

ANÁLISIS DE LAS PRINCIPALES CAUSAS DE DAÑO ESTRUCTURAL DURANTE TERREMOTOS

Luis Alejandro Carvajal Soto

*Especialista e Investigador en Ingeniería Estructural e Ingeniería Sísmica
Costa Rica*

*luis@carvajalvado.com, Carvajal & Vado Ing.-Arq. S.A, Director Técnico e Investigación
lcarvajal@ardsa.net, A.R.D, Asesoría en Riesgos y Desastres S.A, Director Técnico e Investigación*

RESUMEN

El riesgo de una obra de infraestructura a colapsar por un terremoto está en función de la Amenaza Sísmica, su Vulnerabilidad Sísmica y su Capacidad Sismo-resistente; El primer factor (Amenaza Sísmica) por su naturaleza es imposible de controlar por el ser humano, el segundo factor (Vulnerabilidad Sísmica) en algunas ocasiones podemos tomar acciones para reducirla y el tercer factor (Capacidad Sismo-resistente), está en manos de todos los que estamos involucrados en el proyecto de toda obra de infraestructura.

Los daños ocasionados por terremotos, permiten evidenciar causas que ponen en manifiesto la importancia del papel tomado por la Capacidad Sismo-resistente de la obra, en relación al adecuado desempeño estructural durante el evento sísmico y por tanto en la reducción del riesgo de que la obra colapse.

Se insta a realizar sobre las obras existentes, diagnósticos estructurales y estudios de evaluación estructural, para detectar deficiencia en su Capacidad Sismo-resistente y poder actuar sobre ellas antes de la ocurrencia de un evento sísmico que ponga en peligro su integridad.

INTRODUCCIÓN

La capacidad sismo-resistente de una obra, juega un papel muy importante en la determinación del riesgo a colapsar ante un evento sísmico; para ello se considera la siguiente relación básica de riesgo aplicada al colapso durante un terremoto:

$$R = A * V / C \quad [\text{ec.1}]$$

En donde:

R = Riesgo a colapsar.

A = Amenaza Sísmica

V = Vulnerabilidad Sísmica

C = Capacidad Estructural Sismo-resistente

La **amenaza sísmica** es el evento sísmico como tal, el cual, en zonas identificadas como áreas sísmicas representan el factor de mayor consideración en la expresión anterior. El tamaño de la amenaza en un sitio específico

depende de varias variables, de las cuales se resaltan la cercanía a la fuente sísmica y la propagación y atenuación de las ondas sísmicas a través del manto superior y la corteza terrestre.

Se considera la **vulnerabilidad sísmica** como la suma de aquellos factores que modifican la intensidad de la amenaza, tales como las condiciones locales del suelo: *efecto de sitio* (Hernández, 2009), topografía y la susceptibilidad a la licuefacción de suelos granulares. Estos factores han mostrado ser determinantes en el nivel de afectación en un sitio específico durante un terremoto.

En el caso del terremoto de Honduras en 2009, Mw:7.3, fue posible encontrar evidencias de la ocurrencia de *efecto de sitio*, ya que sitios cercanos entre sí presentaron distintos niveles de daño en las estructuras, dentro de las cuales, obras con capacidad reducida y sensibles a ser afectadas estructuralmente por un sismo de esa categoría no sufrieron daños apreciables. Las Figuras 1 y 2, muestran imágenes que evidencian la posible ocurrencia de este efecto en algunos sectores de San Pedro de Sula, Honduras.



Figura 1.- Estructura notablemente dañada-Honduras. (Tomada de Carvajal, 2011)

La intensidad del movimiento sísmico es influenciada también por la topografía del sitio, en donde efectos de atenuación o amplificación son evidentemente marcados en zonas localizadas en valles, crestas, bordes de valles, planicies y taludes.



Figura 2.- Estructura irregular sin daños apreciables-Honduras. (Tomada de Carvajal, 2011)

Los terremotos de Costa Rica (Cinchona 2009, Mw. 6.2 y Nicoya 2012, Mw. 7.6) son muestra del incremento de la intensidad en zonas conformadas por taludes con pendientes pronunciadas o sitios ubicados en zonas con topografía irregular (Barquero, 2009). Además, sitios con pendientes pronunciadas dependerán de la estabilidad propia del talud, el cual durante un evento sísmico estará sometido a aceleraciones horizontales y verticales que darán origen a fuerzas inerciales, que podrían provocar su inestabilidad y desprendimiento, y con ello la afectación de las obras que ahí se ubiquen. La Figura 3, muestra uno de los casos ocurridos en Cinchona, Costa Rica en el 2009.



Figura 3.- Incremento de intensidad por irregularidades topográficas-Costa Rica. (Tomada de Carvajal, 2011)

De igual forma, las arenas finas y sueltas, uniformemente graduadas y con presencia de nivel freático alto, son susceptibles a sufrir licuefacción y afectar el sistema de

cimentación, pudiendo así, provocar el hundimiento total o parcial del área de cimentación. La Figura 4, muestra el caso del puente La Democracia en la ruta San Pedro de Sula - El Progreso en Honduras, el cual se vio afectado en primera instancia por el giro de sus bastiones debido a la licuefacción que sufrieron las arenas donde éste se cimenta y luego por el escaso ancho de la meseta de apoyo de su tramo central, el cual ante el giro y su pérdida de apoyo cayó completamente al río (Figura 5).



Figura 4.- Afectación debido a la licuefacción de las arenas soportante-Honduras. (Tomada de Carvajal, 2011)



Figura 5.- Colapso total del tramo central del puente La Democracia producto del giro de sus bastiones y de la corta meseta de apoyo-Honduras. (Tomada de Carvajal, 2011)

Las variables mencionadas anteriormente están relacionadas con la dinámica del suelo, las cuales mediante la interacción suelo-estructura llegan a manifestarse en la obra a través de su propia dinámica estructural, mostrando así su respuesta final (Carvajal, 2011)

Por su parte, la **capacidad sismo-resistente**, juega un papel fundamental desde el punto de vista de desempeño durante un evento

sísmico. Es en este aspecto donde la ingeniería tiene su mayor actuación.

Se identifica también la participación conjunta de tres partes involucradas (Carvajal, 2011): el dueño del Proyecto (para no escatimar la realización de estudios técnicos preliminares), el equipo técnico de diseño y supervisión (para el análisis, diseño y seguimiento conforme las exigencias de códigos modernos y actualizaciones) y finalmente las Instituciones reguladoras de la actividad constructiva del país (para velar por el cumplimiento de los requerimientos establecidos en los códigos de diseño). Cabe destacar que esto no es únicamente aplicable a obras nuevas, sino también a obras existentes, especialmente aquellas obras esenciales para la población o de alta probabilidad de ocupación durante un evento sísmico.

Es precisamente en este último aspecto en donde se concentra la atención del presente trabajo, el cual tiene como objetivo analizar algunas causas de daño estructural (dadas durante la ocurrencia de los terremotos estudiados), para que éstas sean consideradas en el diseño de obras nuevas y en especial, en la evaluación sismo-resistente de obras existentes, las cuales son y seguirán siendo mayoría en ocupación durante varias décadas más.

CAUSAS DE DAÑO ESTRUCTURAL DURANTE TERREMOTOS

Partiendo de los daños estudiados *in situ* por el autor después de los terremotos ocurridos en: Managua-1972 (evidencias existentes), Costa Rica-2009, Honduras-2009, Haití-2010, Chile-2010, Japón-2011 y recientemente Costa Rica-2012, se ha logrado identificar una serie de causas que ponen en manifiesto la importancia de la capacidad estructural dentro de la reducción del riesgo (ec.1).

Las causas de daño identificadas han sido clasificadas de la siguiente manera:

- Por **Diseño**, relacionada con la estructuración empleada.

- Por **Construcción**, relacionada con las prácticas constructivas y de supervisión.
- Por **Seguimiento y Control** por parte de las autoridades reguladoras de la actividad constructiva.

Claro está, que pueden existir otras causas más y además cada una de ellas se podría clasificar según sus distintos orígenes. Sin embargo, las listadas y analizadas en este trabajo han sido consideradas como las de mayor impacto en los daños identificados.

Causas por Diseño

Las Causas de daño por diseño tienen origen desde que el proyecto fue concebido tanto arquitectónicamente como estructuralmente, tales causas producen durante un terremoto el aumento o concentración de esfuerzos en elementos con capacidad estructural limitada, que después de varios ciclos de carga generan la falla en éstos, desencadenando nuevas concentraciones de esfuerzos en otros elementos, provocando así una serie de daños locales que llegan a poner en peligro la estabilidad global de la obra.

En los sitios estudiados post terremoto fue posible encontrar las siguientes causas de daño por diseño:

- *Irregularidad Estructural*
- *Columna Corta.*
- *Piso Débil.*
- *Viga Fuerte – Columna Débil.*
- *Capacidad Estructural Insuficiente.*

Irregularidad Estructural: La correcta estructuración en planta y en elevación de una obra son factores que inciden en el comportamiento dinámico de la misma, así, obras muy regulares tienen un mejor desempeño en comparación con obras irregulares, en estas últimas se generan fuerzas torsionales mayores que incrementan los esfuerzos tangenciales en las secciones sismo-resistentes. Se muestra en las siguientes figuras (6-8) algunos daños debido a estas irregularidades estructurales.



Figura 6.- Colapso del segundo piso y afectación del primer piso debido a la irregularidad en planta de la edificación-Japón.



Figura 7.- Daño en muros debido a problemas de irregularidad-Haití.



Figura 8.- Irregularidad estructural en planta y elevación-Chile.

Columna Corta: Ampliamente se ha escrito y hablado sobre este tipo de falla y es una de las más comunes durante la ocurrencia de terremotos. En este tipo de elementos, a lo largo de su altura, se producen concentraciones de esfuerzos debido a las fuerzas inerciales generadas por el evento sísmico, estas concentraciones de esfuerzos se presentan principalmente por el cambio drástico de rigidez en la transición muro-columna, donde los primeros son elementos con gran rigidez longitudinal y por tanto con

gran capacidad de tomar fuerzas inerciales, sin embargo, a las segundas se les transfiere la misma fuerza inercial pero sobre una sección más pequeña y con capacidad estructural inferior en comparación con las secciones inmediatamente superiores e inferiores a ellas; por tal razón la falla se presenta a la altura de la columna corta. En las siguientes figuras (9-12), se presentan algunas de las afectaciones encontradas producto a esta a causa.



Figura 9.- Fallo por columna corta-Nicaragua.



Figura 10.- Fallo por columna corta-Honduras.
(Tomada de Carvajal, 2011)



Figura 11.- Fallo por columna corta-Haití.
(Tomada de Carvajal, 2011)



Figura 12.- Fallo por columna corta-Chile.

Piso Débil: En edificaciones, este tipo de causa está muy relacionada con problemas de irregularidad estructural, especialmente en altura. Esta falla se presenta por un cambio drástico de rigidez (por tanto de capacidad lateral) entre dos niveles consecutivos. Suele presentarse en el primer nivel ya que este nivel en muchos casos es destinado a comercio o parqueos, en donde se requiere aberturas para aprovechamiento máximo. Sin embargo niveles superiores, en donde existe también irregularidad estructural están de igual manera propensos a sufrir el colapso parcial o total. De los sitios analizados, por medio de las siguientes figuras (13-15) se resaltan edificaciones afectadas por esta causa.



Figura 13.- Colapso por piso débil-Japón,



Figura 14.- Colapso por piso débil-Haití. Nótese transición entre columnas y muros.



Figura 15.- Colapso por piso débil-Chile. Nótese transición entre columnas y muros.

Viga Fuerte – Columna Débil: Esta causa de daño se presenta cuando columnas con capacidad estructural reducida en comparación a la capacidad de las vigas que llegan a ella, sufren ante la ocurrencia de varios ciclos de carga (sobre una sección con ductilidad reducida), la ocurrencia de rótulas plásticas en las cercanías a la unión de uno de sus extremos o en ambos. La ocurrencia de estas rótulas plásticas en varias columnas puede generar la inestabilidad de toda la edificación, dejándola propensa al colapso parcial o total. Esta causa de daño fue ampliamente identificada en las obras afectadas en Puerto Príncipe – Haití, las cuales se presentan en las siguientes figuras (16-18).



Figura 16.- Edificación sin colapsar con daños a causa de viga fuerte y columna débil-Haití.



Figura 17.- Colapso parcial por la generación de rótulas plásticas en columnas-Haití. (Tomada de Carvajal, 2011)



Figura 18.- Colapso total a causa de la generación de rótulas plásticas en columnas-Haití. (Tomada de Carvajal, 2011)

Capacidad Estructural Insuficiente: Esta causa está vinculada con todas las causas anteriormente mencionadas, ya que es precisamente por la cual se presenta el daño excesivo en los elementos estructurales.

Si una estructura presenta problemas de irregularidad estructural, columna corta, piso débil, columna débil, pero cuenta con la suficiente capacidad estructural para soportar el sobre efecto de las fuerzas inerciales durante un evento sísmico (sobre efecto a raíz de tales prácticas), es de esperar, un adecuado desempeño de la misma, sin embargo, muchas veces no se considera este sobre efecto en el diseño estructural, por lo que conviene mejor evitar tales prácticas que han sido causantes de los principales daños estructurales durante los terremoto analizados.

Específicamente, en estructuras de concreto reforzado y mampostería reforzada, esta capacidad insuficiente se presentan a raíz de la cantidad inadecuada del acero de refuerzo suministrado, así como el mal confinamiento del mismo. En estructuras metálicas se originan principalmente debido a inestabilidad por pandeo torsional lateral, local o global de los elementos sismo-resistentes. Para cada caso, la ductilidad local de las uniones es fundamental, ya que considerando que desde el punto de vista de la dinámica estructural, la respuesta final de una estructura es dependiente de su rigidez y su masa y que generalmente durante un evento sísmico, la masa de la estructura se mantiene sin modificaciones, sin embargo, su rigidez empieza a disminuir conforme la estructura va experimentado daño en sus componentes estructurales.

Durante el tiempo de sacudida, este cambio de rigidez puede hacer coincidir por un instante la frecuencia de vibración del suelo con alguna frecuencia propia de uno de los modos de vibrar de la estructura, generando con ello un efecto de resonancia y por ende un mayor impacto sobre la obra (Carvajal, 2011).

En las siguientes figuras (19-20), se muestran algunas evidencias de causa de daño debido a insuficiente capacidad estructural de elementos sismo-resistentes.



Figura 19.- Insuficiente acero de refuerzo en columna-Haití, Nótese la presencia de una única varilla en la columna y la losa de concreto desplomada al fondo –Chile. (Tomada de Carvajal 2011)



Figura 20.- Escaso refuerzo de columna del primer piso de un edificio con más de 10 pisos de altura que colapsó durante el terremoto–Chile.

Causas por Construcción

Existen también causas producto de malas prácticas de ejecución durante la construcción, éstas en parte se deben a técnicas constructivas no adecuadas, acompañadas de una ineficiente supervisión técnica.

Partiendo de un buen diseño sismo-resistente, ha de esperarse un buen desempeño estructural durante un evento sísmico, sin embargo, si no se contó durante la ejecución de la obra con una mano de obra calificada y una supervisión rigurosa, pudiera darse como resultado una capacidad sismo-resistente limitada, incrementando de tal manera el riesgo de la estructura a colapsar o a sufrir serios daños.

Las prácticas inadecuadas más comunes que da validez a esta causa son:

- *Escaso confinamiento del Refuerzo Estructural en Elementos de Concreto Reforzado.*
- *Ineficiente conexión estructural entre elementos.*
- *Participación de Elementos no Sismo-resistentes en la Respuesta Dinámica de la Estructura.*

El *escaso confinamiento del refuerzo estructural* ha sido una de las causas de daño más notable en cada uno de los sitios analizados post-terremoto, este escaso confinamiento, sea por separación excesiva de los estribos o por incorrecta conformación del doblado (no cerrados adecuadamente), hace que el refuerzo principal pierda capacidad debido a la inestabilidad generada por la falta de confinamiento, por tal razón, este refuerzo principal se pandea y en algunos casos sufren la ruptura completa. Las siguientes figuras (21-23) muestran elementos estructurales afectados debido a esta causa en edificaciones en Chile.



Figura 21.- Pandeo del refuerzo estructural por inadecuado confinamiento-Chile. Nótese el pandeo y ruptura del refuerzo principal. (Tomada de Carvajal 2011)



Figura 22.- Acero de refuerzo sin confinamiento-Chile.

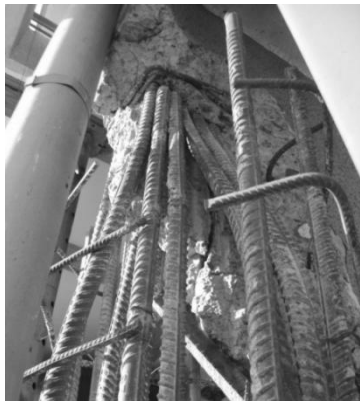


Figura 23.- Inadecuada conformación del doblado de estribos-Chile. Nótese la conglomeración del refuerzo en la zona superior.

La ductilidad global de una estructura depende de la ductilidad local de sus conexiones, por tal razón es fundamental proporcionar las consideraciones y condiciones adecuadas de diseño y además constructivas para garantizar el correcto desempeño de las mismas. Una *ineficiente conexión estructural entre elementos* causa la ocurrencia de daño local, pudiendo afectar también todo el conjunto de la obra, reduciendo su capacidad y provocando la inestabilidad de la misma. Del estudio realizado posterior a los terremotos de Chinchona-Costa Rica y Haití, se ha evidenciado la implementación de malas conexiones entre vigas coronas, vigas de amarre y entepiso y de igual manera entre columnas y paredes, esto debido principalmente a una mano de obra no calificada y ausencia de supervisión (se supone que existió un diseño previo adecuado conforme a las normativas de diseño). Se muestra en las siguientes figuras (24-27) evidencias de inadecuadas prácticas

constructivas y posible ausencia de supervisión técnica.



Figura 24.- Escaso anclaje del refuerzo longitudinal en unión de vigas-Costa Rica. (Tomada de Carvajal, 2011)



Figura 25.- Escaso anclaje del refuerzo longitudinal-Costa Rica. Nótese la ausencia de confinamiento. (Tomada de Carvajal, 2011)



Figura 26.- Inadecuada cantidad de refuerzo en unión viga columna-Haití.



Figura 27.- Inadecuada unión entre paredes-Haití. Nótese la ausencia del acero de refuerzo.

La *participación de elementos no sismo-resistentes* incide en la respuesta dinámica de la estructura, ya que estos elementos (no contemplados en el diseño) aportan rigidez a la estructura, modificando sus características dinámicas y en muchos casos aumentando las fuerzas inerciales sobre la misma. También, la participación de tales elementos (especialmente muros) modifica la ubicación del centro de rigidez de la estructura, pudiendo generar problemas torsionales, desencadenado así el daño de la estructura.

Se ha evidenciado también que esta causa ha dado como consecuencia la aparición de daños de columna corta.

Esta causa puede tener responsabilidad compartida entre el diseño y la construcción, ya que durante el diseño se pudo haber omitido el desplazamiento máximo de los marcos estructurales, o bien, se pudo no haber detallado correctamente estas juntas en planos; pero también sucede que en obra, a falta de una adecuada supervisión, se unen estos muros con las columnas con la incorrecta idea “que es mejor para la estructura” o bien porque se obviaron las juntas expansivas y se completaron con mortero. Las siguientes figuras (28-30) muestran los casos encontrados en Honduras y Nicoya-Costa Rica.



Figura 28.- Participación de muros en la respuesta estructural -Honduras. Nótese también el daño en el muro (Tomada de Carvajal, 2011)



Figura 29.- Poca separación y efecto del choque entre muro y columna-Costa Rica.



Figura 30.- Columna corta provocada por muros no sismo-resistentes-Honduras.

Causas por Falta de Seguimiento y Control por parte de Autoridades Regulatoras

El Seguimiento y Control por parte de las autoridades reguladoras de la actividad constructiva (alcaldías, ministerios de la construcción, colegios profesionales de arquitectura e ingeniería, etc.) es de suma importancia para la reducción del riesgo; estas instituciones como reguladores, son responsables de aprobar y llevar seguimiento de los proyectos de infraestructura.

Por medio de su actuación, en pro de la reducción del riesgo, ellos pueden demandar a los usuarios mayor atención a la realización de estudios preliminares, tales como: estudios de efecto de sitio, susceptibilidad de arenas a licuefacción, fallamiento local, entre otros, con el objetivo de determinar el nivel de vulnerabilidad del sitio previsto para la obra. Adicionalmente, previo a la aprobación pueden demandar a los usuarios el cumplimiento de las ordenanzas de diseño, indicar los requerimientos mínimos de calificación de los constructores y exigir el establecimiento de una supervisión continua durante la ejecución del proyecto, todo esto paralelo a un monitoreo de control de lo ya aprobado.

Mediante un control y seguimiento adecuado ha de esperarse una mejor calidad constructiva y por ende un mejor desempeño estructural que garantice una adecuada capacidad sismo-resistente ante la amenaza sísmica.

Tal como se mencionó al inicio del presente artículo, las obras existentes seguirán siendo mayoría durante varias décadas más, por lo

que durante este tiempo restante, la población estará haciendo uso de estas estructuras cuyos diseño y construcción se llevaron a cabo con normativas muy distintas a las actuales, en las cuales, no se contemplaba el estado del arte del diseño sismo-resistente (por medio de la incorporación de varios estados límites, así como nuevos requerimientos para la calidad de los materiales constructivos). Por tal razón, es necesario implementar un mecanismo por medio del cual las instituciones reguladoras de la actividad constructiva puedan también garantizar a la población que estas obras existentes (sobre todo las de alto uso público, patrimonio u obras esenciales), cuentan con la capacidad estructural sismo-resistente adecuada para resistir sismos con intensidades considerables y puedan por tanto ser utilizadas con seguridad por la población.

ACCIONES A CONSIDERAR

Las acciones a considerar se proponen hacia dos grupos de obras; un primer grupo lo conforman las obras de infraestructuras nuevas a proyectar y el segundo grupo lo conforman las obras existentes que actualmente están en ocupación.

Las *obras de infraestructura nuevas* requieren ser diseñadas conforme a los requerimientos de códigos modernos de diseño y sus actualizaciones, así como, bajo la correcta revisión y aprobación de las autoridades reguladoras de la construcción.

A nivel de diseño y supervisión de obra, se deben considerar las causas que han desencadenado el daño, como las vistas en muchas de las estructuras analizadas para la realización de este trabajo.

Adicionalmente, se requiere de la contratación de mano de obra calificada, acompañada de una supervisión profesional continua y del seguimiento y control de cada una de las autoridades reguladoras de la construcción.

Considerando lo anterior es de esperarse una mejor capacidad sismo-resistente y por lo tanto un nivel de riesgo inferior.

Las *obras existentes*, sobretodo obras esenciales, patrimoniales o de alta

concentración pública, requieren de un tratamiento especial, en primer lugar para conocer el estado actual de la obra y luego para determinar su capacidad sismo-resistente; todo ello se realiza para tener el mejor criterio y poder actuar sobre ellas en pro de la reducción del riesgo al colapso de las mismas.

Es necesario, por tanto, realizar estudios de diagnóstico y de evaluación estructural, determinar el estado y capacidad de la obra e identificar las acciones a tomar, ellas pueden ser variables según los resultados del diagnóstico y de la evaluación.

Pueden considerarse acciones como: reforzamiento de elementos sismo-resistentes y sus uniones, rigidización de la estructura mediante la aneación de muros de cortes o arriostramientos, o bien, separación de los mismo para flexibilizar, así como la extensión vertical de los muros para evitar la ocurrencia de columna corta.

A manera de ejemplo las siguientes figuras (31 y 32), muestran sistemas de rigidización instalados en edificaciones en Japón.



Figura 31.- Sistemas de arriostramiento instalado para aumento de capacidad sismo-resistente- Japón.



Figura 32.- Incorporación de nuevos muros de corte a estructura para el aumento de capacidad sismo-resistente-Japón.

Cada una de estas acciones mejora la capacidad sismo-resistente de la obra, contribuyendo a un mejor desempeño durante un evento sísmico y por ende en la reducción del riesgo al colapso.

En la actualidad, tanto en obras nuevas a proyectarse como en las existentes, es posible instalar sistemas de monitoreo continuo, especialmente aquellos sistemas que permiten llevar seguimiento de las características dinámicas de la estructura.

Las variaciones en la frecuencia de cada modo de vibrar de una edificación, pueden ocurrir principalmente por el cambio de rigidez de la misma, dicho cambio sucede cuando por alguna razón (sin considerar alteraciones de origen humano), la obra ha sido modificada, lo cual puede suceder por un cambio geométrico en las áreas transversales de los elementos, así como de sus momentos de inercia. Estas modificaciones suelen ocurrir durante procesos de daño como los generados por el agrietamiento sin precisar cuál sea su origen.

No siempre todas las áreas de una edificación están expuestas a la vista y control, por lo que muchas veces estas anomalías quedan ocultas sin poder ser vistas ni reportadas y mucho menos analizadas; es ahí donde se demuestra la necesidad de contar con sistemas de monitoreo continuos sabiendo que un leve cambio en las frecuencias de la obra pueden ser una alerta para someterla a una inspección detallada y a una pronta actuación.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha podido demostrar (lamentablemente con un gran número de afectaciones), que los daños ocurridos en las obras impactados por los terremotos analizados en este trabajo, han sido por causas relacionadas con prácticas incorrectas de diseño, construcción, escasa supervisión técnica, y la falta de control y seguimiento de parte de las autoridades reguladoras de la construcción.

La ingeniería sísmica y estructural tiene la tarea de reducir del Riesgo al colapso de las obras de infraestructura (sin importar si estas sean nuevas a proyectar o ya existentes), dando a la estructura la capacidad sismo-resistente adecuada que le permita el correcto desempeño estructural. Para ello es necesario brindar especial atención a factores como la estructuración y la ductilidad de cada uno de los elementos sismo-resistentes que conforman la obra, evitando en la medida de lo posible la implementación de malas prácticas como lo son las columnas cortas, irregularidades en planta y elevación y armado insuficiente e inadecuado del refuerzo estructural.

Es evidente que la mala construcción y la falta de supervisión durante el proceso constructivo, son causas por las cuales ha ocurrido daño en muchas obras estudiadas, por lo que es preciso mejorar el nivel de calificación de los constructores y la formación de supervisores de obra.

En el caso específico de las estructuras nuevas a proyectar, se recomienda el cumplimiento de las ordenanzas establecidas en las normativas de diseño y sus actualizaciones, así como, la asignación del proyecto a constructores calificados, bajo supervisión continua de un profesional y bajo un mecanismo de control (antes y durante) por parte de las autoridades pertinentes.

Una atención especial merecen las estructuras existentes en cuanto al estudio de su estado físico y determinación de su capacidad estructural. Gran cantidad de estas obras se diseñaron con criterios limitados de ingeniería sismo-resistente, además, sin la incorporación de técnicas de análisis modernos como las que existen en la actualidad. Por tal razón, sabemos que muchas de estas edificaciones y sus ocupantes pueden estar en riesgo, por tanto esperan de las autoridades y de los ingenieros la atención debida.

Finalmente, se insta a todos los dueños y desarrolladores de proyectos de edificación, la implementación de sistemas de monitoreo continuo sobre sus estructuras, con el fin de

conocer día a día el comportamiento de las mismas y poder tomar acciones en el momento oportuno y no cuando lo sea muy tarde.

REFERENCIAS

Barquero, R. (2009). *“El Terremoto de Cinchona del 8 de Enero de 2009”*. Red Sismológica Nacional (RNS: ICE-UCR), 2009.

Carvajal, L. (2011) *“Consideraciones tomadas Post-Terremoto para el Diseño Sismorresistente de Estructuras”*. Memoria del Congreso de Estructuras 2011 y XI Seminario de Ingeniería Estructural y Sísmica, San José-Costa Rica, 2011.

Hernández, O. (2009). *Reevaluación del Efecto de Sitio y Propuesta de Clasificación de Terreno con Fines de Diseño Sísmico para Managua Nicaragua*. Tesis de Grado, Maestría Centroamericana en Evaluación de Riesgos y Reducción de Desastres, CIGEO, UNAN-Nicaragua, 2009.