

Planeamiento Estructural de Edificaciones Sismo-Resistentes

Moisés Levy Carciente, MSc Ing.

Caracas, República Bolivariana de Venezuela

2010

Quedan rigurosamente prohibidas, sin la autorización escrita de los titulares del copyright, bajo sanciones establecidas en las leyes, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo público.

© **Moisés Levy Carciente**

Depósito Legal: If25220105511712

ISBN: 978-980-12-4379-3

Dedicatoria:

*Realmente hay dos dedicatorias, la primera es para mis padres.
Por su apoyo, sus consejos, y lo más importante su cariño.*

Y la otra segunda es para el mundo, el universo, el infinito:

Hay que ser original, innovador, inconforme, rebelde, todo lo contrario a lo conservador y repetitivo. Un mundo sin cambios es aburrido y monótono, y decididamente no apto para personas como nosotros. Las decisiones hay que tomarlas, no pensarlo demasiado, y acertar en todo, ya que las equivocaciones no tienen entrada en nuestro espacio, por ser responsables del futuro de otras personas.

El mundo es un lienzo para la imaginación.

Moisés Levy Carciente

INDICE

1. INTRODUCCION	3
2. CONCEPCION ESTRUCTURAL	4
3. SISTEMAS ESTRUCTURALES	8
4. ACCION SISMICA	23
5. FUNDAMENTOS PARA EL ENTENDIMIENTO DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE PORTICOS.	29
6. RECOMENDACIONES ESTRUCTURALES	41
7. PREDIMENSIONADO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES	58
8. ANALISIS SISMICO	77
9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	85
10. SOBRE EL AUTOR.....	86

1. INTRODUCCION

Los arquitectos e ingenieros, responsables de la seguridad estructural de la obra, bajo cuya responsabilidad se planifica la integridad de las vidas y bienes de las personas que utilizarán dichas instalaciones, tiende a rigidizar la morfología del proyecto para enmarcarlo dentro de esquemas estructurales probados y así encaminarse en un camino más seguro hacia la solución.

Por otra parte el arquitecto, preocupado de la funcionalidad de su obra trata de acompañar la funcionalidad con su sello estético, ignorando a veces el aspecto estructural que muchas veces choca y dificulta la consecución formal del proyecto. La necesidad de dotar al proyecto de funcionalidad, seguridad y economía, de forma equilibrada, exige la participación de ambas posturas en su realización.

El diseño estructural lo podemos definir como el proceso mediante el cual se definen las características de un sistema capaz de resistir las sollicitaciones a las que va a estar sometido, sin llegar a colapsar, cumpliendo con las normas, especificaciones y recomendaciones vigentes. Gran parte del territorio de Venezuela se ubicada en regiones sísmicamente activas, razón por la cual las estructuras proyectadas que se construyen en estas zonas deben ser sismo-resistentes.

Las recomendaciones y normas sismo-resistentes establecen criterios de análisis y diseño para edificaciones situadas en zonas donde pueden ocurrir terremotos, con la finalidad de reducir el número de pérdidas humanas como consecuencia de dichos fenómenos naturales. Se planifica que las edificaciones diseñadas bajos dichos lineamientos no sufran daños bajo sismos severos, resistan sismos de moderados, y resistan sismos intensos sin colapsar. Asimismo estas normas se encuentran en permanentes revisiones y actualizaciones.

El presente texto tiene como finalidad servir de guía a estudiantes y profesionales de ingeniería y arquitectura en la introducción al planeamiento estructural de edificaciones sismo-resistentes.

2. CONCEPCION ESTRUCTURAL

Toda concepción estructural de una obra de arquitectura debería basarse en la interpretación de la famosa triada de Vitrubio del tratado 'De Architectura', donde la arquitectura descansa en tres principios: 'firmitas' (firmeza), 'utilitas' (utilidad) y 'venustas' (belleza).

La '*firmeza*' se refiere a la necesidad de que la obra debe realizarse para permanecer en el tiempo y se relaciona con tres propiedades fundamentales de toda estructura, como son: el equilibrio, la estabilidad y la resistencia. El equilibrio se manifiesta cuando existe un balance de fuerzas en un sentido o dirección (fuerzas de igual magnitud y sentido contrario garantizan el equilibrio en una dirección dada, y productos de igual magnitud y sentido contrario entre fuerzas y brazos de palanca garantizan el equilibrio rotatorio). La estabilidad se presenta cuando existe una ausencia de equilibrio.

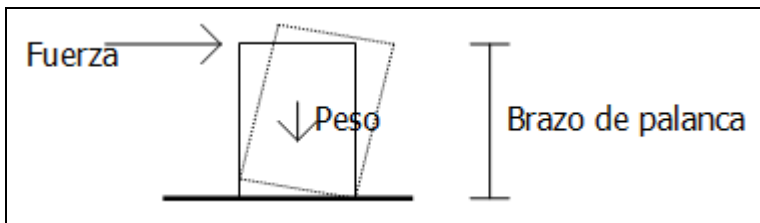


Figura 1: Ejemplo de inestabilidad

(Momento de volcamiento = Fuerza • Brazo de palanca)

Distintos tipos de inestabilidad pueden presentarse en una estructura. Por ejemplo: desde el punto de vista horizontal: deslizamientos, desde el punto de vista rotatorio: volcamientos debidos a fuerzas horizontales (sismos o vientos) o asentamientos del suelo de fundación.

Y la resistencia se manifiesta con la capacidad que tiene el conjunto de soportar esfuerzos elevados manteniendo su integridad estructural, y puede obtenerse mediante dos opciones: variando la cantidad de material y modificando la forma. No debe confundirse rigidez con resistencia, ya que la rigidez se relaciona con la capacidad que

tiene un elemento de soportar esfuerzos elevados con un control de las deformaciones.

Las estructuras siempre se conciben y construyen para que tengan una '*utilidad*' o finalidad definida, la cual varía dependiendo del caso en particular .Por ejemplo: para cerrar o delimitar un espacio, para unir dos lugares distantes (puentes), o para resistir empujes (muros de contención).

Y por último, la '*belleza*', se refiere a lo estético de la obra en su entorno arquitectónico, geográfico y socio-cultural.

En el proyecto de una edificación se contemplan dos tipos de problemas. El primero referido a la *geología, tipo de suelo, y fecha de ocurrencia de sismos* en la zona. Y el segundo relacionado con la *estructura*, en el que se estudia el sistema estructural más conveniente, la capacidad de resistir las cargas verticales y las cargas horizontales.

Aunque el proceso conceptual de la estructura sea un arte y fundamentalmente el resultado de una intuición experimentada, y no se logre nunca por la simple deducción de unos razonamientos lógicos. Resulta como en todo arte dar unas reglas generales, pero destacando que no son todas y ni siquiera las más importantes para cada caso.

- Lo primero es concretar las condiciones funcionales que constituyen el planteamiento del problema, distinguir entre las absolutamente necesarias y definidas de aquellas otras que han de cumplirse en el mayor grado posible, y de las que sólo señalan una simple conveniencia supletoria al problema fundamental.
- Considerar las limitaciones, orientaciones, condiciones y conveniencias que imponen las distintas exigencias del proyecto: el material, el fenómeno tensional en sus líneas fundamentales, el terreno, el proceso de ejecución, la estética, las construcciones colindantes y otras más.
- Seleccionar los sistemas estructurales posibles.
- Evaluación y análisis del esquema estructural, incluyendo materiales, terreno y proceso de ejecución. El proyecto requiere ante todo ser construible, y mejor si es fácil y económico.

En la economía total de un tipo de construcción pueden influir factores tan variados como: el clima, la superficie, la densidad de población, la facilidad de transportes, la industrialización del país, la capacitación del personal obrero, y el volumen de elementos análogos en otras obras simultáneas o que se han de realizar.

El problema es cómo elegir el tipo estructural que, dentro de las condiciones que le impone su finalidad, resulte más adecuado para construirlo con los materiales y las técnicas de que se dispone. Al decir tipo estructural se hace referencia al conjunto de elementos resistentes capaces de mantener sus formas y cualidades a lo largo del tiempo, bajo la acción de cargas y agentes exteriores a que ha de estar sometido.

El profesional debe elegir entre las posibles soluciones, ponderando sus ventajas y desventajas. En otros casos debe pensar solamente si, corrigiendo las formas, puede perfeccionar y sobrevalorar la expresión estética, sin forzar excesivamente las otras condiciones funcionales, resistentes, constructivas y económicas.

El sistema estructural debe cumplir determinados requisitos básicos, tales como, soportar las cargas verticales y horizontales, resistir cargas de impacto, resistir vibraciones y efectos de fatiga, y resistir asentamientos diferenciales. Además debe ajustarse a la arquitectura, presentar facilidad constructiva, y ser económico.

Toda estructura a proyectar debe ser capaz de resistir fuerzas verticales y horizontales, y debe seleccionarse un sistema estructural resistente a fuerzas verticales y horizontales, los cuales actuarán conjuntamente.

Podemos definir el sistema estructural como un conjunto de elementos estructurales dispuestos de tal forma que puedan ser capaces de absorber las sollicitaciones a las que está sometida la estructura durante las diferentes etapas de su existencia a nivel estructural.

Las soluciones estructurales están sujetas a restricciones que surgen de la interacción con otros aspectos del proyecto y a limitaciones de costo y tiempo de ejecución.

La bondad del proyecto depende esencialmente del acierto en el diseño de un sistema estructural que resulte el más idóneo para absorber los efectos de las acciones exteriores a las que va a estar sometido. Los cálculos y comprobaciones posteriores basadas en diseño estructural sirven para definir en detalle las características de la estructura y para confirmar o rechazar la viabilidad del sistema propuesto.

La escogencia del sistema estructural adecuado involucra idealmente la selección y arreglo de los principales elementos estructurales para resistir de manera eficiente las diferentes consideraciones de cargas horizontales y verticales. La escogencia del sistema estructural, por lo general viene dado por las consideraciones estructurales.

La idoneidad de cada sistema sólo puede ser juzgada cuando todos los factores que influyen el comportamiento de las cargas laterales sean tomados en cuenta. Tales factores incluyen la geometría del edificio, severidad del viento, sismicidad de la región, ductilidad de la estructura, tipo de material, método constructivo, límites impuestos en las secciones de los miembros estructurales, y otros más.

Mientras más alto y esbelto sea un edificio, mayor importancia tendrán los factores estructurales y por ende una mayor necesidad de evaluar el sistema estructural apropiado.

El objetivo principal de seleccionar un sistema estructural adecuado, además de satisfacer los requerimientos estructurales y no estructurales antes mencionados, es el de soportar las cargas de gravedad (cargas vivas y cargas muertas), y la de resistir en todos los niveles las fuerzas accidentales, con una adecuada rigidez y estabilidad. Evaluando la solución con mejor relación costo-beneficio para cada caso.

A menudo, los sistemas combinan las características de dos o más sistemas para satisfacer los requerimientos específicos de un proyecto. La multitud de sistemas disponibles presentan una oportunidad para el profesional experimentado de seleccionar un sistema estructural que optimice su función en el sentido general del proyecto.

3. SISTEMAS ESTRUCTURALES

Antes de entrar propiamente al tema de sistemas estructurales, cabe señalar que en el diseño estructural deben considerarse todas las cargas que pueden actuar durante su vida útil. Las cargas podemos clasificarlas en permanentes, variables, accidentales y excepcionales:

- Cargas *permanentes* (o cargas muertas):
 - Actúan continuamente sobre la edificación, y corresponden al peso propio de los elementos estructurales y no estructurales: tabiquería, frisos, pavimentos, pisos, rellenos, instalaciones, cerramientos y demás cargas permanentes durante períodos prolongados de tiempo.

- Cargas *variables* (o cargas vivas):
 - Actúan con una magnitud variable en el tiempo, debidas a su ocupación u uso habitual, tales como las cargas de personas, vehículos, y otras cargas transitorias, cargas de viento, nieve y sismo. Estas cargas se suponen siempre uniformemente distribuidas en las áreas de diseño.

- Cargas *accidentales*:
 - Aquellas que en la vida útil de la edificación tienen una baja probabilidad de ocurrencia sólo durante lapsos breves de tiempo, como las cargas de viento y sismo.

- Cargas *extraordinarias*:
 - Aquellas que generalmente no se consideran entre las que actúan en la vida útil, pero pueden presentarse en casos excepcionales y causar catástrofes, como las acciones debidas a explosiones, incendios y similares.

Los sistemas estructurales se pueden clasificar desde el punto de vista de la *resistencia a cargas verticales*, según el tipo de losa o entrepiso seleccionado.

<i>SISTEMA</i>	<i>ELEMENTOS PRINCIPALES</i>	<i>TIPO DE LOSAS</i>
Con vigas	Losas Macizas Losas Nervadas Vigas Columnas o pantallas Fundaciones	Armadas en 1 dirección Armadas en 2 direcciones
Sin vigas	Losas Reticulares Losas Fungiformes Columnas o pantallas Fundaciones	

La elección del tipo de entrepiso debe realizarse conjuntamente con la selección del sistema resistente a fuerzas horizontales, para lograr un conjunto estructural que funcione coherentemente.

Los principales factores que influyen en la elección del tipo de entrepiso son:

➤ *Expresión arquitectónica:*

La arquitectura siempre es uno de los factores más influyentes en el acabado final de la estructura, por lo que en muchas ocasiones la selección de una determinada solución estructural deberá estar acondicionada al aspecto arquitectónico final.

➤ *Luces y cargas:*

Las luces (o distancias) influyen en el tipo de estructura tanto desde el punto de vista resistente (posibilidad de soportar las cargas sin excesivas deformaciones), como por las implicaciones arquitectónicas. El tipo de losa y espesor a emplear se condiciona principalmente por las luces y cargas a resistir.

➤ *Costo de materiales, mano de obra y factores constructivos:*

En este aspecto influyen diversos factores que varían con el tiempo. Podemos comentar que la selección estructural más adecuada debe evaluar el factor costo-beneficio. Con relación a los factores constructivos es importante considerar aspectos como la tecnología empleada, personal, tiempo de ejecución y costos.

➤ *Aislamiento acústico y térmico:*

Es importante considerar el aspecto de aislamiento térmico con relación a la comodidad y al ahorro de energía. Y considerar el aislamiento acústico es conveniente para reducir la contaminación por ruido.

Las losas de uso más frecuente son losas macizas, nervadas, y reticulares, y de menor uso están las losas pretensadas y postensadas.

El empleo de losas macizas se ha generalizado en muchos países debido a que requieren menor mano de obra que las losas nervadas, que son más eficientes desde el punto de vista de comportamiento estructural. En efecto, las placas macizas eliminan las operaciones de colocación de moldes o bloques y de colocación nervio a nervio del refuerzo metálico, emplean fácilmente la malla de acero electrosoldada. En los países donde la mano de obra es costosa, esto representa un ahorro.

Las losas nervadas presentan ventajas en comparación a las losas macizas con relación a la disminución de peso de la propia losa, y se comporta mejor con luces más grandes. Tanto las losas macizas como las nervadas pueden estar armadas en una dirección, o en dos direcciones, variando la forma de la distribución de la carga vertical a través de la losa.

Las losas reticulares emplean moldes (metal, fibra de vidrio u otro material) para formar la losa, y son omitidos cerca de las columnas convirtiéndose en losa maciza para resistir mejor los esfuerzos flectores y de corte en estas áreas críticas. La carga vertical se reparte en dos direcciones, por lo que se adapta mejor para áreas cuadradas.

Otro sistema de entrepiso que se emplea con bastante frecuencia consiste en láminas de acero galvanizadas perfiladas, que sustituyen el uso de cabillas y eliminan el encofrado de madera, recubiertas de una capa de concreto. El sistema presenta rapidez y facilidad constructiva, además de reducir el costo económico.

Las vigas y losas, pretensadas y postensadas, son de amplio uso en casos donde se desean grandes luces con miembros de pequeñas secciones, aunque cabe señalar que

requiere un mayor cuidado y detalle en su cálculo y ejecución en comparación a los elementos de concreto armado.

La estructura debe ser también capaz de resistir esfuerzos laterales, como viento y sismos. En edificios altos los factores predominantes en la elección del sistema estructural son:

- Altura del edificio
- Características del terreno de fundación
- Requerimientos arquitectónicos
- Relaciones de costos entre mano de obra y materiales

Los sistemas estructurales *resistentes a fuerzas horizontales* y la influencia de la altura en la elección del mismo, se resume en la siguiente tabla. Considerando que los valores indicados son solamente una guía que debe ser aplicada con buen criterio profesional dependiendo de las características de cada edificación en particular.

<i>Sistema</i>	<i>Cantidad de pisos</i>
Pórticos	20
Pantallas	35
Interacción pórticos y pantallas	45
Fachada resistente	50
Tubo dentro de tubo	60
Fachada resistente + Diafragmas de interconexión	80
Otros (Pisos suspendidos, Pilones, ...)	

Pórticos:

Uno de los primeros sistemas estructurales empleado para edificaciones son los pórticos formados por vigas y columnas, construidos tanto en acero como en concreto reforzado, que trabajan conjuntamente para soportar las cargas, existiendo colaboración de las columnas para resistir los momentos. A medida que la relación altura a dimensiones laterales aumenta, la influencia de las fuerzas laterales (sismos y vientos principalmente) se va convirtiendo en el factor más determinante en la concepción y diseño de la estructura, por este motivo el sistema de pórticos resulta poco económico para edificios de altura, si bien su comportamiento sismo-resistente es bueno por la gran ductilidad que se le puede dar al sistema.

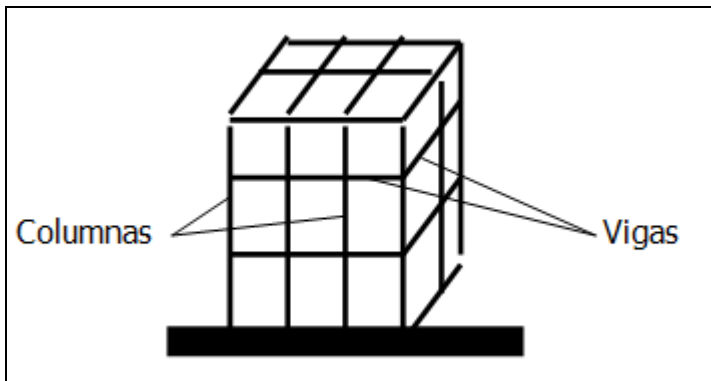


Figura 2: Edificio de pórticos

Los edificios aporticados proporcionan la mayor libertad y flexibilidad para la disposición del espacio interno, pero hay problemas de desplazabilidad cuando se desean luces grandes o un número alto de pisos. El concreto armado por ser un material moldeable se presta mucho para el aporticamiento pues no hay problemas para la obtención de uniones monolíticas requeridas para la efectiva acción del pórtico.

La rigidez de los pórticos es directamente proporcional a las dimensiones de las columnas y vigas, e inversamente proporcional a la altura del edificio y a la distancia entre las columnas. En un pórtico el desplazamiento lateral puede considerarse producido por tres factores: momentos en vigas (60%), momentos en columnas (20%) y fuerzas axiales en columnas por volcamiento (20%), los porcentajes indicados son solamente una referencia de la influencia de cada componente.

La deformabilidad de los pórticos se determina a través de la flexión individual de las vigas, columnas y la rotación de sus juntas. La resistencia y la rigidez de los pórticos son proporcionales a las secciones de las vigas y columnas, e inversamente proporcionales a la separación de las columnas.

El pórtico es un sistema estructural en el cual la resistencia a las cargas laterales es suministrada en principio por la flexión de sus vigas y columnas. Este sistema es empleado para construcción de edificios con alturas bajas y medianas. En general los pórticos no son tan rígidos como los muros, y son considerados más dúctiles y menos susceptibles que los muros a los daños estructurales ocasionados por un sismo, sin embargo tiene mayores daños no estructurales, como por ejemplo en la tabiquería.

En el caso de edificaciones para oficinas, los pórticos ubicados en el interior de las edificaciones no son muy usados, ya que en éstos el aprovechamiento del espacio es primordial, lo cual limita el número de columnas necesarias para que los pórticos puedan existir. En cambio, en las edificaciones para uso de viviendas éste aspecto no es de principal importancia.

La ventaja de los pórticos consiste en la simplicidad y conveniencia de su forma rectangular proporcionando grandes espacios libres.

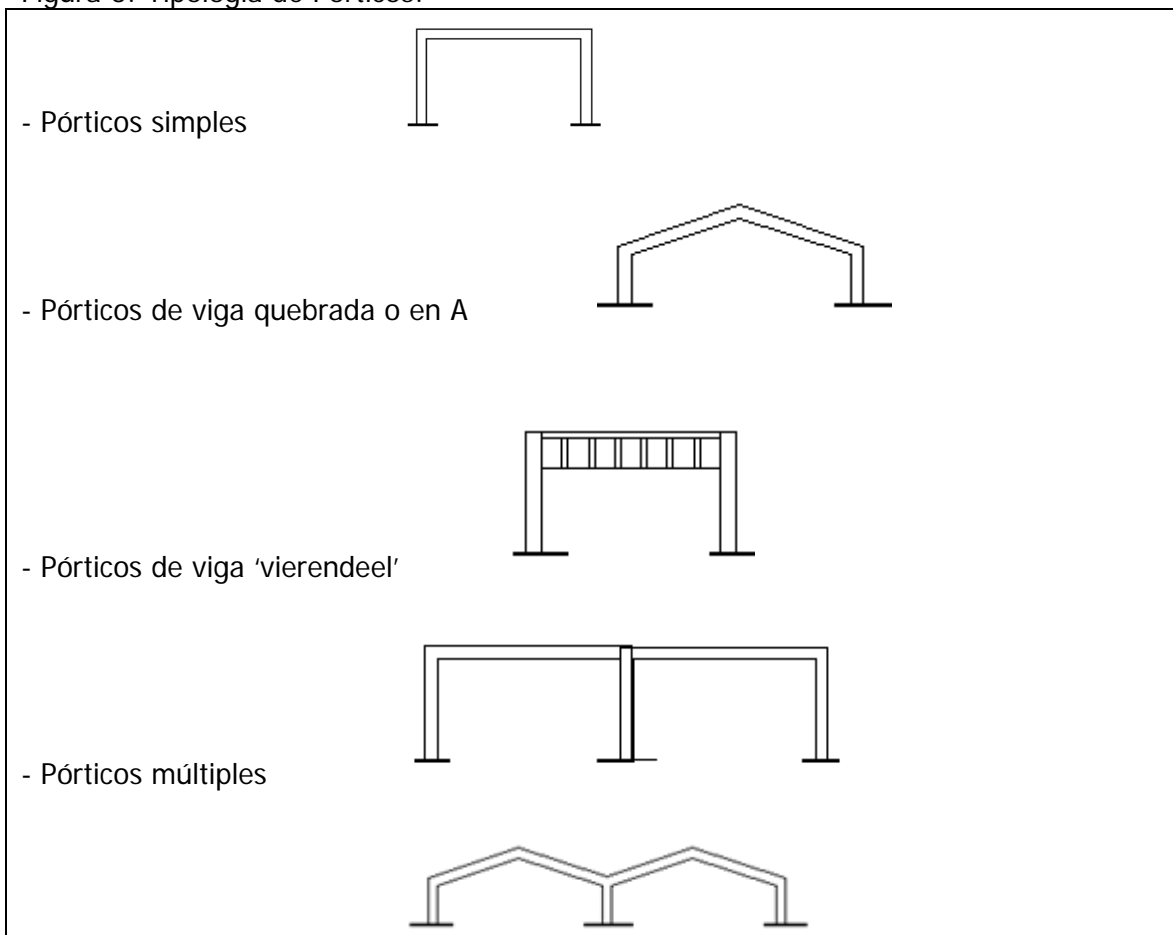
Los sistemas de pórticos resultan muy deformables bajo sismo o viento cuando crece el número de pisos por lo cual es necesario asociarlos con sistemas de muros o pantallas de concreto a fin de obtener mayor rigidez frente a esas acciones. A mayor altura de las edificaciones se produce un retorno a los muros de concreto, pero empleados ahora más para resistir las cargas horizontales que las verticales, debido a que su elevado momento de inercia los hace poco deformables bajo acciones de sismo o viento.

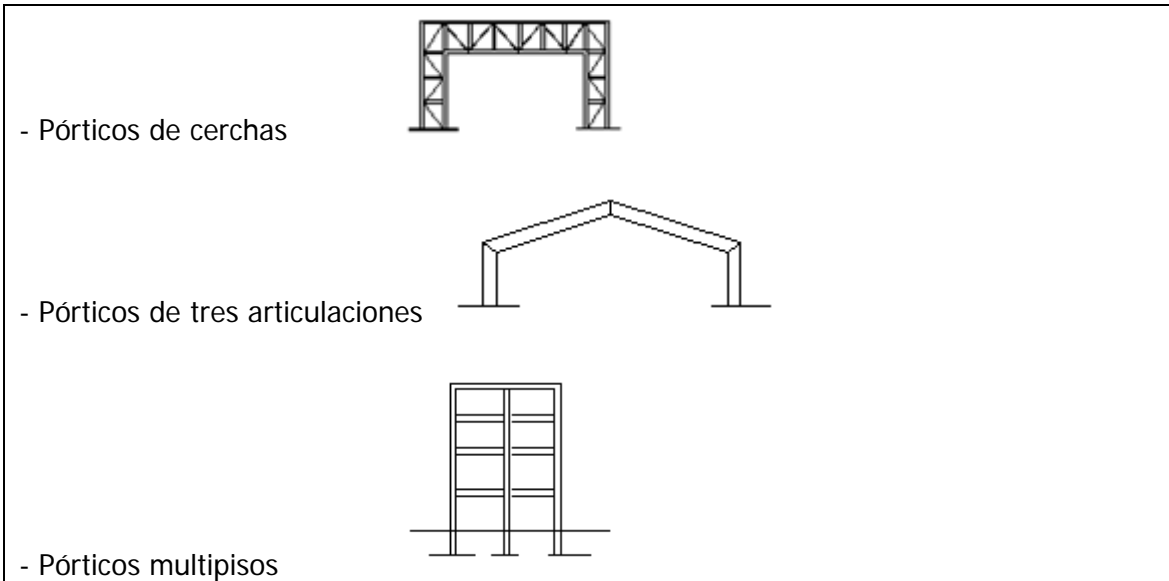
Se estima que los edificios de pórticos de concreto armado resultan adecuados hasta 20 pisos, a partir de ese valor la cantidad del material necesario para controlar la deformabilidad del edificio aumenta rápidamente y hace que el sistema estructural sea poco económico. No se puede fijar un valor tope absoluto, pues además de la altura hay otros factores que influyen en la eficiencia del sistema, como características del

terreno de fundación, distancia entre columnas, sismicidad de la zona, peso de materiales empleados, y otros.

También existen recursos y dispositivos que permiten controlar la desplazabilidad de edificios aporricados sin recurrir a un consumo exagerado de materiales como son los cinturones rigidizantes, que se ubican convenientemente en determinados pisos para lograr una reducción de las deformaciones; en la construcción de concreto armado están constituidos por vigas de gran altura colocadas generalmente en la periferia del edificio a fin de no afectar desfavorablemente la funcionalidad de las plantas. En los edificios metálicos los cinturones rigidizantes suelen estar constituidos por cerchas de gran altura, que pueden estar dispuestas en la fachada o en el interior del edificio según los requerimientos arquitectónicos.

Figura 3: Tipología de Pórticos:





Algunas definiciones:

- Pórtico simple: Es aquel que está conformado por dos columnas y una viga.
- Pórtico de viga quebrada o en "A": La viga que lo conforma presenta un quiebre pero conforma un elemento monolítico con las columnas.
- Pórtico de viga Vierendeel: En este caso se emplea la viga para crear un espacio aprovechable, relacionado con el espacio principal cubierto por el pórtico.
- Pórticos múltiples: Son aquellos que presentan más de un vano, formando un conjunto de pórticos.
- Pórticos de cerchas: En éste pórtico, las columnas y las vigas son cerchas.
- Pórtico de 3 articulaciones: Es un pórtico de viga quebrada que presenta uniones articuladas en donde el momento es cero.
- Pórticos multipisos: Pórticos múltiples dispuestos unos encima de otro para originar una edificación de varios niveles.

Pantallas:

En los edificios bajos el sistema de pórticos es el más sencillo y económico en la construcción tradicional, mientras que en la construcción industrializada puede resultar bastante competitivo el sistema de pantallas, cumpliendo las exigencias estructurales y de cerramiento.

Las pantallas son elementos estructurales de concreto armado de gran rigidez, caracterizados por su poco espesor, elevada altura y elevada inercia (en una dirección).

En los sistemas de pantallas deben evitarse las fuertes torsiones en plantas, y es recomendable una distribución regular de las pantallas estableciendo simetría preferentemente. Las pantallas pueden conformarse en C, en L, en T o en doble T para amoldarse a los requerimientos arquitectónicos, en especial a las zonas de circulación vertical constituyéndose en núcleos que comunican gran resistencia y rigidez a los edificios.

Las pantallas son más rígidas, por lo que ofrecen mayor resistencia a cargas laterales, menor deformabilidad y por lo tanto sufren menos daños los elementos no estructurales de la edificación.

Uno de los usos más frecuentes de las pantallas es en la forma de núcleos rectangulares alrededor de núcleos verticales de circulación como escaleras y ascensores. La ventaja de estas estructuras como núcleos, es que siendo estructuras espaciales son capaces de resistir todo tipo de cargas, fuerzas verticales, fuerzas de corte, y momentos flectores en todas las direcciones. Cuando las pantallas son empleadas para soportar fuerzas horizontales y proveer estabilidad lateral, deben colocarse según la dimensión más corta de la estructura. Las pantallas planas son eficientes en resistir cargas laterales sólo en su plano, por lo cual se recomienda disponer pantallas en dos direcciones ortogonales.

Las pantallas se presentan usualmente en tres formas: pantallas aisladas (aquellas que no están conectadas con ningún otro elemento estructural), pantallas acopladas (pantallas unidas entre sí por elementos estructurales) y colaboración pórticos -

pantallas.

Cuando dos o más pantallas se interconectan por un sistema de vigas o losas, la rigidez total supera la suma de las rigideces de ambas pantallas. Debido a que la viga o la losa reducen la acción individual de 'cantilever' forzando al sistema a actuar como una sección compuesta.

Si se dispone una pantalla de dimensiones en planta relativamente estrecho y bastante largo en la dirección de las cargas aplicadas, se observa que no es más que una viga empotrada en voladizo.

Las pantallas deben emplearse con la mayor extensión posible porque, si están diseñadas adecuadamente, suministran un medio verdaderamente económico para resistir cargas laterales, ya sean sísmicas o de otro tipo, en una amplia variación de tipos de edificios.

Interacción de pórticos y pantallas:

La combinación de pórticos y pantallas aprovecha en forma muy eficaz las ventajas de ambos sistemas. Las pantallas o paredes de concreto armado actúan como vigas verticales en voladizo y se deflectan como tales, la pendiente de la elástica es máxima en la parte superior indicando que en esta región la pantalla tiene menor rigidez y que contribuye menos a limitar las deformaciones y a absorber fuerzas horizontales. Los pórticos se deforman por corte con pendiente máxima en la parte baja de la estructura donde el cortante es máximo, en esta zona ellos contribuyen menos que las pantallas para resistir fuerzas horizontales. En otras palabras, el muro está sosteniendo al pórtico en la parte más baja del edificio, mientras que lo opuesto ocurre en su parte alta.

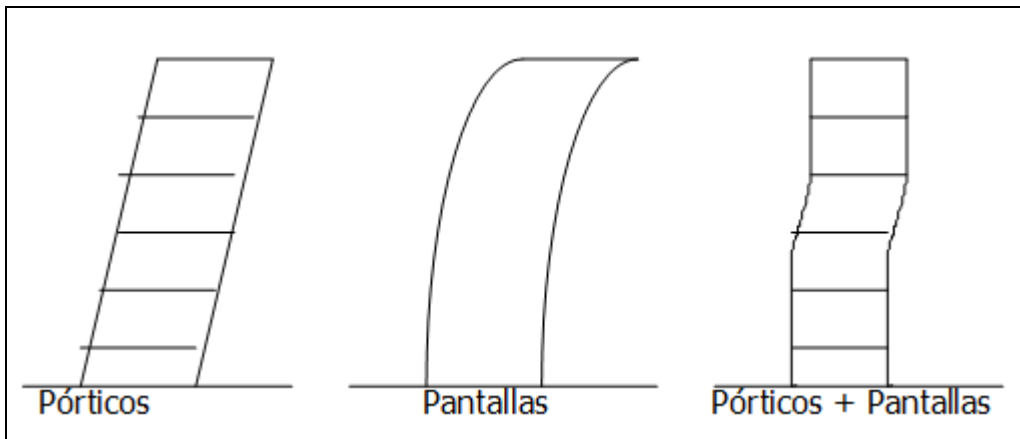


Figura 4: Interacción de pórticos y pantallas

Cuando interactúan pantallas y pórticos se superponen sus deformaciones resultando una curva con forma parecida al signo de integral, debido a estos patrones las pantallas son 'frenadas' por los pórticos en la parte superior, mientras que en los pisos inferiores estos son 'frenados' por las pantallas. De este comportamiento resulta que la mayor parte de la fuerza horizontal debida a viento o sismo es soportada por los pórticos en la región superior del edificio y por las pantallas en la parte inferior.

En edificios largos y angostos a veces es posible resistir las cargas horizontales en el sentido corto solamente por la acción de pórticos, primero porque que el área del edificio expuesto en la dirección corta es pequeña, y segundo porque en edificios largos

usualmente existe un número de columnas suficiente en esa dirección.

También es común en el diseño de los edificios altos asumir que los muros van a resistir todas las fuerzas laterales, y diseñar los pórticos solamente para resistir cargas gravitacionales. A pesar de que ésta consideración incurre en pequeños errores para edificios menores de 20 pisos con pórticos, es posible que en muchos casos en los cuales los pórticos sean rígidos y el edificio de mayor altura, se pierda la oportunidad de diseñar estructuras más racionales y económicas.

Los muros de concreto armado limitan la flexibilidad en la distribución de los espacios internos. El deseo de tener espacios vinculados al exterior mediante grandes ventanas que dejan pasar la luz, el aire y la vista ha ayudado a disminuir progresivamente el uso de los muros portantes.

La construcción de edificios cuya estructura es totalmente a base de pantallas de concreto armado tiene gran importancia en la construcción industrializada (sistemas tipo túnel) y de la pre-fabricación. La ventaja principal de estos sistemas es de tipo constructivo al eliminar muchas operaciones tradicionales que consumen mano de obra y aprovechar eficientemente las características propias de la producción en serie, la repetición de procesos similares y la mecanización de esos mismos procesos.

El equivalente en estructura metálica del sistema de paneles de concreto armado, es el sistema a base de diagonales, el cual es usado ampliamente en edificios altos en países con desarrollo siderúrgico. Los paneles de concreto se reemplazan por cerchas metálicas verticales capaces de resistir cargas horizontales de viento o sismo y cargas de peso con bastante eficiencia, en cierto modo la cercha viene a ser como la pantalla reducida a su esqueleto resistente más elemental.

Los edificios con sistema resistente a base diagonales se caracterizan por ser relativamente económicos aunque tienen menor flexibilidad arquitectónica debido a la presencia de los elementos inclinados, que tienden a bloquear o restringir el paso de los espacios entre columnas, su diseño arquitectónico es más complicado y requiere una cuidadosa planificación del conjunto estructural.

Sistema de fachada resistente:

El sistema de fachada resistente o sistema de tubos consta de un conjunto de columnas exteriores muy próximas entre sí, conectadas mediante vigas en cada nivel de entrepiso. Facilitan mucho la organización interna, debido a la ausencia de columnas internas, aunque condicionan bastante el aspecto externo del edificio. En este sistema se aprovecha la acción espacial de las fachadas para resistir la acción de las fuerzas horizontales, de manera que todos los elementos estructurales de la fachada resistente colaboran cualquiera sea la dirección de las fuerzas horizontales. La eficiencia del sistema se debe al gran número de juntas rígidas actuando a lo largo de la periferia, formando un largo tubo. Los sistemas de fachada resistente son los más usados actualmente para edificios altos, con diversas variantes.

Las columnas tan cercanas son usualmente inaceptables en el nivel de entrada al edificio, por lo tanto, las columnas se unen mediante una viga de transferencia unos cuantos niveles por encima de la base, para que sólo unas cuantas columnas espaciadas más ampliamente, continúen hasta la base del edificio, aunque se reconoce que en zonas sísmicas el cambio brusco de rigidez no es recomendable.

La forma de tubo se desarrolla para edificios con plantas rectangulares, y probablemente su uso más eficiente sea para éste tipo de plantas. Sin embargo su uso es apropiado para otras formas de planta, incluso ha sido utilizado en plantas triangulares y circulares.

El tubo es apropiado en términos económicos, para estructuras de acero y concreto. El patrón repetitivo permite la prefabricación de estructuras en acero y el uso de encofrados rápidamente movibles en estructuras de concreto, para una construcción más rápida, aunque depende de una serie de factores tales como el espaciamiento y dimensiones de las columnas, y de la configuración en planta del edificio.

Si además la base se ensancha siguiendo una curvatura adecuada, la acción de las fuerzas de viento o sismo puede ser parcial o favorablemente balanceada por la acción de las cargas verticales obteniéndose un comportamiento eficiente que conduce a una mayor economía de material. La forma de base ensanchada contribuye de modo

importante a mejorar el comportamiento bajo acción del viento o sismo pues se aumenta el brazo de palanca resistente en la zona donde la acción de fuerzas horizontales tiende a ser más intensa, o sea en la parte inferior del edificio. La combinación de base ensanchada con fachada resistente ha demostrado su efectividad y de allí los buenos resultados económicos obtenidos.

La fachada resistente aporticada emplea columnas exteriores muy próximas con vigas altas, creando un sistema parecido a un tubo perforado.

El tubo dentro de tubo es la combinación de un tubo exterior localizado en la periferia y de un tubo interior que circunda el punto fijo, ligados ambos por las placas que garantizan el comportamiento de conjunto del sistema. Se mejora el comportamiento de la fachada resistente aporticada mediante la incorporación de un núcleo central que colabora ante la acción de las cargas exteriores interactuando en la medida que el diafragma lo permita, lo cual favorece la distribución de esfuerzos y las acciones laterales no representan un costo adicional en el dimensionamiento de los miembros.

Cuando se superan los 80 pisos, el sistema de tubo en tubo puede no ser suficientemente rígido para resistir las fuerzas laterales, y se disponen de diagonales en el tubo periférico, o pantallas en ambas direcciones que crucen el interior del edificio y conecten lados opuestos. Las diagonales que rigidizan la estructura, se diseñan para soportar las fuerzas de corte, eliminando así la flexión en las columnas y vigas del tubo.

Un sistema estructural que simula el comportamiento del tubo en 'cantilever' puede conseguirse eliminando todas las columnas exteriores y reemplazándolas por diagonales en ambas direcciones con una separación tal entre ellas que representen un muro de soporte (sistema de tubos arriostrados). Uniendo las diagonales en donde se cruzan y en las cuatro esquinas del edificio, la estructura actúa efectivamente como un tubo rígido resistiendo las fuerzas horizontales. Sin embargo, debido al gran número de juntas involucradas, y a los ventanales delicados, las desventajas estructurales se aprecian en la respuesta a las cargas gravitacionales primarias, debido a que las cargas verticales producen un aumento en las fuerzas en las direcciones inclinadas de los miembros diagonales, por lo que requieren de grandes secciones transversales en los

miembros en comparación a un sistema de vertical de columnas.

En consecuencia, una solución más práctica para incrementar la eficiencia del tubo aporticado es agregar un número suficiente de diagonales arriostrando las fachadas del tubo. Las columnas exteriores deben estar más espaciadas y las diagonales generalmente inclinadas 45 grados con respecto a la vertical, sirviendo esto para unir las columnas exteriores a las vigas para formar pórticos de fachada arriostrados. El arriostramiento asegura que las columnas exteriores actúen en conjunto para resistir tanto las fuerzas de gravedad como las fuerzas horizontales. Resultando un tubo en 'cantilever' muy rígido cuyo comportamiento bajo cargas laterales es muy parecido al de un tubo rígido.

Las caras exteriores están generalmente provistas de un arriostramiento en ambas diagonales, sin embargo, si la estructura es de planta rectangular, las caras mas cercanas tendrán arriostramiento en una sola de las diagonales dispuestas en 'zig-zag' de manera de permitir que las diagonales unan en las esquinas.

Otros sistemas estructurales empleados en la construcción de edificios altos son los edificios con pisos suspendidos y los edificios de pilones.

Los edificios de pisos suspendidos permiten tener en planta baja grandes espacios abiertos por no existir columnas en las fachadas, la principal ventaja es de tipo constructivo, sin embargo presenta una elevada concentración de cargas en la fundación del núcleo central.

En los edificios de pilones las columnas se sustituyen por grandes pilas, autosuficientes para cargas verticales y horizontales, a distancias relativamente grandes, sobre las cuales se apoya a manera de puente la estructura de los pisos del edificio. Generalmente las circulaciones verticales se disponen en los pilones. Este sistema igual que el anterior presenta ventajas constructivas, y las concentraciones de cargas en las fundaciones de los pilones son menores.

4. ACCION SISMICA

“En una zona donde nunca ha temblado no podemos asegurar que nunca temblará, pero en una zona donde ya tembló podemos asegurar que volverá a temblar”.

¿Qué es un sismo?

Es un movimiento súbito de una parte de la corteza terrestre, causado por la liberación de la energía acumulada en las rocas por fuerzas que tienen su origen en el interior de la Tierra. La liberación de esta energía acumulada se efectúa principalmente por ruptura de las zonas deformadas. Al sobrevenir la ruptura, la energía almacenada se libera en forma de ondas elásticas que se transmiten por el interior o por la superficie de la Tierra, causando vibraciones y oscilaciones del material a través del cual se propaga.

Los sismólogos coinciden en considerar dos mecanismos que dan origen a los movimientos sísmicos: tectónicos y volcánicos. Los sismos de origen tectónico son el resultado de roturas bruscas a lo largo de las fallas, mientras que los de origen volcánico se relacionan con erupciones de magma subterráneo. La mayoría de los sismos son de origen tectónico.

Los movimientos a lo largo de las fallas son explicados por la teoría de la 'Deriva Continental', según la cual antiguamente las masas continentales formaban un solo gran Continente llamado 'Pangea', rodeado de una gran Océano llamado 'Pantalasa' u Océano Pacífico ancestral. Posteriormente este 'super-continente' se disgregó y sus partes (los actuales Continentes) empezaron a desplazarse derivando en diferentes direcciones.

Esta teoría surgió inicialmente de la comparación de los accidentes geográficos de la costa de Brasil en América del Sur y del Golfo de Guinea en Africa, que parecían calzar como piezas de un rompecabezas, luego fue confirmada por el estudio de la evolución de especies animales en América del Sur y Africa y por la orientación magnética de las rocas en ambos Continentes con relación con el desplazamiento de los polos magnéticos de la Tierra ocurrido hace millones de años.

Las zonas de colisión de las placas presentan actividad sísmica importante como ocurre en Perú y Chile donde chocan la placa de Suramérica y la de Nazca; en Venezuela y Colombia donde la placa Caribe choca con la de Suramérica; en Grecia donde la placa Helénica choca con la de Africa, y así en otras regiones del planeta.

La historia sísmica de Venezuela revela que desde 1.530 hasta la actualidad han ocurrido cientos de sismos que han causado algún tipo de daño. Esto nos reitera que el país posee zonas con alto potencial sísmico. En Venezuela las fallas más activas son las de Boconó en la región Andina, la de San Sebastián frente al Litoral Central y la de El Pilar en el Estado Sucre, que vienen a constituir parte de la línea de separación entre la placa Caribe y la de Suramérica. En Estados Unidos la falla más conocida es la falla de San Andrés en el estado de California, que tiene una longitud aproximada de 100 km y una profundidad superior a los 30 km.

Dependiendo de la probabilidad de ocurrencia de movimientos sísmicos en un área determinada se determinará la amenaza o peligro sísmico. El efecto destructivo que un sismo puede provocar en un área determinada depende de factores como: magnitud de la energía liberada, la profundidad del foco, la distancia al epicentro, y las características geológicas del suelo.

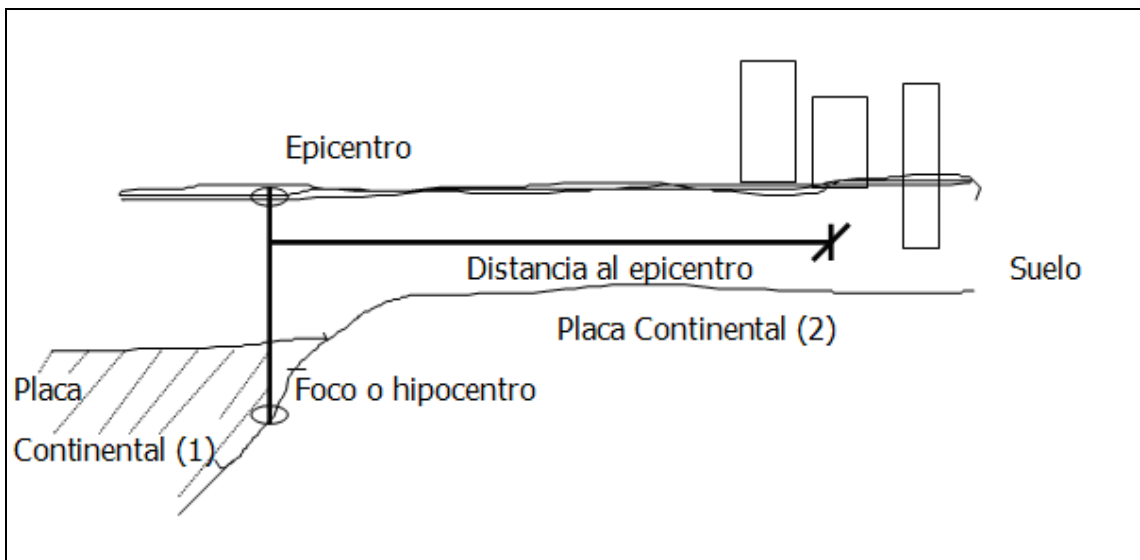


Figura 5: Hipocentro y Epicentro de un sismo tectónico

El *foco o hipocentro* es el punto de la corteza terrestre donde ocurre la ruptura de los estratos, originándose las ondas sísmicas, que se propagan en todas las direcciones, y el *epicentro* es el punto de la superficie en la vertical del foco o hipocentro, donde la acción sísmica es sentida con mayor intensidad.

Se acostumbra a llamar *ondas superficiales* las que se propagan a lo largo de la parte exterior de la corteza terrestre, y *ondas directas* las que van del foco a la superficie. Las ondas que llegan en primer término a los sismógrafos se llaman *ondas P* ó primarias, siendo ondas directas compresivas que hacen desplazar las partículas de tierra en la misma dirección en que avanza la onda, y las que llegan al sismógrafo después de las ondas P son las *ondas S* ó secundarias ó de corte, que producen desplazamientos de las partículas transversalmente a la dirección de propagación de la onda.

Entre las ondas superficiales podemos mencionar las *ondas de Rayleigh*, donde las partículas se mueven hacia arriba y hacia abajo a lo largo de su trayectoria, y las *ondas de Love*, que producen oscilaciones en un plano horizontal con desplazamientos laterales de las partículas. Ambos tipos suelen causar daños importantes en sismos de alta intensidad.

Los sismos se *clasifican* según su magnitud e intensidad. La *intensidad de un sismo* es una medida subjetiva de los daños ocasionados por un sismo, sin dar información de la cantidad de energía liberada en el temblor. Esta escala fue la primera usada para cuantificar sismos, debido a que es una medida de los efectos observables producidos por el evento en la población, las construcciones y la naturaleza. En América se emplea la llamada *Escala Modificada de Mercalli* y consta de 12 grados. Los niveles bajos de la escala están asociados por la forma en que las personas sienten el temblor, mientras que los grados más altos se relacionan con el daño estructural observado.

La magnitud de un sismo es la medida de la energía liberada por un sismo, y no depende de la densidad de la población, ni del tipo de construcción.

La escala más utilizada es la escala sismológica de Richter, también conocida como escala de magnitud local (ML), que es una escala logarítmica arbitraria que asigna un

número para cuantificar el efecto de un terremoto, denominada así en honor del sismólogo Charles Richter.

En la *escala de Richter* los terremotos de magnitud 0, 1 y 2 son en general de poca importancia; los de magnitud 3 y 4 son percibidos pero no causan daños graves; los de magnitud 5 y 6 originan daños moderados; y los de magnitud 7 o más son bastante fuertes y ruinosos en el área epicentral.

En la próxima tabla se presenta la escala de intensidad sísmica de Mercalli Modificada y la escala de magnitud correlativa de Richter.

Hoy en día la mayoría de los sismólogos consideran obsoletas las escalas de magnitudes tradicionales, siendo reemplazadas por una medida físicamente más significativa llamada momento sísmico, el cual es más adecuado para relacionar los parámetros físicos, como la dimensión de la ruptura sísmica y la energía liberada por el terremoto. En años recientes sismólogos propusieron la escala sismológica de magnitud de momento (MW), que provee una forma de expresar momentos sísmicos que puede ser relacionada aproximadamente a las medidas tradicionales de magnitudes sísmicas.

Los sismos no se pueden predecir como se hace con ciertos fenómenos atmosféricos, como por ejemplo, al determinar aproximadamente cada cuánto tiempo se produce la crecida importante de un río.

El *riesgo sísmico* se puede definir como la probabilidad que en un lugar determinado y durante un cierto tiempo de exposición, las consecuencias económicas o sociales de los sismos, expresadas en unidades monetarias o en víctimas, excedan valores prefijados.

Las normas sismo-resistentes establecen criterios de análisis y diseño para edificaciones situadas en zonas donde pueden ocurrir sismos, con la finalidad de reducir el número de pérdidas humanas como consecuencia de sismos. Así mismo se espera que las edificaciones diseñadas bajo dichos lineamientos no sufran daños bajo sismos severos, resistan sismos de moderados, y resistan sismos intensos sin colapsar (aunque con daños estructurales importantes).

Tabla de escala de intensidad sísmica de Mercalli Modificada y escala de magnitud correlativa de Richter.

Intensidad	Magnitud	Descripción
I	0, 1 y 2	Muy débil. Registrado por sismógrafos. Insensible para las personas, o sentido por muy pocas personas en condiciones favorables.
II	0, 1 y 2	Débil. Perceptible sólo por algunas personas en reposo, particularmente aquellas que se encuentran ubicadas en los pisos superiores de los edificios. Los objetos colgantes suelen oscilar.
III	3	Leve. Perceptible por algunas personas dentro de edificios, especialmente en pisos altos. Muchos no lo reconocen como terremoto. Los automóviles detenidos se mueven ligeramente. Vibraciones parecidas al paso de camiones pequeños.
IV	4	Moderado. Perceptible por la mayoría de personas dentro de edificios, por pocas personas en el exterior durante el día. Durante la noche algunas personas pueden despertarse. Rotura en cerámicas, puertas y ventanas. Los automóviles detenidos se mueven con más energía. Vibraciones parecidas al paso de camiones grandes.
V	4	Poco fuerte. Casi todos lo sienten. Caen objetos inestables. Movimiento de muebles. Caminar es dificultoso.
VI	5	Fuerte. Lo perciben todas las personas. Daños leves a ventanas, revestimientos y elementos similares. Movimiento de objetos pesados. Daños leves a estructuras
VII	5	Muy fuerte. Todos corren, pararse es difícil dificultoso. Daños insignificantes en estructuras de buen diseño y construcción. Daños leves a moderados en estructuras ordinarias bien construidas. Daños considerables estructuras pobremente construidas. Daños en tabiquería. Se siente por personas en vehículos.
VIII	6	Destruyivo. Daños leves en estructuras especializadas. Daños considerables en estructuras ordinarias bien construidas, posibles colapsos. Daño severo en estructuras pobremente construidas. Tabiquería seriamente dañada. Muebles sacados de lugar.
IX	7	Destruyivo. Pánico general. Daños considerables en edificios bien diseñados. Colapsos en estructuras pobremente construidas. Grietas en la tierra.
X	7	Desastroso. Daño generalizado en las estructuras. Vías férreas dobladas. Graves daños a puentes y presas. Derrumbes.
XI	8	Muy Desastroso. Caen edificios y puentes. Tuberías subterráneas totalmente rotas. Grandes grietas. Cambio de la topografía.
XII	8	Catastrófico. Destrucción general. Ondulaciones en la superficie del terreno. Grandes derrumbes. Cambios topográficos notables.

Los terremotos se producen como consecuencia de la presión que ejercen entre sí las plataformas en que se divide la corteza terrestre, liberando la energía acumulada. Existen teorías que aseguran que el riesgo de movimientos sísmicos depende de la energía acumulada en las fallas que no ha sido liberada.

Para obtener un mejor conocimiento del comportamiento estructural de las edificaciones sismo-resistentes, mejores normas y diseños más eficientes, es necesario obtener un mayor número de datos en relación a su comportamiento frente a sismos. Lo anterior solamente es posible si se poseen instrumentos de medición en el edificio para el registro de su respuesta, es decir, si se le realiza una instrumentación adecuada a la edificación.

Dichos instrumentos son los acelerógrafos, que son equipos específicamente diseñados para registrar la historia de las aceleraciones debidas a movimientos fuertes del terreno. En distintos países se recomienda la instalación y monitoreo de acelerógrafos en edificaciones donde se consideren pertinentes.

Un aspecto fundamental en cualquier país es la inspección, de ahí la importancia del ingeniero inspector, que junto al ingeniero proyectista y constructor, tienen toda la responsabilidad de la edificación. Cabe destacar, que el diseño, la inspección y la construcción son de gran importancia para garantizar un comportamiento adecuado de las estructuras.

5. FUNDAMENTOS PARA EL ENTENDIMIENTO DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE PORTICOS.

5.1. ASPECTOS GENERALES

Los pórticos se comportan como un sistema en el que trabajan conjuntamente vigas y columnas, por lo que se deben comprender las acciones que inciden en cada elemento por separado para saber como actúan en conjunto y las leyes que rigen estos comportamientos.

Las Leyes de Newton sobre el movimiento son fundamentales para regir el balance que debe existir entre todas las fuerzas aplicadas a las estructuras. La primera ley de movimiento, aplicada a las estructuras, establece que un cuerpo en reposo no se mueve a menos de que una fuerza no equilibrada le sea aplicada. La tercera ley, a su vez, establece que cuando un cuerpo está en reposo, a cada fuerza que se le aplique le corresponde una acción igual pero opuesta.

Toda estructura debe mantenerse en equilibrio para que se comporte eficazmente, y basados en las leyes anteriores existen dos tipos de equilibrios: el de traslación y el de rotación.

a) Equilibrio de traslación:

Es aquel que permite que un elemento permanezca en reposo cuando le es aplicada una fuerza en cierta dirección. Existen dos estados de este equilibrio según la dirección de la fuerza, uno horizontal y uno vertical. En las estructuras el equilibrio vertical viene dado por la acción del peso y la reacción del suelo, y el horizontal por el viento (por ejemplo) y la reacción del suelo.

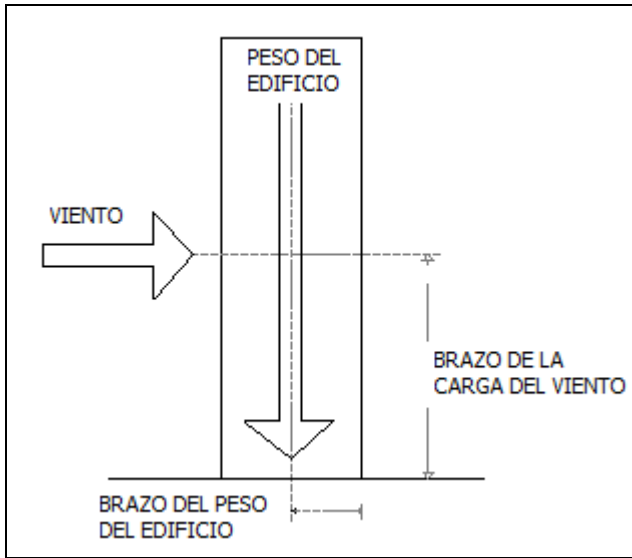


Figura 6: Equilibrio de un edificio alto bajo la acción de viento

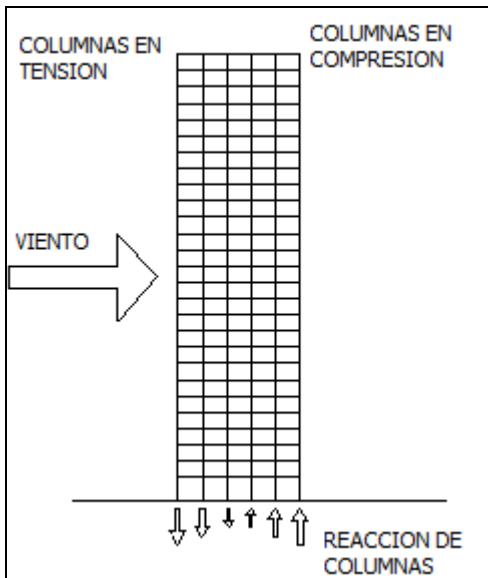


Figura 7: Reacción al viento en columnas ancladas

b) Equilibrio de Rotación:

El equilibrio de rotación es aquel que permite que la pieza permanezca en reposo cuando tiende a girar sobre un eje por la aplicación de dos fuerzas opuestas en diferentes puntos. Este equilibrio se puede observar en un edificio alto bajo la acción del viento.

Si en un elemento se aplican dos fuerzas iguales en sus extremos que tienen la misma distancia al centro de apoyo, este permanece en equilibrio. Si en cambio se aplica una fuerza que es el doble que la otra, se debe colocar esta a la mitad de la distancia al punto de apoyo para que se mantenga la condición de equilibrio.

A mayor fuerza, menor distancia para que esté en equilibrio, es decir:

$$\Sigma \text{ Momentos} = \Sigma (\text{Fuerza} \bullet \text{brazo}) = 0$$

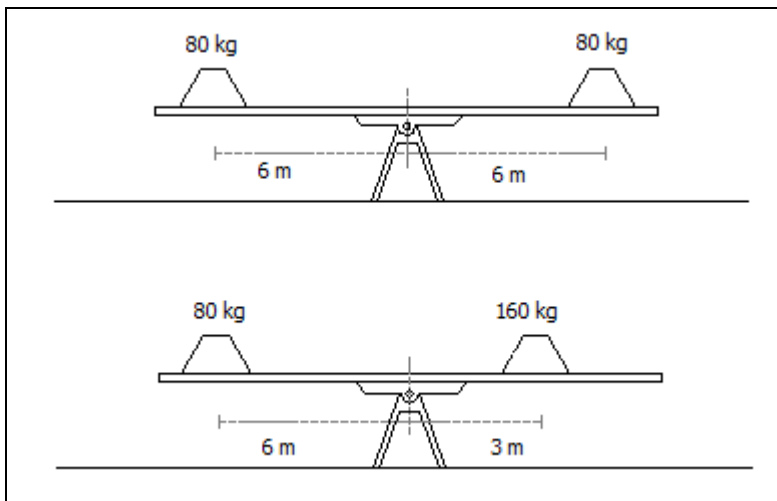


Figura 8: Equilibrio Rotacional

5.2. FLEXIÓN

Las deformaciones debidas a cargas perpendiculares al eje de un elemento son las que causan mayores daños y son llamadas flexiones o acción de viga. En una estructura aporticada, las vigas son las más propensas a flectar pues usualmente son cargadas en ángulo recto con respecto a su eje longitudinal. El grado de la deformación también varía si la viga está simplemente apoyada o está empotrada.

La flexión se caracteriza por la curvatura de la viga. Si la viga está apoyada en dos puntos, sus extremos se curvean hacia arriba y su parte superior trabaja a compresión y la inferior a tracción; pero si está en voladizo (apoyada en un solo punto), su extremo se curva hacia abajo y su cara superior trabaja a tracción y la inferior a compresión.

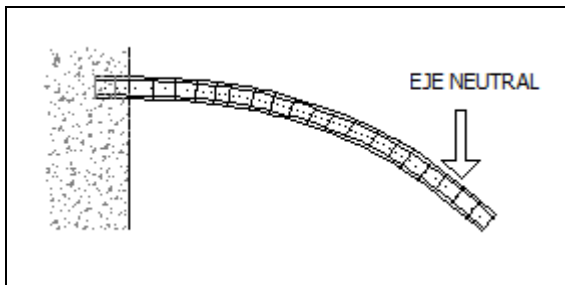


Figura 9: Secciones y eje neutral en una viga en voladizo

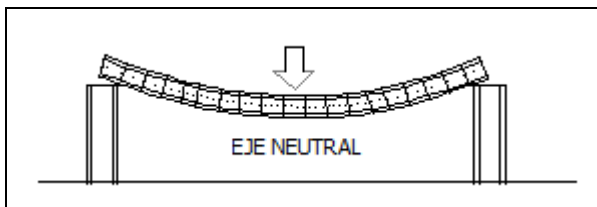


Figura 10: Secciones y eje neutral en una viga simplemente apoyada

Se recomienda como límite de deformación para vigas, el valor de $L/360$, siendo 'L' la longitud, variando según la elasticidad y rigidez del elemento. La rigidez se mide a través del momento de inercia, las vigas más altas son más rígidas que las más bajas, y la rigidez disminuye cuando aumenta la longitud. Así al aumentar al doble la longitud de la viga, su rigidez disminuye a $1/16$. Las vigas empotradas, por su parte, son

particularmente rígidas y fuertes ante las deformaciones: soportan 1,5 veces más carga que una viga apoyada de la misma longitud y flectan 5 veces menos.

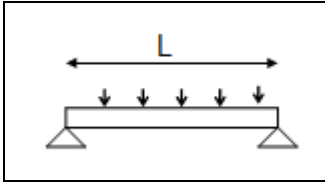


Figura 11: Viga apoyada

$$f = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I}$$

$$M = q \cdot L^2 / 8$$

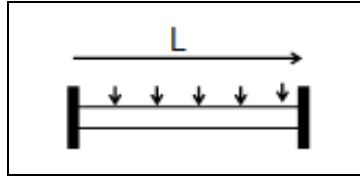


Figura 12: Viga empotrada

$$f = \frac{q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I}$$

$$M = q \cdot L^2 / 12$$

En vigas flexionadas, se observan puntos en los que no hay curvatura, que se denominan puntos de inflexión. Estos puntos se pueden observar en las vigas empotradas justo donde la curvatura de los extremos.

5.3. CORTE

Cuando un voladizo se carga en su extremo, tiende a rotar, pero el equilibrio rotacional se garantiza por la acción de las fuerzas tensoras en sus fibras superiores y las fuerzas compresoras en las inferiores que tiende a hacer que la viga rote en dirección contraria y anulan el volcamiento. El equilibrio de traslación también debe ser satisfecho por lo que la fuerza del extremo que actúa hacia abajo debe ser anulada con una reacción hacia arriba que solo puede ser localizada en el soporte; esa fuerza hacia arriba que realiza el soporte se llama 'fuerza de corte', que junto con la carga producen en la viga una acción de corte parecido al efecto de una tijera. La fuerza de corte tiende a desplazar las partículas de la viga en forma vertical, hacia arriba y hacia abajo.

En un fragmento de viga (ver figura) se observa que actúa una fuerza hacia abajo (carga) y otra hacia arriba que la contrarresta (fuerza de corte) que la mantiene en equilibrio vertical. Estas fuerzas tienden a rotarla por lo opuesto de sus cargas y la separación existente entre sus puntos de acción.

Para garantizar el equilibrio rotacional las partículas se desplazan horizontalmente. La equivalencia entre el corte y la combinación de compresión y tracción, se visualiza porque las fuerzas que se dirigen hacia arriba y a la izquierda se combinan en una fuerza resultante de tracción con dirección hacia arriba y a la izquierda, mientras que las fuerzas de corte hacia abajo y a la derecha se combinan para formar una fuerza de tracción equivalente dirigida hacia la derecha y hacia abajo. Sin embargo, las fuerzas hacia arriba y a la derecha también se combinan para formar una fuerza de compresión que actúa hacia abajo y a la izquierda; así mismo, las fuerzas dirigidas hacia abajo y a la izquierda se combinan para formar una compresión equivalente hacia arriba y a la derecha.

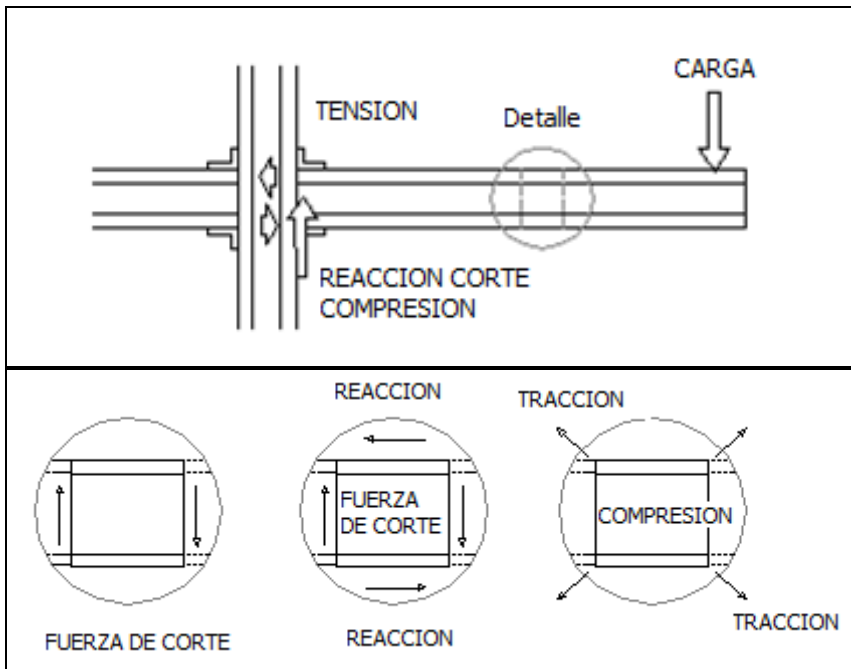


Figura 13: Equivalencia entre el corte y tracción - compresión

Además se ha observado que el corte es estructuralmente equivalente a la tracción y a la compresión actuando perpendiculares entre sí y a 45° de la fuerza de corte. Una prueba física de esto está dada por las vigas de concreto armado que no han sido reforzadas contra el corte, en estos casos aparecen fracturas diagonales a 45° , cerca de su soporte, mostrando que la resistencia del concreto a la tensión ha sido sobrepasada por el componente de tensión del corte.

Estas fracturas se previenen doblando el acero inferior de la viga a 45° cerca de los soportes para absorber la tensión de corte, o bien rigidizando las capas horizontales de la viga con amarres verticales (estribos) para prevenir el deslizamiento de las partículas.

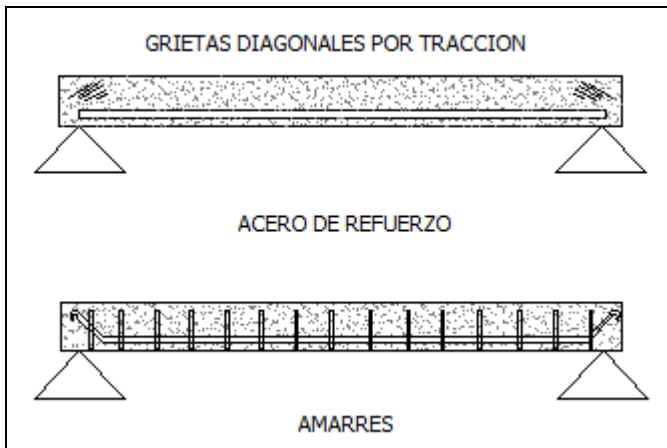


Figura 14: Fracturas por tracción en un pórtico

5.4. PANDEO

Pandeo es la flexión que se produce en un elemento vertical frente a una compresión y su magnitud se relaciona a la esbeltez del elemento. El punto en el que la fuerza hace que pandee la pieza se llama valor crítico, en ese punto se considera que la columna es inestable.

La capacidad de un elemento al pandeo o el valor de su carga crítica, dependen de la esbeltez, el material que lo compone y la forma en la que el mismo se soporta. La carga de pandeo crítico aumenta en proporción al momento de inercia de la columna.

Mientras más larga es la columna, más esbelta se torna y su carga de pandeo se reduce en proporción al cuadrado de su longitud; si duplicamos la longitud de una columna, su carga de pandeo se reduce a la cuarta parte. Una columna empotrada en su base y libre para moverse en su extremo (en voladizo), tiene una carga de pandeo menor que una columna de la misma longitud rígidamente conectada a un elemento por cada extremo.

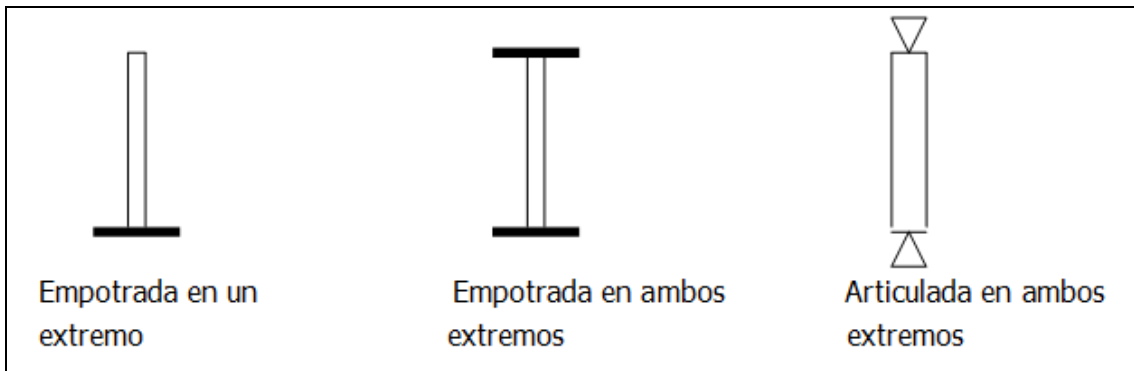


Figura 15: Modelos de columnas en extremos.

$$P_{cr} = \frac{p^2 \cdot E \cdot I}{4 \cdot L^2}$$

$$P_{cr} = \frac{4 \cdot p^2 \cdot E \cdot I}{L^2}$$

$$P_{cr} = \frac{p^2 \cdot E \cdot I}{L^2}$$

Finalmente, mientras más rígido sea el material que constituye la columna, más resistencia al pandeo tiene la misma; por ejemplo: una columna de acero es tres veces más fuerte ante el pandeo que una de aluminio de iguales medidas ($E =$ Módulo de Elasticidad, E acero = $2,1 \cdot 10^6$ K/cm², E aluminio = $0,7 \cdot 10^6$ K/cm²).

El pandeo es consecuencia de la ley natural de proceder por la vía de menor resistencia. Si una fuerza creciente es aplicada en el tope de una columna la carga baja primero mediante compresión y acortamiento del elemento. Tan pronto como el trabajo que se requiere para llevar la carga a tierra es menor doblando el elemento que comprimiéndolo, la fuerza sigue el patrón más fácil y pandea la columna.

5.5. TORSIÓN.

Cuando se aplican dos fuerzas rotatorias en sentido contrario, se produce una deformación en el elemento que se caracteriza por originar fuerzas de compresión, tracción y corte; este fenómeno se llama Torsión. Por ejemplo, cuando un voladizo se carga en un punto desplazado de su eje longitudinal ocurre una torsión a lo largo de este eje.

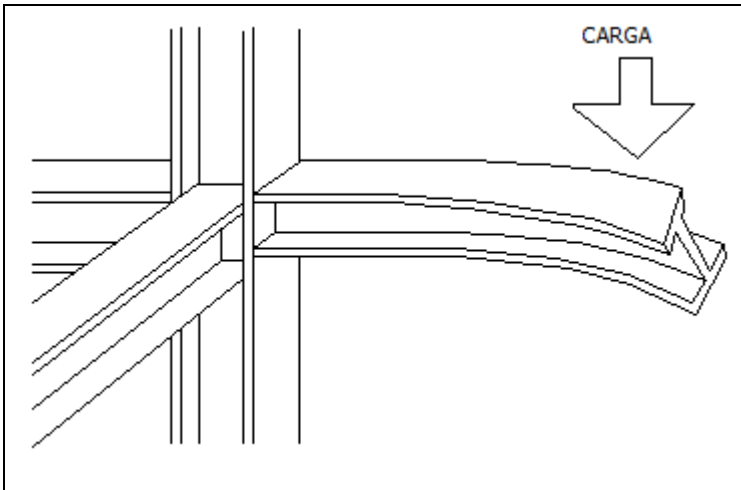


Figura 16: Torsión lateral de una viga en voladizo

5.6 DETALLES DE NODOS EN PORTICOS

Para lograr el trabajo de conjunto de la viga y la columna, es importante diseñar convenientemente el nodo, cumpliendo las normas y recomendaciones vigentes.

A continuación se mencionan los nodos más empleados y el material empleado:

- a) Nodos típicos de concreto en zonas sísmicas.
 - b) Nodos típico de acero.
 - c) Nodo típico de madera.
-
- a) Nodos típicos de concreto en zonas sísmicas.
 - Las ligaduras de las columnas se continúan en el nodo.
 - Las ligaduras de las columnas y los estribos del nodo se acercan más en la zona de confinamiento próxima al nodo.

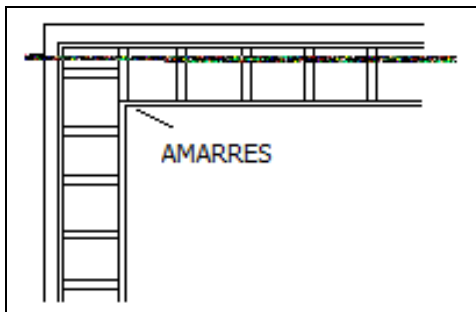


Figura 17: Nodo de concreto

b) Nodos típico de acero.

- Unión de viga y columna con usarse pernos, remaches ó soldadura. La unión soldada es muy empleada, con planchas adicionales de refuerzo y soldadura entre la viga y la columna.

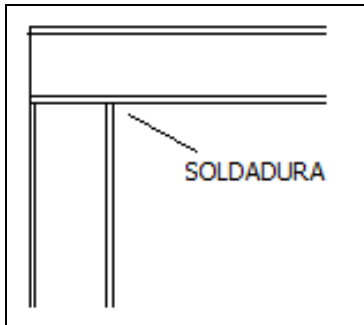


Figura 18: Nodo de acero

c) Nodo típico de madera.

- Uso de planchas metálicas y las formas de acero para hacer una buena unión.
- Uso de 'pies de amigo' para reforzar el nodo, reduciendo de luz de la viga.

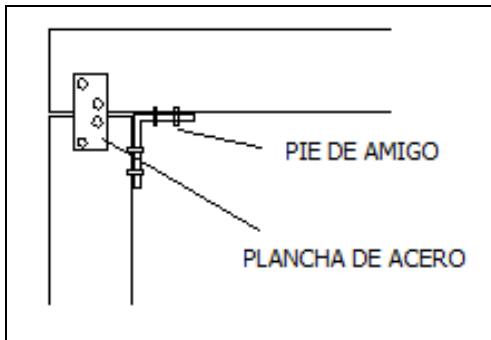


Figura 19: Nodo de madera

6. RECOMENDACIONES ESTRUCTURALES

En edificaciones ubicadas en zonas sísmicas hay que considerar los aspectos de distribución arquitectónica conjuntamente con el planteamiento del sistema resistente a fuerzas horizontales y verticales, con la finalidad de armonizar las exigencias del uso del edificio con la necesidad de resistir las elevadas solicitaciones por acción sísmica.

Los *edificios altos* se caracterizan por estar solicitados a cargas laterales importantes, cuyo efecto aumenta a medida que aumenta la altura del edificio, por lo que su diseño para estas cargas se debe hacer con especial cuidado. Hay dos tipos de cargas laterales importantes, éstas son las fuerzas de viento y las fuerzas sísmicas. En Venezuela gran parte del territorio está ubicado en zonas sísmicas activas, por lo que estas cargas son consideradas principalmente para el diseño estructural.

Se pudiera afirmar que en el mundo han surgido dos generaciones de rascacielos: la primera caracterizada por su habilidad resistente basada principalmente en la cantidad de material, constituida por edificios aporricados de luces medianas y en algunos casos parcialmente rigidizados por paredes de mampostería; y la segunda que basa su resistencia no en la cantidad de material sino en la apropiada forma estructural.

En el diseño sismo-resistente es necesario prevenir el colapso de la estructura durante sismos severos y limitar los daños no estructurales al mínimo durante temblores. El edificio debe estar diseñado para tener una ductilidad que le permita una mayor deformación durante una actividad sísmica severa.

Al diseñar cualquier estructura hay tres factores importantes que deben ser considerados: resistencia, rigidez y estabilidad. Para estructuras bajas la resistencia es el factor dominante en su diseño. Mientras que a medida que la altura aumenta, la rigidez y la estabilidad se hacen más importantes y a menudo son los factores dominantes en el diseño. Básicamente hay dos maneras de satisfacer estos requerimientos. La primera es aumentar la sección de los miembros por encima de los requerimientos de resistencia. Aunque esto tiene sus propios límites, más allá de los cuales comienza a ser impráctico y antieconómico aumentar la sección de los miembros. La segunda forma y la más elegante es la de cambiar la forma de la

estructura a una más rígida y estable para disminuir la deformación y aumentar la estabilidad. Para tal fin, hoy en día se dispone con una variedad de sistemas estructurales que se adaptan a los requerimientos del caso y su utilidad depende también de la altura de la estructura.

A pesar del número de soluciones estructurales posibles, es importante tomar en cuenta algunas consideraciones en la selección del sistema estructural para edificios altos como:

- El costo del encofrado tiene un efecto significativo en el costo total de la construcción. Por lo tanto, el sistema estructural seleccionado debe reducir estos costos usando un encofrado repetitivo.
- Si las condiciones del suelo son malas, el costo de las fundaciones debe ser minimizado reduciendo el peso de la estructura. Agregados livianos pueden ser utilizados si son disponibles.
- Las luces cortas son más económicas que las luces largas. Sin embargo, en edificios de oficinas el diseño a menudo impone luces libres grandes. El uso de vigas acarteladas y otras técnicas como el postensionado permite obtener las luces deseadas sin tener que considerar aumentos indebidos en la altura del edificio.
- La experiencia de los constructores locales y métodos de construcción disponibles son factores a considerar en la elección del sistema. El diseño más eficiente minimizará el costo estructural cuando todos los otros factores permanezcan constantes. El objetivo general en la mayoría de los sistemas es reducir las cantidades de material necesarias, lo cual en la mayoría de los casos conlleva a una solución muy cercana a la óptima.

A partir de la experiencia obtenida del comportamiento de diversas estructuras en caso de terremotos, de estudios experimentales, y de investigaciones teóricas, se han obtenido diversas consideraciones importantes en la estructuración de edificaciones en zonas sísmicas, a continuación se comentan las principales:

6.1.- Interacción Suelo-Estructura:

La acción sísmica sobre los edificios está altamente condicionada por el tipo de suelo, diversas compañías han comprobado que en caso de sismos fuertes han tenido que gastar menos en reparaciones en las zonas de terreno firme que en las de terreno blando, ya que en estos la acción sísmica puede amplificarse y complicarse, mientras que en los suelos duros el sismo se transmite de manera más directa a la estructura sin alteraciones ni complicaciones. En el terremoto de Caracas de 1967 hubo daños más severos en los edificios ubicados en Los Palos Grandes donde existen depósitos aluvionales blandos de gran profundidad.

En arenas sueltas la acción sísmica puede producir licuefacción, como ocurrió en el terremoto de Kobe en Japón en 1996, colapsando algunos edificios debido a este fenómeno.

En el terremoto de la ciudad de Méjico de 1957 se produjeron cuantiosos daños en los edificios altos, mientras que construcciones bajas aunque débiles no sufrieron. Esto se ha atribuido a que los suelos blandos amortiguan las vibraciones de período corto y amplifican las de período largo por lo que el sismo no afectó las construcciones bajas de período corto pero sí a los edificios multipisos de período largo.

La interacción suelo-estructura depende directamente del tipo de suelo donde se va a ubicar la edificación, no hay que olvidar que la edificación actúa como un todo y se relaciona directamente con su entorno geológico. Al presentarse movimientos en la corteza terrestre la frecuencia de vibración del suelo puede coincidir con la de la estructura, produciéndose el fenómeno de resonancia que conlleva a efectos indeseables en la estructura.

Por tal razón, en suelos duros se recomienda la utilización de estructuras más flexibles (período largo) para evitar el fenómeno de resonancia. Lo contrario en suelos blandos, es decir, se recomiendan estructuras más rígidas (período corto) para evadir el mismo fenómeno. Las estructuras rígidas en suelos duros, al igual que las estructuras flexibles en suelos blandos, son más susceptibles a sufrir mayores daños en sismos.

6.2.- Función del edificio:

La función del edificio tiene una importante influencia en la selección del sistema estructural, por lo que podemos clasificar las edificaciones en:

- Edificios residenciales y hoteles:

- Se caracterizan por presentar divisiones predefinidas, que son construidas con la estructura, las cuales permanecen inmóviles durante la vida del edificio.
- Las particiones permanentes permiten que la disposición de las columnas correspondan con la arquitectura, y la selección del sistema de entrepisos dependerá principalmente de las distancias entre columnas. Las dimensiones de las columnas en edificios residenciales generalmente no es una consideración de diseño crítico, con excepción en las plantas bajas, donde pueden ser disimuladas con la arquitectura.
- Usualmente la resistencia lateral en edificios hasta 20 pisos está provista por los pórticos, y para más de 20 pisos se prevé un sistema que interactúe con pantallas

- Edificios de oficinas y comercios:

- Se caracterizan por la ausencia de particiones durante el diseño y construcción, debido a que se prefieren espacios para oficinas que puedan adaptarse a las necesidades del propietario. La distribución se modifica generalmente cuando cambia el propietario, por lo que es deseable que la ubicación de servicios sea flexible (electricidad, teléfono, aire acondicionado,...) .
- Cuando se alcanzan aproximadamente los 20 pisos, la rigidez de los edificios aporricados es insuficiente, por lo que con el incremento de la altura en edificaciones diversos sistemas estructurales han sido diseñados para resistir las fuerzas laterales, tales como pantallas, pantallas interactuando con pórticos, fachada resistente, tubo en tubo y otros.

- Edificios residenciales y de oficinas (mixtos).

- Usualmente la arquitectura para edificios de ocupación mixta, residencial y oficinas, dispone las oficinas y comercios en los pisos inferiores, dejando los pisos superiores para uso residencial. Debido a que los espacios para comercios

requieren luces más grandes que los apartamentos, el proyectista debe seleccionar la luz para una de las dos funciones o estudiar las dificultades y costos de una zona de transición.

- Edificios industriales y estacionamientos.

- Los edificios industriales se caracterizan por entresijos que soporten altas cargas, donde las columnas con capiteles son de uso común, también se emplean losas macizas en dos direcciones apoyadas en vigas. Debido a las altas cargas, las luces deben ser cortas para que sean económicas. Otra alternativa recomendable es considerar el pretensado, y postensado. El sistema resistente a cargas laterales es generalmente pórticos, debido a que el número de pisos generalmente es bajo.

6.3.- Claridad Estructural:

La estructura de una edificación debe ser claramente reducible a un modelo matemático que pueda ser analizado en forma racional, y no arroje dudas en relación a las hipótesis consideradas. En una estructura donde no existe 'claridad estructural' se presentan dudas en cuanto a su comportamiento, por lo que análisis más complicados son necesarios.

La transmisión de esfuerzos horizontales y verticales a las fundaciones sólo puede ser solucionado satisfactoriamente si el diseño considera, desde el comienzo, una visión clara del conjunto de la edificación y busca que en el flujo de de fuerzas la estructura se comporte satisfactoriamente de acuerdo a la rigidez y resistencia, manteniendo a su vez homogeneidad con el conjunto de elementos no estructurales.

Algunas de las causas de problemas estructurales presentados en edificaciones, posterior a un sismo, es la falta de disposición de líneas resistentes claramente definidas en las direcciones de la planta.

6.4.- Uniformidad de estructuración:

Una condición deseable en el diseño resistente a cargas horizontales es su uniformidad, por su influencia en la repartición regular de los esfuerzos. Su importancia aumenta con el incremento de la altura.

La distribución de los elementos estructurales en líneas resistentes nítidas, y la continuidad entre ellos, basada en una clara interacción de los mismos y una unión detallada, evita dificultades para comprobar su comportamiento bajo un estado de carga, mediante el análisis estructural.

En aquellos casos donde se combinen sistemas estructurales es conveniente analizar los posibles efectos desfavorables, como variación en la resistencia y la rigidez.

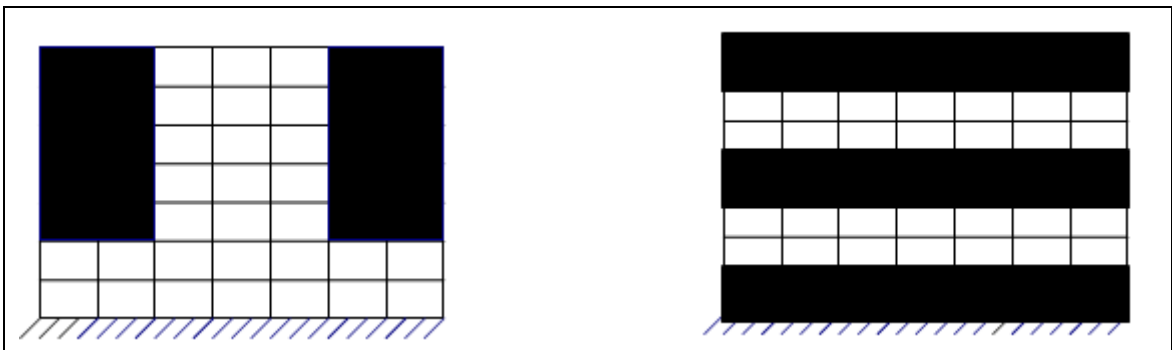


Figura 20: Desuniformidad en la distribución de resistencia y rigidez (combinación de pórticos y pantallas)

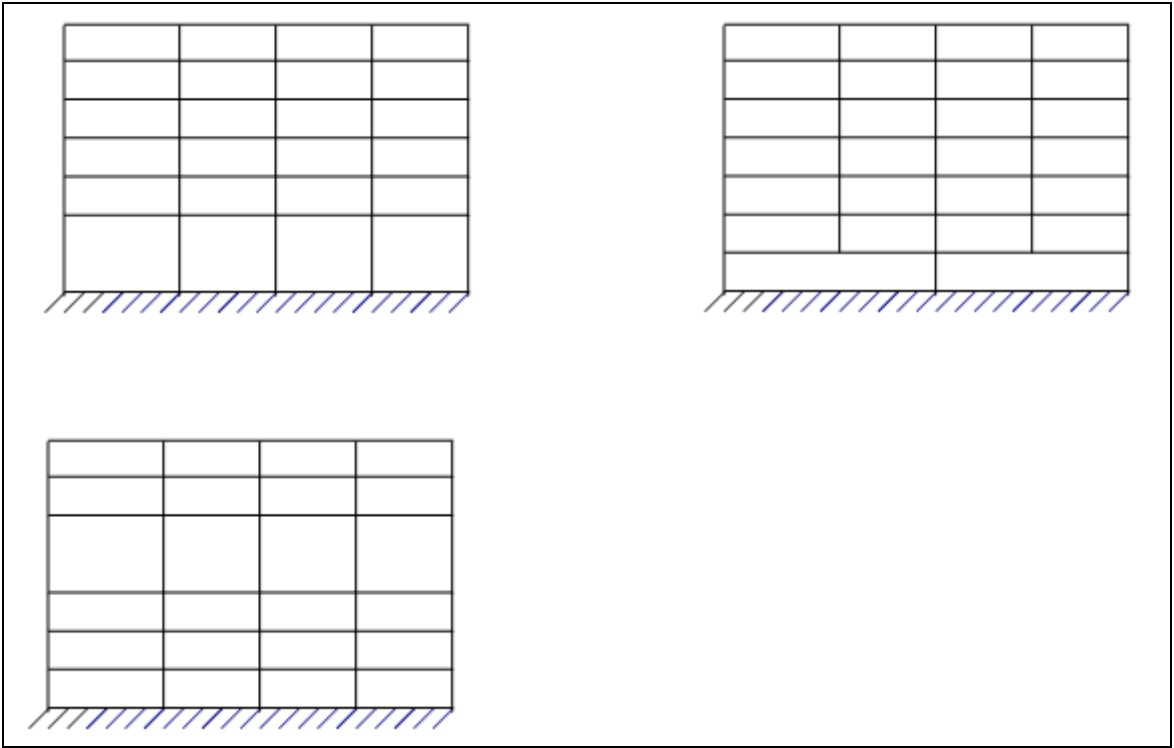


Figura 21: Desuniformidad en la distribución de rigideces (pórticos)

6.5.- Configuración en planta:

La forma de la planta influye en el comportamiento de una estructura sometida a fuerzas horizontales, en general las plantas con formas simples (cuadradas, rectangulares y circulares) poseen un buen comportamiento, a diferencia de las estructuras con plantas de forma irregular, las cuales pueden tener un comportamiento indeseable generando concentraciones de esfuerzos en determinadas zonas.

Plantas en forma de L, H, C y T, pueden considerarse como plantas flexibles y presentan concentraciones de esfuerzos en las esquinas principalmente. Estas plantas generalmente son muy deseables arquitectónicamente debido a sus múltiples ventajas relacionadas con la iluminación y la ventilación.

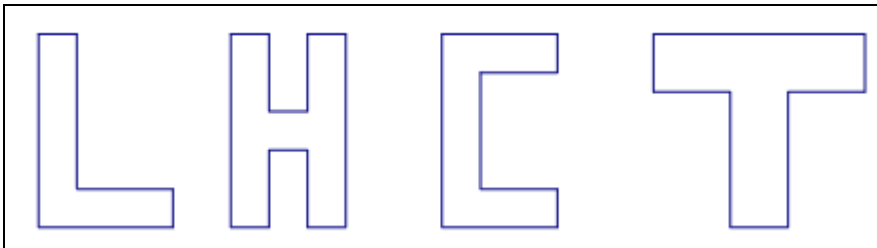


Figura 22: Plantas irregulares.

Las estructuras con plantas alargadas presentan mayores momentos torsores, por lo que se debe tener especial cuidado en la colocación de las pantallas. Se recomienda para disminuir los esfuerzos cortantes dividir a la estructura en módulos estructuralmente independientes mediante el empleo de juntas de dilatación, o aumentar las rigideces de los elementos estructurales.

6.6.- Concentración de masas:

La concentración de masas innecesarias son indeseables en toda estructura, ya que como se sabe a mayor masa mayor será la fuerza (Fuerza = masa • aceleración).

Las masas excéntricas igualmente no son recomendables, ya que ocasionan que la estructura esté sometida a mayores esfuerzos de torsión en caso de movimientos sísmicos.

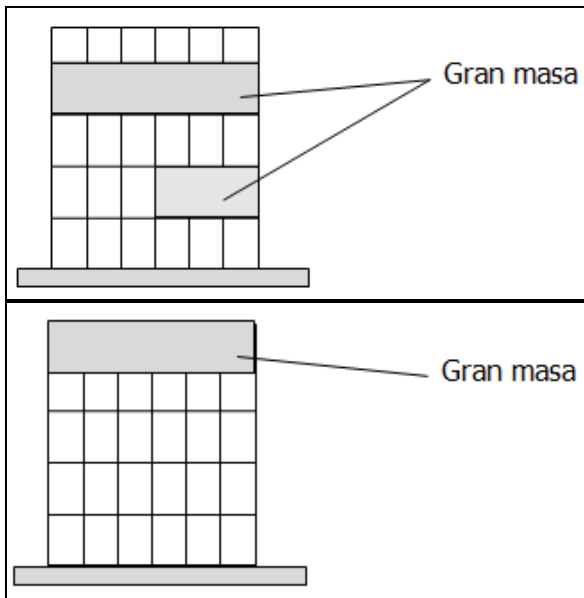


Figura 23: Variación en la distribución de masas

Debido a que a mayor masa mayor es la fuerza, la concentración masas a medida que la edificación crece en altura trae efectos indeseables.

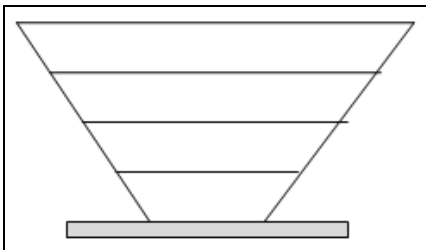


Figura 24: Variación de las dimensiones de plantas con la altura.

6.7.- Rigidez de entresijos:

En los análisis convencionales de estructuras se supone la presencia de un diafragma rígido, el cual cumple las siguientes funciones:

- soportar las cargas verticales y transmitir las a los apoyos,
- transmitir y distribuir las cargas horizontales que actúan sobre los entresijos entre los elementos resistentes a cargas verticales,
- unir los elementos resistentes de cargas verticales imponiendo la compatibilidad de desplazamientos horizontales.

La confiabilidad de esta hipótesis será mayor cuando la rigidez del diafragma supere la rigidez de los elementos estructurales resistentes. Cuando la hipótesis presente dudas es conveniente realizar análisis para mayor exactitud, como por ejemplo, por teoría de elementos finitos.

6.8.- Torsión en planta:

La torsión es una de las principales causantes de los daños producidos por los terremotos en las edificaciones. El problema de torsión se origina cuando el centro de cortantes no coincide con el centro de rigideces, lo cual se debe generalmente a plantas no simétricas, y distribuciones irregulares de los elementos estructurales resistentes.

La disposición de los elementos resistentes cargas horizontales es probablemente uno de los factores más importantes en el diseño de la estructura. Es recomendable una disposición simétrica para garantizar una disminución de la excentricidad, y por lo tanto de los momentos torsores. Asimismo, deben evitarse concentraciones de rigideces.

En caso de presencia de huecos en planta, se debe proporcionar rigidez a la zona afectada por la abertura, uniformizando así la repartición de rigideces. En plantas con forma de 'H', 'T', 'L' ó 'C' es conveniente analizar las esquinas debido a los grandes esfuerzos cortantes.

Para evitar problemas de torsión en planta, debido a formas irregulares de la misma, se pueden adoptar distintas soluciones como son: separar al edificio en varios cuerpos mediante juntas de dilatación, o aumentar la rigidez de la estructura en las zonas consideradas críticas.

6.9.- Esbeltez en la estructura:

La relación entre la altura de la estructura y la dimensión de la planta es llamada esbeltez, la cual influye en su comportamiento en presencia de fuerzas horizontales.

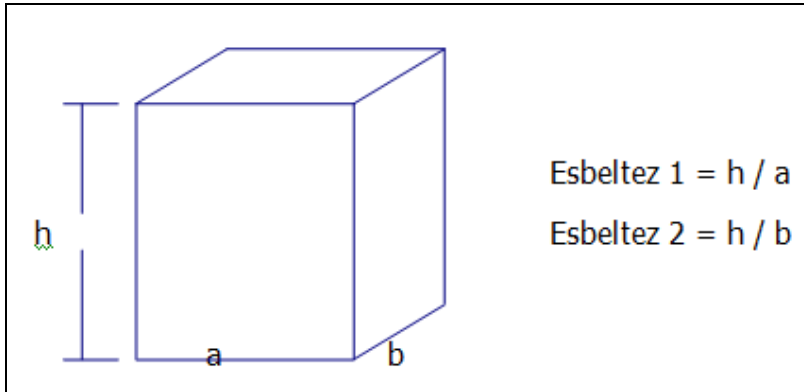


Figura 25: Esbeltez de una estructura regular

Los empujes horizontales sobre una estructura tratan de voltearlo, por lo que se generan fuerzas de tracción del lado del empuje y compresión del lado opuesto. El momento de volcamiento producido es igual al resultante de las fuerzas horizontales multiplicado por el brazo de palanca, el cual se incrementa a medida que aumenta la altura del edificio y su peso. Para el equilibrio debe existir un momento resistente, igual en magnitud y de signo contrario al momento de volcamiento, con su respectivo factor de seguridad.

Una forma de incrementar el momento resistente en edificaciones altas es mediante el ensanchamiento de la base, lo cual reduce la esbeltez.

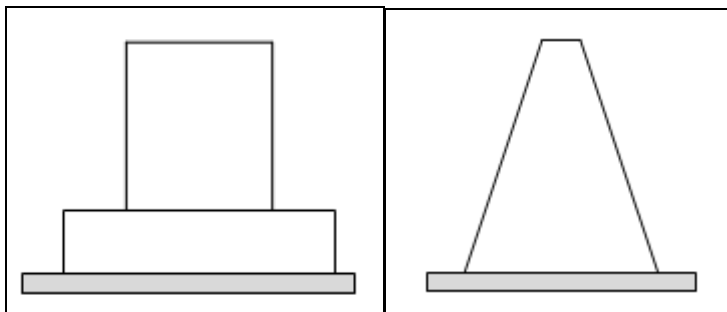


Figura 26: Ejemplos de base ensanchada.

6.10.- Cambio brusco de rigideces:

Arquitectónicamente se presentan edificaciones con cambio brusco de rigideces entre niveles adyacentes, por lo que es conveniente analizar la transmisión de esfuerzos en la estructura.

Igualmente se pueden presentar columnas de distintas rigideces en un mismo nivel, o columnas de gran altura. A medida que aumenta la altura de la columna, su rigidez disminuye, y su longitud efectiva de pandeo aumenta, por lo que es conveniente revisar estos valores en el diseño de columnas.

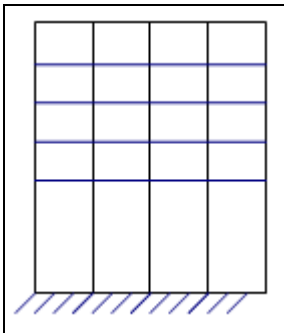


Figura 27: Plantas bajas libres (variaciones de rigidez)

6.11.- Juntas de dilatación:

El empleo de juntas consiste en la separación física de una estructura considerada irregular en distintos cuerpos, con la finalidad de mejorar su comportamiento bajo la acción del sismo y simplificar su análisis.

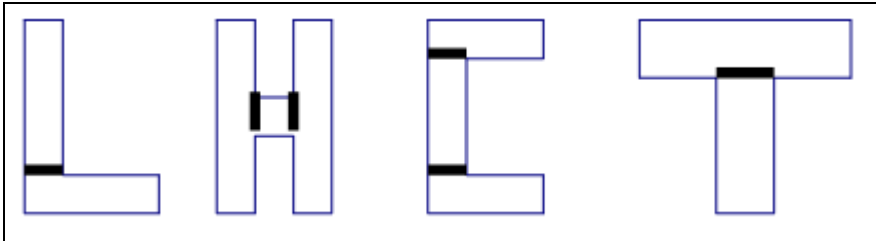


Figura 28: Ejemplo de juntas de dilatación en plantas irregulares

Si al estructurar una edificación, este se divide en varios cuerpos, generalmente cada uno vibrará con un período distinto debido a la diferencia de rigideces, lo cual ocasiona una incompatibilidad de los desplazamientos en la unión de los cuerpos por lo que no se debe considerar la hipótesis del diafragma rígido.

6.12.- Edificaciones adosadas:

Las edificaciones cercanas deben cumplir una separación mínima para evitar choques entre ellas en caso de oscilación, es decir, permitir una respuesta dinámica independiente. Esta separación mínima está influenciada tanto por la zonificación sísmica, como por el sistema estructural empleado.

Se ha verificado en sismos ocurridos que los mayores daños de edificaciones adosadas se presentan cuando los entrepisos se encuentran desfasados, es decir, los niveles no se encuentran a la misma altura.

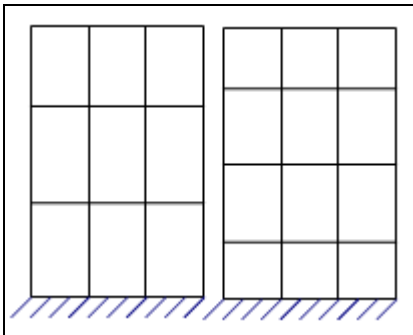


Figura 29: Edificaciones adosadas con niveles a distinta altura.

Asimismo, dos edificaciones adyacentes pueden quedar adosadas siempre que todas las losas estén al mismo nivel y se compruebe que su interacción no da lugar a efectos desfavorables.

6.13.- Efectos de tabiquería:

Con el análisis de las estructuras sometidas a sismos, se ha comprobado que la presencia de tabiquería puede tener efectos desfavorables, respecto al comportamiento esperado del análisis de modelos que ignoren su presencia. La disposición irregular de la tabiquería en planta genera asimetrías, y en consecuencia provoca efectos torsionales que pueden ser importantes.

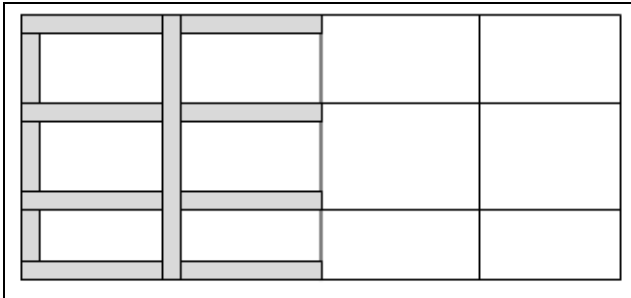


Figura 30: Tabiquería asimétrica en planta

Una alternativa para evitar estos inconvenientes, es separar en forma adecuada la tabiquería de la estructura. Si la tabiquería va a quedar ligada a la estructura y se ha ignorado en el diseño, es recomendable efectuar verificaciones en el comportamiento de la estructura con tabiquería.

La tabiquería discontinua puede traer consigo el no deseado efecto de columna corta, es decir, que la tabiquería al no llegar hasta el final de la columna produce el efecto de columna corta en la parte superior de la misma, ya que está sometida a mayores esfuerzos por cambio de rigidez.

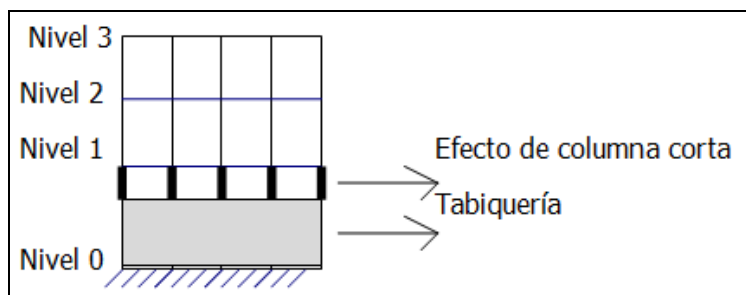


Figura 31: Tabiquería discontinua en el nivel 1

6.14.- Control de desplazabilidad:

En los sismos se ha verificado que estructuras que no sufrieron daños de su estructura presentaron daños severos de tabiquería, y es por tal razón que en las normas se ha implementado el control de desplazabilidad. Es decir, que no basta que una estructura resista un sismo, sino que debe hacerlo con deformaciones pequeñas.

Los desplazamientos máximos permitidos dependen del tipo y disposición de los elementos no estructurales, y del tipo de edificación. En caso de presentarse elementos estructurales no susceptibles de sufrir daños por deformaciones de la estructura se incrementa el desplazamiento máximo permitido.

7. PREDIMENSIONADO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Un aspecto importante tanto para los arquitectos como para los ingenieros consiste en la determinación de las dimensiones preliminares de los elementos estructurales de la edificación, ya que estos van a condicionar tanto los espacios arquitectónicos como la calidad estructural de la edificación. En este capítulo se analiza el predimensionado de los elementos estructurales para edificios aporticados, debido a su simplicidad y amplio uso por profesionales.

El diseño inicial de los pórticos se basa en análisis aproximados, después de los cuales un análisis más riguroso debe realizarse. El procedimiento típico de análisis incluye el estudio de los siguientes aspectos:

- Estimación de las cargas verticales y horizontales en vigas y columnas por métodos aproximados.
- Estimaciones preliminares de la sección de los elementos estructurales, tomando en consideración las fuerzas de gravedad con un aumento racional en estas dimensiones para resistir a la vez fuerzas horizontales.
- Distribución aproximada de las cargas horizontales y análisis preliminar de las fuerzas en los elementos estructurales del pórtico.
- Verificación del desplazamiento y redimensionado de los elementos estructurales si es necesario.
- Verificación de la resistencia de los elementos estructurales para las combinaciones más desfavorables de cargas verticales y horizontales, y ajuste de las dimensiones si es necesario.
- Análisis por computadora de toda la estructura para una verificación precisa del desplazamiento y la rigidez de los elementos estructurales, con ajustes posteriores de las dimensiones de éstas donde se requiera. En ésta etapa debe tomarse en cuenta la verificación del efecto P-Delta de los desplazamientos.
- Diseño detallado de elementos estructurales y uniones.

En edificios aporticados existen determinados factores que hacen que la obra sea siempre costosa aunque se afine mucho en el diseño de los diversos elementos estructurales. Estos factores son principalmente la correcta ubicación de las columnas y la fijación acertada de las luces de las vigas y losas.

A continuación se procede a describir los pasos generales sugeridos para el predimensionado de una edificación de pórticos de concreto armado, sin que ello represente una regla estricta.

a) Ubicación de las columnas:

El primer paso después de establecer un sistema estructural aporticado consiste en la ubicación física de las columnas, ya que esto determinará la disposición de las losas y vigas, por lo cual deberán tomarse en cuenta determinados criterios.

La disposición de las columnas se encuentra limitada principalmente por los requerimientos arquitectónicos de los ambientes, a fin de que los espacios no queden condicionados indebidamente por la presencia de vigas o por dimensiones inadecuadas, sin olvidar los aspectos económicos y estructurales. En edificios de estacionamiento, por ejemplo, la separación entre columnas debe ser tal que la distancia libre entre ellas permita acomodar un número exacto de vehículos.

b) Selección del tipo de entrepiso:

Como se mencionó anteriormente, los principales factores que influyen en la elección del tipo de losa son la expresión arquitectónica, las luces, las cargas, el costo de los materiales y mano de obra, los factores constructivos, y el aislamiento acústico y térmico.

Si nos basamos en el aspecto económico podemos afirmar que resulta más beneficioso disponer las vigas principales en el sentido de las luces largas, y las losas en el sentido de las luces más cortas. Esta disposición resulta también mejor para las vigas sismo-resistentes, pues así resultan más rígidas con menor altura en relación a las vigas

principales. Aunque puede darse que la elección de los apoyos sea en la dirección más larga debido a otros factores, como por ejemplo: simplicidad en el proceso constructivo. No hay que olvidar que debe darse un adecuado apoyo a elementos como escaleras y voladizos.

c) Predimensionado de entrepisos:

Las normas establecen la altura mínima de vigas o espesor mínimo de losas armadas en una dirección, a menos que se calcule la flecha. Los valores de la tabla son para los miembros que no soportan ni están unidos a elementos no estructurales susceptibles de ser dañados por grandes flechas, y que estén constituidos por concreto de peso normal (aprox. 2400 K/m³) y acero de grado 42 (resistencia cedente = 4200 K/cm²).

Elementos estructurales	Altura o espesor mínimo (h)			
	Simplemente apoyados	Un extremo continuo	Ambos extremos continuos	Voladizo
Losas macizas	L / 20	L / 24	L / 28	L / 10
Vigas o losas nervadas	L / 16	L / 18	L / 21	L / 8

Donde 'L' representa la longitud del elemento estructural

Para losas macizas armadas en dos direcciones con ambos extremos continuos puede considerarse el factor L/35, y para losas nervadas armadas en dos direcciones el factor L/32.

Cabe señalar que los espesores comúnmente empleados de las losas nervadas con bloques de arcilla son: 20cm - 25cm - 30cm y 35cm debido a las dimensiones del bloque de arcilla comercialmente disponible.

Ejemplo:

Cálculo del peso propio por metro cuadrado de una losa nervada armada en una dirección de espesor 30 cm; conformada por una loseta superior de 5 cm de espesor, nervios de 10 cm de ancho con separación de 50cm eje a eje y rellenos con bloques de arcilla.

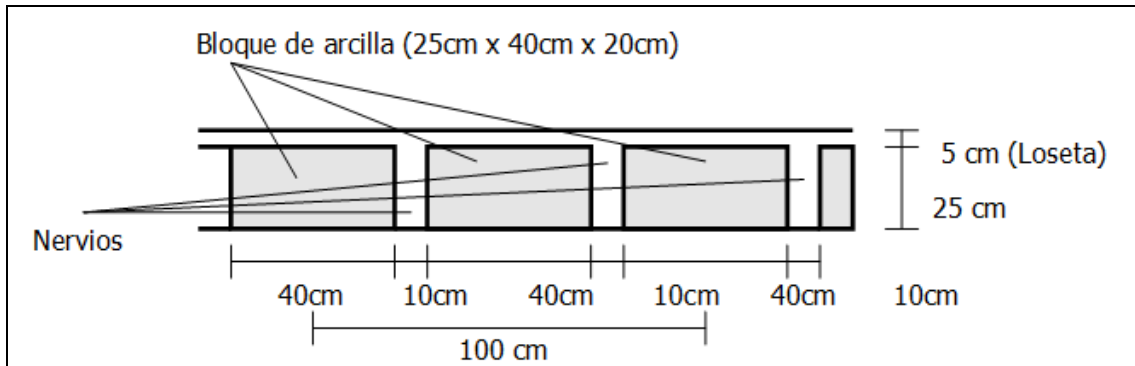


Figura 32: Losa nervada armada en una dirección de espesor 30cm

Cálculo del peso propio por metro cuadrado:

$$\text{Loseta:} \quad 1 \text{ m}^2 \cdot 5\text{cm} \cdot 2400 \text{ K/m}^3 = 120 \text{ K}$$

$$\text{Nervios: } 2 \cdot (1\text{m} \cdot 0,10\text{m} \cdot 25\text{cm} \cdot 2400 \text{ K/m}^3) = 120 \text{ K}$$

$$\text{Bloques de arcilla:} \quad 10 \cdot 1 \text{ m}^2 \cdot 12 \text{ K/m}^2 = \underline{120 \text{ K}}$$

$$\text{Peso: } 360 \text{ K / m}^2$$

Pesos aproximados de losas nervadas armadas en una y dos direcciones:

Tipo de losa	Espesor	Peso
Losa nervada armada en una dirección	20 cm	270 K/ m ²
	25 cm	315 K/ m ²
	30 cm	360 K/ m ²
	35 cm	415 K/ m ²
Losa nervada armada en dos direcciones	20 cm	315 K/ m ²
	25 cm	375 K/ m ²
	30 cm	470 K/ m ²
	35 cm	510 K/ m ²

Otro tipo de losa empleado por su facilidad de construcción para cargas livianas es la losa de tabelones. Sus dimensiones se influyen por los tabelones (largo: 60cm u 80cm , espesor: 6cm u 8cm), con vigas (doble T) dispuestas cada 60cm u 80cm.

Pesos aproximados de losas de tabelones:

Tipo de losa	Perfil	Peso
Losa de tabelones con un recubrimiento de 4cm de concreto Tabelón 6 x 20 x 60	IPN 8	165 K/ m ²
	IPN 10	170 K/ m ²
	IPN 12	175 K/ m ²
Losa de tabelones con un recubrimiento de 4cm de concreto Tabelón 6 x 20 x 80	IPN 10	185 K/ m ²
	IPN 12	190 K/ m ²
	IPN 14	195 K/ m ²
Losa de tabelones con un recubrimiento de 4cm de concreto Tabelón 8 x 20 x 60	IPN 10	180 K/ m ²
	IPN 12	185 K/ m ²
	IPN 14	190 K/ m ²
Losa de tabelones con un recubrimiento de 4cm de concreto. Tabelón 8 x 20 x 80	IPN 12	195 K/ m ²
	IPN 14	200 K/ m ²

Cuando las luces entre los apoyos supera los 8 metros de longitud o las cargas a resistir son elevadas, la selección de una losa nervada armada en una o dos direcciones puede no resultar beneficiosa económicamente, por lo que se debe recurrir a otras alternativas. Existen distintas tipos de losas como son las losas fungiformes, losas reticulares, losas pretensadas, y mallas espaciales.

Un factor importante en la selección del tipo entrepiso, como se menciona anteriormente, son las luces entre los apoyos.

A continuación indicamos en la siguiente tabla las luces recomendadas para distintos tipos de entrepisos para luces máximas de 15 metros.

Tipo de losa	Luces recomendadas (mínima - máxima)	Espesores
Maciza	1,0 m - 6,0 m	5 cm - 20 cm
Nervada	3,0 m - 8,0 m	20 cm - 50 cm
Fungiforme	4,5 m - 12,0 m	15 cm - 40 cm
Reticular	5,0 m - 15,0 m	20 cm - 65 cm
Malla espacial	6,0 m - 15,0 m	40 cm - 90 cm
Pretensada	7,0 m - 15,0 m	15 cm - 25 cm

Cuando las luces exceden los 15 metros es recomendable un análisis más detallado del sistema estructural a emplearse, ya que los aspectos económicos generalmente son los principales para la selección de alternativas estructurales.

Para un pórtico de luces grandes (mayores de 15 metros), la selección del sistema estructural no es sencilla, debiendo considerar alternativas estructurales como:

- Pórticos de concreto armado (columnas y vigas de concreto armado)
- Pórticos de acero (columnas y vigas de acero)
- Pórticos de concreto armado y acero (columnas de concreto armado y vigas de acero)
- Las mismas soluciones anteriores, pero con cerchas metálicas para las vigas.
- Columnas de concreto armado y/o acero, y un sistema de vigas y/o losas

pretensadas.

- Columnas de concreto armado y/o acero, y un sistemas de vigas y/o losas postensadas.
- Columnas de concreto armado y/o acero, y un sistema de cerchas en las dos direcciones.
- Columnas de concreto armado y/o acero, y un sistema de mallas espaciales.

d) Predimensionado de vigas:

El predimensionado de pórticos de concreto armado consiste en la determinación preliminar de las dimensiones del entrepiso, vigas y columnas. Las vigas pueden definirse como aquellos elementos estructurales que sirven de apoyo a las losas y transmiten las cargas a las columnas; según su dirección estructural se pueden diferenciar las vigas de cargas y sismo-resistente, y las sólo sismo-resistentes, siendo las primeras generalmente de mayor dimensión.

Las cargas de las losas sobre las vigas se reparten dependiendo del ancho tributario de la viga, entendiéndose por ancho tributario el promedio de las distancias a las vigas vecinas. Si consideramos la losa uniformemente cargada, tendremos que a mayor ancho tributario, mayor será la carga soportada por la viga, para cargas uniformemente distribuidas.

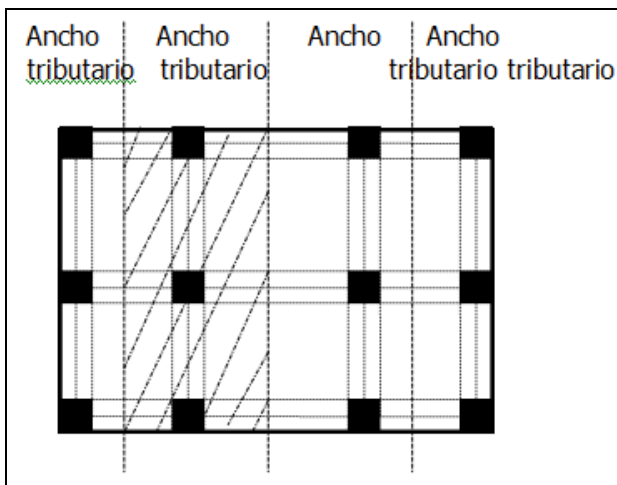


Figura 33: Ancho tributario de vigas

Las vigas de carga son las encargadas de transmitir las cargas a los apoyos, y su dirección dependerá de la dirección de armado del entrepiso. Un método rápido para el predimensionado de las vigas de carga consiste en dividir la luz entre apoyos por un factor que depende de la carga:

$$\text{Altura de la viga: } h_v = L / k$$

donde L: distancia entre apoyos

k: divisor: Carga alta o voladizos: $k = 10$

Carga mediana-alta: $k = 12$

Carga mediana-baja: $k = 16$

Carga baja: $k = 20$

Un predimensionado rápido de las vigas sismo-resistentes consiste en considerarlas como vigas de carga mediana-baja, aunque hay que destacar que su valor final vendrá determinado por el control de desplazabilidad.

El ancho o base de las vigas generalmente empleados son:

- en quintas: 15 a 20 cm
- en edificios: 30 a 40 cm
- en casos especiales: 50 cm,
- ó predimensionar como $b = h/2$, es decir, la mitad de la altura.

Si se desea un cálculo más exacto de la dimensión de la viga se puede emplear el método detallado, que consiste en calcular la carga que soporta la viga con la dimensión preliminar encontrada anteriormente ($q_v = \text{Ancho tributario} \cdot q_{\text{Losas}} + \text{Peso propio}$), considerar el momento de diseño igual al momento de empotramiento ($M_{\text{EMP.}} = q_v \cdot L^2 / 10$) y compararlo con el momento resistente de la sección de concreto armado considerada.

Arquitectónicamente la desaparición de las vigas en determinados espacios puede ser algo muy deseado, pero hay que destacar que las vigas planas no son muy recomendables desde el punto de vista estructural, ya que son muy flexibles por su baja inercia ($I = b \cdot h^3 / 12$), lo cual puede ocasionar daños en casos de sismos. Una

viga plana no es más que una viga donde su altura coincide con la altura del entrepiso.

Un efecto importante que se debe evitar es el llamado efecto de punzonado, para lo cual la dimensión de la viga en relación a la columna debe satisfacer una dimensión mínima:

$$\text{Ancho viga} \leq 1,5 (\text{Altura losa}) + (\text{Ancho columna})$$

Hay que resaltar que la altura de las vigas pueden condicionar la altura de entrepisos, por ejemplo: considerando una altura libre mínima recomendada de 2,20m resulta:

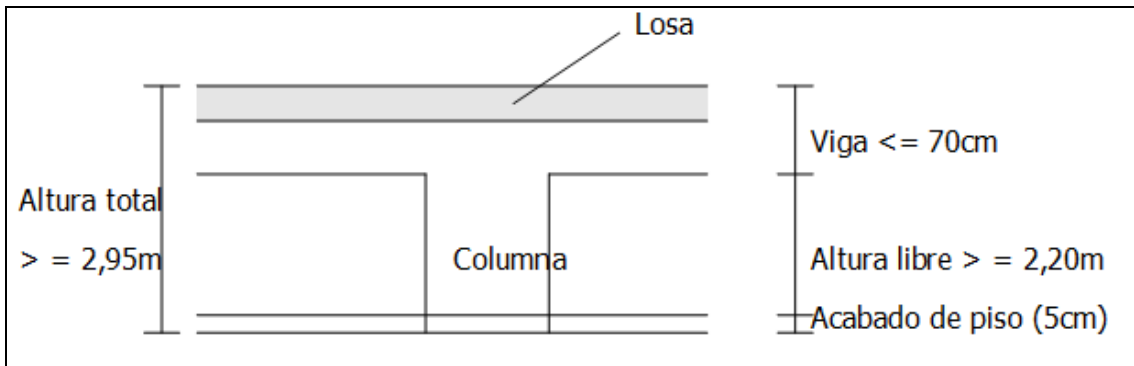


Figura 34: Altura de entrepisos

Cuando se emplean vigas en áreas con elevadas cargas, una alternativa para disminuir su sección en el centro de la misma es mediante el empleo de cartelas en las áreas cercanas a los apoyos. Por ejemplo en estacionamientos para facilitar el paso de vehículos y en bibliotecas por las elevadas cargas.

El concreto es un material que presenta buen comportamiento frente a esfuerzos de compresión, pero no podemos afirmar lo mismo respecto a las tracciones, debido a esto, es que empleamos refuerzos de acero en las zonas donde el concreto presenta esfuerzos de tracción.

Una de las desventajas del concreto es su elevado peso propio (aproximadamente 2.400 K/m^3) en relación a la resistencia. En el caso de las vigas más de la mitad del volumen del concreto (por debajo del eje neutro: aproximadamente 0,60 veces la altura útil) no trabaja para favorecer la resistencia, además de incrementar el peso propio.

El diagrama de esfuerzos para una sección de concreto armado se indica en la figura, bajo las siguientes suposiciones y consideraciones: la distribución de las deformaciones es lineal; el concreto no resiste esfuerzos de tracción; no existe deslizamiento entre el concreto y el acero; y se aplica la Ley de Hooke (las deformaciones son proporcionales a los esfuerzos).

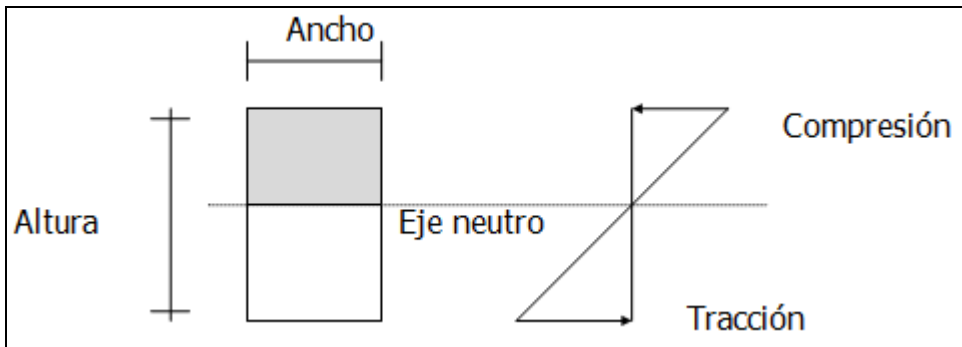


Figura 35: Diagrama de esfuerzos para una sección de concreto armado.

Por tal razón es que las vigas pre-tensadas y post-tensadas pueden presentar una alternativa con mejor relación costo-beneficio que las de concreto armado para luces grandes. En el concreto pre-tensado el cable se tensa previamente al vaciado del concreto sobre el encofrado de la viga, a diferencia del concreto post-tensado donde el tensado del cable es posterior al vaciado del concreto. Las vigas pretensadas y postensadas son más económicas en material que las de concreto armado, ya que son de menores dimensiones.

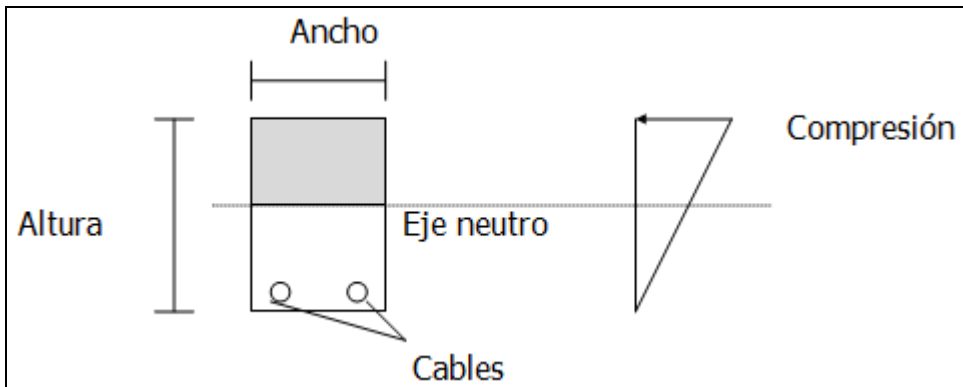


Figura 36: Diagrama de esfuerzos para una sección de concreto pretensado (Comportamiento ideal en el caso de condición final: caso carga muerta + cable + carga viva)

e) Predimensionado de columnas:

Las vigas transmiten las cargas a los apoyos o columnas, por lo que la dimensión de estas dependerá fundamentalmente de las cargas transmitidas. Un método empleado para el dimensionamiento preliminar de columnas es el conocido como 'método del área tributaria', que consiste en la determinación de la carga axial que le corresponde a cada columna dependiendo de su área tributaria.

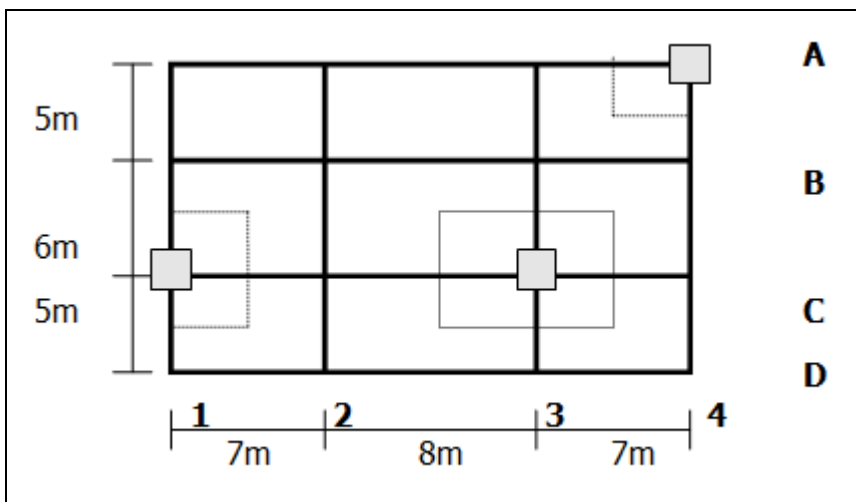


Figura 37: Areas tributarias

La disposición de las columnas van a definir los ejes estructurales (ejes: A,B,C,D, 1,2,3,4), y dependiendo de su ubicación podemos diferenciar tres tipos de columnas:

- de esquina (A1, A4, D1, D4)
- de borde (B1, C1, A2, A3, B4, C4, D2, D3)
- central (B2, B3, C2, C3)

Para el cálculo del área tributaria debemos trazar líneas por los puntos medios entre ejes consecutivos, y determinar el área que encierra a cada columna.

Para la columna central C3 el área tributaria resulta:

$$A_{T-C3} = (4m + 3,5m) \times (3m + 2,5m) = 41,25 \text{ m}^2$$

Las cargas que se transmiten a la columna queda constituida por el peso propio de los elementos estructurales (losa, vigas, y columnas), las demás cargas permanentes (piso, friso, tabiquería) y las cargas vivas.

Dependiendo del tipo de uso de la edificación pueden definirse estadísticamente las cargas por metro cuadrado de área tributaria:

Uso vivienda: 1.000 a 1.200 K/m²

Uso oficinas: 1.100 a 1.300 K/m²

Uso comercios: 1.300 a 1.500 K/m²

Uso estacionamientos: 1.400 a 2.000 K/m²

Las normas de los países definen las mínimas cargas distribuidas variables sobre entresijos para distintos ambientes, mediante las cuales puede determinarse con mayor exactitud las cargas por metro cuadrado.

Para el caso de una vivienda con una losa nervada armada en una dirección (espesor 30cm) resulta:

Peso de la losa		= 360 K/m ²
Piso (granito o mármol):	4 cm x 2.800 K/m ³	= 112 K/m ²
Friso:	2,5 cm x 1.900 K/m ³	= 48 K/m ²
Tabiquería: (bloques de arcilla de 15cm frisados)		= 230 K/m ²
Peso de columnas y vigas		= 190 K/m ²
Carga variable (vivienda)		= <u>175 K/m²</u>
		Peso: 1.115 K/m ²

El peso de las vigas y columnas supuesto (190 K/m²) en el cálculo anterior, puede variar dependiendo del proyecto en cuestión, por lo que se recomienda recomendable verificarlo.

A continuación se verifica el peso de las vigas y columnas:

Considerando nuevamente la columna C3, procedemos a predimensionar la viga del eje C y eje 3:

Viga de carga (eje C): $h_v = L/12 = 800\text{cm} / 12 = 67\text{cm}$
 $b_v = 30 \text{ a } 40 \text{ cm (edificios)}$ Seleccionamos 35cm
resulta: viga C: 35cm x 70 cm (base x altura)

Viga sismo-resistente (eje 3): $h_v = L/16 = 800 \text{ cm} / 16 = 50\text{cm}$
 $b_v = 30 \text{ cm}$
resulta: viga 3: 30cm x 50 cm (base x altura)

Suponiendo la columna C3 cuadrada (50cm x 50cm) resultan los siguientes pesos:

- Vigas de carga:

$$(4m+3,5m-0,5m) \times (35cm \times 70cm) \times 2.400 \text{ K/m}^3 = 4.116 \text{ K}$$

- Vigas sismo-resistentes:

$$(2,5m+3m-0,5m) \times (30cm \times 50cm) \times 2.400 \text{ K/m}^3 = 1.800 \text{ K}$$

- Columna (altura entrepiso 3m):

$$50cm \times 50cm \times 3m \times 2.400 \text{ K/m}^3 = \underline{1.800 \text{ K}}$$

Peso: 7.716 K

Dividiendo el peso total por el área tributaria (41,25 m²) resulta: 187 K/m², que coincide con el valor supuesto de 190 K/m².

Procedemos ahora a calcular las dimensiones preliminares de las columnas de la edificación, suponiendo un total de 8 niveles:

Este método considera exclusivamente la carga axial acumulada actuante sobre la columna de un determinado piso, que no es más que la suma de todas las cargas axiales superiores.

Considerando exclusivamente la carga axial, el área de la columna depende de la resistencia a compresión del concreto en cuestión y del tipo de columna, determinándose con la siguiente expresión:

$$\text{Area} = (\text{Carga Acumulada}) / (\alpha \cdot f'c)$$

donde: α el factor que condiciona el tipo de columna

(0,20: de esquina, 0,24: de borde, y 0,28: centrales)

$f'c$: resistencia a compresión del concreto (por ejemplo: 210K/cm²)

Tabla de cálculo de áreas por el método de área tributaria:

Columna	Nivel	Area (m ²) Tributaria	Carga (q) (K/ m ²)	AT • q (K)	Carga Acumulada (K)	Area Columna
C3	8-7	41,25	1.100	45.375	45.375	649 cm ²
	7-6	41,25	1.100	45.375	90.750	1.297 cm ²
	6-5	41,25	1.100	45.375	136.125	1.945 cm ²
	5-4	41,25	1.100	45.375	181.500	2.593 cm ²
	4-3	41,25	1.100	45.375	226.875	3.241 cm ²
	3-2	41,25	1.100	45.375	272.250	3.890 cm ²
	2-1	41,25	1.100	45.375	317.625	4.583 cm ²
	1-P.B.	41,25	1.100	45.375	363.000	5.186 cm ²

Posterior a determinar el área de la sección transversal de la columna solo queda determinar sus dimensiones físicas, las cuales se fijan por razones arquitectónicas y de rigidez.

Por ejemplo si se desean en el nivel 5-6 columnas circulares:

Columna C3: Area = 1.945 cm² resulta: Columna circular de 50 cm de diámetro
o Columna cuadrada de 45 cm de lado

A diferencia en el nivel de planta baja donde:

Columna C3: Area = 5.186 cm² resulta: Columna circular de 80 cm de diámetro
ó Columna rectangular de 70cm x 75cm

Es recomendable que las dimensiones de las columnas sean múltiplos de 5 por facilidad de construcción, y no variar las dimensiones de las mismas todos los pisos para disminuir el costo de encofrado y facilitar la colocación del acero de refuerzo.

Por lo tanto, resultan las siguientes dimensiones:

Columna	Nivel	Area Columna	Dimensión cuadrada	Dimensión rectangular	Dimensión circular (diámetro)
C3	8-7	649 cm ²	30 x 30 cm	30 x 30 cm	30 cm
	7-6	1.297 cm ²	40 x 40 cm	35 x 40 cm	40 cm
	6-5	1.945 cm ²	45 x 45 cm	40 x 50 cm	50 cm
	5-4	2.593 cm ²	50 x 50 cm	45 x 60 cm	60 cm
	4-3	3.241 cm ²	60 x 60 cm	55 x 60 cm	65 cm
	3-2	3.890 cm ²	65 x 65 cm	60 x 65 cm	70 cm
	2-1	4.583 cm ²	70 x 70 cm	65 x 70 cm	80 cm
	1-P.B.	5.186 cm ²	75 x 75 cm	70 x 75 cm	85 cm

f) Predimensionado de fundaciones:

Toda edificación debe estar soportada por fundaciones apropiadas sobre terreno natural competente o rellenos artificiales que no incluyan materiales degradables y que hayan sido adecuadamente compactados. Las fundaciones son los elementos encargados de transmitir las cargas al suelo, y su selección dependerá del tipo de suelo y cargas totales a resistir.

Para el diseño de las fundaciones se recomienda disponer de un estudio de suelos, que caracteriza el perfil del subsuelo.

En el caso de fundaciones directas, el dimensionamiento preliminar se realiza básicamente por compresión, considerando que la fundación se encuentra apoyada sobre un estrato firme.

El área de la fundación se calcula por la siguiente expresión:

$$\text{Area de la fundación} = \text{Carga} / (\text{Presión máxima admisible del terreno})$$

La presión máxima admisible del suelo va a depender del tipo de suelo en cuestión, pero se puede afirmar que sus valores varían entre 0,5 y 4,0 K/ cm² (suelos malos - suelos buenos).

Para entender las magnitudes de las presiones admisibles, consideremos el siguiente ejemplo: imaginemos una persona corriendo por la playa, la presión máxima que ejerce sobre el suelo dicha persona será igual a su peso dividido por el área del pie. Aproximemos a 100 cm² el área del pie de la persona y 50 Kg su peso, que resulta en una presión ejercida sobre el suelo de 0,5 K/cm². Entonces el suelo debe tener una presión admisible mayor para que la persona no se hunda.

La profundidad de la fundación la consideraremos como un (1) metro, por lo que ya tenemos predimensionada la fundación. Es costumbre engrosar las dimensiones de la columna 5 cm antes de llegar a la fundación, para protección del acero contra la corrosión.

Con el ejemplo anterior para la columna central C3 resulta una carga axial de 363 toneladas, y considerando un suelo bueno con una presión máxima admisible de 4,0 K/cm², tenemos:

$$\begin{aligned}\text{Area de la fundación} &= \text{Carga} / (\text{Presión máxima admisible del terreno}) \\ &= 363.000 \text{ K} / 4,0 \text{ K/ cm}^2 \\ &= 90.750 \text{ cm}^2\end{aligned}$$

Donde resulta, una fundación cuadrada de 3 metros de lado y 1 metro de profundidad, u otras dimensiones según las necesidades del proyecto.

Las fundaciones deben enlazarse entre sí en dos direcciones preferiblemente ortogonales, con miembros estructurales capaces de soportar (en compresión y tracción) una fuerza de por lo menos igual al 10% de la mayor carga transmitida por las columnas que enlaza. En el caso usual de vigas de concreto armado se recomienda una dimensión mínima de 30cm x 30cm.

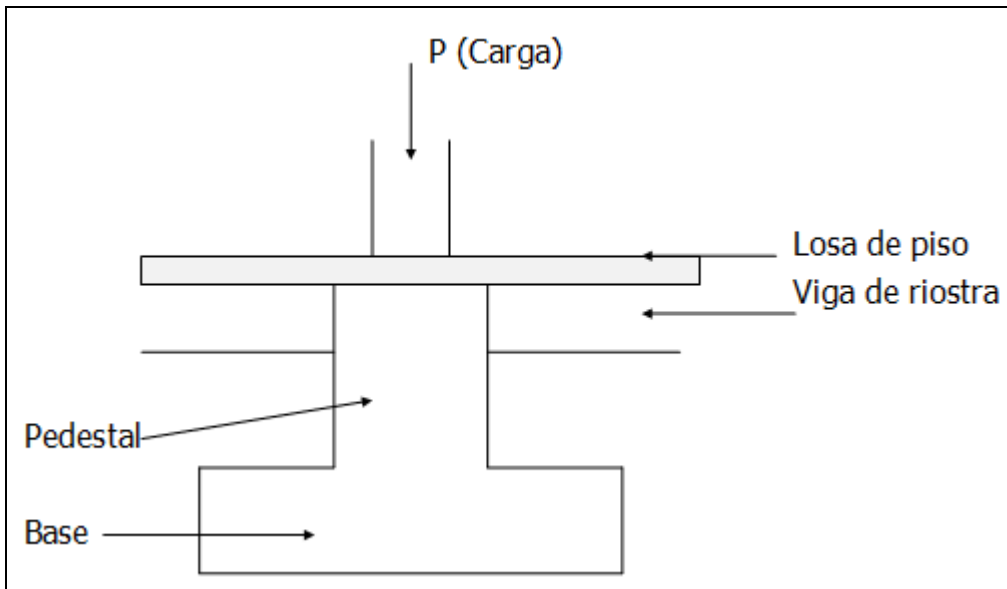


Figura 38: Fundación aislada.

Cuando la profundidad del estrato firme es mayor de 4 ó 5 metros, la selección del tipo de fundaciones puede variar entre fundaciones directas y fundaciones profundas.

Para el predimensionado de fundaciones profundas consideremos el caso de pilotes circulares, donde:

$$\text{Area pilote} = \text{Carga} / (30 \text{ a } 50 \text{ K/cm}^2)$$

$$\text{Area pilote} = \Pi \cdot (\text{Diámetro})^2 / 4$$

El dimensionado preliminar de los pilotes se caracteriza por definir su longitud y su diámetro. La longitud se considera igual a la profundidad que se encuentra un estrato firme, y el diámetro que define el área de la sección transversal va a depender básicamente de la carga.

Con el ejemplo anterior para la columna central C3 resulta una carga axial de 363 toneladas.

$$\begin{aligned}\text{Area del pilote} &= \text{Carga} / (40 \text{ K/ cm}^2) \\ &= 363.000 \text{ K} / 40 \text{ K/ cm}^2 \\ &= 9075 \text{ cm}^2 = 0,9075 \text{ m}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Area del pilote} &= \Pi \cdot (d)^2 / 4 \\ &= 3,14159 \cdot d^2 / 4\end{aligned}$$

$$\text{Despejando el diámetro: } d = 1,075 \text{ m}$$

Por lo tanto resulta un pilote de un diámetro de 1,10 metros y con una longitud que depende de la profundidad del estrato firme.

8. ANALISIS SISMICO

Las edificaciones están ligadas al terreno sobre el cual están fundadas. Cuando el suelo sufre movimientos, las bases de las edificaciones también se desplazan, mientras que el resto del cuerpo superior trata de permanecer en su posición original, produciéndose deformaciones y generándose una fuerza de reacción.

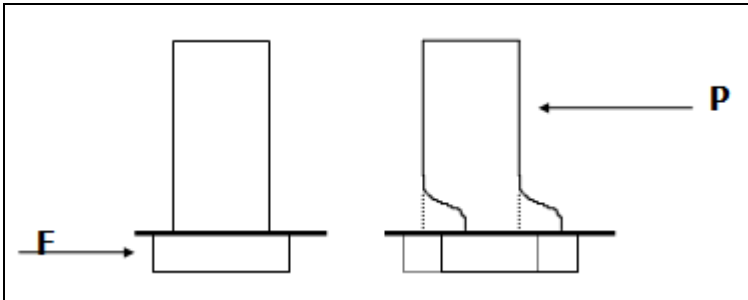


Figura 39: Comportamiento de una edificación bajo movimientos del suelo.

Al moverse el suelo de fundación debido a las ondas sísmicas, se origina una fuerza en la base del edificio conocida como corte basal (V_0). La magnitud de dicha fuerza es directamente proporcional a un coeficiente sísmico y al peso de la edificación, es decir:

$$V_0 = C_s \cdot W$$

donde: C_s : coeficiente sísmico

W : peso total de la edificación por encima del nivel base

Dependiendo de las características estructurales de la edificación existen diversos métodos para el análisis y modelo matemático del comportamiento estructural. En el presente capítulo se analiza uno de los métodos más sencillos para el análisis sísmico, como es el método simplificado, que si bien debe aplicarse solamente para edificios con ciertas características particulares, es un buen ejemplo para la introducción al análisis sísmico de edificaciones.

El método simplificado debe emplearse exclusivamente para edificaciones que satisfagan las siguientes características: estructura regular; el número de niveles debe

ser menor o igual a tres (3); la altura total de la edificación no debe exceder los 10,5m, ni la altura de entresijos los 3,5m; uso del edificio público o privado (que no incluyen instalaciones esenciales, de funcionamiento vital en condiciones de emergencia, o cuya falla pueda dar lugar a grandes pérdidas humanas o económicas);

Se entiende por regulares aquellas estructuras que satisfacen todas las siguientes condiciones:

- la distribución vertical de masas, o rigideces, o resistencia al cortante, no varía sustancialmente entre niveles adyacentes;
- la distancia entre el centro de cortantes y el centro de rigideces, no excede el 8% de la dimensión de la planta perpendicular a la dirección analizada; y
- las dimensiones de las plantas no aumentan en forma sustancial con la elevación.

Las edificaciones que no satisfagan alguna de las condiciones anteriores se consideran irregulares.

En caso de que la edificación no cumpla los requisitos anteriores se recomienda el uso de otros métodos de análisis, tales como, estático equivalente, superposición modal con un grado de libertad por nivel, superposición modal con tres grados de libertad por nivel, y torsión estática equivalente.

Para el método simplificado el coeficiente sísmico depende de los siguientes factores: el uso de la edificación, las características del suelo sobre el cual está fundado, el tipo de sistema estructural, y el riesgo sísmico. Lo cual se resume en la siguiente expresión:

$$C_s = \frac{\alpha \cdot A_o \cdot (\beta + 1)}{(D + 1)}$$

y cada uno de los términos se explica a continuación:

- Coeficiente de uso (α): De acuerdo al uso a que se destinen las edificaciones se asigna un valor al coeficiente de uso para mayorar la fuerza cortante basal:
 - ✓ Edificaciones con instalaciones esenciales, de funcionamiento vital en condiciones de emergencia, o cuya falla pueda dar lugar a cuantiosas pérdidas humanas o económicas $\alpha = 1,25$ (se mayorar un 25 %)
 - ✓ Edificaciones de uso público o privado: $\alpha = 1,0$ (no se mayorar)

- Aceleración horizontal máxima (A_0): Dependiendo de la zonificación sísmica se le asigna un valor a la aceleración horizontal máxima del terreno de fundación, como una fracción de la aceleración de la gravedad (usualmente entre 0,10g y 0,4g).

- Factor de magnificación promedio (β): Depende del tipo del perfil del sub-suelo donde se encuentra fundada la edificación (usualmente entre 2 y 2,2).

- Factor de ductilidad (D): Depende del tipo de sistema estructural resistente a cargas horizontales, y del nivel de diseño empleado (usualmente entre 1 y 6).

De los anteriores factores, resulta que el valor del coeficiente sísmico es:

$$C_s = \frac{\alpha \cdot A_0 \cdot (\beta + 1)}{(D + 1)}$$

y debe satisfacer que: $C_s \geq \alpha \cdot A_0 / 6$ como factor de seguridad en el análisis sísmico.

Valores prácticos para el coeficiente sísmico varían entre 0,10 y 0,20.

Para el cálculo de la fuerza cortante basal el peso total de la edificación por encima del nivel base se calcula como la suma de las cargas permanentes totales (que incluyen el peso propio de los elementos estructurales o no, y las maquinarias o equipos no despreciables) y un porcentaje de la carga viva.

$$W = C.P. + \eta \cdot C.V.$$

donde 'η' representa el porcentaje de la carga viva, que se indica en la siguiente tabla:

	η
Recipientes de líquidos	100 %
Almacenes y depósitos	80 %
Estacionamientos	50 %
Entrepisos no incluidos en los dos anteriores	25 %
Techos y terrazas no accesibles	0%

La fuerza cortante en la base se distribuirá verticalmente en la edificación de acuerdo a la siguiente expresión:

$$F_i = V_o \cdot (W_i \cdot h_i) / \sum (W_j \cdot h_j)$$

Donde: F_i : fuerza lateral en el piso i
 W_i : peso del nivel i de la edificación
 h_i : altura medida desde la base hasta el nivel i de la edificación

A continuación la determinación del peso de un piso y la posición del centro de masa:

- El peso de cada piso de la edificación se puede idealizar como concentrado en su centro de gravedad, denominándose *centro de masa*. Se considera que por dicho punto pasa la línea de acción de la carga sísmica lateral por nivel F_i que determinamos anteriormente, por el método de análisis sísmico simplificado o por cualquiera de los otros métodos indicados.
- La posición del centro de masa puede determinarse calculando la posición de la resultante de las reacciones en las columnas del piso estudiado, suponiendo el piso totalmente cargado con su carga permanente y un porcentaje de la carga viva.
- Otro método para determinar la posición del centro de masas, de manera aproximada, consiste en la determinación del peso de cada uno de los elementos y búsqueda de los centros geométricos de cada una de las áreas, determinando así el centro de gravedad.

El método se explica mediante el siguiente ejemplo, considerando la siguiente planta en una edificación:

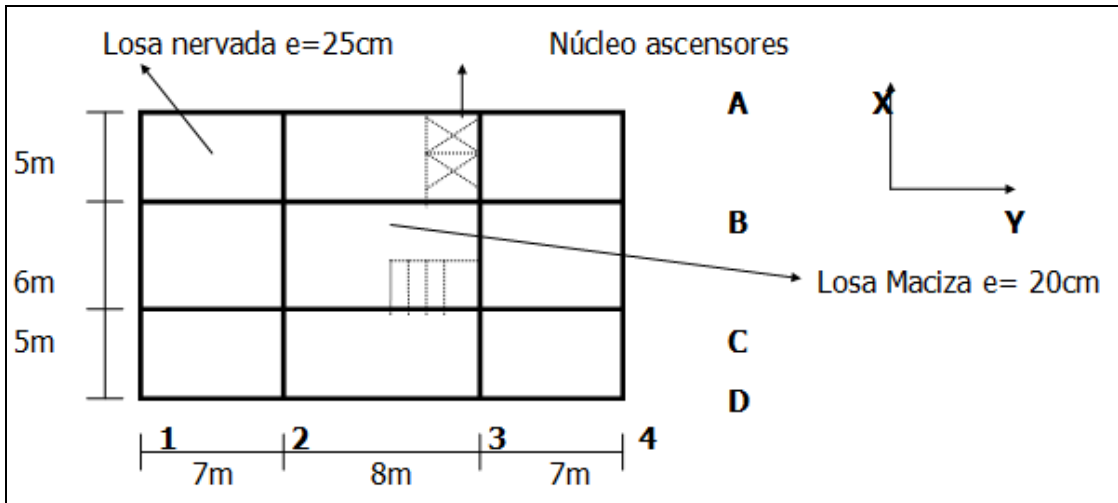


Figura 40: Planta de una edificación

Con los siguientes valores para los elementos estructurales:

- Altura de entrepiso: 3 m
- Columnas: 40 cm x 40 cm
- Vigas en sentido X: 40 cm x 60 cm
- Vigas en sentido Y: 30 cm x 50 cm
- Sobrecarga en escalera y losa maciza: 500 K/m²
- Sobrecarga en losa nervada: 200 K/m²

Paso 1: Se procede a calcular los pesos totales en la planta:

Peso de la losa nervada incluida tabiquería: 570 K/m²

Peso de la losa maciza incluida tabiquería: 750 K/m²

Peso de las columnas: 16 columnas • 3m • 0,4m • 0,4m • 2400K/m³ = 18.432K

Peso de las vigas s/x: 4 vigas • 22m • 0,4m • 0,6m • 2400K/m³ = 50.688K

Peso de las vigas s/y: 4 vigas • 16m • 0,3m • 0,5m • 2400K/m³ = 23.040K

El peso total de las vigas y columnas resulta 92.160 K, que si lo consideramos repartido uniformemente en las losas, resulta: 92.160K / 352 m² = 262 K/m²

El peso de la escalera en proyección horizontal lo podemos determinar a partir de la fórmula:

$$W_{ESC} = (c / 2 + e / \text{Cos}\alpha) \cdot 2400 \text{ K/m}^3 + 100 \cdot h / \text{Cos}\alpha + 100 \cdot (h+c) / h$$

Donde: e: espesor

h: huella

c: contrahuella

α : inclinación

Por lo tanto:

$$W_{ESC} = (0,17/2 + 0,20/\text{Cos}30^\circ) \cdot 2400 + 100 \cdot 0,30 / \text{Cos}30^\circ + 100 \cdot (0,30+0,17) / 0,30$$

$$W_{ESC} = 950 \text{ K/m}^2$$

Paso 2: A las cargas unitarias de las losas se agrega el 25% de la sobrecarga viva, resultando las siguientes cargas distribuidas unitarias:

Losa nervada: $W_{LN} = 570\text{K/m}^2 + 0,25 \cdot 200\text{K/m}^2 = 620 \text{ K/m}^2$

Losa maciza: $W_{LM} = 750\text{K/m}^2 + 0,25 \cdot 200\text{K/m}^2 = 875 \text{ K/m}^2$

Escalera: $W_{ESC} = 950\text{K/m}^2 + 0,25 \cdot 500\text{K/m}^2 = 1075 \text{ K/m}^2$

Vigas y columnas: $W_{VC} = 262 \text{ K/m}^2$

Paso 3: Para el cálculo del peso total y posición del centro de gravedad, se procede a dividir la planta en sectores:

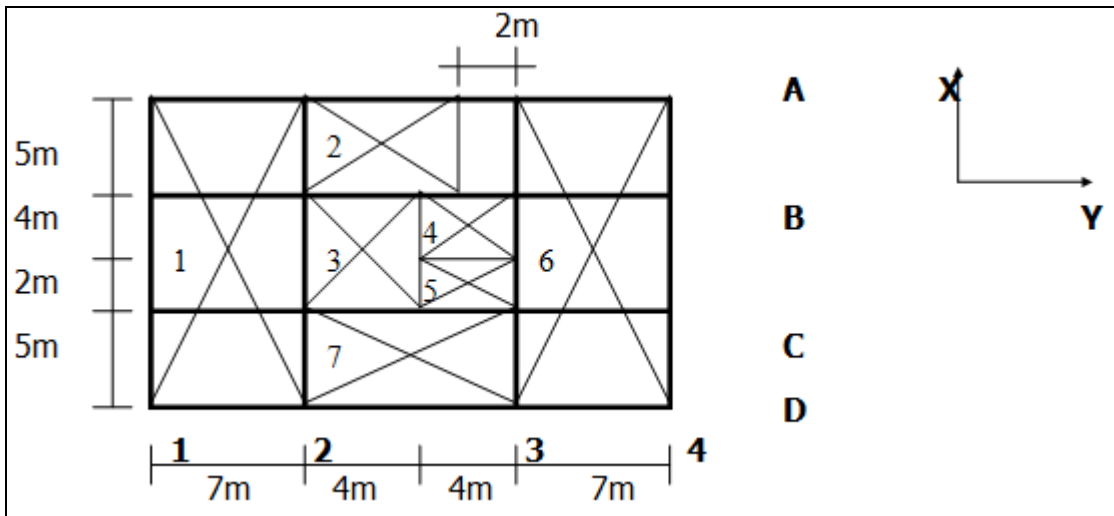


Figura 41: Planta dividida en sectores

En la siguiente tabla se indican los valores para el cálculo del centro de masa:

Zona	Area (m ²)	Sobrecarga (K/m ²)	Peso Pi (K)	Centro gravedad de Xi		Pi · Xi	Pi · Yi
1	112	$W_{LN} + W_{vc}$ = 892	99.904	3,5	5,5	349.664	549.472
2	30	$W_{LN} + W_{vc}$ = 892	26.760	10,0	13,5	267.600	361.260
3	24	$W_{LM} + W_{vc}$ = 1137	27.288	9,0	8,0	245.592	218.304
4	16	$W_{LM} + W_{vc}$ = 1137	18.192	13,0	9,0	236.496	163.728
5	8	W_{ESC} = 1075	8.600	13,0	6,0	111.800	51.600
6	112	$W_{LN} + W_{vc}$ = 892	99.904	18,5	5,5	1.848.224	549.472
7	40	$W_{LN} + W_{vc}$ = 892	35.680	11,0	2,5	392.480	89.200
	$\Sigma:342$		$\Sigma:316.328$			$\Sigma:3451856$	$\Sigma:1983036$

Peso total del piso: 316.328 K

Posición del centro de masa:

$$X_{CM} = (\Sigma Pi \cdot Xi) / \Sigma Pi = 3.451.856 / 316.328 = 10,91 \text{ m}$$

$$Y_{CM} = (\Sigma Pi \cdot Yi) / \Sigma Pi = 1.983.036 / 316.328 = 6,27 \text{ m}$$

9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

9.1. Arnal, Henrique y Barboza, Eudio (1992). *Diseño Antisísmico de Edificios*. Editorial Texto. Caracas, Venezuela.

9.2. Arnal, Henrique y Epelboim, Salomon (1985). *Manual para el Proyecto de Estructuras de Concreto Armado para Edificaciones*. Ministerio del Desarrollo Urbano, MINDUR. Caracas, Venezuela.

9.3. Taranath, Bungale (1988). *Structural Analysis and Design of Tall Buildings*. McGraw-Hill Company.

9.4. Torroja, Eduardo (1991). *Razón y Ser de los Tipos Estructurales*. Colección Textos Universitarios N° 13, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Instituto de Ciencias de la Construcción "Eduardo Torroja", Madrid, España.

10. SOBRE EL AUTOR

MOISES LEVY CARCIENTE, MSc. Ing.

Egresado de la Universidad Central de Venezuela como Ingeniero Electricista (1990), Ingeniero Civil (1993), y Magister Scientiarum en Ingeniería Eléctrica Opción Sistemas Digitales (1994).

Ha sido galardonado con premios de reconocimiento académico, profesional y tecnológico como: Orden José Félix Ribas, Premios de mejor rendimiento académico y Premio CEICA.

Fue miembro del personal docente y de investigación de la Universidad Central de Venezuela (1994-1998).

Ha participado en diversos eventos como ponente. Consultor de diversas corporaciones transnacionales.

En la actualidad se desempeña como asesor y director fundador de empresas de consultoría y gerencia de proyectos.

www.levymoises.com

levymoises@gmail.com