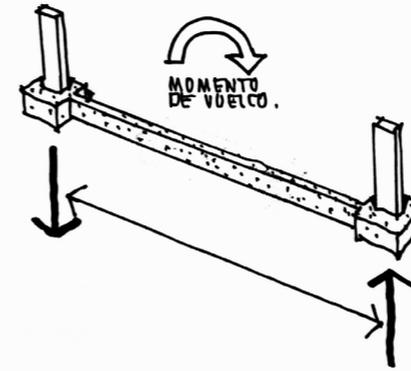
Diferentes diagramas de tensiones sobre el suelo, a medida que se incrementa el valor de momento en relación a la carga normal.

En fundaciones 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 fundación

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



Arriostramientos mediante vigas riostras