

CRITERIOS FUNDAMENTALES PARA EL DISEÑO SISMORRESISTENTE

MARIANELA BLANCO

Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Ciclo Básico
blanco.marianela@gmail.com

Recibido: agosto 2011

Recibido en forma final revisado: agosto 2012

RESUMEN

Los sismos representan uno de los factores que ocasionan mayor número de problemas que deben resolver los profesionales de la ingeniería civil. El presente trabajo se realiza con la finalidad de indicar algunas recomendaciones mínimas que deben ser tomadas en cuenta tanto por ingenieros como por arquitectos, para lograr un mejor desempeño de las edificaciones de concreto armado ante la presencia de sismos. Se realizó una investigación y recopilación de información sobre el comportamiento sismorresistente de algunas edificaciones a nivel mundial, analizando las causas de los daños y la posible solución para disminuirlos en un futuro. Se analizaron algunas recomendaciones indicadas en nuestro país y en otros países, tanto en las normas vigentes, como en experiencias previas, para resumirlas y darles un punto de partida a los profesionales para lograr un diseño sismorresistente. El objetivo principal del diseño sismorresistente es salvar vidas y, adicionalmente, minimizar los daños materiales. La responsabilidad de los ingenieros para lograr dichos objetivos depende del diseño estructural, estudio de suelos, supervisión de los materiales utilizados y los procesos constructivos adecuados.

Palabras clave: Sismorresistente, Riesgo, Amenaza, Vulnerabilidad, Estructuras.

FUNDAMENTAL CRITERIA FOR THE SEISMIC-RESISTANT DESIGN

ABSTRACT

Earthquakes are the factor to consider during the building's design, because they represent a big problem that the civil engineers have to solve. The following project was performed in order to indicate some recommendations to be taken in consideration by engineers and architects, to get a better performance of the reinforced concrete buildings during earthquakes. An investigation, about the seismic behavior of some buildings around the world, was performance to get the information and analyze the causes of damage of those structures and possible solutions to reduce the affectation in the future. Analyzed some recommendations in our country and other countries, considering current standards, as in previous experiences, to summarize and give them a starting point for professionals to achieve earthquake resistant design. The main objective of earthquake resistant design is to save lives and minimize further damage in structures and materials. The responsibility of engineers, to achieve these goals, depends on the structural design, soil survey, materials selection and appropriate construction processes.

Keywords: Seismic-Resistant, Risk, Threat, Vulnerability, Structures

INTRODUCCIÓN

Al examinar y analizar los daños sufridos por algunas estructuras luego de un evento sísmico, se puede concluir que los terremotos representan uno de los mayores problemas que deben considerar por los ingenieros. La vulnerabilidad de las estructuras depende de los posibles daños que puedan sufrir sus elementos estructurales más importantes ante un sismo, lo cual repercute en el comportamiento de todo el sistema.

El planteamiento del problema se basa en el riesgo, que depende de la amenaza y la vulnerabilidad ($\text{RIESGO} = \text{AMENAZA} \times \text{VULNERABILIDAD}$), al aumentar cualquiera de estos dos parámetros, o ambos a la vez, aumenta el riesgo de la estructura y resulta más difícil cumplir el objetivo de salvar vidas y propiedades. La incertidumbre es la principal característica del problema porque no se sabe cuándo y dónde va a ocurrir un sismo, tampoco su magnitud y duración. Cabe destacar que la contribución del sismo en las cargas puede controlar el

diseño estructural. Es muy importante tener en cuenta que mientras los esquemas “arquitectónicos – estructurales” se alejan más de los esquemas simples, las edificaciones son más castigadas por los sismos.

Lamentablemente, en muchos países las normas para el diseño Sismorresistente no son aplicadas en construcciones informales, lo cual repercute en elevar la vulnerabilidad de las estructuras. Al estudiar el comportamiento de edificaciones luego de un evento sísmico, se puede afirmar que cuando se toman en cuenta las normas de diseño sismorresistente, la construcción es debidamente supervisada y el sismo de diseño representa la amenaza sísmica real de la zona, los daños son considerablemente menores que en los casos en los cuales no se cumplen los requerimientos mínimos indispensables para tal fin. Sin embargo, es importante señalar que las normas sismorresistentes por sí solas no pueden garantizar la inexistencia de daños ante un terremoto severo, en ellas se establecen requisitos mínimos para proteger la vida de las personas que ocupan la edificación. El daño severo o el colapso de un gran número de estructuras durante sismos de alta intensidad, se debe a la falla de uno o varios elementos cuya ductilidad y resistencia no son suficientes.

Algunos de los daños encontrados en columnas de estructuras castigadas por los movimientos sísmicos pueden ser grietas diagonales causadas por cortante y/o torsión, grietas verticales y aplastamiento del concreto causados por compresión, pandeo de las barras longitudinales por exceso de distanciamiento de las ligaduras y pérdida del recubrimiento en todos los casos mencionados. En vigas se evidencian grietas diagonales y rotura del acero transversal causadas por cortante y/o torsión, grietas verticales, rotura del acero longitudinal y aplastamiento del concreto por flexión.

Las conexiones entre elementos estructurales son puntos críticos, aparecen grietas diagonales y fallas por adherencia entre el concreto y el acero, anclaje insuficiente del refuerzo longitudinal y esfuerzos excesivos de flexión. Las losas pueden presentar daños por punzonamiento alrededor de las columnas y grietas longitudinales perpendiculares al plano de flexión a lo largo de la placa, debido al exceso de flexión producida por el movimiento.

Las irregularidades de alturas de entrepisos, que repercuten en cambios bruscos de rigidez entre pisos adyacentes, hacen que la absorción y disipación de la energía al momento del sismo se concentre en los pisos flexibles, produciendo sobre-solicitación en los elementos estructurales.

Las irregularidades en planta, de masa, rigidez y resistencia, pueden originar torsión, lo cual genera esfuerzos adicionales difíciles de evaluar.

El objetivo principal del presente trabajo de investigación, es dar a los ingenieros que se inician en la profesión, un grupo de criterios mínimos necesarios para lograr diseños sismorresistentes adecuados. Sensibilizar a los arquitectos en cuanto a la enorme responsabilidad del ingeniero y a la imperiosa necesidad del trabajo en equipo, para lograr que las estructuras cumplan sus funciones, salvar vidas y minimizar los daños materiales. Es importante señalar que es responsabilidad del ingeniero profundizar su investigación, según sea el caso, para calcular y detallar adecuadamente cada uno de los elementos de la estructura.

METODOLOGÍA

En la primera etapa se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva de los aspectos relacionados con el tema. En la segunda etapa se realizó una clasificación de los posibles problemas estructurales que se pueden presentar debido a los sismos y, simultáneamente, se exponen las posibles soluciones para evitar los problemas planteados previamente.

PROBLEMAS DE CONFIGURACIÓN EN PLANTA

Son problemas referentes a la distribución del espacio y la forma de la estructura en el plano horizontal.

• LONGITUD EN PLANTA

La longitud en planta de una edificación, influye en la respuesta estructural ante la transmisión de ondas en el terreno producidas por el movimiento sísmico. A mayor longitud en planta empeora el comportamiento estructural, debido a que la respuesta de la estructura ante dichas ondas puede diferir considerablemente de un punto de apoyo a otro de la misma edificación. (Grases et al. 1987). Los edificios largos son más propensos a tener problemas debido a las componentes torsionales del movimiento del terreno (Figura 1).

Recomendación práctica: $L2 / L1 \leq 2.3$ (Cardona, 2004)

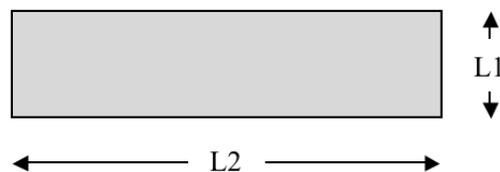


Figura 1. Planta de gran longitud.
(Fuente: Grases et al. 1987)

Para solucionar dicho problema se insertan juntas totales, de tal manera que cada una de las estructuras separadas se trate como una estructura corta (Grases et al. 1987). Estas juntas deben ser diseñadas para que no se produzcan choques entre las partes separadas, a consecuencia del movimiento independiente de cada una (Figura 2).



Figura 2. Recomendación: Insertar juntas totales.
(Fuente: Grases et al. 1987)

Recomendaciones prácticas:

- $L_{MAX} = 40$ metros
- $L2/L1 \leq 2.3$
- Si $L2/L1 > 2.3$, se recomienda insertar al menos una junta total

• **FORMA DE LA PLANTA**

La forma de la planta influye en la respuesta de la estructura ante la concentración de esfuerzos generada en ciertas partes, debido al movimiento sísmico. Los sitios más vulnerables son los ángulos de quiebre entre partes de la estructura, cuyo problema se puede resolver colocando apropiadamente las juntas totales mencionadas en el párrafo anterior. Algunos ejemplos de este caso y su posible solución se muestran a continuación (Figura 3):

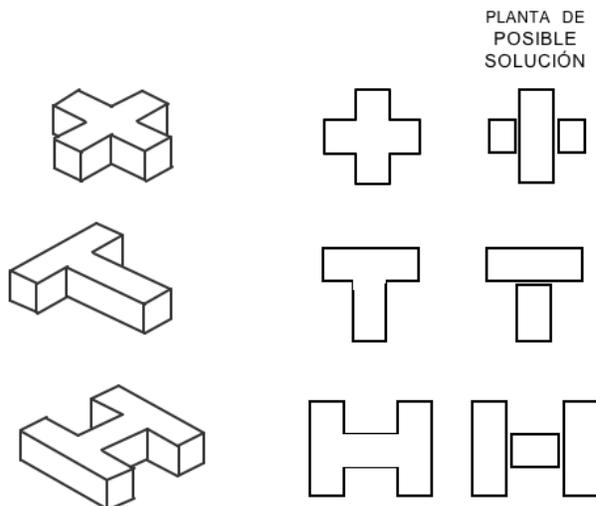


Figura 3. Ejemplos de plantas de forma irregular y su posible solución
(Fuente: Arnold & Reitherman, 1982)

Otras posibles soluciones para aminorar el problema son:

- Colocar elementos rigidizadores en las plantas en forma de "H" y "U" (Figura 4)



Figura 4. Solución con rigidizadores para plantas en forma de "H" y "U" (Fuente: Grases et al. 1987)

- Modificar ligeramente la sección para suavizar el ángulo en la zona de quiebre (Figura 5)



Figura 5. Ángulo modificado en la zona de quiebre en plantas de forma irregular.
(Fuente: Arnold & Reitherman, 1982)

Existen diversos criterios para considerar las plantas como regulares, basados en normativas de varios países, es importante señalar que es decisión del ingeniero cuan conservador va a ser su diseño (figura 6).

La Norma Venezolana COVENIN 1756:2001 (Edificaciones Sismorresistentes) establece la limitación del 40% para el coeficiente de longitudes, si no se presentan otras condiciones negativas. En las normas norteamericanas (FEMA, 1997; ICC, 2000) se limitan los salientes o entrantes en 15 % y las europeas (Eurocódigo 8, 1998) establecen 25 %. (Se recomienda revisar exhaustivamente la Norma Venezolana)

CRITERIO DE LA NORMA VENEZOLANA

Si $L1 < 0.4 L$, se puede considerar Planta regular.

CRITERIOS DE OTROS PAÍSES

- Criterio de la OPS (Organización Panamericana de la Salud), 2004.

Si $L1 < 0.2 L$, se puede considerar Planta regular

- CRITERIO EUROPEO

Si $L1 < 0.25 L$ se puede considerar como una planta regular. Esta consideración es aplicable a las plantas en forma de "E, T, L, H, entre otras.

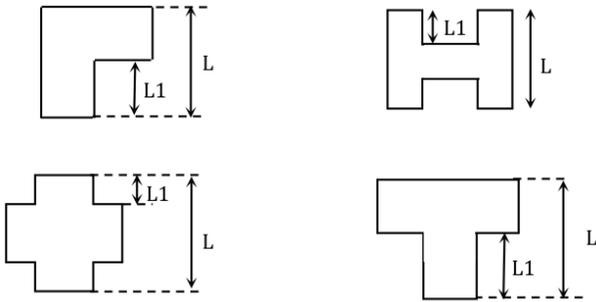


Figura 6. Plantas regulares

PROBLEMAS DE CONFIGURACIÓN VERTICAL

Son problemas referentes a las irregularidades verticales que al estar presentes en las edificaciones, ocasionan cambios bruscos de rigidez y masa entre pisos consecutivos, lo que se traduce en fuertes concentraciones de esfuerzos (Figuras 7 y 8). Deben evitarse, en lo posible, los escalonamientos y tratar que los cambios de un nivel a otro sean lo más suaves posibles, sobre todo en edificaciones tan importantes como hospitales y centros de salud. (Grases et al. 1987; Arnold & Reitherman, 1982)

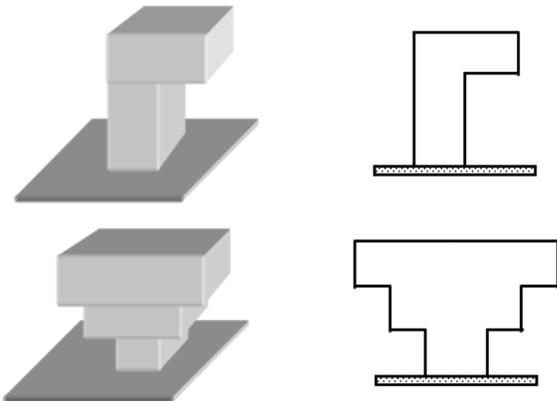


Figura 7. Irregularidades verticales.

(Fuente: Grases et al. 1987; Arnold & Reitherman, 1982)



Figura 8. Torre Balgres. Caràcas-Venezuela
(Fuente: www.area.com.pa/proyectos.php)

La Norma venezolana establece ciertos criterios para clasificar las estructuras como irregulares verticalmente (Figura 9). Las edificaciones con aumento vertical significativo de dimensiones y de masas, requieren un análisis espacial ya que presentan problemas por los efectos dinámicos debido a los sismos (Grases et al. 1987).

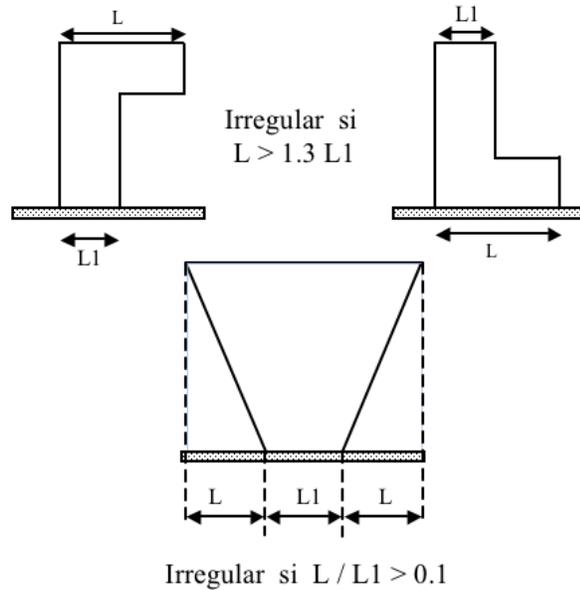


Figura 9. Irregularidades verticales: Criterios Norma Venezolana

PROBLEMAS DE CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL

Son problemas inherentes al propio diseño estructural, que influyen directamente en el comportamiento de la edificación a lo largo de su vida útil y repercuten en el desempeño ante un evento sísmico.

- CONCENTRACIONES DE MASA

Esto se refiere a problemas ocasionados por concentraciones de masa en algún nivel de la edificación, al colocar elementos de gran peso como equipos, tanques (Figura 10), piscinas, archivos, depósitos, entre otros. Debido al hecho de que el problema se agrava si dicha concentración se localiza en los pisos más elevados ya que a mayor altura, mayor aceleración sísmica de respuesta, se recomienda colocarlos en sótanos o en construcciones aisladas cercanas al edificio, para evitar el efecto de péndulo invertido (Cardona, 2004).



Figura 10. Tanques para agua en el techo de un hospital
(Fuente: Cardona, 2004)

• COLUMNAS DÉBILES

Las columnas son de vital importancia dentro del sistema estructural, debido a que transmiten las cargas a las fundaciones y mantienen al edificio en pie.

Si bien en el diseño sismorresistente se tolera cierto nivel de daños, se debe prever que si éstos aparecen es preferible que sea en las vigas y no en las columnas. En la viga se genera una falla “local” que afecta principalmente al piso afectado. En la columna la falla afecta a toda la estructura, pudiendo ocasionar el colapso de la misma. El diseño ideal es “Columna fuerte – Viga débil”, en el cálculo se debe verificar que el momento resistente total en la columna dividido entre el de las vigas sea mayor o igual a 1,20. En la Figura 11 se muestra un edificio en construcción, donde se evidencia un diseño inadecuado ya que las dimensiones de las columnas son significativamente inferiores a la altura de las vigas.



Figura 11. Diseño inadecuado:
“Columna débil – Viga fuerte”
(Fuente: EERI, 1999)

• COLUMNAS CORTAS

Al analizar y estudiar el comportamiento de edificaciones bajo la acción sísmica, se ha observado que algunas columnas presentan grietas a 45° (Figura 12), lo que indica una falla frágil. La columna diseñada como dúctil, se convierte en frágil y falla la zona no confinada. La falla se debe al hecho de que las columnas de un mismo nivel presentan similar desplazamiento lateral durante un sismo, sin embargo al ser las columnas cortas más rígidas absorben mucha más fuerza lateral (Bachmann, 2003).



Figura 12. Falla frágil: Columna corta y poco refuerzo transversal
(Fuente: Sezen et al. 2003)

Uno de los problemas podría ser por aumento de la fuerza cortante en la columna, que es igual a la suma de los momentos flectores de los extremos dividido entre la longitud libre. Si la longitud libre se ve disminuida, la fuerza cortante aumenta de manera inversamente proporcional. Es decir, que si la longitud libre se reduce en una tercera parte, la fuerza cortante aumenta tres veces (Figura 13).

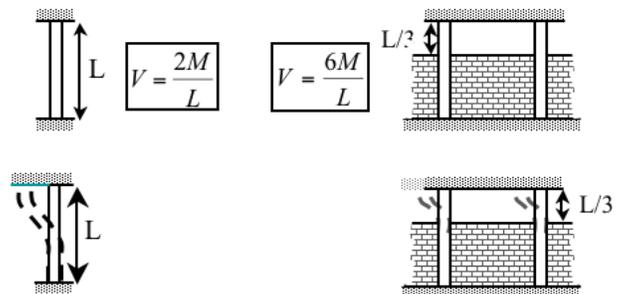


Figura 13. Ejemplo de Fuerza Cortante en Columnas Cortas

Este efecto puede ocurrir en los siguientes casos:

- Columnas con diferentes alturas libres en un mismo piso de una edificación. La fuerza cortante es mayor en las más cortas.
- Ubicación del edificio en terrenos inclinados.

- Disposición de losas en niveles intermedios.
- Confinamiento parcial lateral en la altura de la columna por paredes, muros divisorios o de fachada, entre otros, cuando las dimensiones de su sección transversal son pequeñas.
- Por la ruptura de una parte de la pared adyacente a la columna.

En la Figura 14 se muestra el excelente desempeño sismorresistente de una escuela antigua en Palpa-Perú, durante el sismo del 12 de noviembre de 1996, debido al adecuado confinamiento de las columnas. Gracias al ancho de las paredes adyacentes a las ventanas, se evitó el efecto de “columna-corta”.



Figura 14. Confinamiento adecuado de columnas.
(Fuente: Quiun, 2005)

• PISOS DÉBILES

Algunos sistemas arquitectónicos conllevan a la formación de pisos cuya rigidez y/o resistencia es significativamente menor que la del resto de los niveles, haciéndolos más vulnerables. Esto se puede atribuir a la diferencia de altura entre pisos consecutivos (Figuras 15, 16 y 17) o a la ausencia de algún elemento estructural. La ausencia o falta de continuidad de columnas, ha sido una causa de muchos colapsos de estructuras sometidas a movimientos sísmicos. (Grases et al. 1987; Arnold & Reitherman, 1982)

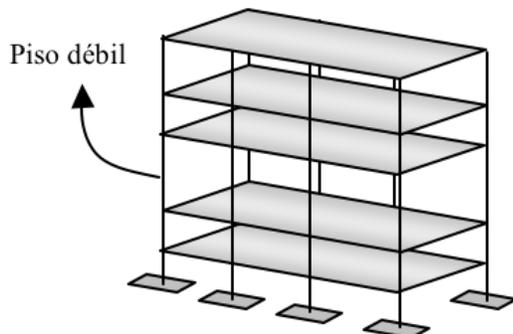


Figura 15. Ejemplo de Piso Débil



Figura 16. Colapso del quinto piso. (Débil)
(Fuente: Vyacheslav, 2004)



Figura 17. Desplazamiento lateral y ruptura de columnas
(Fuente: Arslan & Korkmaz, 2006)

• EXCESIVA FLEXIBILIDAD ESTRUCTURAL

En el diseño debe garantizarse que la edificación resista los efectos del movimiento sísmico, y también minimizar los daños en elementos no estructurales, juntas, escaleras, entre otros, debido a los desplazamientos laterales. Las edificaciones excesivamente flexibles, son más susceptibles a sufrir grandes desplazamientos laterales entre niveles consecutivos, por el movimiento debido a fuerzas sísmicas. A dichos desplazamientos relativos se les conoce como “deriva” y deben ser controlados en el diseño según las especificaciones normativas. (Grases et al. 1987; Arnold & Reitherman, 1982)

Las principales causas de la flexibilidad estructural son:

- Excesiva distancia libre entre elementos verticales (lucos o vanos)
- Altura libre entre niveles consecutivos
- Poca rigidez de elementos verticales
- Discontinuidad de elementos verticales (Figuras 18 y 19)

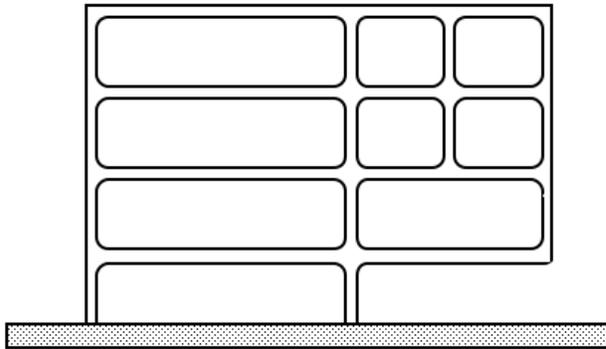


Figura 18. Ejemplos de discontinuidad vertical



Figura 19. Colapso de cornisa en Hotel Radisson.
Terremoto de Quillahua – Chile (2007)

(Fuente: <https://listas.us.es/mailman/listinfo/enciclo>)

• EXCESIVA FLEXIBILIDAD DE DIAFRAGMAS

Una configuración estructural adecuada se logra, entre otras consideraciones, conectando las líneas resistentes con diafragmas rígidos, para lograr deformaciones uniformes (Figura 20). Es importante resaltar que considerar rígidos los diafragmas representa una hipótesis de cálculo. El comportamiento flexible del diafragma se debe a las siguientes razones:

- Material inadecuado o espesor insuficiente.
- Este tipo de elementos trabaja a flexión en su plano y sus deformaciones laterales pueden aumentar significativamente, si la relación entre el largo y el ancho del diafragma es mayor a 5.
- Si el diafragma presenta aberturas para iluminación, ventilación, entre otras, cuya área sea mayor al 20 % del área total, se pueden presentar dentro de él zonas flexibles que afectan la conexión rígida entre elementos verticales. Una forma de solucionar este problema es colocar adecuadamente elementos rigidizadores en las aberturas.

En la Norma Venezolana: COVENIN 1756-1:2001 “Edificaciones Sismorresistentes”, se especifica que un diafragma se considera flexible cuando:

- La rigidez en su plano sea menor a la de una losa equivalente de concreto armado de 4 cm. de espesor y la relación largo/ancho no sea mayor que 4,5.
- Un número significativo de plantas tenga entrantes cuya menor longitud exceda el cuarenta por ciento (40 %) de la dimensión del menor rectángulo que inscribe a la planta, medida paralelamente a la dirección del entrante; o cuando el área de dichos entrantes supere el treinta por ciento (30 %) del área del citado rectángulo circunscrito.
- Las plantas presenten un área total de aberturas internas que rebasen el veinte por ciento (20 %) del área bruta de las plantas.
- Existan aberturas prominentes adyacentes a planos Sismorresistentes importantes o, en general, cuando se carezca de conexiones adecuadas con ellos.
- En alguna planta el cociente largo/ancho del menor rectángulo que inscriba a dicha planta sea menor que 5.

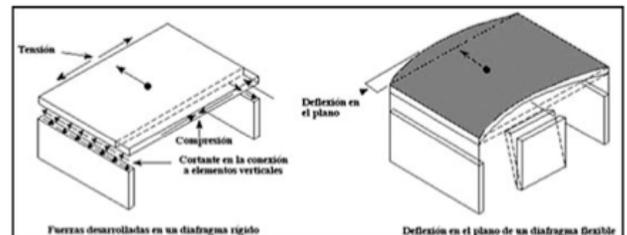


Figura 20. Comportamientos, rígido y flexible del diafragma (Fuente: Cardona, 2004)

• COLUMNAS NO ALINEADAS

Cuando varias de las columnas no están alineadas con los ejes predominantes de la estructura, se dice que no existe claridad estructural (Figura 21).

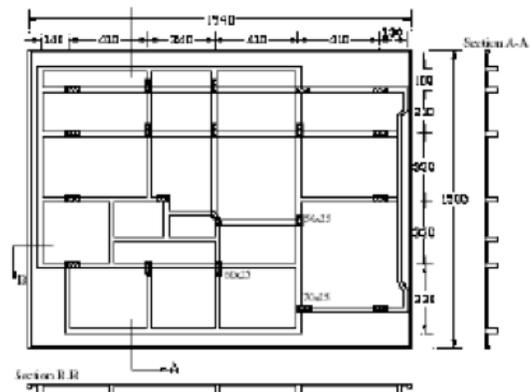


Figura 21. Planta de edificio irregular Columnas no alineadas (Fuente: EERI, 1999)

Esto impide que se puedan determinar con mayor precisión las acciones sobre los elementos de la estructura. Además se introducen efectos secundarios en el diafragma, que producen agrietamiento por concentración de esfuerzos (Arnold & Reitherman, 1982).

• **DIRECCIÓN POCO RESISTENTE A FUERZAS HORIZONTALES**

En general debe alternarse la orientación de los elementos verticales, para que las rigideces laterales sean similares (Figura 22), (Grases et al. 1987).

Cuando la menor dimensión de todas o la mayoría de las columnas rectangulares de una edificación se encuentran orientadas en la misma dirección, ésta es poco resistente a fuerzas horizontales debido a sismo (Figura 23 y 24).

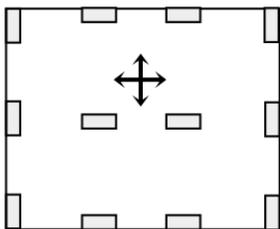


Figura 22. Rigideces laterales similares.

Dos planos resistentes a sismo

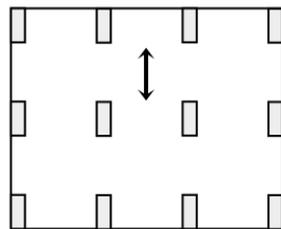


Figura 23. Rigideces laterales distintas.

Un solo plano resistente a sismo



Figura 24. Dirección poco resistente a fuerzas laterales debidas a sismos
(Fuente: Sezen et al. 2003)

• **TORSIÓN**

La torsión ha sido la causa de importantes daños y, en algunos casos, colapso de edificaciones sometidas a fuertes movimientos sísmicos. Se presenta por la excentricidad entre el centro de masa y el centro de rigidez. Cuando en una configuración, el centro de masa coincide con el centro de rigidez, se dice que existe simetría estructural. A medida de que el edificio sea más simétrico, se reducirá su tendencia a sufrir concentraciones de esfuerzos y torsión, y su comportamiento ante cargas sísmicas será menos difícil de analizar y más predecible.

La simetría va desde la geometría de la forma exterior, hasta las distribuciones internas de elementos resistentes y componentes no estructurales. En los casos donde existen muros, núcleos de ascensores o tabiquería, hacia un lado de la edificación, el centro de rigidez se desplaza en esa dirección. Debido a esto se generan deformaciones no previstas en el cálculo estructural (Figura 25), (Grases et al. 1987)

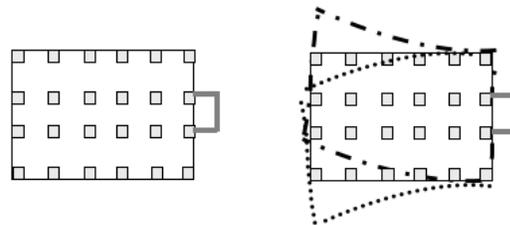


Figura 25. Núcleo de Muros excéntricos → Posible deformación por Torsión debida a la excentricidad

A continuación se muestran algunos ejemplos y su posible solución (Figura 26) (Bachmann, 2003; Grases et al. 1987):

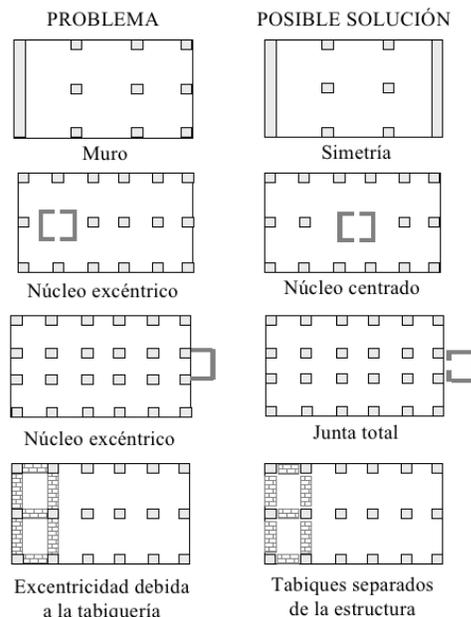


Figura 26. Torsión: Problema - Posible Solución
(Fuente: Bachmann, 2003; Grases et al.1987)

La Figura 27 muestra el edificio Miramar en la ciudad de Cumaná-Venezuela. Edificio de concreto armado de 8 pisos, con muros muy rígidos en el núcleo de escaleras y ascensor ubicado a un lado de la estructura. La planta se muestra en la Figura 28. Debido a la excentricidad entre el centro de masa y de rigidez, se produjo un efecto de torsión, que al sumarse con otros problemas presentes en la edificación, ocasionó el colapso de la misma, durante el terremoto de Cariaco-1997 (Figura 29), (Hernández & López, 2007)



Figura 27. Edificio Miramar -Cumaná, antes del terremoto de 1997 (Fuente: Hernández & López, 2007)

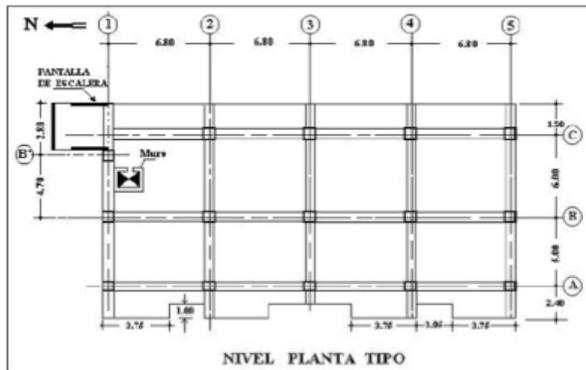


Figura 28. Planta del edificio Miramar. (Fuente: Hernández & López, 2007)



Figura 29. Edificio Miramar -Cumaná, después del terremoto de 1997 (Fuente: Hernández & López, 2007)

• TRANSICIÓN EN COLUMNAS

Cuando columnas de niveles adyacentes varían bruscamente de forma, se generan grandes esfuerzos y se presentan problemas de discontinuidad del acero longitudinal, ocasionando fallas en los nodos.

En las fotografías mostradas se puede observar que la columna del piso superior es de sección rectangular y su acero longitudinal se encuentra por fuera de columna inferior, que es de sección circular (Figura 30). El problema de transición generó una articulación en el nodo, incapaz de transmitir momentos, lo cual convirtió la estructura en inestable ante cargas laterales. También se puede apreciar una falla por cortante en la columna superior.



Figura 30. Problema de San Fernando California 1971. Transición de columna (Fuente: Bertero, 1971)

• AUSENCIA DE VIGAS

Los sistemas estructurales formados por losas y columnas (sin vigas), presentan un pobre desempeño ante eventos sísmicos. La columna actúa como un punzón ocasionando daños severos en la losa. En la Figura 31 se muestran estructuras ubicadas en Kocaeli-Turkía, dañadas en el sismo del agosto de 1999. Los sistemas presentan losas de espesores entre 8 y 12 cm y vanos (luz libre) mayores a 4 m (EERI, 1999).



Figura 31. Ausencia de Vigas (Fuente: EERI, 1999)

- **POCA CUANTÍA DE REFUERZO TRANSVERSAL**

La función del refuerzo transversal, estribo o ligadura, es soportar fuerzas cortantes, garantizar el adecuado confinamiento del concreto e impedir el pandeo del refuerzo longitudinal. Cuando se presenta mal armado del refuerzo transversal, el diámetro de la cabilla es insuficiente o están muy separadas, se evidencian daños en los elementos estructurales.

Los ganchos en los extremos de los estribos deben tener un ángulo mayor o igual a 135° (Figura 32), para lograr un amarre adecuado. Cuando el ángulo del gancho es a 90° (Figura 33), éste puede abrirse con el movimiento sísmico (COVENIN, 1985).



Figura 32. Ganchos en estribos adecuados



Figura 33. Ganchos en estribos inadecuados

En la Figura 34 se observa que las columnas fallaron debido a la poca cuantía volumétrica de acero transversal lo que implicó falta de confinamiento. Es imprescindible prestar suficiente atención al refuerzo transversal en las juntas, acatando las recomendaciones indicadas en las normas. La separación de las barras determina el confinamiento del concreto y el adecuado comportamiento de las juntas ante un evento sísmico.



Figura 34. Falta de acero transversal
(Fuente: D'Ayala et al. 2003)

En la Figura 35 se observa que se evitó el colapso de la estructura gracias al refuerzo transversal en la junta.



Figura 35. Acero transversal en junta
(Fuente: Sezen et al. 2003)

- **FUNDACIONES INADECUADAS**

Las fundaciones de una edificación son las bases sobre las cuales ésta se apoya de forma adecuada y estable sobre el terreno. Es imprescindible, para toda obra de ingeniería, realizar un estudio de suelos por expertos en el área. Dicho estudio dependerá de la altura, peso y uso de la edificación. Evidentemente, escoger el tipo de fundación adecuado dependerá de las características de la estructura, del estudio de suelos y la actividad sísmica probable de la zona.

El sistema de fundación deberá ser capaz de transferir al suelo las acciones sísmicas y gravitatorias, sin que supere la capacidad portante de éste, correspondiente al nivel de excitación sísmica previsto y sin que se produzcan movimientos relativos entre los elementos de fundación que puedan originar deformaciones inaceptables en la estructura. Los desplazamientos relativos que eventualmente pueden sufrir los distintos elementos de fundación, deberán ser tales que no comprometan la estabilidad y funcionalidad de la estructura. Cada uno de los bloques estructuralmente independientes de una construcción, tendrá un sistema de fundación único (homogéneo). No se admitirán sistemas diversos dentro de una misma unidad, por ejemplo: algunas columnas sobre pilotes y otras sobre fundaciones directas.

Los apoyos de la estructura deben vincularse entre sí mediante un sistema de riostras o losa que asegure el movimiento conjunto de todos los elementos. Esto con la finalidad de evitar apreciables desplazamientos diferenciales entre ellos que impliquen deformaciones adicionales a la estructura. En la Figura 36 se muestra el volcamiento de un edificio cuya fundación superficial resultó inadecuada al momento del sismo.



Figura 36. *Fundación Superficial*
(Fuente: redbpncivil.blogspot.com)

PROBLEMAS COLATERALES

• CHOQUE ENTRE EDIFICACIONES

Esto ocurre cuando el movimiento de un edificio, durante el sismo, queda impedido por otro muy cercano y, en general, más rígido. Al chocar se generan fuerzas cortantes en las columnas golpeadas. Es conveniente crear amplias juntas totales entre edificios de diferentes alturas, para que puedan oscilar de forma distinta durante un movimiento sísmico y evitar así el choque violento entre ellos.

Se debe impedir que edificios de diferentes alturas puedan estar juntos y a partir de cierta altura, éstos deben estar aislados. Otra causa del problema es cuando edificios cercanos presentan alturas distintas de entrepisos o niveles distintos de pisos (Figura 37).



Figura 37. *Choque entre edificios. Ciudad de México.*
(Fuente: www.proteccioncivil.org (1985))

Durante el sismo de México (1985), el edificio de concreto armado de la izquierda colapsa luego de golpear al edificio antiguo de la derecha (Figura 38). El edificio de la derecha es más rígido que el otro construido recientemente.



Figura 38. *Choque entre edificaciones. Terremoto de México 1985* (Fuente: [Bachmann, 2003](#))

• EFECTOS INDIRECTOS

Los efectos locales indirectos como licuefacción, asentamientos, deslizamientos y avalanchas, pueden ser causa de importantes daños en estructuras, ocasionando en muchos casos pérdidas humanas. La licuefacción es un fenómeno que se produce en terrenos blandos saturados de agua, durante movimientos sísmicos fuertes y prolongados. Debido a las vibraciones sísmicas, el suelo se comporta como un fluido. Las edificaciones se hunden y/o vuelcan bajo los efectos de la licuefacción.

Las zonas propensas a que ocurra este fenómeno son aquellas sobre depósitos sedimentarios, lechos fluviales, rellenos artificiales, entre otros, donde el nivel freático es superficial. Es importante volver a mencionar, que es imprescindible para toda obra de ingeniería, realizar un estudio de suelos por expertos en el área. La Figura 39 muestra edificios parcialmente hundidos y volcados por los efectos de la licuefacción del terreno en el sismo de Nigata-Japón, del 16 de junio de 1964. Se puede observar que las edificaciones, como tales, no sufrieron daños estructurales, debido a su gran rigidez y seguramente buen diseño sismorresistente.



Figura 39. *Licuefacción. Nigata-Japón-1964*
(Fuente: facingyconst.blogspot.com/2007/08/daos)

Media planta del edificio se hundió (Figura 40), debido al fenómeno de licuefacción, durante el sismo de septiembre de 1985 en México.



Figura 40. Licuefacción. México - 1985
(Fuente: facingyconst.blogspot.com/2007/08/daos)

- **CALIDAD DE LOS MATERIALES Y PROCESOS CONSTRUCTIVOS**

Como se ha mencionado anteriormente, cumplir con las normas sismorresistentes vigentes, no es suficiente para garantizar el buen desempeño de las obras de ingeniería. La calidad de los materiales utilizados y el adecuado proceso constructivo, son fundamentales para que el comportamiento de la edificación sea lo más cercano al de diseño. Se han encontrado casos de obras muy cercanas en las cuales solo una de ellas falla. Si el diseño y el suelo son idénticos, la falla y en algunos casos el colapso, puede atribuirse a materiales que no cumplan las especificaciones y/o procesos constructivos deficientes.

La Figura 41 muestra el colapso de un edificio de seis pisos gemelo con otro, que sufrió daños leves durante el mismo sismo. En la investigación posterior se detectó, que lo ocurrido se debió a la mala calidad de los materiales utilizados y procesos constructivos.



Figura 41. Licuefacción. México - 1985
(Fuente: facingyconst.blogspot.com/2007/08/daos)

La Figura 42 muestra el caso de dos edificios similares en construcción, donde uno de ellos colapsa durante el sismo de Kocaeli-Turkía-agosto 1999, dañando severamente una columna del otro. El edificio se mantiene en pie, lo que permitiría un estudio posterior para analizar la factibilidad de recuperación.

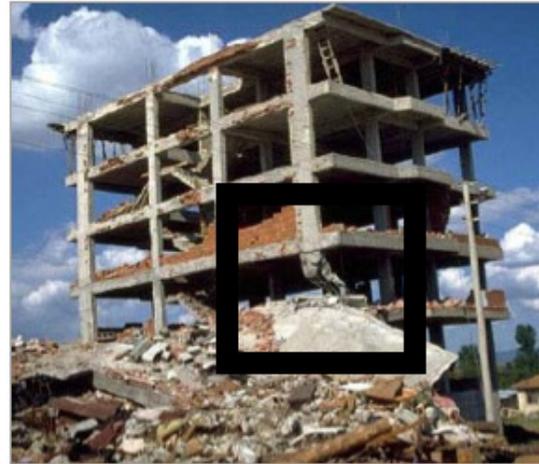


Figura 42. Daño severo en columna
(Fuente: Arslan & Korkmaz, 2006)

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De la investigación realizada se puede concluir que muchos de los daños de importancia en edificios públicos y de viviendas, han sido consecuencia de deficientes o inexistentes estudios de suelos, mala calidad de los materiales, inadecuado diseño arquitectónico y estructural, deficiencia en los sistemas constructivos y supervisión de las obras.

Debido al hecho que los sismos no pueden evitarse, se deben tomar todas las medidas pertinentes para evitar al máximo la pérdida de vidas y minimizar los daños materiales.

Acatar las recomendaciones de lo que debe hacerse antes, durante y luego de un evento sísmico. En el caso de presentarse el diseño de una edificación irregular, es imprescindible asesorarse con los profesionales expertos en el área. Es necesario obtener información sobre desempeño Sismorresistente de edificaciones similares.

GLOSARIO

DUCTILIDAD: Capacidad que tiene el material de seguir deformándose más allá de su límite elástico sin romperse (zona de deformación plástica).

EPICENTRO: Proyección vertical del foco sobre la superficie terrestre.

ESFUERZO: Valor que mide la fuerza por unidad de área sobre una superficie.

FOCO: Punto en el interior de la tierra donde se produce el sismo.

INTENSIDAD DE UN SISMO: Mide el grado de destrucción que los sismos causan en la zona afectada.

JUNTA TOTAL: Esaquella junta que separa estructuralmente la edificación. Cada parte es una estructura independiente de la otra.

MAGNITUD DE UN SISMO: Medida utilizada para estimar la energía liberada por los sismos.

PREMONITORES: Sismos previos a un evento sísmico importante.

RÉPLICAS: Sismos que ocurren después de un evento sísmico importante.

SISMÓGRAFO: Instrumento que se utiliza para medir sismos.

SISMOGRAMA: Representación gráfica generada por el sismógrafo.

SISMORRESISTENTE: Estructura capaz de soportar un sismo sin sufrir daños considerables.

VULNERABILIDAD SÍSMICA: Parámetro que nos indica lo propensa que es una construcción a sufrir daños por efecto de un sismo. Se mide por el daño que puede causar un sismo a una construcción. La vulnerabilidad está en función del tipo de construcción y del estado de degradación de la

edificación.

REFERENCIAS

ARNOLD C. & REITHERMAN R. (1982). *Building Configuration Seismic Design*. Canada

ARSLAN M. & KORKMAZ H. (2006). What is to be learned from damage and failure of reinforced concrete structures during recent earthquakes in Turkey? Artículo de investigación original Ingeniería Análisis de Fallas, Volumen 14, Número 1, enero de 2007, páginas 1-22. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2006.01.003>, [Consulta: 2008 y 2009]

BACHMANN H. (2003). *Seismic Conceptual Design of Buildings – Basic principles for engineers, architects, building owners, and authorities*. www.admin.ch [Consulta: 2009]

BERTERO V. (1971) NISEE University of California, Berkeley. www.nisee.berkeley.edu [Consulta: 2008 y 2009]

CARDONA, O. (2004) *Fundamentos para la mitigación de desastres en establecimientos de salud* (2ª ed). Washington, D.C. Organización Panamericana de la Salud. www.paho.org/desastres [Consulta: 2008 y 2009]

COVENIN 1756:2001. Norma Covenin. “Edificaciones Sismorresistentes”. Fondonorma, Caracas.

COVENIN. (1985). “Estructuras de Concreto Armado para Edificaciones” Norma Venezolana 1753, Caracas.

D’AYALA D., DOYLE, P., SPENCER, R. (2003). *Performance of Buildings*. Cap. 5. Earthquake Engineering Field Investigation Team. London

EERI, (1999). *Earthquake Engineering Research Institute, Earthquake Spectra, Supplement a to volume 16t, August 17, 1999, Kocaeli (Izmit), Turkey*. Earthquake.

EUROCÓDIGO 8 (1998). *Disposiciones para el proyecto de estructuras sismorresistentes: Norma Europea Experimental; Comité Europeo de Normalización, Bruselas; Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid*, <http://www.cenorm.be>; <http://www.aenor.es> [Consulta: 2008 y 2009].

FEMA (1997). *NEHRP Recommended Provisions for the Development of Seismic Regulations for New Buildings*:

FEMA 302. (National Earthquake Hazard Reduction Program), Building Seismic Safety Council, Federal Emergency Management Agency; Washington D.C.; <http://www.fema.gov/>; <http://www.bssconline.org/pubs/> [Consulta: 2008 y 2009]

GRASES J., LÓPEZ, O., HERNÁNDEZ, J. (1987). Edificaciones Sismorresistentes: Manual de aplicación de las normas. Fundación Juan José Aguerrevere. FONDUR. Caracas.

HERNÁNDEZ, J. & LÓPEZ, O. (2007). Investigación de respuestas sísmicas críticas incorporando la torsión accidental. Boletín Técnico ISSN 0376-723X IMME v.45 n.3. www.scielo.org.ve [Consulta: 2008 y 2009].

ICC, 2000. International Building Code, International Code Council, Inc., BOCA, ICBO, SBCCI, Birmingham, AL., U.S.A. www.intlcode.org

ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD. (2004). Fundamentos para la mitigación de desastres en establecimientos de salud (2ª ed). www.paho.org/desastres [Consulta: 2008 y 2009]

QUIUN, D. (2005). Reforzamiento Sísmico de la Infraestructura Educativa. Lima.

SEZEN, H., WHITTAKER, A., ELWOOD, K., MOSALAM, K. (2003). Performance of Reinforced Concrete Buildings during the august 17, 1999 Kocaeli, Turkey, and seismic design and construction practice in Seismic Turkey. www.sciencedirect.com

VYACHESLAV, Z. (2004). Los terremotos y sus peligros: ¿Cómo sobrevivir a ellos? Universidad de Colima, México. books.google.co.ve [Consulta: 2008 y 2009]

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

www.area.com.pa/proyectos.php [Consulta: 2008 y 2009]

<https://listas.us.es/mailman/listinfo/enciclo> [Consulta: 2008 y 2009]

redbpncivil.blogspot.com [Consulta: 2008 y 2009]

www.proteccioncivil.org [Consulta: 2008 y 2009]

facingyconst.blogspot.com/2007/08/daos [Consulta: 2008 y 2009]