



ESTRUCTURAS PARA ACCIONES SISMICAS

Arq. Eduardo Rodríguez Cimino

Estructuras III A

Prof. Titular:

Eduardo Rodríguez Cimino

Prof. Adjunta:

Julieta Mansilla

Prof. Asistentes:

Leonel Ghiglione

Horacio Altamirano

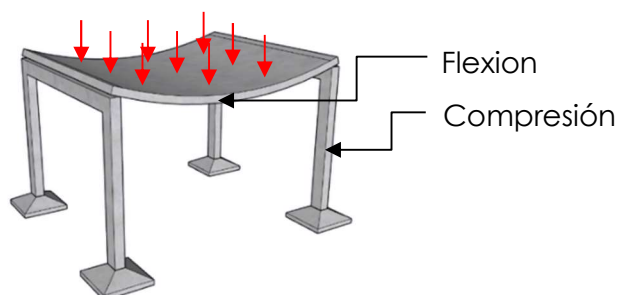
Anabella Cardellino

Ana Ostera

Madeleine Ledezma Orozco

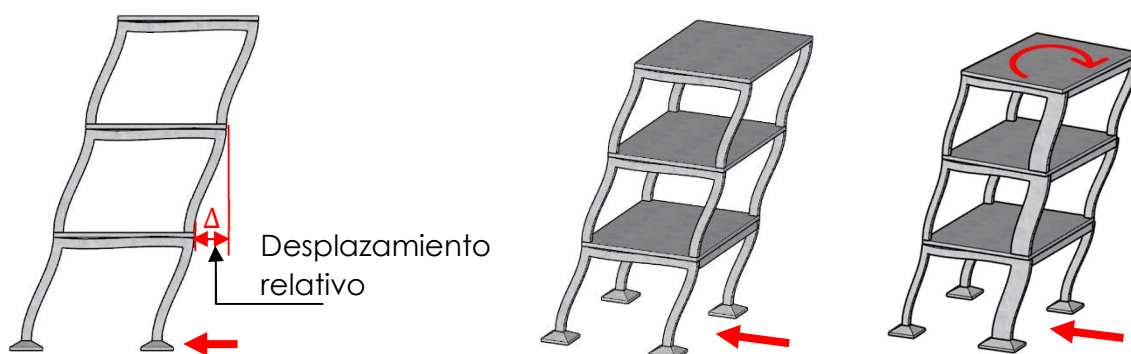
4 ESTRUCTURAS PARA ACCIONES SISMICAS

Cuando diseñamos estructuras para cargas gravitatorias, en lo primero que pensamos es en dar una adecuada rigidez flexional a los planos horizontales y a las vigas, y suficiente resistencia a compresión para los soportes (columnas y muros) que conforman los planos resistentes verticales. Los esfuerzos de flexión y corte en columnas son poco relevantes en comparación con la compresión.



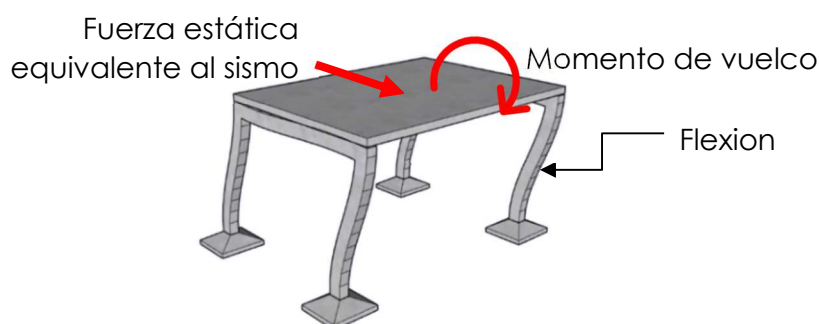
Principales solicitaciones para acciones verticales

Cuando se trata de acciones sísmicas, el problema surge a partir del desplazamiento lateral relativo entre los planos horizontales, a causa de su inercia ante el movimiento del suelo. Este desplazamiento puede ser de traslación o torsión, dependiendo de la configuración de la estructura.



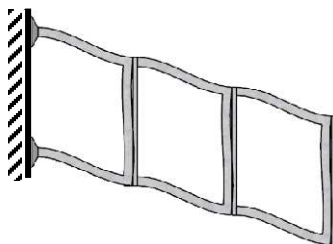
Desplazamiento relativo entre planos horizontales por efecto del sismo

Al desplazarse, el plano horizontal empuja a su vez a los planos resistentes verticales, produciendo la flexión de columnas y muros, y un momento de vuelco que puede ocasionar la inestabilidad de la estructura. A diferencia de las acciones gravitatorias, ahora cobran una especial relevancia las solicitaciones de flexión y corte sobre los elementos verticales de la estructura.



Principales solicitaciones para acciones horizontales

Los planos resistentes verticales desempeñan el rol principal de la estructura sismorresistente, dado que son los encargados de vincular a los planos horizontales con el terreno, actuando como grandes ménsulas en voladizo.



Los planos resistentes verticales actúan de forma similar a ménsulas en voladizo

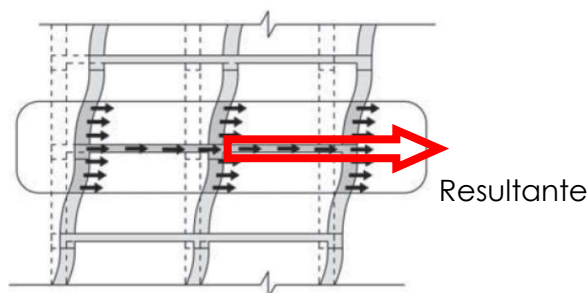
Para asegurar la estabilidad de la estructura, estos planos deben cumplir con una cantidad y posición adecuadas, de manera que garanticen suficiente rigidez traslacional y rotacional, en cualquier dirección en la que pueda actuar la fuerza sísmica.

Antes de evaluar cómo se produce el equilibrio, veremos cuales son los tipos de planos resistentes que componen a la estructura y cómo se comporta cada uno.

4.1 PLANOS RESISTENTES

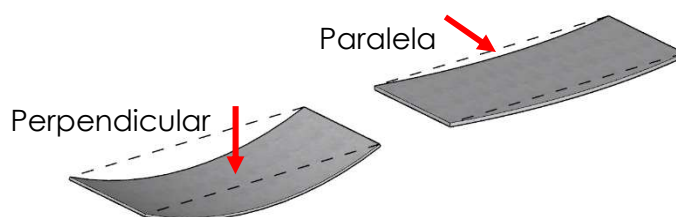
4.1.1 Planos horizontales

El plano horizontal es el primer elemento de la estructura sismorresistente. En él se ubica la mayor parte de la masa de cada nivel y por lo tanto es en donde se consideran concentradas las fuerzas de inercia producidas durante el sismo.



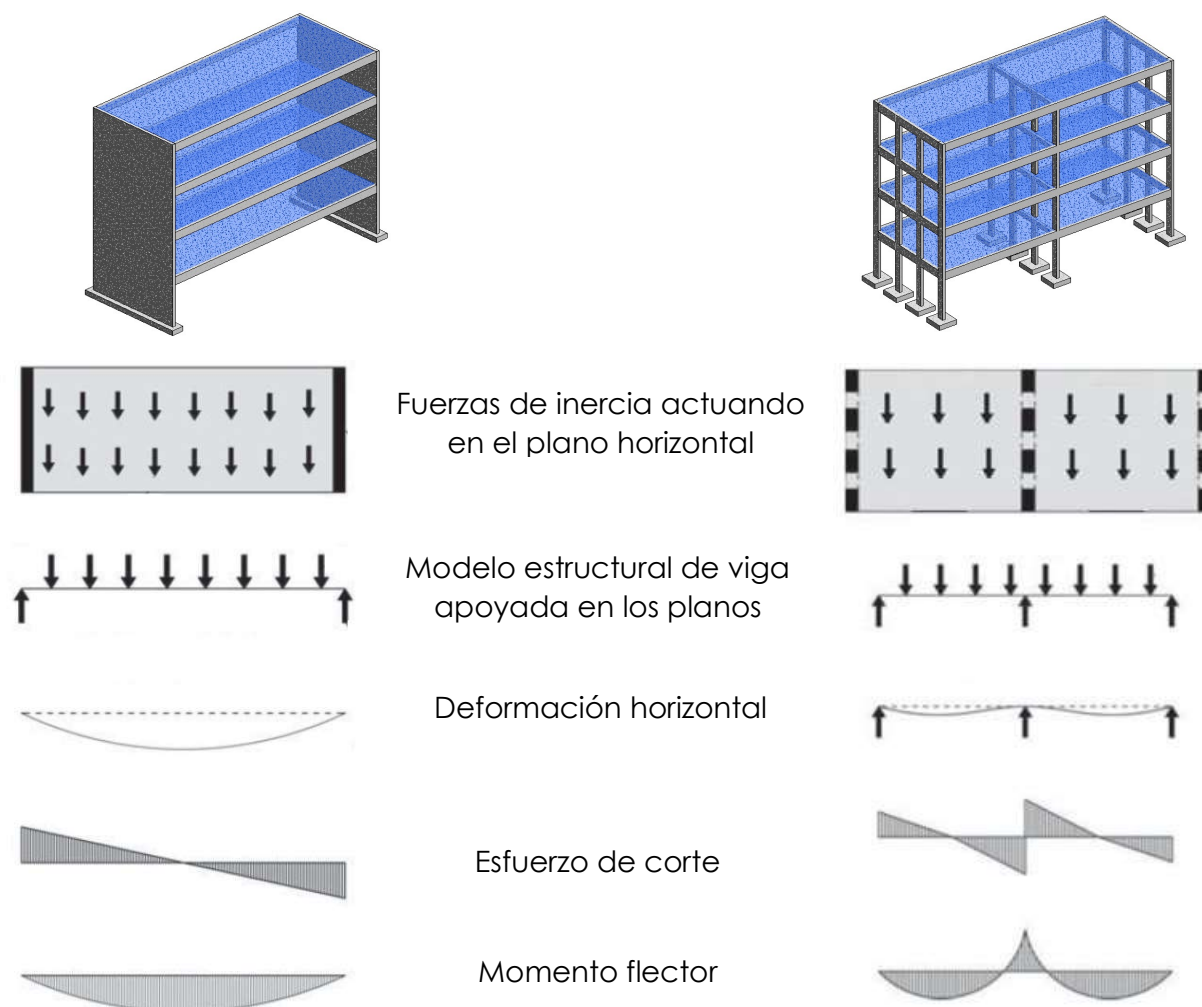
Fuerzas de inercia consideradas para un nivel intermedio

Habitualmente su función es la de recibir cargas gravitatorias perpendiculares a su plano, pero durante el lapso de tiempo que actúa el sismo, debe resistir además cargas horizontales que son paralelas a su plano, orientación para la cual su geometría le otorga gran rigidez.

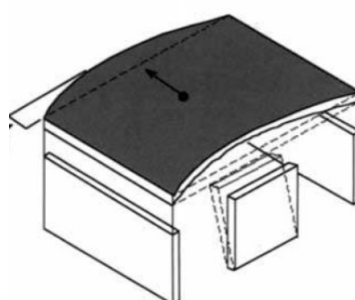


Comportamiento flexible o rígido de una placa según dirección de la fuerza.

Sin embargo, una esbeltez excesiva, o la presencia de perforaciones o desniveles pueden producir la pérdida de dicha rigidez. Los planos horizontales rígidos tienen la capacidad de vincular eficazmente a los planos resistentes verticales y lograr un trabajo en conjunto de la estructura. Cuando existe este comportamiento se los denomina "Diafragma rígido", y su trabajo se asemeja al de una gran viga colocada en posición horizontal, apoyada sobre los planos resistentes verticales.



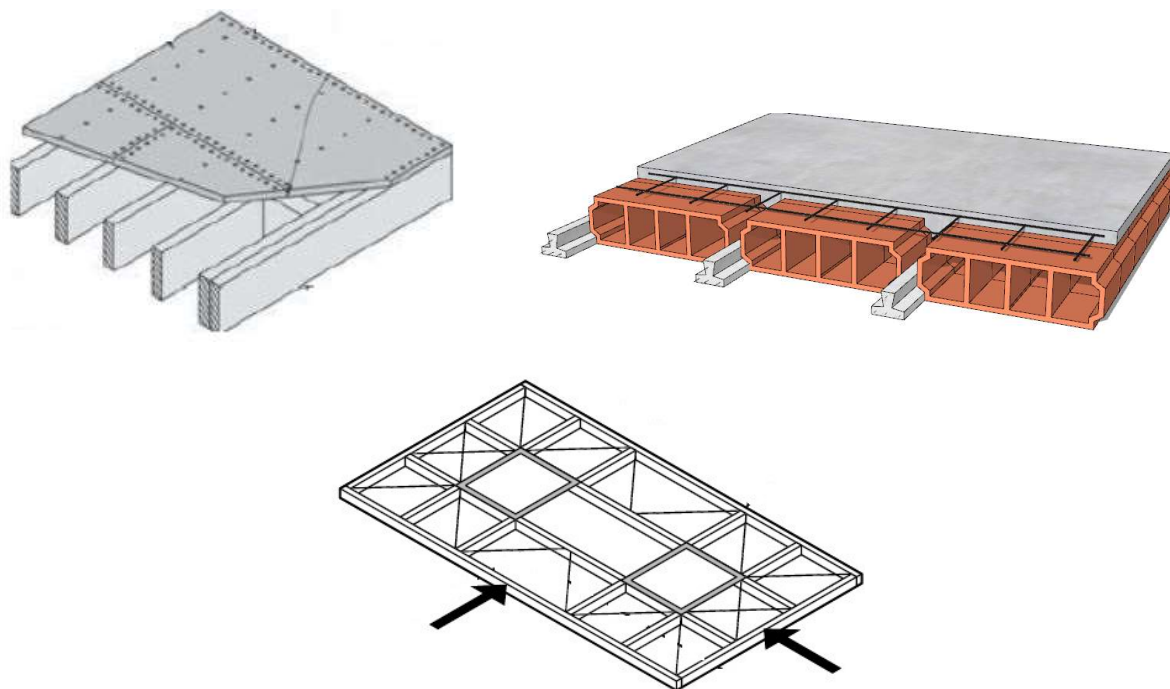
Un diafragma rígido, vincula a los planos resistentes verticales, y les transfiere la fuerza sísmica proporcionalmente a la rigidez de cada uno. Por el contrario, si el diafragma es flexible, los planos verticales podrán desplazarse independientemente unos de otros, y la fuerza sísmica actuante sobre cada uno será proporcional al área de influencia del plano horizontal que le corresponda.



Plano horizontal flexible

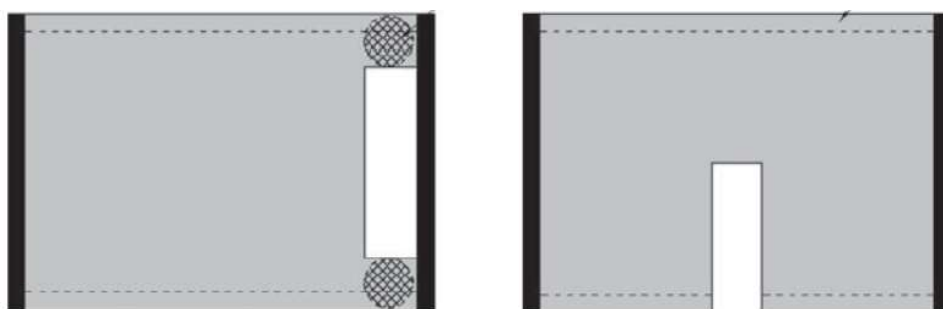
Los diafragmas rígidos pueden materializarse con:

- Losas de hormigón armado coladas in situ, macizas, alivianadas o mixtas, que cuenten con un espesor adecuado en relación a su luz.
- Losas mixtas de hormigón y chapa colaborante
- Losas prefabricadas que cuenten con una conexión rígida con los planos resistentes verticales.
- Entramados de madera o perfiles livianos de acero, rigidizados con placas de contrachapado, OSB o similar, de espesor adecuado, o arriostrados mediante tensores o triangulaciones.



Materialización de planos horizontales rígidos

En todos los casos se deberá prestar particular atención a la continuidad del plano horizontal en toda su extensión, y a su vínculo con los planos resistentes verticales. Perforaciones o cambios de nivel interrumpen la continuidad del diafragma, reduciendo drásticamente su rigidez.



Entrantes y perforaciones que producen la pérdida de rigidez del plano horizontal

4.1.2 Planos verticales

Los planos resistentes verticales son los encargados de vincular a planos horizontales con las fundaciones, por lo cual deben diseñarse de manera que posean continuidad vertical en todos los niveles, evitando interrupciones o desplazamientos de su eje.

Pueden ser de tres tipos diferentes, ordenados de mayor a menor rigidez:

- Muros: de mampostería encadenada, hormigón armado, o entramados livianos de madera o acero rigidizados mediante placas.
- Reticulados o entramados rigidizados mediante triangulaciones: de hormigón, madera o acero.
- Pórticos: de hormigón armado, madera o acero

El hormigón armado presenta mayor facilidad para materializar nudos rígidos, por lo cual es común su uso para construir pórticos. Por el contrario, las articulaciones son más simples de lograr con uniones metálicas, y por ello los reticulados son más habituales con este material.



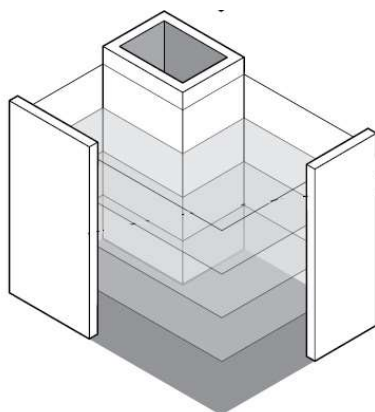
Planos resistentes verticales

Los distintos tipos de planos resistentes verticales pueden eventualmente combinarse para generar sistemas mixtos, como tabiques acoplados con vigas de conexión, sistemas pórtico-tabique, o elementos tridimensionales como tubos, que se verán más adelante.

- **Muros**

Los muros son el tipo de plano resistente vertical que históricamente han tenido mejor comportamiento ante el sismo, incluso aunque no hayan estado específicamente detallados para este tipo de solicitaciones, pero si con una correcta densidad y ubicación. Su gran rigidez minimiza los desplazamientos relativos entre pisos consecutivos, y en consecuencia el daño a los elementos estructurales y no estructurales.

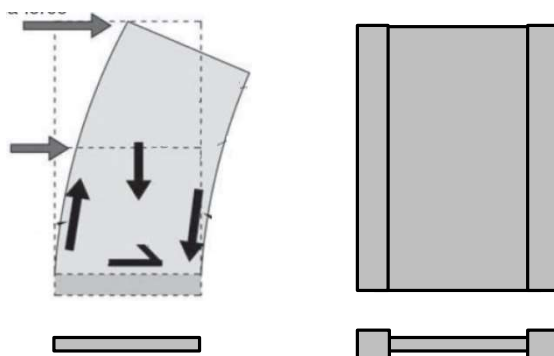
Por contrapartida, presentan cierta dificultad a la hora de compatibilizar la estructura con los requerimientos funcionales de un proyecto arquitectónico. En este sentido, los núcleos de circulación vertical ofrecen un espacio muy útil funcionalmente para utilizar este tipo de elementos, y de allí que en los edificios en altura sea habitual rodearlos con muros resistentes de hormigón armado.



Muros ubicados perimetralmente y en el núcleo de circulación vertical

Es importante que su diseño sea continuo en altura, desde la fundación hasta el último piso, de lo contrario, su interrupción o desfase de un nivel a otro puede producir fallas fatales.

El muro de hormigón armado es el tipo de plano vertical que posee mayor rigidez y resistencia, aunque con un mayor costo económico que con otros materiales. El momento flector al que están sometidos produce tracción y compresión en cada uno de sus extremos, que pueden presentar un engrosamiento que permita alojar mayor refuerzo para el borde traccionado y evitar el pandeo en el borde comprimido.



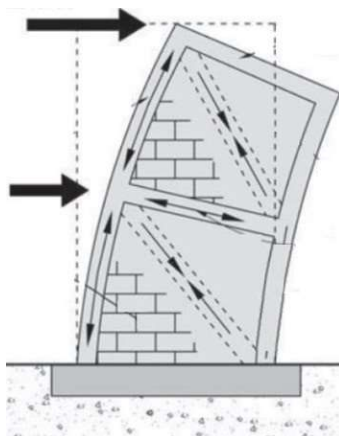
Muro de hormigón y engrosamiento de bordes

Pueden acoplarse mediante vigas de conexión, logrando sistemas de gran ductilidad, siempre que se cuente con un correcto diseño que evite las posibles fallas por corte tanto en dichas vigas como en la zona próxima a la fundación.



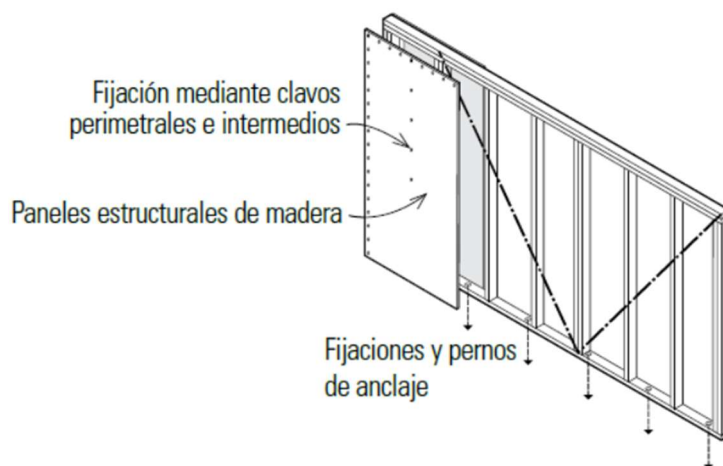
Muros de hormigón acoplados mediante vigas de conexión, y su típico refuerzo de acero en diagonal

En el caso de los muros de mampostería encadenada, la fuerza horizontal se descompone en una diagonal comprimida a través de los mampuestos, y esfuerzos de tracción en los encadenados. Este tipo de muro puede utilizarse para un número limitado de niveles, y será estudiado más en detalle en capítulos posteriores.



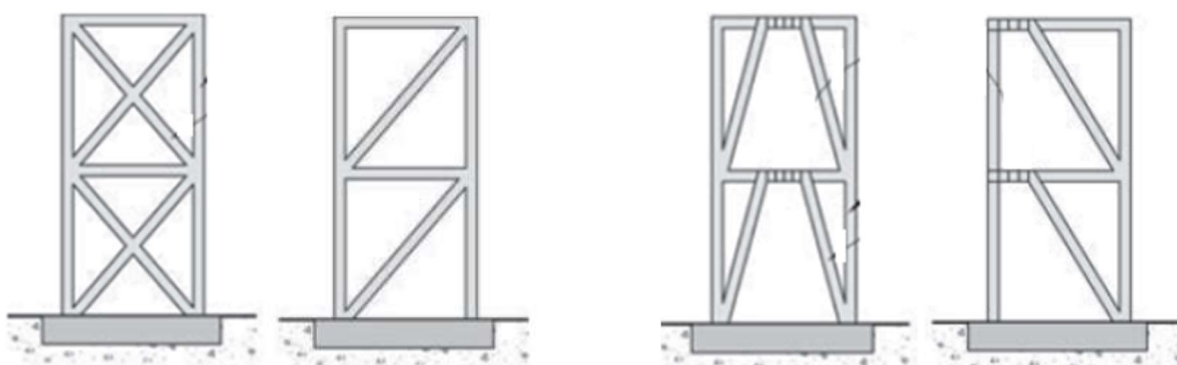
Esfuerzos de tracción en encadenados y diagonal de mampuestos comprimida en muros de mampostería encadenada.

En el caso de construcciones bajas y livianas, los muros pueden construirse también con madera, mediante placas de contrachapado o tableros de viruta (OSB) fijadas a un entramado ligero de madera aserrada o de perfiles livianos de acero (Wood/Steel framing)



- **Entramados triangulados**

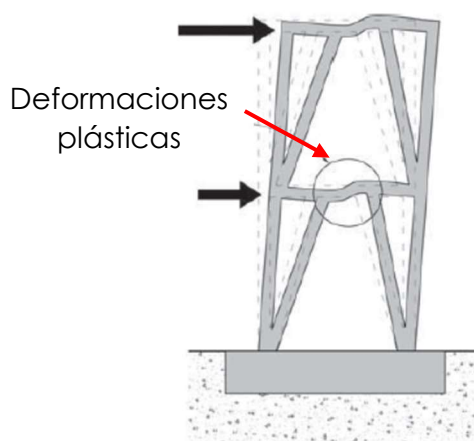
Consisten en un entramado de barras con uniones articuladas entre sí, rigidizadas mediante la incorporación de diagonales de arriostramiento conformando triángulos, figura geoméricamente indeformable. Las diagonales pueden ser concéntricas, cuando concurren directamente al nudo del marco que rigidizan formando triángulos, o excéntricas, cuando la unión se desfasa ligeramente del nudo, quedando formas trapezoidales.



Diagonales concéntricas

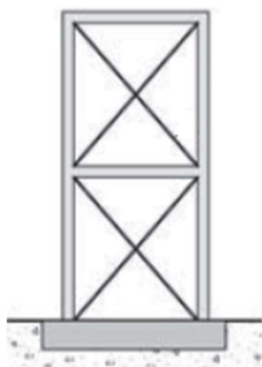
Diagonales excentricas

Las diagonales excéntricas producen importantes solicitaciones de corte y momento localizadas en los pequeños tramos de barras en donde se produce la excentricidad. Un correcto diseño detallado de estas piezas (evitando modos de falla frágiles como el corte o pandeo), permite la formación de rotulas plásticas de gran ductilidad que funcionan como “fusibles”, disipando energía del sismo.



Zona de formación de rotulas plásticas para dotar de ductilidad al sistema

Cuando se prevean barras que solo trabajen a tracción, estas pueden reemplazarse por tensores, logrando una mayor transparencia arquitectónica de los planos resistentes verticales. Este sistema es usado habitualmente en conjunto con una resolución similar para los diafragmas horizontales.



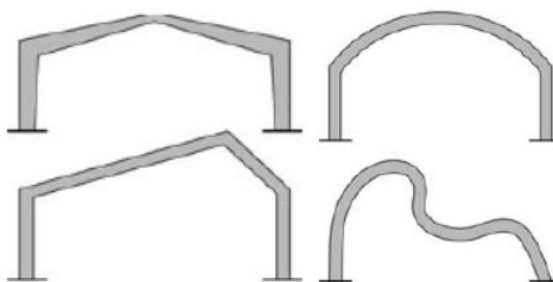
Rigidización mediante tensores diagonales

El acero es el material más habitual para este tipo de plano resistente vertical, dada su facilidad para ejecutar anclajes, tensores y uniones articuladas. La madera también es apta para construcciones bajas y livianas, pero la capacidad de sus elementos suele estar limitada por la resistencia de las conexiones. Por su parte, los reticulados de hormigón armado requieren secciones algo mayores que los de acero, y su detallado y ejecución son más dificultosas, debido a la necesidad de encofrados inclinados y empalmes de barras en diversas orientaciones dentro de los nudos.

- **Pórticos**

Se denomina pórtico al plano resistente vertical conformado por barras con uniones rígidas entre sí, conformando ángulos que no se modifican al deformarse el pórtico.

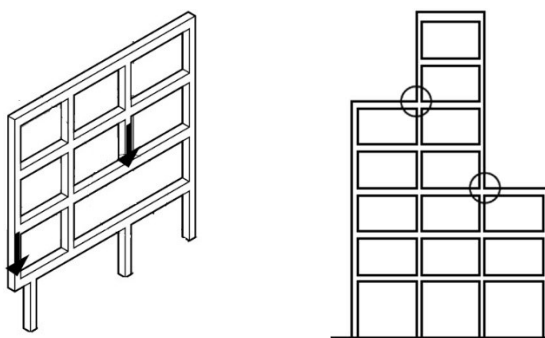
Este tipo estructural es el que brinda una mayor flexibilidad y facilidad para su compatibilización con el proyecto arquitectónico, a la vez que se presenta como una oportunidad para desarrollar su capacidad expresiva como herramienta de diseño. Cualquier plano resistente que cumpla con la condición de poseer nudos rígidos es considerado un pórtico, sin importar su geometría.



Distintas geometrías de pórticos

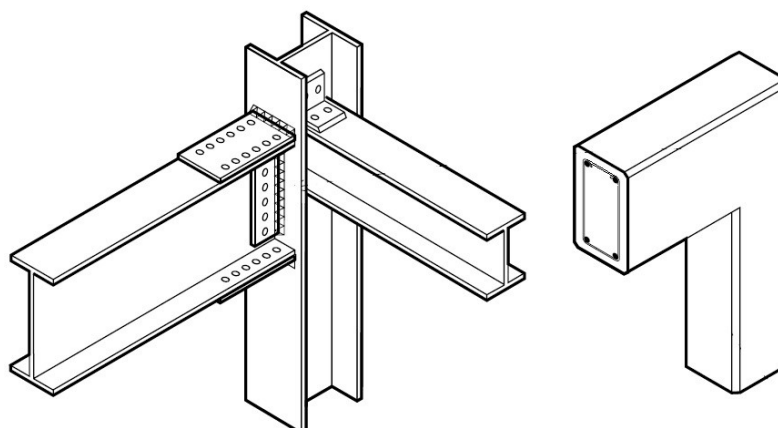
El diseño del pórtico debe permitir conseguir la suficiente rigidez y resistencia para soportar tanto las acciones sísmicas como gravitatorias, y a la vez que cumplir con los requisitos morfológicos y funcionales del proyecto arquitectónico.

La existencia de discontinuidades en los elementos del pórtico (sean vigas o columnas) produce la concentración de altas tensiones en pocos elementos. Para evitarlo es conveniente que las vigas y columnas mantengan su eje a lo largo de todos sus tramos o niveles, sin desplazamientos laterales o desfases en altura, ni variaciones bruscas de sección en dos tramos consecutivos.



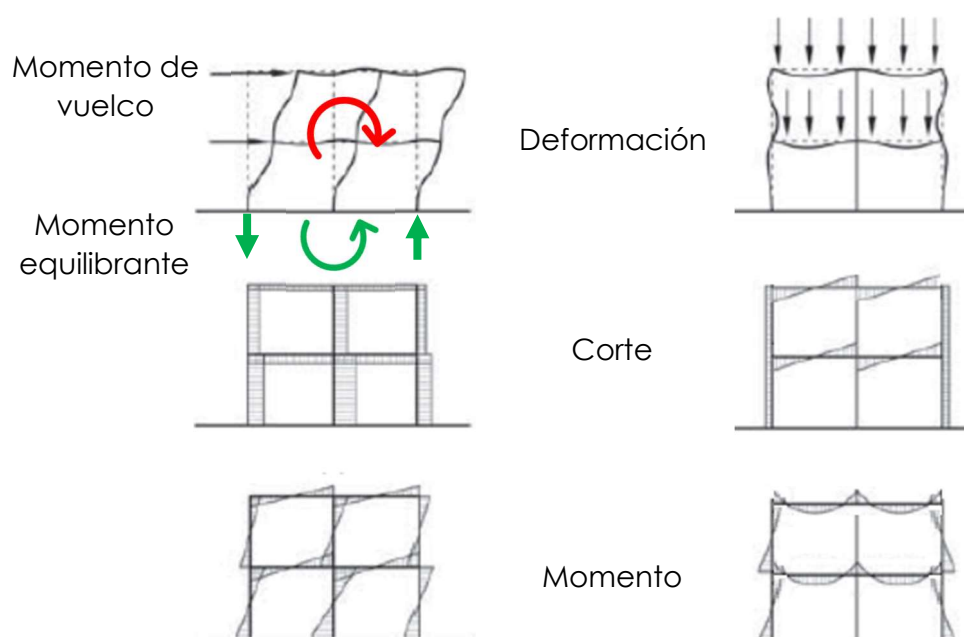
Irregularidades en diseño de pórticos que deben evitarse

En los nudos, es conveniente que las columnas y vigas que se unen tengan un ancho similar y que sus ejes coincidan, para lograr una óptima conexión de los elementos.



Nudos viga/columna en acero y hormigón

A diferencia de las cargas gravitatorias, el sismo produce en el pórtico esfuerzos de flexión concentrados en los nudos. Las columnas de los extremos también experimentan esfuerzos alternados de tracción y compresión, debidas al momento de vuelco. Se debe considerar además que una misma columna puede formar parte de dos pórticos de diferentes direcciones, y sus solicitaciones serán producto de la interacción de ambos.



Comparación entre solicitaciones producidas por acciones sísmicas y gravitatorias

La rigidez traslacional de un pórtico depende de su geometría, cantidad de vanos y pisos, y de la rigidez propia de los elementos que lo componen. A su vez, la rigidez flexional (k) de vigas y columnas depende del módulo de elasticidad de su material, del momento de inercia de su sección, y de su longitud.

$$k = \frac{E \cdot I}{L}$$

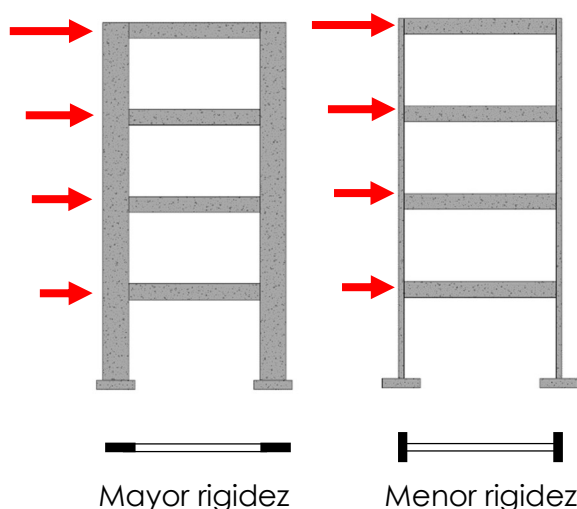
Donde:

E es el modulo de elasticidad del material

I es el momento de inercia de la sección

L es la longitud del elemento

Por consecuencia, para lograr un pórtico más rígido, es conveniente colocar la sección de las columnas haciendo coincidir su mayor inercia en la misma dirección del plano resistente.

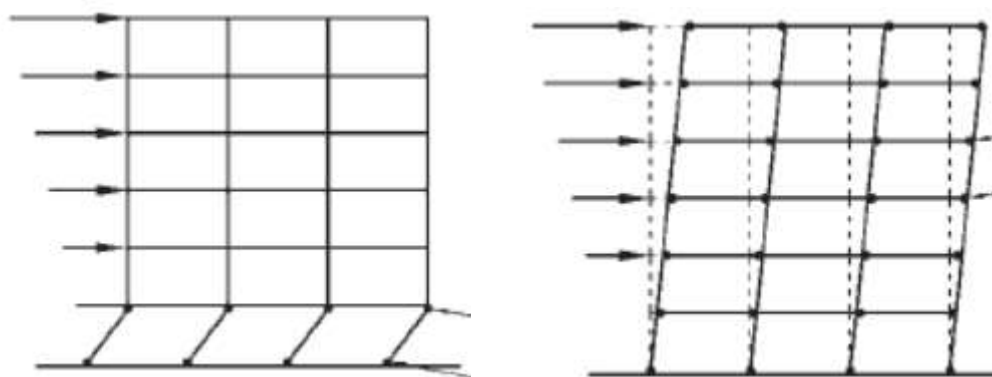


Del mismo modo, para obtener un adecuado comportamiento sísmico, las secciones de las vigas deben tener una orientación vertical (mayor alto que ancho) de manera de obtener una rigidez que sea considerablemente mayor a la del plano horizontal que soportan.

En cuanto a su materialidad, los pórticos pueden construirse con hormigón armado, madera o acero. La dificultad principal consiste en lograr la unión rígida en los nudos entre vigas y columnas, lo cual es relativamente sencillo en hormigón armado, pero en acero y madera puede ser bastante dificultoso.

Para asegurar una adecuada ductilidad, es preferible que las columnas tengan una mayor capacidad resistente a flexión que las vigas, de manera que la formación de rotulas plásticas se produzca en los extremos de las vigas, y no en las columnas, que pueden comprometer la estabilidad de la estructura. Esta configuración se denomina columna fuerte – viga débil.

En la siguiente imagen, en el pórtico de la izquierda la aparición de rotulas plásticas en los extremos de las columnas de un nivel producen la inestabilidad de la estructura. En cambio, en el de la derecha, la plastificación en extremos de vigas permite una mayor disipación de energía sin comprometer la estabilidad de la estructura.



Mecanismos de colapso

El diseño de los planos resistentes que contempla la ubicación de los puntos en donde se formarán las rotulas plásticas y los elementos que deben comportarse elásticamente durante un sismo se denomina “Diseño por capacidad”.

La redundancia estructural es otro factor que también incrementa la ductilidad. Mayor cantidad de vigas y columnas implican menores solicitaciones en cada elemento. Si se produce el fallo de alguno de ellos, los esfuerzos se redistribuyen entre los elementos restantes de la estructura.

Como se vio anteriormente, para el cálculo de las acciones sísmicas, el reglamento INPRES-CIRSOC 103, parte I, de 2018 permite adoptar como factor de reducción hasta un valor de 7 para pórticos en los cuales se obtenga una ductilidad completa, lo cual en la práctica es difícil de lograr. Para ello es necesario un cuidadoso estudio del mecanismo de colapso y un minucioso detallado de armaduras para las zonas de formación de rotulas plásticas, que luego debe ser respetado en detalle en obra, ya que el comportamiento final de la estructura puede ser susceptible a pequeños cambios en la ejecución. Además, se deben respetar una serie de prescripciones de armado particulares indicadas por el propio reglamento según se utilicen pórticos de ductilidad completa o limitada.

4.2 ESTABILIDAD LATERAL

La capacidad de mantener un **equilibrio estable** ante cualquier tipo de cargas, es uno de los requisitos mínimos que debe cumplir cualquier estructura, además de poseer una adecuada **rigidez** que permita cumplir su función sin producir daños sobre otros elementos u objetos, y suficiente **resistencia** para garantizar que no se produzca rotura de sus componentes.

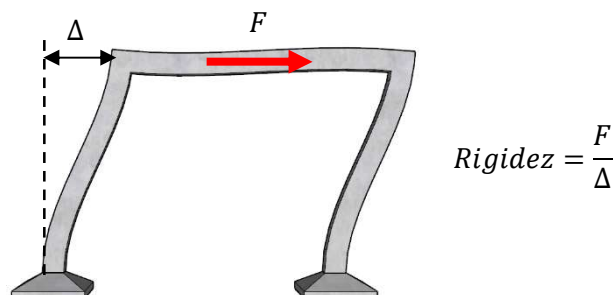
Para lograr la estabilidad, es conveniente que todos los planos resistentes colaboren en conjunto, para lo cual se requiere que los planos horizontales se comporten como diafragmas rígidos, vinculando a los planos resistentes verticales. Si el plano horizontal fuera flexible, habrá que garantizar la estabilidad de cada componente de la estructura por separado.

A continuación, realizaremos un análisis del equilibrio para estructuras bajo cargas horizontales que cuentan con diafragmas rígidos.

4.2.1 Equilibrio a traslación

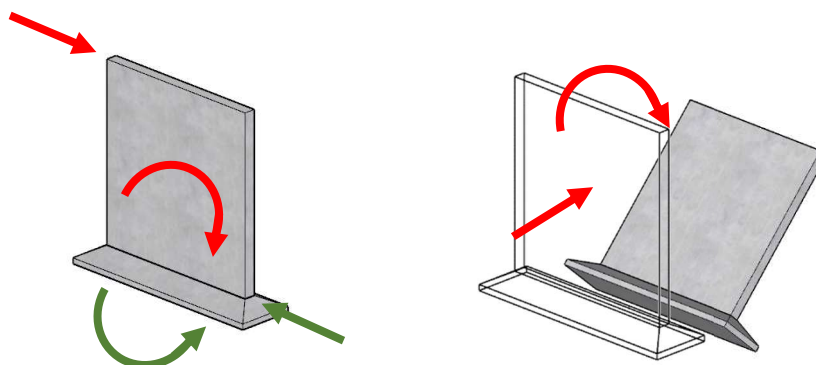
Al aplicarse la fuerza estática equivalente al sismo sobre el plano horizontal de una estructura, éste sufre un desplazamiento cuya magnitud depende de la rigidez traslacional de los planos resistentes verticales que conforman dicha estructura.

La rigidez traslacional de un plano resistente vertical depende de sus materiales, tipo de apoyos y de la geometría de sus componentes. Puede medirse mediante la relación entre la fuerza que se le aplica y el desplazamiento horizontal que genera.



Por ejemplo, en un pórtico dependerá de su material, si sus apoyos están articulados o empotrados, cantidad y altura de sus pisos, cantidad y luces de sus tramos, y de las secciones de sus vigas y columnas. Si se trata de un muro, dependerá de su altura, longitud, espesor y materiales que lo componen.

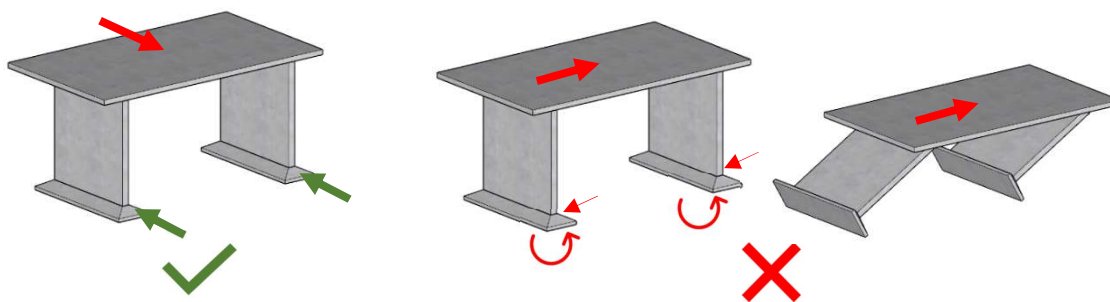
Cabe aclarar que la rigidez también dependerá de la dirección con que se aplica la fuerza, dado que los planos resistentes verticales, cualquiera sea su tipo, poseen muy escasa rigidez para acciones que son perpendiculares a ellos.



Estabilidad de planos resistentes verticales para acciones paralelas y perpendiculares a ellos

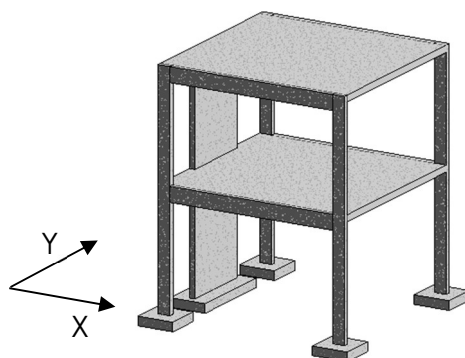
Como la estabilidad debe garantizarse para cualquier dirección de fuerzas, esto implica que no podemos ubicar en una estructura todos los planos verticales paralelos, dado que si ello ocurre una fuerza perpendicular a ellos pondría en riesgo la estabilidad del conjunto.

Por ejemplo, la siguiente estructura posee solo dos planos resistentes verticales paralelos. Si aplicamos una fuerza en la misma dirección de ellos, la estabilidad queda garantizada por la gran rigidez traslacional que proporcionan dichos planos a la estructura. En cambio, si aplicamos una fuerza perpendicular, la estabilidad del conjunto depende exclusivamente de la rigidez rotacional de las bases, que es mucho más limitada. Si no se logra un empotramiento, la estructura es inestable.



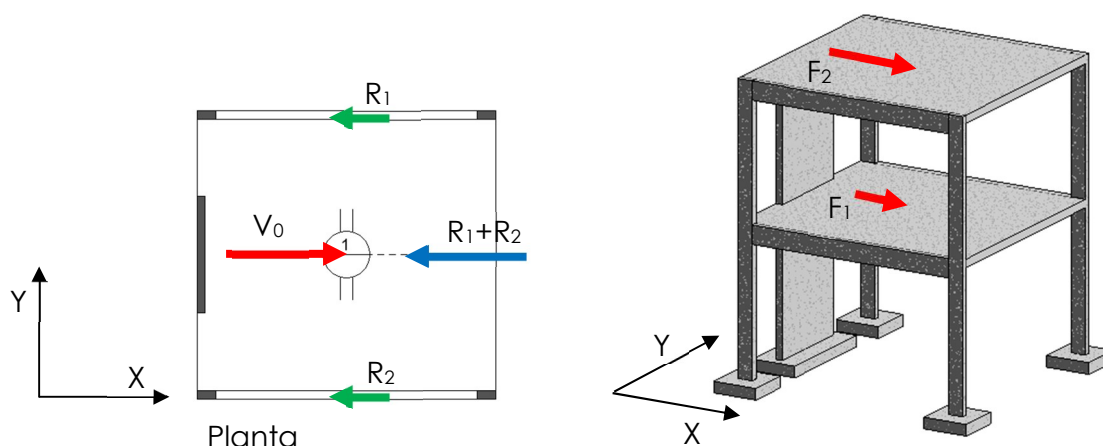
La fuerza estática equivalente al sismo, actuando en el centro de gravedad del plano horizontal, debe equilibrarse por las reacciones que ofrecen los planos resistentes verticales. La magnitud de la reacción que cada plano ofrece será proporcional a su rigidez. En este caso ambas reacciones de los muros son iguales.

En la siguiente estructura de dos niveles compuesta por planos horizontales de losas macizas de hormigón armado, y tres planos resistentes verticales: dos pórticos de hormigón armado en dirección X y un muro también en hormigón armado en dirección Y.



Si aplica la fuerza estática equivalente al sismo en dirección X de valor igual a V_0 , que distribuida en altura equivale a las fuerzas $F_1 + F_2$, y como ya sabemos $F_2 > F_1$

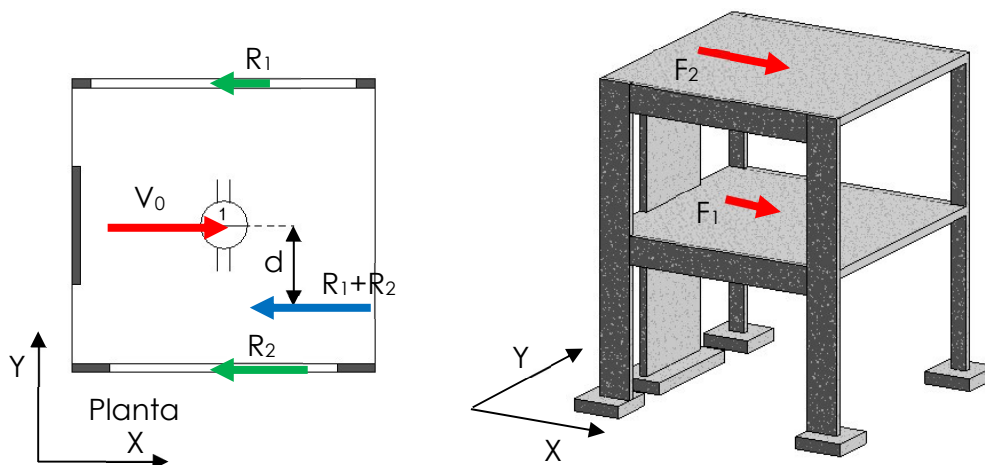
- El muro que está en dirección Y presenta muy escasa rigidez para una fuerza perpendicular a su plano, por lo cual se considera que no tiene reacción.
- Los pórticos son idénticos, por lo cual tienen la misma rigidez, y reaccionan con fuerzas iguales (R_1 y R_2), que sumadas equilibran a la fuerza sísmica.
- La resultante de las reacciones coincide con la recta de acción de la fuerza sísmica, quedando equilibradas.



$$V_0 = F_1 + F_2$$

$$V_0 = R_1 + R_2$$

Si ahora modificamos uno de los pórticos, incrementando su rigidez:

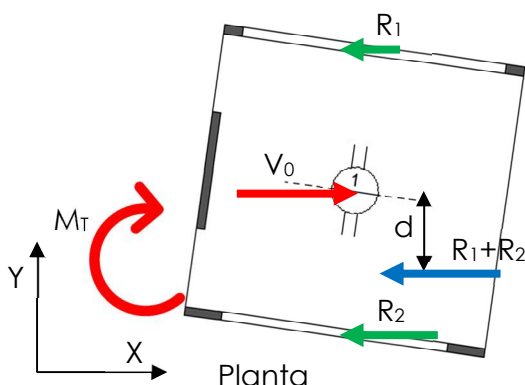


- Los pórticos reaccionan con fuerzas proporcionales a su rigidez, por lo cual R_2 es mayor que R_1 .
- Las fuerzas R_1 y R_2 producen un esfuerzo de corte en los planos resistentes verticales, por el efecto de traslación, que se denomina "corte directo"
- La resultante de las reacciones R_1+R_2 equilibra la magnitud de la fuerza sísmica, pero su recta de acción no coincide, por lo cual se produce un momento torsor que aún falta equilibrar.

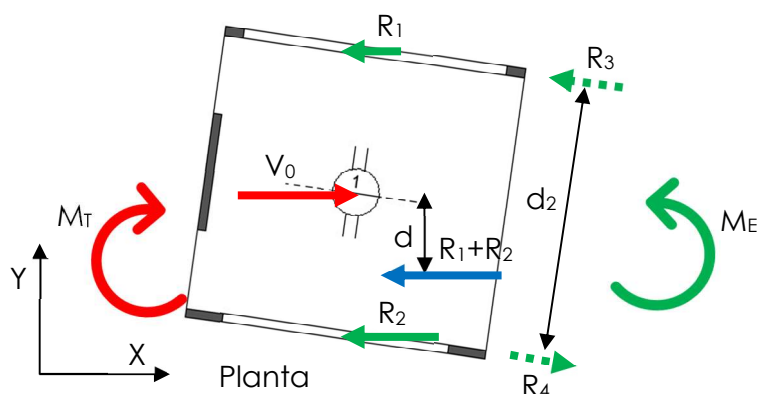
4.2.2 Equilibrio a torsión

La resultante de las reacciones y la fuerza sísmica quedan separadas a una distancia d , produciendo un momento torsor M_T de valor:

$$M_T = V_0 \cdot d = (R_1 + R_2) \cdot d$$



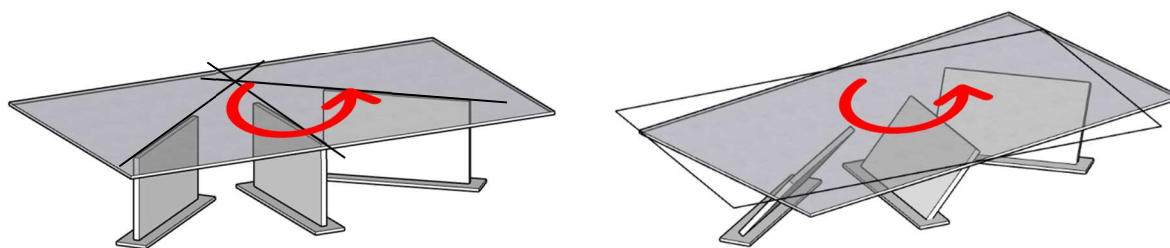
El momento torsor produce la rotación del plano horizontal en sentido horario, y para equilibrarlo deberán aparecer nuevas reacciones que generen un momento equilibrante de sentido antihorario.



- Los pórticos presentan una reacción adicional R_3 y R_4 , ambas de igual valor, que separadas por la distancia d_2 producen un momento equilibrante M_E .
- El muro ubicado en dirección Y no puede reaccionar ante la torsión dado que no existe otro plano en esa dirección con el cual pueda formarse una cupla.
- Las reacciones R_3 y R_4 producen un esfuerzo de corte adicional en los planos resistentes verticales, por efecto de la torsión, y se denominan "corte indirecto". Su valor depende no solo de la rigidez de cada plano vertical, sino también de su distancia al centro de rigidez.
- El corte indirecto, dependiendo del sentido de la acción sísmica, puede incrementar o disminuir la reacción por corte directo, pero debe considerarse sólo el caso en que su efecto resulte desfavorable. Como la acción del sismo alterna permanentemente su dirección, para cada plano vertical siempre habrá un instante en que resulte desfavorable.

Del análisis realizado podemos concluir que para equilibrar el momento torsor, la estructura debe poder generar, mediante sus planos resistentes verticales, al menos una cupla que dé lugar al momento equilibrante.

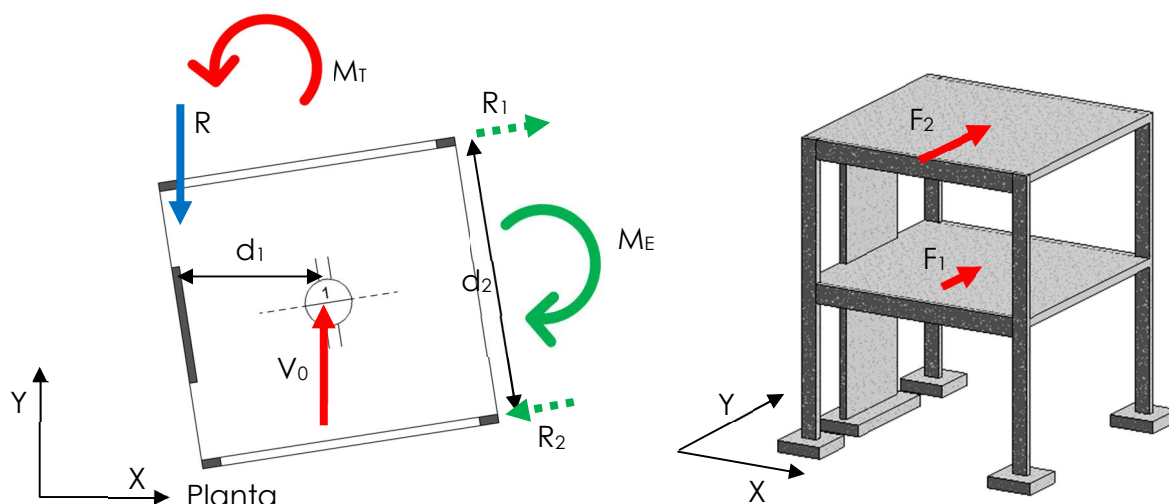
No son recomendables entonces configuraciones que presenten la totalidad de sus planos resistentes verticales con direcciones concurrentes a un mismo punto, dado su escasa rigidez torsional.



Inestabilidad torsional

4.2.3 Centro de rigidez

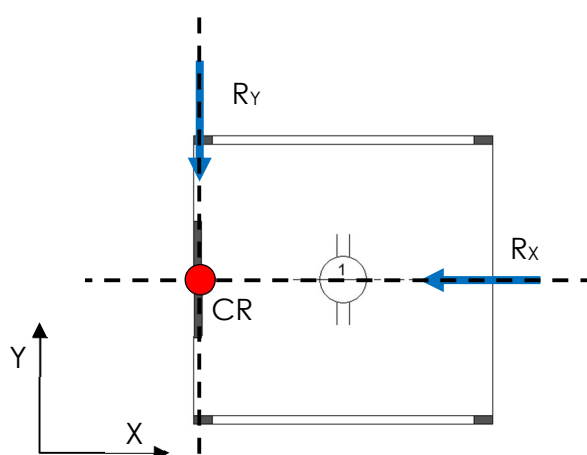
Si analizamos la estructura anterior de dos niveles para una fuerza sísmica actuando en dirección Y:



- Los pórticos tienen muy escasa rigidez para una fuerza perpendicular a su plano, por lo cual su reacción se considera nula.
- En dirección Y existe solo un plano resistente vertical que debe ofrecer una reacción igual y de sentido contrario a la fuerza sísmica.
- La recta de acción de fuerza sísmica y reacción no coinciden, produciéndose un momento torsor y la rotación del plano horizontal.
- Las reacciones por corte indirecto de los pórticos, R_1 y R_2 , generan el momento M_E consiguiendo el equilibrio.

El centro de rigidez de la estructura es el punto por donde pasa la resultante de las reacciones, y alrededor del cual se produce la rotación del plano horizontal. Su posición depende de la ubicación y rigidez de los planos resistentes verticales.

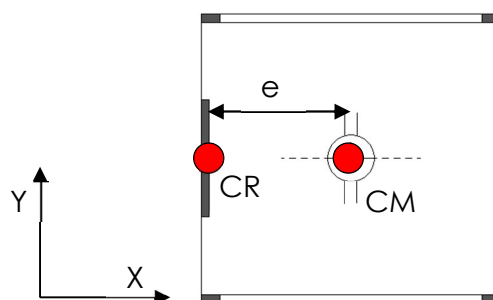
Del análisis en ambas direcciones de la estructura, podemos ubicar su centro de rigidez en el punto en que se cortan las rectas de acción de las resultantes de las reacciones producidas para cada dirección en que se consideró actuando el sismo.



Posición del centro de rigidez

Cuando el centro de rigidez coincide con el centro de masa (donde se considera aplicada la fuerza estática equivalente al sismo), no se produce torsión y la estructura solo se traslada, sin rotar.

La distancia entre el centro de masa y el centro de rigidez se denomina excentricidad, y constituye un parámetro de eficiencia sísmica del diseño estructural, dado que mientras menor sea, menores serán las solicitaciones producidas por corte indirecto.



Excentricidad

4.3 REACCIONES DE APOYO

Una vez obtenida la reacción que debe ofrecer cada plano resistente vertical (considerando efectos de traslación y torsión), estos deben transferirlas hasta las fundaciones, en donde las reacciones de apoyo proveen el equilibrio final de la estructura.

Se deben cumplir las ecuaciones de equilibrio

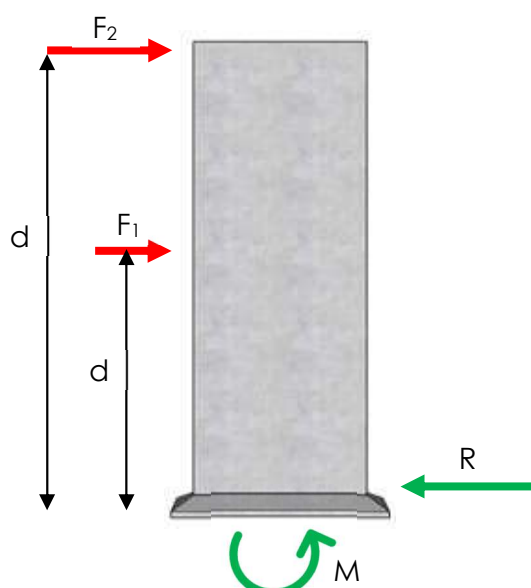
Fuerzas horizontales $\Sigma F_H = 0$

Fuerzas verticales $\Sigma F_V = 0$

Momentos $\Sigma M = 0$

- **Muros**

Supongamos un muro de una estructura de dos niveles. Sobre él actúan dos fuerzas (una por cada plano horizontal), correspondientes a un porcentaje de la acción sísmica total, proporcional a su rigidez.



Fuerzas horizontales $\Sigma F_H = F_1 + F_2 - R = 0 \Rightarrow R_H = F_1 + F_2$

Fuerzas verticales $\Sigma F_V = 0 \Rightarrow R_V = 0$

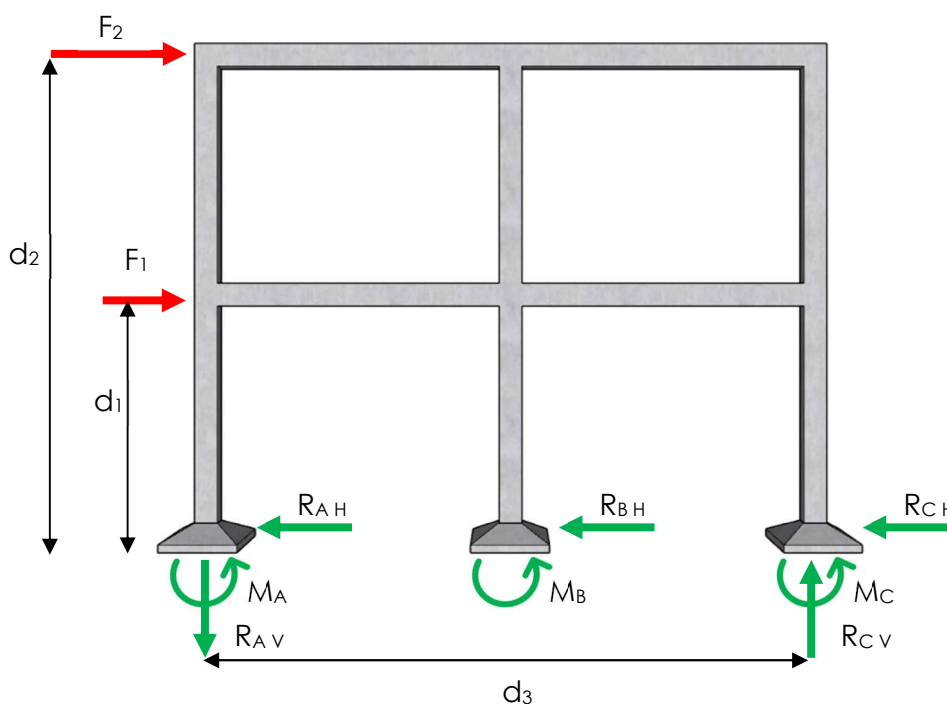
Nota: Solo existe un apoyo, por lo cual para que la suma de fuerzas verticales sea 0, la única reacción vertical debe ser 0 (el análisis es solo de acciones sísmicas, y no se consideran cargas gravitatorias)

Momentos $\Sigma M = 0 \Rightarrow F_1 \cdot d_1 + F_2 \cdot d_2 - M = 0$

Momento
de vuelco

• Pórticos

Los pórticos poseen una mayor cantidad de apoyos, lo que permite que el equilibrio del momento de vuelco se genere a partir de los momentos de los empotramientos de las bases, mas el momento producido por las reacciones verticales y la distancia entre ellas.



Fuerzas horizontales $\Sigma F_H = 0 \Rightarrow F_1 + F_2 - R_{AH} - R_{BH} - R_{CH} = 0$

Fuerzas verticales $\Sigma F_V = 0 \Rightarrow -R_{AV} + R_{BV} = 0 \Rightarrow R_{AV} = R_{CV}$

Momentos $\Sigma M = 0 \Rightarrow F_1 \cdot d_1 + F_2 \cdot d_2 - M_A - M_B - M_C - R_{AV} \cdot d_3 = 0$