

**EN RIESGO:**

# **El Desempeño Sísmico de los Edificios de Marcos de Concreto Reforzado Rellenos con Paredes de Mampostería**

Un tutorial desarrollado por un comité de la

*World Housing Encyclopedia*

Un proyecto del “*Earthquake Engineering Research Institute*” y de la “*International Association for Earthquake Engineering*”



**EN RIESGO:**  
**El Desempeño Sísmico de los Edificios de Marcos  
de Concreto Reforzado Rellenos con Paredes de  
Mampostería**

Un tutorial desarrollado por un comité de la

*World Housing Encyclopedia*

Un proyecto del “*Earthquake Engineering Research Institute*” y  
de la “*International Association for Earthquake Engineering*”

C. V. R. Murty  
Svetlana Brzev  
Heidi Faison  
Craig D. Comartin  
Ayhan Irfanoglu

Octubre 2006

**Traducción al Español**

Jorge Gutiérrez  
Alonso González

Diciembre 2011

**Publicación Número WHE-2006-03**



© 2006 Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California 94612-1934.

Segunda impresión Setiembre 2008

Todos los derechos reservados. Ninguna parte de este libro puede ser reproducido en ninguna forma o por ningún medio sin el previo permiso por escrito del editor, *Earthquake Engineering Research Institute*, 499 Calle 14, Habitación 320, Oakland, CA 94612-1934.

Este reporte es publicado por el *Earthquake Engineering Research Institute*, una corporación sin fines de lucro. El objetivo del *Earthquake Engineering Research Institute* es reducir el riesgo sísmico con avances en la ciencia y la práctica de ingeniería sísmica por medio de un mejor entendimiento del impacto de los terremotos en lo físico, social, económico, político, y en el ambiente cultural, y abogando medidas comprensivas y realistas para reducir los efectos dañinos de los sismos.

La impresión de este tutorial ha recibido el apoyo de la Bangladesh University of Engineering and Technology-Virginia Tech Partnership for Reduction of Seismic Vulnerability, con financiamiento de la U.S. Agency for International Development.

Este tutorial fue escrito por un comité de autores voluntarios, los cuales participan en EERI y el proyecto de IAEE *World Housing Encyclopedia*. Cualquier opinión, descubrimientos, conclusiones, o recomendaciones expresados en adelante por los autores no necesariamente representan las opiniones de los organizadores.

ISBN: 978-1-932884-54-8

Número de publicación EERI WHE-2006-03

**Coordinadores de producción:** Marjorie Greene, C. V. R. Murty, Svetlana Brzev and Heidi Faison

**Diseño:** Marjorie Greene, Heidi Faison

**Portada:** Edificio residencial de marco de concreto reforzado con relleno de mampostería sin reforzar que colapsó a unos 50 km del epicentro durante el sismo de M7.7 en Bhuj (India). El edificio tenía parqueos en la mitad de la planta baja, con apartamentos en la otra mitad. Muchos de los edificios residenciales se construyen de esta manera en India y muchos otros países, sin un diseño formal por cargas de gravedad o sísmicas. El tamaño típico de columna en estos edificios es de 230 mm por 450 mm con ganchos de 90 grados en los estribos. El mismo detallado de refuerzo de viga-losa se repite en todos los niveles; el edificio en la foto muestra una división vertical en el medio del edificio debido a este uso genérico de detallado de refuerzo en todos los niveles. Este pobre detallado resulta en el traslape de las barras de refuerzo en todas las vigas y losas en los mismos puntos en planta en todos los pisos del edificio. Esta es una práctica peligrosa que puede resultar en colapsos de edificios durante un sismo. Foto: C.V.R. Murty

## Reconocimientos

El proyecto *World Housing Encyclopedia* (WHE) le debe su origen a la visión de Chris Arnold, quien originalmente propuso la idea al *EERI Endowment Fund*.

Este tutorial ha sido desarrollado y revisado por un equipo internacional de expertos. Los autores principales son C.V.R. Murty (India), Svetlana Brzev (Canadá), Heidi Faison (EEUU), Craig D. Comartin (EEUU) y Ayhan Irfanoglu (EEUU). Aportes adicionales por Ahmet Yakut (Turquía), Durgesh Rai (India) y Marjorie Greene (EEUU). Los autores están particularmente agradecidos con Andrew Charleson (Nueva Zelanda) quien aportó muchas sugerencias útiles como revisor. Además, Randolph y Eduardo Fierro (EEUU) y Cynthia Perry (EEUU) aportaron sugerencias útiles en borradores iniciales. Los autores de los varios reportes de vivienda de la WHE citados en este tutorial suministraron mucha información útil en sus reportes, por lo que todos los autores están agradecidos:

Ascheim, M. (EEUU)	Jarque, F.G. (México)
Bostenaru, M.D. (Romania)	Mejia, L. (Colombia)
Brzev, S. (Canadá)	Pao, J. (Canadá)
Comartin, C. (EEUU)	Rodriguez, M. (México)
Elwood, K. (Canadá)	Sandu, I. (Romania)
Faison, H. (EEUU)	Sheu, M.S. (Taiwán)
Farsi, M. (Argelia)	Sinha, R. (India)
Gomez, C. (Chile)	Spence, R. (Reino Unido)
Goyal, A. (India)	Yao, G. (Taiwán)
Gulkan, P. (Turquía)	Yakut, A. (Turquía)
Jaiswal, K. (India)	

El sitio web y la base de datos de WHE se diseñaron por un equipo de *John A. Martin and Associates* de Los Ángeles, CA, como un esfuerzo para el bien público: Farzad Naeim, Líder de Equipo; Mark Day, Administrador de Proyecto, Jefe de Diseño, y Programador de Sitio Web; Scott Hagie, Programador de interface de base de datos y servidor web; Kostas Skliros, Ingeniero en Software y Jefe de desarrollo de base de datos.

Este proyecto no sería posible sin la dedicación de más de 190 profesionales en ingeniería sísmica alrededor del mundo quienes han donado su tiempo y experiencia para contribuir en la construcción de viviendas en sus países y para revisar información suministrada por otros. Este tutorial es dedicado a todos esos contribuyentes, cuyos nombres están en las páginas siguientes.

C.V.R. Murty  
Editor en Jefe  
Noviembre 2006



# COMITÉ EDITORIAL DE *WORLD HOUSING ENCYCLOPEDIA*



## **Editor en Jefe**

**C.V.R. Murty**

Indian Institute of Technology Madras  
India

Vanja Alendar  
University of Belgrade  
Serbia

Qaisar Ali  
NWFP University of Eng. & Technology  
Pakistán

Chris Arnold  
Building Systems Development  
EEUU

Marcial Blondet  
Universidad Católica de Perú  
Perú

Jitendra Bothara  
National Society for Earthquake Technology  
Nepal

Svetlana Brzev  
British Columbia Institute of Technology  
Canadá

Andrew Charleson  
University of Wellington  
Nueva Zelanda

Shel Cherry  
University of British Columbia  
Canadá

Craig Comartin  
CD Comartin Inc.  
EEUU

Dina D'Ayala  
University of Bath  
Reino Unido

Dominic Dowling  
University of Technology, Sydney  
Australia



## **Jefe de Redacción**

**Marjorie Greene**

Earthquake Engineering Research Institute  
EEUU

Heidi Faison  
Nabih Youssef & Associates  
EEUU

Jorge Gutiérrez  
Universidad de Costa Rica, Esc. de Ing. Civil  
Costa Rica

Andreas Kappos  
University of Thessaloniki  
Grecia

Marjana Lutman  
Eslovenian National Bldg.& Civil Eng. Institute  
Eslovenia

Kimiro Meguro  
University of Tokyo, Institute of Industrial Science  
Japón

Ofelia Moroni  
Universidad de Chile  
Chile

Farzad Naeim  
John A. Martin & Associates  
EEUU

Jelena Pantelic  
The World Bank  
EEUU

Virginia Rodriguez  
Universidad Nacional de San Juan  
Argentina

Laura Samant  
Consultant  
EEUU

Baitao Sun  
Insitute of Engineering Mechanics  
China

## COLABORADORES DE WORLD HOUSING ENCYCLOPEDIA

Abdibaliev, Marat	Davis, Ian	Lutman, Marjana	Skliros, Kostas
Agarwal, Abhishek	Deb, Sajal K.	Maki, Norio	Smillie, David
Ahari, Masoud Nourali	Desai, Rajendra	Malvolti, Daniela	Sophocleous, Aris
Ait-Méziane, Yamina	Dlaz, Manuel	Manukovskiy, V.	Sanchez, De la Sotta
Ajamy, Azadeh	Dimitrijevic, Radovan	Martindale, Tiffany	Spence, Robin
Al Dabbeek, Jalal N.	Dowling, Dominic	Meguro, Kimiro	Speranza, Elena
Alcocer, Sergio	Eisenberg, Jacob	Mehrain, Mehrdad	Sun, Baito
Alemi, Faramarz	Eisner, Richard	Mejía, Luis Gonzalo	Syrmakezis, Kostas
Alendar, Vanja	Ellul, Frederick	Meli, Roberto P.	Taghi Bekloo, Nima
Ali, Qaisar	Elwood, Kenneth	Moin, Khalid	Talal, Isreb
Alimoradi, Arzhang	Faison, Heidi	Mollaioli, Fabrizio	Tanaka, Satoshi
Al-Jawhari, Abdel Hakim W.	Farsi, Mohammed	Moroni, Ofelia	Tassios, T. P.
Almansa, Francisco López	Feio, Artur	Mortchikchin, Igor	Tomazevic, Miha
Al-Sadeq, Hafez	Fischinger, Matej	Mucciarella, Marina	Tuan Chik, Tuan
Ambati, Vijaya R.	French, Matthew A.	Muhammad, Taj	Norhayati
Ambert-Sanchez, Maria	Gómez, Cristian	Muravljov, Nikola	Tung, Su Chi
Ansary, Mehedi	Gordeev, Yurii	Murty, C. V. R.	Upadhyay, Bijay
Arnold, Chris	Goretti, Agostino	Naeim, Farzad	Kumar
Arze L., Elias	Goyal, Alok	Naito, Clay J.	Uranova, Svetlana
Aschheim, Mark	Greene, Marjorie	Ngoma, Ignasio	Valluzzi, Maria Rosa
Ashimbayev, Marat U.	Guevara-Perez, Teresa	Nienhuys, Sjoerd	Ventura, Carlos E.
Ashtiany, Mohsen Ghafory	Gülkan, Polat	Nimbalkar, Sudhir	Vetturini, Riccardo
Astroza, Maximiliano	Gupta, Brijbhushan J.	Nudga, Igor	Viola, Eugenio
Awad, Adel	Gutierrez, Jorge A.	Nurtaev, Bakhtiar	Wijanto, Sugeng
Azarbakht, Alireza	Hachem, Mahmoud M.	Olimpia Niglio, Denise U.	Xu, Zhong Gen
Bachmann, Hugo	Hashemi, Behrokh Hosseini	Ordonez, Julio	Yacante, María I
Baharudin, Bahiah	Irfanoglu, Ayhan	Ortiz R, Juan Camilo	Yakut, Ahmet
Bassam, Hwaija	Itskov, Igor Efroimovich	Osorio G., Laura Isabel	Yao, George C.
Bazzurro, Paolo	Jain, Sudhir K.	Ottazzi, Gianfranco	Zhou, Fu Lin
Begaliev, Ulugbek T.	Jaiswal, Kishor S.	Palanisamy, Senthil Kumar	
Belash, Tatyana	Jarque, Francisco Garcia	Pantelic, Jelena	
Benavidez, Gilda	Kante, Peter	Pao, John	
Benin, Andrey	Kappos, Andreas	Papa, Simona	
Bento, Rita	Kaviani, Peyman	Parajuli, Yogeshwar Krishna	
Bhatti, Mahesh	Khakimov, Shamil	Pradhan, Prachand Man	
Bin Adnan, Azlan	Khan, Akhtar Naeem	Pundit, Jeewan	
Blondet, Marcial	Khan, Amir Ali	Quiun, Daniel	
Bogdanova, Janna	Kharrazi, Mehdi H. K.	Rai, Durgesh	
Bommer, Julian	Klyachko, Mark	Reiloba, Sergio	
Bostenaru Dan, Maria	Kolosova, Freda	Rodriguez, Virginia I	
Bothara, Jitendra Kumar	Koumousis, Vlasis	Rodriguez, Mario	
Brzev, Svetlana	Krimgold, Fred	Samant, Laura	
Cardoso, Rafaela	Kumar, Amit	Samanta, R. Bajracharya	
Castillo G., Argimiro	Lacava, Giuseppe	Samaroo, Ian	
Cei, Chiara	Lang, Kerstin	Sandu, Ilie	
Chandrasekaran, Rajarajan	Lazzali, Farah	Saqib, Khan	
Charleson, Andrew	Leggeri, Maurizio	Sassu, Mauro	
Chernov, Nikolai Borisovich	Levtchitch, Vsevolod	Schwarzmueller, Erwin	
Cherry, Sheldon	Lilavivat, Chitr	Shabbir, Mumtaz	
Choudhary, Madhusudan	Liu, Wen Guang	Sharpe, Richard	
Cleri, Anacleto	Loaiza F., Cesar	Sheth, Alpa	
Comartin, Craig	Lopes, Mário	Sheu, M.S.	
D'Ayala, Dina	Lopez, Walterio	Singh, Narendrapal	
D'Ercole, Francesco	Lopez M, Manuel A.	Singh, Bhupinder	
	Lourenco, Paulo B.	Sinha, Ravi	

## ***Tutorial***

# **Edificios de Concreto Reforzado Rellenos de Paredes de Mampostería**

## **Sobre el Tutorial**

Este documento se escribe para profesionales del diseño y construcción de edificios con dos objetivos claves: 1) mejorar el entendimiento del pobre desempeño de los edificios de concreto reforzado rellenos de paredes de mampostería, y 2) proveer tecnologías constructivas alternativas viables que puedan ofrecer un nivel superior de seguridad sísmica. Causas del desempeño sísmico insatisfactorio de estos edificios de concreto reforzado son: (a) la pobre elección del lugar de construcción, (b) la elección inapropiada de formas arquitectónicas de edificios que ofrecen un pobre desempeño sísmico, (c) la ausencia de un diseño estructural para un comportamiento sísmico adecuado, (d) la falta de detallados sísmicos especiales de elementos estructurales claves, (e) inadecuada mano de obra de construcción, (f) materiales de construcción de baja calidad, y (g) la ausencia de supervisión de la construcción. El problema se agrava más por el uso de paredes de mampostería de relleno sin refuerzo, usualmente hechos de ladrillos sólidos o huecos de arcilla. Los efectos del relleno usualmente no se consideran en el diseño, sin embargo estas paredes pueden afectar significativamente la forma en que estos edificios responden ante sacudidas sísmicas producto del movimiento del suelo y hasta pueden causar que el edificio colapse (como se reporta después de varios sismos mayores a nivel mundial).

En general, alcanzar un desempeño sísmico satisfactorio en los edificios de concreto

reforzado sujetos a varios ciclos de movimientos sísmicos se considera un desafío hasta en los países sumamente industrializados con tecnologías de construcción avanzadas. Teniendo estos retos en mente, este documento propone dos tecnologías de construcción alternativas caracterizadas por un nivel de seguridad sísmica mayor a un costo y complejidad comparable a la construcción de concreto reforzado; estas tecnologías son construcción de mampostería confinada y construcción de marcos de mampostería reforzada con muros de cortante de mampostería reforzada.

Considerando el gran número de edificios de marcos de concreto reforzado con relleno en regiones de moderado a alto riesgo sísmico alrededor del mundo, este documento también discute algunas estrategias actualizadas para estas estructuras que pueden reducir el riesgo asociado.

Es importante que todos los involucrados en el proceso de construcción entiendan cómo se comportan estos edificios durante un sismo, cuáles son los retos relacionados con su seguridad ante un sismo, y cuáles tecnologías de construcción alternativas pueden ser más apropiadas. Autores de este documento creen que un mejor entendimiento de estos problemas críticos resultarán en un mejoramiento en construcción y prácticas actualizadas para construcciones de este tipo, reduciendo

perdidas de vida y propiedades en futuros

sismos.

## Sobre la WHE

La *World Housing Encyclopedia* (WHE) es un proyecto de *Earthquake Engineering Research Institute* y *the International Association for Earthquake Engineering*.

Ingenieros sísmicos voluntarios y expertos en viviendas de todo el mundo participan en este proyecto basado en la web

desarrollando reportes sobre prácticas constructivas de vivienda en sus países.

Además, los voluntarios preparan tutoriales en varias tecnologías constructivas y donan tiempo en varios proyectos especiales, como la creación del *World Adobe Forum* y la recolección de información en varias alternativas temporales de vivienda. Toda la información suministrada por los voluntarios

es revisada por sus pares. Visite [www.world-housing.net](http://www.world-housing.net) para más información.



## Contenidos

1. <b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
2. <b>DISEÑO CONCEPTUAL Y CONSIDERACIONES DE PLANEAMIENTO</b> .....	6
Forma del Edificio .....	6
Diseño no simétrico .....	8
Muros de mampostería de relleno .....	9
Resistencia sísmica fuera del plano de muros de relleno .....	11
Columnas cortas y cautivas .....	12
Modificaciones de Edificios Existentes .....	14
Alteraciones .....	14
Adiciones Verticales.....	14
Pisos Suave y Débil.....	16
Como Evitar Pisos Suaves .....	18
Falla por Viga Fuerte – Columna Débil.....	19
3. <b>CONSIDERACIONES DE DETALLADO</b> .....	22
Sobre Ductilidad.....	22
Vigas .....	23
Modos de falla.....	23
Ubicación y cantidad de las barras de refuerzo horizontal.....	23
Estribos .....	26
Columnas .....	26
Modos de falla.....	26
Barras de refuerzo vertical.....	26
Estribos horizontales.....	27
Uniones Viga-Columna .....	29
Muros de relleno de mampostería .....	32

Elementos No Estructurales .....	33
<b>4. CONSIDERACIONES DE CONSTRUCCIÓN .....</b>	<b>36</b>
Calidad de los Materiales .....	36
Selección y control de materiales .....	37
Preparación, manejo y curado del concreto .....	37
Selección y control del acero .....	38
Mano de obra .....	39
Inspección .....	41
<b>5. ALTERNATIVAS A LOS MARCOS DE CR CON MUROS DE RELLENO DE MAMPOSTERÍA EN REGIONES DE ALTO RIESGO SÍSMICO .....</b>	<b>42</b>
Porque son necesarias las alternativas .....	42
Las Alternativas .....	42
Edificios de Mampostería Confinada .....	44
Antecedentes .....	44
Ventajas .....	45
Edificios de Marcos de CR con Muros de Corte de CR .....	46
Antecedentes .....	46
Ventajas .....	49
<b>6. REFORZAMIENTO DE LOS EDIFICIOS DE MARCOS DE CR .....</b>	<b>51</b>
Introducción .....	51
Valoración de la vulnerabilidad .....	51
Formas de Reforzar Edificios Existente de Marcos de CR .....	52
Instalación de Nuevos Muros de Corte de CR o Riostras de Acero .....	53
Revestimiento .....	56
Refuerzo de Muros de Mampostería de Relleno Existente .....	60
Refuerzo de Edificios de Marcos de CR con Plantas Bajas Abiertas .....	60
Meta a Corto Plazo = Prevenir el Colapso .....	61
Meta a Largo Plazo = Mejorar el Desempeño Sísmico .....	62
Cómo el Refuerzo Sísmico Afecta las Propiedades Estructurales .....	62

Refuerzo de Marcos de CR con Muros de Mampostería de Relleno: Retos de Implementación .....	63
<b>7. CONCLUSIONES</b> .....	65
Desafíos técnicos.....	65
Partes interesadas .....	65
Comentarios finales .....	66
<b>8. REFERENCIAS</b> .....	67
-----	
-----	
-----	

NOTA:

A través del documento PUNTOS CLAVE y CONSEJOS DE DISEÑO se han colocado en los márgenes estos puntos son para los lectores que no están tan interesados en algunos de los detalles técnicos en el texto. Los PUNTOS CLAVE están en elipses doradas. Los CONSEJOS DE DISEÑO están en hexágonos azules.





# 1. Introducción

El concreto reforzado es uno de los materiales para edificios modernos más extensamente usado. El concreto es una “piedra artificial” obtenida por medio de la mezcla de cemento, arena, y agregados con agua. El concreto fresco se puede moldear en casi cualquier forma, dándole una ventaja inherente sobre otros materiales. Se volvió muy popular después de la invención del cemento Portland en el siglo XIX; Sin embargo, su limitada resistencia a la tracción inicialmente evitó su uso extenso en la construcción de edificios. Para sobreponer esta pobre resistencia en tracción, barras de acero son embebidas en concreto para formar un material compuesto llamado *concreto reforzado* (CR). El uso de construcción con CR en el mundo moderno se deriva por la gran disponibilidad de sus materiales – acero de refuerzo así como concreto. Excepto por la producción de acero y cemento, la producción de concreto no requiere fábricas costosas para su producción. Pero la construcción con concreto sí requiere cierto nivel de tecnología, experiencia y mano de obra, particularmente en el área de construcción. A pesar de esta necesidad de sofisticación y aporte profesional, un gran número de casas unifamiliares o edificios residenciales de baja altura alrededor del mundo han sido y están siendo construidas usando CR sin asistencia de un ingeniero. Estos edificios, en zonas sísmicas, son potenciales trampas mortales. Esta es la motivación detrás del desarrollo de este tutorial.

Un edificio típico de CR (mostrado en la Figura 1) está generalmente compuesto por un número de elementos horizontales semejantes a placas (losas), elementos horizontales semejantes a costillas (vigas) conectadas a la parte inferior de las losas, elementos verticales esbeltos (columnas), y

elementos planos verticales (muros). En la mayoría de casos, todos estos elementos son colados monólicamente – esto es, que vigas y columnas son coladas en el sitio de construcción en una sola operación con tal de que actúen de manera conjunta. El concreto fresco se vierte en el encofrado de madera o metálico colocado alrededor del acero de refuerzo para diferentes elementos de edificios. Tales edificios se llaman edificios de CR monolítico (o colados en sitio), en contraste a los edificios de CR prefabricado, donde cada uno de los elementos son colados separadamente (usualmente en fábrica) y luego ensamblados en el sitio de construcción. En edificios de CR monolítico, la conexión entre elementos se alcanza proporcionando barras de refuerzo continuas que pasan de un elemento a otro. La intersección entre una viga y una columna, conocida como unión viga-columna, juega un papel vital en la capacidad de estos edificios para resistir cargas laterales.

En marcos de CR la acción integral de vigas, columnas y losas, proporciona resistencia para cargas gravitacionales y laterales a través de flexión en vigas y columnas. Marcos de CR construidos en regiones propensas a sismos deben poseer ductilidad, o la capacidad de sostener deformaciones significativas en condiciones de carga extremas; este aspecto se discute en el Capítulo 3. Marcos que son diseñados para resistir principalmente los efectos de cargas gravitacionales generalmente se llaman marcos no dúctiles (o de gravedad). Los marcos de CR no dúctiles, con o sin muros de relleno de mampostería, son de práctica común alrededor del mundo (Figura 2).



Un gran número de edificios de CR se construyen alrededor del mundo sin supervisión de un ingeniero

Estos marcos de CR tridimensionales (ej. sistemas viga-columna-losa) son habitables gracias a muros colocados en los edificios conocidos como *muros de relleno*.

Marcos no dúctiles no son diseñados para resistir cargas de sismo, pero son muy comunes en zonas sísmicas

Estos muros se construyen en puntos deseados a lo largo del edificio, usualmente en el plano vertical definido por pares de vigas y columnas adyacentes. Un material popular usado para hacer estas paredes alrededor del mundo es mampostería de ladrillos de arcilla con mortero de cemento. Últimamente, el uso de bloques de concreto sólidos o huecos y ladrillos huecos de arcilla va en aumento en el mundo. En algunos casos, los muros de relleno de mampostería también se refuerzan con barras de acero pasando a través de ellos en la dirección vertical y horizontal y anclando estas barras a las vigas y columnas adyacentes.

De los 37 países representados en la base de datos de la WHE, 23 han presentado reportes de construcción de concreto vulnerables a sismos; esto incluye muchos de los países más poblados del mundo

Con el rápido crecimiento de la población urbana, la construcción con marcos de CR ha sido ampliamente usada para construcciones residenciales tanto en los países en

desarrollo así como en los industrializados. A la fecha (Octubre 2006), la base de datos de construcción de vivienda en la World Housing Encyclopedia (WHE) contiene más de 110 reportes describiendo construcciones de vivienda de 37 países (ver [www.world-housing.net](http://www.world-housing.net)). Además de la mampostería, el concreto reforzado parece ser el material de elección para la construcción de viviendas – la base de datos contiene actualmente 26 reportes (aproximadamente 25% de todos los reportes) que describen construcciones de marcos de CR en Argelia, Chile, Colombia, Chipre, Grecia, India, Italia, Kirguistán, Malasia, México, Territorios Palestinos, República Árabe Siria, Taiwán, Turquía, Uzbekistán, Venezuela, Serbia, Rumania, y los EEUU.

Estas construcciones se realizan en muchas partes del mundo, especialmente en países en vías de desarrollo. En esta época, la construcción con marcos de CR comprende aproximadamente el 75% de los edificios en Turquía, aproximadamente el 80% en México, y más del 30% en Grecia (Yakut, 2004). Aplicaciones del diseño van desde viviendas unifamiliares en países como Argelia y Colombia, hasta rascacielos de apartamentos en Chile, Canadá, México, Turquía, India y China.

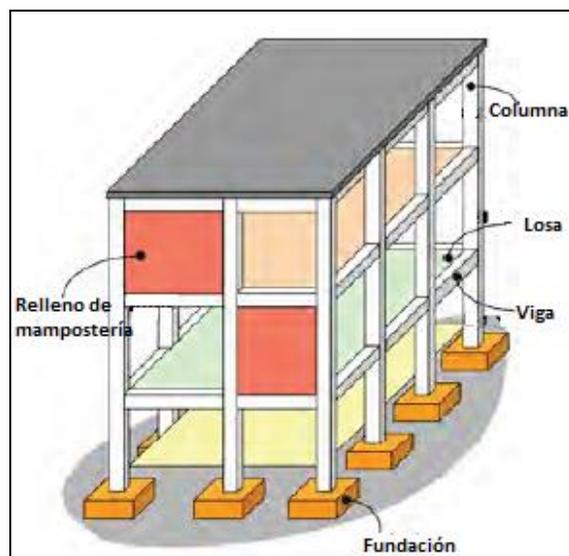


Figura 1. Edificio típico de concreto reforzado con relleno de mampostería y sus componentes (Fuente: C.V.R. Murty).



**Figura 2. Este paisaje urbano de Alger, Argelia tiene muchos edificios de concreto reforzado, como muchas otras ciudades alrededor del mundo (foto: S. Brzev)**

Rascacielos de apartamentos de este tipo tienen una alta densidad de población, en algunos casos unos cientos habitantes por edificio. Ejemplos de construcciones de marcos de CR de varios países se muestran en las Figuras 3 y 4.

El uso extensivo de la construcción con CR, especialmente en países en desarrollo, se atribuye a su relativo bajo costo inicial comparado a otros materiales como el acero. El costo de construcción depende de la región y de las prácticas constructivas locales. Como ejemplo, el área unitaria de un edificio residencial típico con CR cuesta aproximadamente \$100-\$400/m<sup>2</sup> en India, \$250/m<sup>2</sup> en Turquía y \$500/m<sup>2</sup> en Italia (Yakut, 2004).

La construcción de marcos de CR es frecuentemente usada en regiones de alto riesgo sísmico, como en Latinoamérica, Sur de Europa, África del Norte, Medio Oeste y el Sureste de Asia. Terremotos recientes alrededor del mundo, incluyendo los de Izmit y Duzce en Turquía en 1999, el de Bhuj en

India en 2001, el de Chi Chi en Taiwán en 2001 y el de Bourmedes en Argelia en 2003, revelan deficiencias mayores en estos edificios, algunas de las cuales llevaron a colapsos catastróficos causando miles de muertes. Una de las mayores causas de la vulnerabilidad sísmica asociada a estos edificios es que, en los países en desarrollo, un gran número de los edificios de marcos de CR se han diseñado por arquitectos e ingenieros sin la capacitación adecuada en el diseño sísmico y su construcción y han sido construidos por mano de obra inadecuada.

La construcción con concreto requiere un avanzado nivel de tecnología, experiencia y mano de obra

Debido a la alta ocupación asociada a estos edificios, además de su presencia extendida a lo largo del mundo, muertes y pérdidas en propiedades

A menos de que se de atención cuidadosa a muchos problemas en el diseño y construcción, estos edificios pueden experimentar grandes daños o colapso en sismos mayores

significativas pueden asociarse con su posible pobre comportamiento sísmico. Por ende, se requiere cuidado especial para entender los retos que un sismo plantea y asegurar que las

características adecuadas sean incorporadas en el diseño arquitectónico y estructural y en la construcción de los edificios de marcos de CR. La Figura 5 muestra la construcción de un moderno edificio de marcos de CR en México. Las consideraciones claves relacionadas a la construcción de marcos de CR se discutirán más adelante en este documento.

El número estimado de edificios de marcos de CR en zonas sísmicas a lo largo del mundo es asombroso, incluyendo tanto los países en desarrollo como los altamente industrializados. En los países desarrollados, miles de edificios de marcos de CR antiguos

están siendo considerados en riesgo debido a que los códigos de construcción no incluían requisitos especiales para el diseño sísmico de estructuras de concreto reforzado hasta los años 70, cuando varios terremotos demostraron la necesidad de diseños más dúctiles. La base de datos de la WHE documenta el daño a viejos edificios de marcos de CR durante los sismos principales que sacudieron a EEUU durante los últimos 50 años, incluyendo el de 1964 en Anchorage, Alaska, el de 1971 en San Fernando, California y el de 1994 en Northridge, California. Estos terremotos revelaron la vulnerabilidad de los edificios de marcos de CR, y obligaron al desarrollo de modernas tecnologías sísmicas (Faison, Comartin y Elwood, 2004). En un mundo ideal, lo mejor sería reforzar todos estos edificios para protegerlos de los efectos de futuros sismos y minimizar las víctimas y daños a propiedades.

Los ingenieros se han valido de fallas por sismos anteriores para comprender cómo mejorar el comportamiento de marcos de CR



**Figura 3. Construcciones de marcos de CR de baja y mediana altura: Turquía (arriba izquierda; de Gulkan et al. 2002); Colombia (arriba derecha; de Mejía 2002); Taiwán (abajo izquierda; de Yao y Sheu 2002); India (abajo derecha; de Jaiswal et al. 2002)**



**Figura 4. Ejemplos de rascacielos de CR en Canadá (izquierda; de Pao y Brzev 2002), y Chile (derecha, de Moroni y Gómez 2002). Muros de cortante de CR proporcionan resistencia a los efectos sísmicos en estos edificios mientras que las columnas se diseñan para resistir las cargas gravitacionales.**

Sin embargo, en una situación antes del sismo, es poco probable que el financiamiento esté disponible para readecuar un número importante de estos edificios en cualquier comunidad. Por consiguiente, existe la necesidad para desarrollar estrategias y políticas para priorizar edificios para ser readecuados de acuerdo a su importancia y capacidad de financiamiento. La base de datos de la WHE contiene varios reportes describiendo las técnicas para adecuar edificios de marcos de CR en países como EEUU, México, Algeria, India, Grecia, Colombia, Chile, Italia, Rumania, Taiwán, Turquía, etc. Algunas estrategias genéricas de adaptación sísmica adecuadas para estructuras de marcos de

CR se discuten en este documento (ver Capítulo 6). Considerando la alta vulnerabilidad sísmica asociada con los edificios de marcos de CR, es necesario considerar alternativas viables a la construcción de marcos de CR, que proveen un nivel de seguridad sísmica más alto a un costo y complejidad constructiva comparable; algunas alternativas se proponen más adelante en este documento (ver Capítulo 5).

Debido a su alto riesgo de colapso, la construcción de marcos de CR debe evitarse, a menos que los diseñe un ingeniero calificado



**Figura 5. Un ejemplo de construcción de marcos de CR de México (fuente: Rodríguez y Jarque 2005): colocación del refuerzo de columna (izquierda) y el marco completo con rellenos (derecha).**

## 2. Diseño Conceptual y Consideraciones de Planeamiento

### Forma del Edificio

El comportamiento de un edificio durante un sismo depende de varios factores, incluso si su forma es simple y simétrica. Algunos edificios en sismos anteriores se han comportado de mala manera debido a formas irregulares severas (ver Figura 6).

Considerando que la forma del edificio se determina temprano en el desarrollo del proyecto, es crucial que arquitectos e ingenieros estructurales trabajen juntos durante las etapas de planeamiento para asegurarse que se eviten características desfavorables y se escoja una buena configuración del edificio. Puntos claves para entender el rol de la configuración de un edificio se describen a continuación.

- Edificios con una geometría simple en planta típicamente se comportan mejor durante sismos fuertes que edificios con esquinas entrantes en planta con formas de U, V, H y + (ver Figura 7a). Esto se debe a que los edificios con simetría simple ofrecen un recorrido de cargas fluido y directo para que las fuerzas de

inercia inducidas durante el movimiento sísmico fluyan a la fundación (ver Figura 7b).

- Una forma de reducir la irregularidad es separar el edificio en bloques simples separados por una brecha de aire (conocida como junta de expansión). Este tipo de diseño permite que los edificios de configuración simple actúen independientemente, de este modo se evita altas concentraciones de esfuerzos en esquinas entrantes que frecuentemente provocan daños. Por ejemplo, un edificio con forma de L en planta se puede dividir en dos edificios rectangulares en planta usando juntas de expansión (ver figura 8). Pero las consecuencias de esta junta es que, durante sismos, pueden darse golpes (o aplastamiento) entre las dos partes del edificio, si no están separadas lo suficiente.

Edificios con formas simples se comportan mejor durante sismos



Figura 6. Un edificio con una forma bastante irregular sufrió graves daños en el sismo de 2001 en Bhuj, India (fuente: EERI 2001).

Se deben evitar edificios con entrantes verticales y alturas de niveles variables

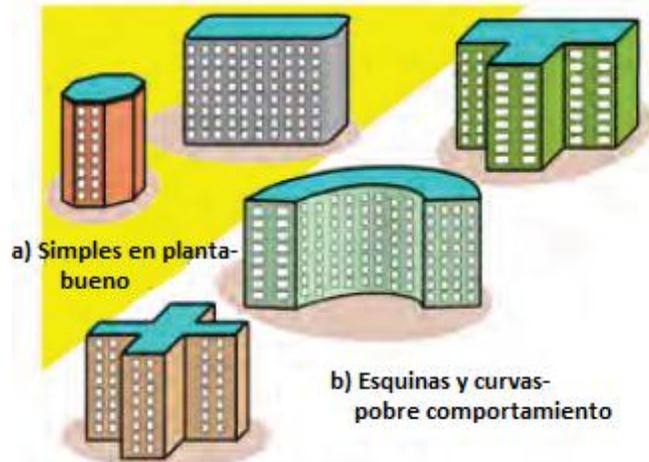


Figura 7. Influencia de la forma del edificio: a) Edificios con formas simples permiten que la sacudida inducida por las fuerzas de inercia fluya de manera directa a las fundaciones y por lo tanto comportarse bien durante los sismos; b) Edificios con formas irregulares obligan a las fuerzas de inercia a doblar en cada esquina entrante, lo que resulta en daños en estas esquinas y por lo tanto un pobre desempeño del edificio como un todo durante un sismo (fuente: Murty 2005).

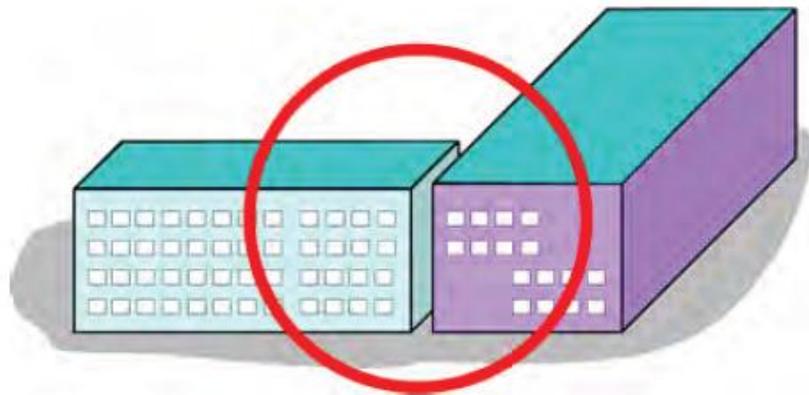


Figura 8. Las juntas de expansión ayudan a simplificar los edificios en planta (fuente: Murty 2005).

Conectar de manera apropiada todos los elementos estructurales a lo largo del recorrido de las cargas

- Irregularidades en altura pueden tener un efecto negativo en el comportamiento sísmico de un edificio. Edificios con entradas en altura (como edificios de hotel con un podio en la base) causan un cambio repentino en la resistencia a sismos en el nivel de la discontinuidad (ver Figura 9a). Los edificios que tienen menos columnas o muros en algún nivel o con un nivel inusualmente alto (ver Figura 9b) exhiben un comportamiento de piso

suave y débil y tienden a ocasionar daños o colapso, que se inician en el nivel irregular. Edificios en terrenos inclinados que poseen columnas de diferente altura a lo largo de la pendiente, usualmente exhiben daños en las columnas cortas (ver Figura 9c).

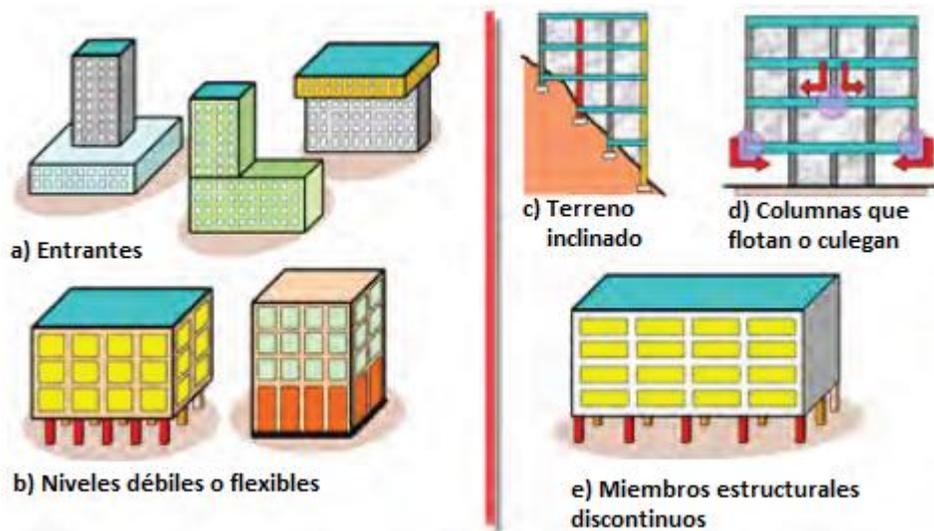
- También son de preocupación las discontinuidades en elementos que son necesarios para transferir las cargas sísmicas del edificio al suelo. Por ejemplo, los edificios que tienen columnas que cuelgan o flotan en vigas en un nivel intermedio y no siguen todo el trayecto hasta la

fundación son vulnerables (ver Figura 9d). Asimismo, edificios que tienen muros de concreto reforzado diseñados para transmitir cargas sísmicas a la fundación, pero son interrumpidos en algunos pisos, son vulnerables (ver figura 9e). Cuando estas paredes son interrumpidas en un nivel superior, es muy probable que el edificio sufra daños severos durante fuertes movimientos sísmicos.

## Diseño no simétrico

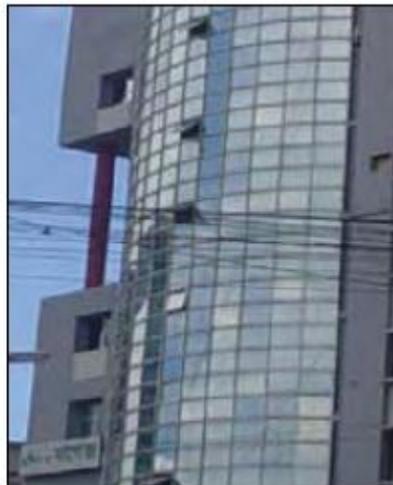
Edificios con formas irregulares carecen de regularidad o simetría en planta. Esto puede resultar en rotación en planta debido a sacudidas sísmicas (ver Figura 10). Por ejemplo, en un edificio con un saliente apoyado en columnas flexibles y esbeltas (ver Figura 11), la parte saliente tiende a girar en planta. Es importante minimizar la torsión de un edificio durante un sismo. La torsión causa

Edificios con recorridos de carga con quiebres tienen un comportamiento pobre ante un sismo



Asegurarse que los edificios tengan simetría en planta y en altura

Figura 9. Cambios repentinos en el recorrido de la carga ocasionan un pobre comportamiento de los edificios durante un sismo: a) entrantes; b) pisos suaves o débiles; c) terreno inclinado; d) columnas que flotan o cuelgan; e) miembros estructurales discontinuos (fuente: Murty 2005).



Miembros estructurales (ej. columnas y muros) no deben ser discontinuos en los niveles inferiores del edificio

Figura 10. Ejemplos de irregularidades verticales (de Bangladesh) que pueden inducir efectos torsionales no deseados (fuente: M. A. Noor).

Hay que asegurarse que los elementos arquitectónicos no alteren la respuesta estructural del edificio

que los elementos estructurales (ej. muros) en un mismo nivel se muevan diferente en el sentido horizontal. Debido a la torsión, las columnas y muros en el lado que se mueve más, experimentan mayores daños (ver Figura 12).

En el pasado, muchos edificios han sido severamente afectados por torsión excesiva durante sismos. Lo mejor es minimizar (o evitar completamente) la torsión, asegurándose que el edificio sea simétrico en planta (ej. con distribución uniforme de masas y colocación uniforme de los elementos verticales que resisten las cargas sísmicas horizontales). Es mejor colocar simétricamente los marcos sismorresistentes en el perímetro exterior del edificio; tales distribuciones aumentan la resistencia del edificio a la torsión.

Por supuesto, es importante tomar en cuenta la estética durante el proceso de diseño. Sin embargo, esto no debe ser a expensas de un buen comportamiento del edificio y una seguridad sísmica adecuada. Deben evitarse las características arquitectónicas que van en detrimento del comportamiento sísmico del edificio. Cuando se incluyen irregularidades arquitectónicas, el diseño estructural siempre requiere un nivel considerablemente más alto de esfuerzo ingenieril.

## Muros de mampostería de relleno

En algunas partes del mundo, especialmente en países en desarrollo, las paredes de mampostería se usan como relleno tanto en los marcos de CR interiores como exteriores (ver Figura 13). El material de los rellenos de mampostería es la variante principal, variando desde elementos de piedra natural



Figura 11. Un edificio con una abertura en la primera planta de un lado gira durante una sacudida sísmica (fuente: Murty 2005).

Se deben proveer marcos sismorresistentes simétricamente a lo largo del perímetro exterior del edificio

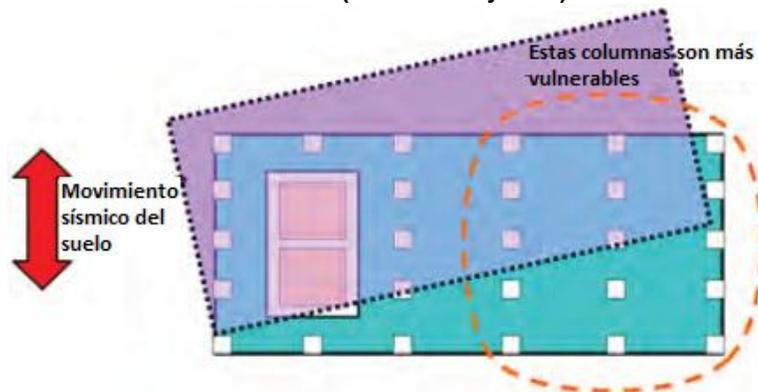


Figura 12. Miembros verticales que se mueven más horizontalmente, sufren mayores daños (Murty 2005).

(ej. granito, arenisca o laterita) hasta bloques y ladrillos hechos por el hombre (ej. ladrillos de arcilla, bloques de concreto sólidos o huecos), como se muestra en la Figura 14.

Es particularmente difícil diseñar estos edificios para que tengan un comportamiento sísmico satisfactorio. El comportamiento de tales edificios en sismos pasados ha revelado que la presencia de paredes de mampostería de relleno es típicamente perjudicial para el comportamiento sísmico del edificio. No se deben usar muros de mampostería de relleno A MENOS que sean específicamente diseñados por un ingeniero para:

- Trabajar en conjunto con los marcos que resisten las cargas laterales, o
- Permanecer aislados del marco.



Algunos constructores creen erróneamente que la presencia de muros de mampostería de relleno mejora el comportamiento sísmico; sin embargo la evidencia de sismos pasados prueban que esta afirmación es generalmente incorrecta (ver Figura 15). Sólo es cierta, si el edificio ha sido cuidadosamente diseñado por un ingeniero para que las paredes de relleno aporten resistencia sin producir la falla del marco. Un marco sin relleno debe ser capaz de resistir los efectos sísmicos (ver Figura 16a). Las paredes de relleno deben ser distribuidas uniformemente en el edificio (ver Figura 16b). Los muros de relleno de mampostería no deben ser discontinuos en ningún nivel intermedio o en la planta baja; esto tendría un efecto no deseado en el recorrido de las cargas (ver Figura 16c).

Los efectos de muros de relleno se deben considerar en el diseño estructural

Figura 13. Construcción típica con paredes de relleno de ladrillo en Turquía: los muros de relleno de mampostería se colocan después de que se completa la construcción del marco (fuente: Gulkan et al. 2002).



a



b

Figura 14. (a) Variedad de unidades de mampostería para paredes de relleno en Perú; (b) Unidades huecas de arcilla típicas de Perú (fotos: H. Faison).

En muchas partes del mundo, las paredes de mampostería se usan como muros de relleno

Los muros de relleno de mampostería afectan significativamente el desempeño sísmico de un edificio de marcos



**Figura 15. Edificio de marcos de CR con paredes de relleno de mampostería en Argelia (después del sismo de 2003 en Boumerdes): (a) Los muros de relleno de mampostería fallaron en ambas direcciones; (b) Falla de muro de relleno de mampostería que muestra agrietamiento diagonal debido a la acción de puntal en compresión (fotos: S. Brzev).**

Los muros de relleno actúan como puntales diagonales y aumentan la rigidez de un edificio de marcos de CR. El aumento en rigidez depende del espesor del muro y el número de paneles de marcos con relleno, y puede llegar a ser muy significativo (hasta 20 veces el de un marco sin relleno). El aumento en la rigidez del edificio debido a la presencia de relleno de mampostería reduce la habilidad del marco a flexionar y deformarse. En marcos de CR dúctiles, el relleno de mampostería puede prevenir que los elementos primarios del marco (ej. columnas y vigas) respondan de una manera dúctil - haciendo que esas estructuras pueden mostrar un comportamiento frágil. Esto puede ocasionar una falla repentina y dramática.

La mampostería confinada es una alternativa viable a los marcos de CR con relleno para edificios de baja altura

Sin embargo, muchos de los edificios de marcos de CR con muros de relleno de mampostería no están diseñados para tomar en cuenta los efectos de las paredes de relleno en el comportamiento del edificio, por lo que este tutorial recomienda evitar este tipo de construcción completamente – ya sea confinando la mampostería o usando muros de corte de CR (ver discusión en Capítulo 5).

Cuando los marcos dúctiles de CR son diseñados para resistir grandes desplazamientos evitando el colapso, los rellenos de mampostería deben aislarse del

marco por una separación suficiente. De esta manera, las paredes de relleno de mampostería no afectan el comportamiento del marco y los desplazamientos del marco no se restringen. Otra ventaja de aislar los rellenos de mampostería es que las paredes se mantienen sin daños, reduciendo así los costos de reparación después del terremoto.

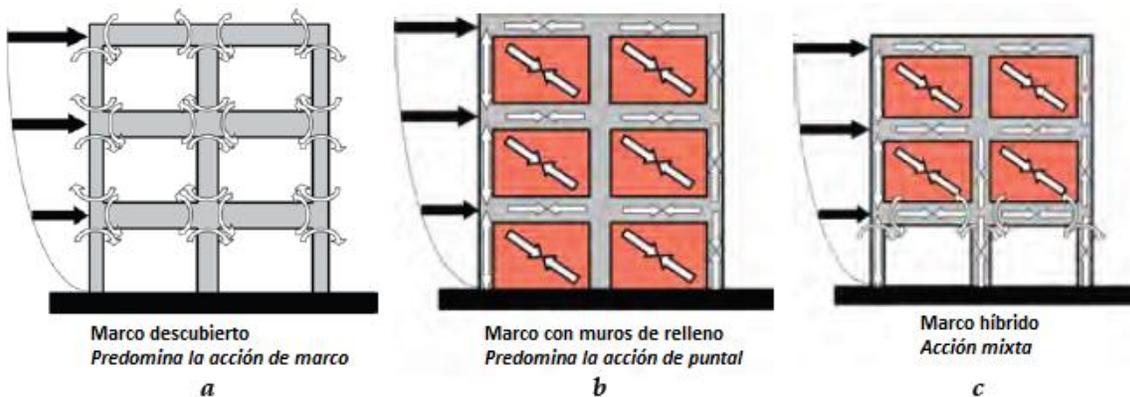
Desde el punto de vista del control de las condiciones climáticas dentro del edificio, las separaciones deben sellarse con un material elástico; estas provisiones pueden ser costosas y requieren buenos detalles constructivos para que se ejecuten con precisión.

Los muros de relleno deben ser distribuidos uniformemente en el edificio

En general, debido al pobre desempeño sísmico de los edificios de marcos no dúctiles de CR así como de los edificios de mampostería resistente a cargas verticales, la construcción con mampostería confinada está emergiendo como una mejor alternativa para edificios de baja altura en países en desarrollo (Brzev 2007, Blondet 2005). Este tipo de construcción es mucho más fácil de construir que los marcos dúctiles con rellenos aislados.

## Resistencia sísmica fuera del plano de muros de relleno

El problema de aislar los muros de relleno de mampostería de los marcos de CR es que



**Figura 16. Muros de relleno influyen el comportamiento de los marcos de CR: (a) un marco descubierto; (b) los muros de relleno se deben distribuir uniformemente en el edificio; y (c) si los rellenos están ausentes en la planta baja esto modifica el recorrido de las cargas, que es perjudicial al desempeño sísmico (fuente: C. V. R. Murty).**

estos muros son susceptibles al colapso en la dirección fuera del plano, eso es, en la dirección perpendicular a la superficie del muro. Esto es particularmente serio en los pisos altos o cuando hay grandes espaciamentos entre columnas. Una vez que la pared de mampostería se agrieta, las sacudidas continuas pueden fácilmente causar el colapso de los bloques pesados de relleno causando una amenaza seria a la vida de los ocupantes del edificio y a los peatones.

## Columnas cortas y cautivas

Algunas columnas en marcos de CR se pueden considerar más cortas en tamaño que otras en el mismo nivel (ver Figura 17). Las *columnas cortas* ocurren cuando un edificio es construido en una pendiente o en edificios con mezzanines o losas que se agregan entre dos niveles regulares (ver Figura 18). En sismos pasados, los edificios



**Figura 17. Un edificio con columnas cortas en el nivel de sótano en Chipre (fuente: Levtchitch 2002).**

de marcos de CR que tiene columnas de diferentes tamaños dentro de un mismo piso sufrieron más daños en las columnas cortas que en las más altas del mismo nivel. Las columnas cortas son más rígidas, y requieren una fuerza mayor para deformarse un determinado desplazamiento que las columnas más altas que son más flexibles. Este aumento en la fuerza generalmente causa daño extenso en las columnas cortas, como se ilustra en las fotos de daños por sismo (ver Figura 19).

Se deben evitar diseños que tengan columnas cortas o cautivas

Hay otra situación especial en edificios donde pueden ocurrir efectos de columna corta. Considere un muro de *mampostería* de altura parcial con una ventana sobre este (ver Figura 20). La porción superior de la columna contigua a la ventana se comporta como una columna corta debido a la presencia del muro de relleno, el cual limita el movimiento de la porción inferior de la columna. En muchos casos, otras columnas en el mismo nivel son de altura regular, ya que no hay muros contiguos a ellas. Cuando la losa de piso se mueve horizontalmente durante un sismo, la parte superior de todas las columnas

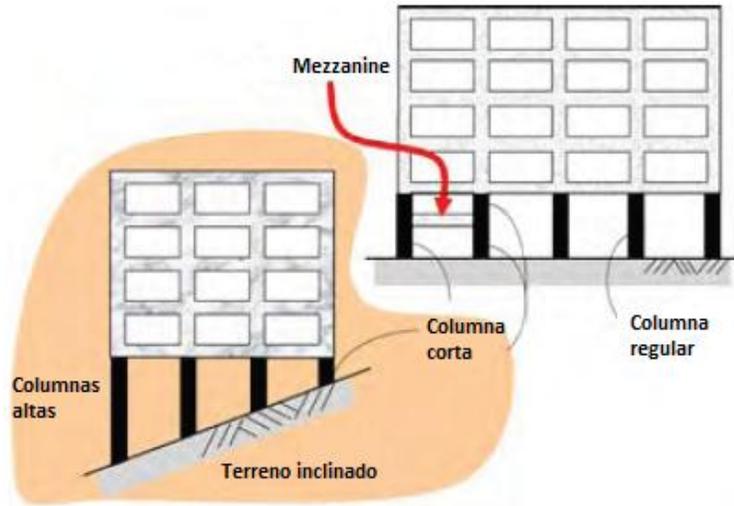


Figura 18. Ejemplos de construcción común de edificios con columnas cortas (fuente: Murty 2005).



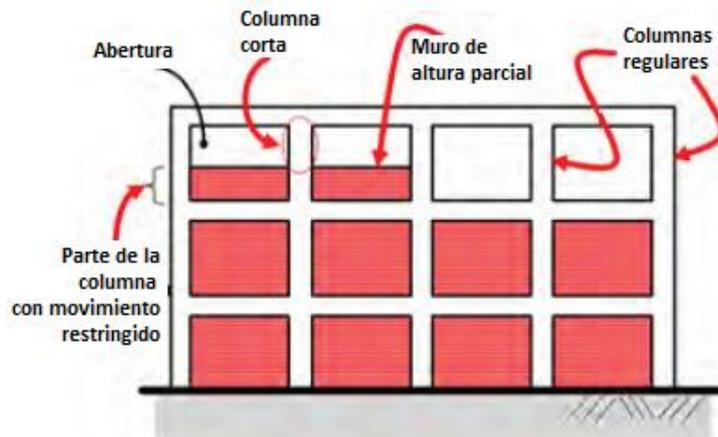
Figura 19. Daños en columnas cautivas de (a) 2003 en el sismo de Boumerdes, Argelia (foto: M. Farsi), y (b) 2001 en el sismo de Bhuj, India (fuente: EERI).

En sismos pasados, columnas cortas en edificios de marcos de CR con columnas de diferentes tamaños en un mismo nivel, experimentaron daños significativos

experimentan el mismo desplazamiento. Sin embargo, los muros rígidos restringen el movimiento horizontal de la parte inferior de la columna cautiva, por lo que la columna se desplaza completamente en *la altura corta* adyacente a la abertura de la ventana. Por otro lado, las columnas regulares se desplazan a lo largo de *toda la altura*. La altura efectiva sobre la cual la columna corta se puede flexionar libremente es pequeña, en consecuencia las columnas cortas atraen fuerzas sísmicas mayores comparadas a las columnas

regulares. Como resultado de esto, las columnas cortas sufren mayores daños. El daño en estas columnas cortas suele ser grietas en forma de X, característico de la falla por cortante.

En edificios nuevos, el *efecto de columna corta* se debe evitar durante la etapa de diseño arquitectónico. En edificios existentes, los rellenos en regiones de columna corta se deben aislar de columnas contiguas. Deben proveerse separaciones adecuadas para que la columna se desplace de un lado a otro sin la interferencia de los muros de relleno de mampostería. Esto es esencial porque estas columnas cortas pueden no haber sido diseñadas para resistir las grandes fuerzas de cortante a las cuales se someten.



**Figura 20.** Las columnas cautivas son comunes en los edificios de CR cuando hay muros de altura parcial contigua a columnas y los muros son tratados como elementos no estructurales (fuente: Murty 2005).

Puede haber un limitado número de situaciones de diseño inevitables que requieren el uso de columnas cortas. Tales edificios se deben diseñar y construir para minimizar su vulnerabilidad a un daño sísmico mayor. Estas columnas cortas se deben reconocer desde la etapa del análisis estructural; el problema de las columnas cortas se torna obvio cuando tales miembros atraen grandes fuerzas de cortante.

## Modificaciones de Edificios Existentes

### Alteraciones

Son comunes las alternaciones en los edificios de marcos de CR con muros de relleno. Por ejemplo, en Argelia, India y Turquía, las modificaciones típicas incluyen cerrar balcones para aumentar el tamaño de los aposentos, o demolición de paredes interiores para expandir apartamentos existentes. En algunos casos, se remueven columnas o muros de carga con tal de expandir el tamaño de apartamentos; alternativamente, se conectan nuevas escaleras perforando las losas; en algunos casos, las paredes se perforan para crear aberturas. Cuando estas alteraciones no fueron tomadas en cuenta en el diseño original o se realizan sin la participación de

profesionales calificados, hay un aumento en el riesgo de daño sísmico.

### Adiciones Verticales

En algunos casos, se agregan niveles adicionales sobre edificios de marcos de CR existentes, sin tomar en cuenta la capacidad soportante de carga de la estructura existente. Los dueños de los edificios usualmente deciden construir estos pisos adicionales cuando se necesita espacio habitacional adicional y cuando las autoridades municipales son poco estrictas sobre los límites de altura. En algunos casos, estas extensiones se realizan sin permisos constructivos. Desafortunadamente, los planes para futuras adiciones a los edificios no siempre toman en cuenta las cargas adicionales en las fundaciones o las fuerzas adicionales que se van a imponer en el marco de CR existente.

Las alteraciones en edificios pueden afectar perjudicialmente su desempeño en un sismo

En algunos países, los edificios de baja altura de uno a tres pisos son provistos con barras de refuerzo que sobresalen desde las columnas en el nivel superior para la construcción futura de niveles adicionales. En general, estas barras sin protección suelen corroerse extensamente si la construcción de la

expansión del edificio no se construye en pocos años. Debido a que la parte inferior de las columnas experimenta esfuerzos altos durante un sismo, se forma un plano de debilidad en el nuevo nivel, que lo hace susceptible al colapso. Un ejemplo de adiciones a edificios vulnerables en Chipre se muestra en la Figura 21.

## Edificios adyacentes: Efecto de Martilleo

Cuando dos edificios se encuentran muy cerca uno del otro, pueden colisionar durante sacudidas fuertes; este efecto se conoce como *martilleo*. El efecto de martilleo es más pronunciado en edificios altos. Cuando la altura de los edificios no concuerda, el techo del edificio más pequeño puede golpear en una altura media de las columnas del edificio más alto; esto puede ser muy peligroso, y puede llevar al colapso del nivel (ver Figura 22 y Figura 23).



Figura 21. Un ejemplo de un edificio de marcos de CR existente en Chipre mostrando columnas débiles, marco incompleto y un pesado y rígido parapeto (fuente: Levitchich 2002).

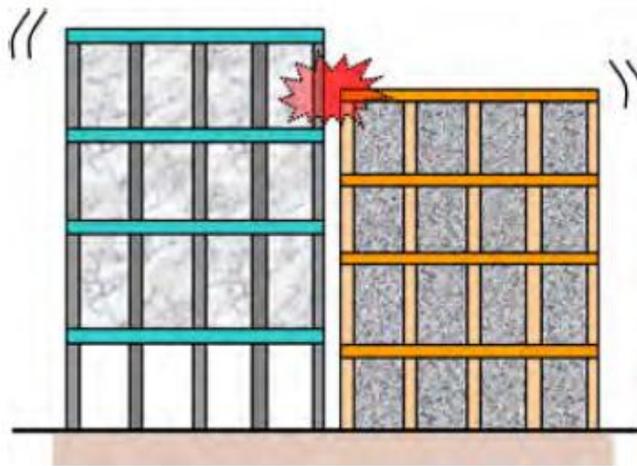


Figura 22. El martilleo puede ocurrir en edificios adyacentes ubicados muy cerca uno del otro, debido a la sacudida inducida por un sismo (fuente: Murty 2005).



Figura 23. (a) Martilleo entre un edificio de seis pisos y uno de dos pisos en Golcuk, Turquía causando daños en las columnas del edificio de seis pisos durante el sismo de 1999; (b) Detalle del daño por martilleo en un edificio de seis pisos mostrado en la figura (a) (fuente: Gulkan et al. 2002).

## Pisos Suave y Débil

El tipo más común de irregularidad vertical ocurre en edificios que poseen una planta baja *abierta*. Un edificio con la planta baja abierta tiene tanto columnas como muros de relleno de mampostería en los niveles superiores pero solo columnas en la planta baja (ver Figura 24). Puesto de manera simple, ¡parece que estos edificios están siendo soportados por palillos!. Edificios con la planta baja abierta han mostrado consistentemente un desempeño pobre durante sismos pasados en todo el mundo. Por ejemplo, un número significativo de estos edificios colapsaron durante los sismos de

1999 en Turquía, 1999 en Taiwán, 2001 en India y 2003 en Argelia. En muchos de los casos, la parte superior de un edificio con la planta baja abierta (sobre el nivel de la planta baja) se mueve como un solo bloque rígido; esto hace que el edificio se comporte como un péndulo invertido, con las columnas de la planta baja actuando como la *barra del péndulo* y el resto del edificio actuando como la *masa rígida del péndulo*. Como consecuencia, ocurren grandes movimientos localmente solo en la planta baja, induciendo, de este modo, grandes daños en las columnas durante un sismo (ver Figura 25). Un piso débil o blando también puede ocurrir en los niveles intermedios de un



Figura 24. Edificio típico con planta baja débil en India (fuente: ERRI 2001).

edificio, y causar daños y colapso en esos niveles (ver Figura 26).

Los siguientes dos rasgos son característicos de los edificios con planta baja abierta:

(a) Planta baja relativamente *flexible* en comparación con los niveles superiores, ej. el movimiento relativo horizontal en la planta baja es mucho mayor que en los pisos

superiores. Esta planta baja flexible se llama *piso suave* (ver Figura 24).

(b) Planta baja relativamente *débil* en comparación con los niveles superiores, ej. la fuerza (carga) horizontal total de sismo resistida en la planta baja es significativamente menor que la de los pisos superiores. Por lo tanto, la planta baja abierta es un *piso débil*.

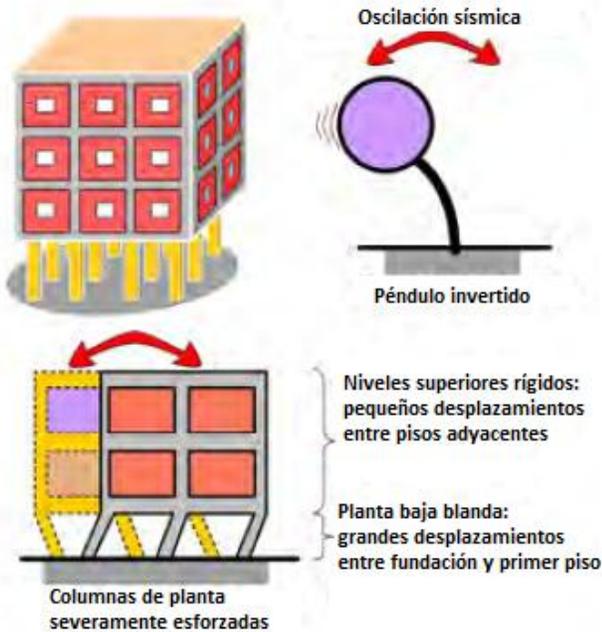


Figura 25. Deformaciones excesivas solo en la planta baja no son deseadas debido a que las columnas de este nivel toman esfuerzos mucho mayores a los anticipados en el diseño (fuente: Murty 2005).



Figura 26. Un ejemplo de colapso de un edificio debido a un piso suave intermedio en el sismo de 2001 en Bhuj, India (fuente: EERI 2001).

Los edificios con planta baja abierta se conocen como *edificios con piso suave*, aunque su planta baja puede ser tanto *suave* como *débil*. Generalmente, los pisos suaves o débiles se encuentran en el nivel de planta baja (Figura 27), pero también pueden encontrarse en cualquier otro nivel.

### Como Evitar Pisos Suaves

Los arquitectos e ingenieros estructurales pueden usar la siguiente estrategia de diseño conceptual para evitar desempeños no

deseados de los edificios con planta baja abierta durante un sismo:

- Proveer algunos muros de corte en la planta baja abierta: esto debería ser posible hasta cuando la planta baja abierta se está utilizando para ofrecer parqueos (ver Figura 28b).

Los edificios con piso suave son extremadamente susceptibles al daño y hasta al colapso provocado por un sismo



Figura 27. Colapsos de edificios debido al efecto de piso suave: (a) Un edificio de concreto de baja altura que colapsó en el sismo de 2003 en Boumerdes, Argelia (foto: S. Brzev); (b) Un mecanismo de piso débil se desarrolló en el primer piso de un edificio de funciones mixtas – la planta baja se utilizaba para uso comercial y carecía de la rigidez aportada por los muros de relleno en los pisos superiores (fuente: Gulkan et al. 2002); (c) Colapso por piso suave en el sismo de 1999 en Chi Chi, Taiwán (fuente: Yao y Sheu 2002).

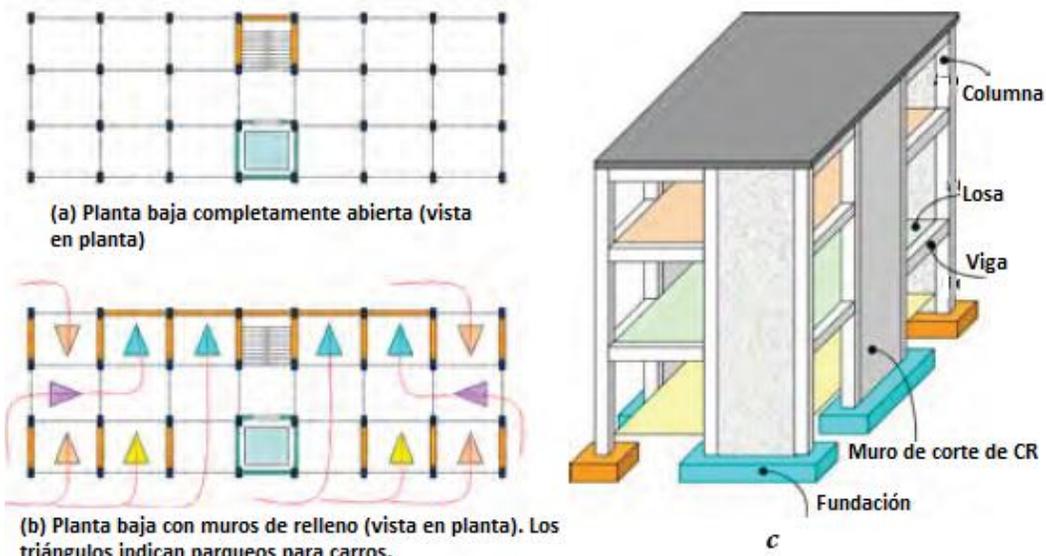


Figura 28. El edificio se debe diseñar tomando en cuenta los efectos en el desempeño de un piso abierto (a). Esto puede incluir (b) proveer muros en todos los paneles posibles del piso abierto, o (c) escoger un sistema estructural alternativo ej. muros de corte de CR, para resistir las cargas laterales de sismo (fuente: Murty et al. 2006).

Se deben evitar niveles completamente abiertos – usar otras estrategias alternativas de diseño

- Seleccionar un sistema estructural alternativo (ej. muros de corte de CR) para proveer resistencia sísmica. Cuando el número de paneles en la planta baja que se pueden rellenar con muros de mampostería es insuficiente para ofrecer la rigidez y resistencia lateral necesaria para la planta baja, un marco dúctil no es una opción adecuada. En tales casos, se requiere un sistema alternativo, como un muro de corte de CR, para proveer la resistencia sísmica (ver Figura 28c).

## Falla por Viga Fuerte – Columna Débil

En un edificio de marcos de concreto reforzado sujeto a sacudidas sísmicas, los efectos sísmicos se transmiten de las vigas a las columnas y después a las fundaciones. Las conexiones viga-columna también son críticas para asegurar un comportamiento sísmico satisfactorio en estos edificios. El enfoque aceptado actualmente para el diseño sísmico de marcos de concreto reforzado es el llamado *columna fuerte – viga débil*. Los principios de diseño asociados a este enfoque se resumen a continuación:

- (a) Las columnas (que reciben las fuerzas de las vigas) se deben diseñar para ser más fuertes en flexión que las vigas, y de la misma manera, las fundaciones (que reciben las fuerzas de las columnas) se deben diseñar para ser más fuertes que las columnas. Las columnas se pueden hacer más resistentes en flexión que las vigas teniendo una mayor área de sección transversal y una mayor cantidad

de acero longitudinal que la viga.

- (b) Las conexiones entre vigas y columnas así como entre columnas y fundaciones se deben diseñar para que se evite su falla asegurando la transmisión de las fuerzas de manera segura entre estos elementos.

Reportes de sismos pasados en todo el mundo han confirmado que los edificios diseñados contrarios al enfoque de columna fuerte – viga débil a menudo fallan en sismos.

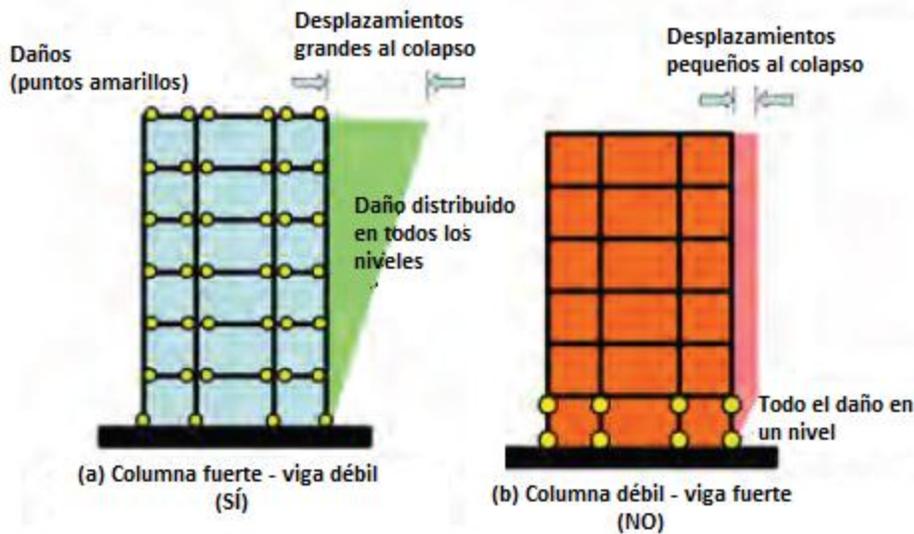
Cuando el enfoque de columna fuerte – viga débil se sigue en el diseño, se espera que el daño ocurra *primero* en las vigas. Cuando las vigas son detalladas adecuadamente asegurando un comportamiento dúctil, el marco del edificio es capaz de deformarse significativamente, a pesar del daño progresivo causado por la consecuente cedencia del refuerzo de la viga. En sismos mayores, este tipo de daño se da en varias vigas a lo largo de la estructura; sin embargo, esto se considera “daño aceptable” porque es poco probable que cause un colapso repentino del edificio (ver Figura 29a). En contraste, las columnas que son más débiles en comparación con las vigas sufren severos daños localizados en la parte superior e inferior de un nivel en particular (ver Figura 29b); esto puede causar el colapso de un edificio entero, a pesar de que las columnas de los niveles superiores se mantengan prácticamente intactas.

Estas estructuras vulnerables son caracterizadas por tener dimensiones de columnas relativamente pequeñas comparadas a las dimensiones de las vigas y son conocidas como estructuras con “viga fuerte – columna débil” (como se muestra en la Figura 30 [derecha]). Las fallas de columnas pequeñas y débiles se han reportado en sismos alrededor del mundo (ver Figura 31 y Figura 32). Por ejemplo, varios edificios de concreto reforzado colapsaron debido a este efecto en el sismo

Edificios de marcos de CR diseñados adecuadamente experimentarán daños en varias vigas durante sacudidas fuertes, pero este tipo de daño usualmente no lleva al colapso

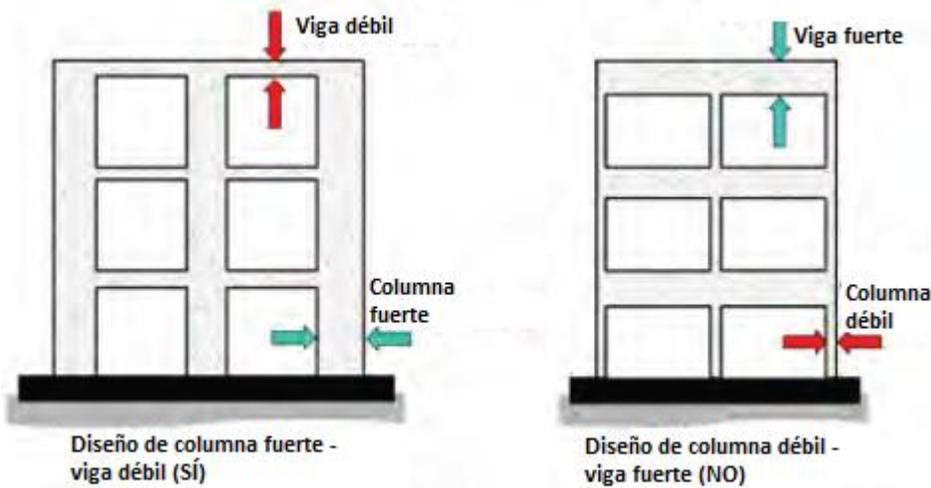
de 1999 en Turquía (ver Figura 32). Usualmente el daño es muy extenso, aunque la falla completa del edificio no ocurra,

haciendo que la reparación no sea viable. Estos edificios usualmente son demolidos después del sismo.



Las conexiones viga-columna son críticas para el desempeño satisfactorio del edificio

Figura 29. Dos distintos enfoques de diseño resultan en comportamiento sísmico significativamente diferentes (fuente: Murty 2005).



Las columnas deben ser más fuertes que las vigas

Figura 30. Las vigas se deben diseñar para actuar como los enlaces débiles en un edificio de marcos de CR; esto se puede lograr diseñando las columnas más fuertes que las vigas (fuente: C. V. R. Murty).



**Figura 31. Colapso de un edificio de marcos de CR de varios pisos debido al diseño de columna débil – viga fuerte en el sismo de 2001 en Bhuj, India (foto: C. V. R. Murty).**

Los edificios con columnas débiles y vigas fuertes experimentan primero daños en las columnas; esto puede llevar al colapso del edificio



**Figura 32. Colapso de varios pisos en un edificio de seis pisos debido al diseño de columna débil – viga fuerte en el sismo de 1999 en Turquía (fuente: Gulkan et al. 2002).**

### 3. Consideraciones de detallado

#### Sobre Ductilidad

Las sacudidas sísmicas causan movimientos vigorosos bajo el edificio y por lo tanto le transmiten energía. La filosofía del diseño sismorresistente es hacer que el edificio absorba esta energía permitiendo el daño en puntos deseados de los elementos estructurales. Este daño es asociado a grandes deformaciones, y extensiva cedencia (estiramiento) del acero de refuerzo en miembros de concreto reforzado. Este comportamiento se conoce como comportamiento dúctil. La *ductilidad* denota la habilidad de una estructura para sostener grandes deformaciones bajo condiciones de carga extremas absorbiendo así una cantidad significativa de energía sísmica. Es particularmente retador alcanzar la ductilidad en miembros de CR debido al diferente comportamiento del concreto y el acero: el concreto es un material frágil, el cual sufre aplastamiento cuando es sujeto a compresión y se agrieta cuando es sujeto a tracción; por otro lado, el acero muestra un comportamiento dúctil cuando está sujeto a tracción. Como resultado, se puede hacer que las estructuras de concreto reforzado se comporten de manera dúctil cuando se

diseñan para tomar ventaja de las propiedades dúctiles del acero.

Sin embargo, una de los retos claves asociados al diseño sismorresistente de estructuras de concreto reforzado es asegurarse que los miembros se comporten de manera dúctil y que el daño ocurra en puntos predeterminados. Esto se puede lograr aplicando el *Enfoque de Diseño por Capacidad* el cual se puede explicar usando la analogía de la cadena (ver Figura 33). Considérese una cadena hecha de eslabones frágiles; cuando se jalen, la falla de cualquiera de los eslabones causa una falla frágil en la cadena. Sin embargo, cuando un eslabón dúctil se introduce en la cadena, se puede obtener una falla dúctil si el eslabón dúctil es el más débil y falla primero. Para que se dé la falla dúctil en este tipo de estructura, los eslabones frágiles deben ser más fuertes en comparación con el eslabón dúctil.

El acero y el concreto se combinan para tomar ventaja de los mejores atributos de cada material

El diseño sismorresistente pretende asegurar que el daño ocurra en puntos específicos del edificio

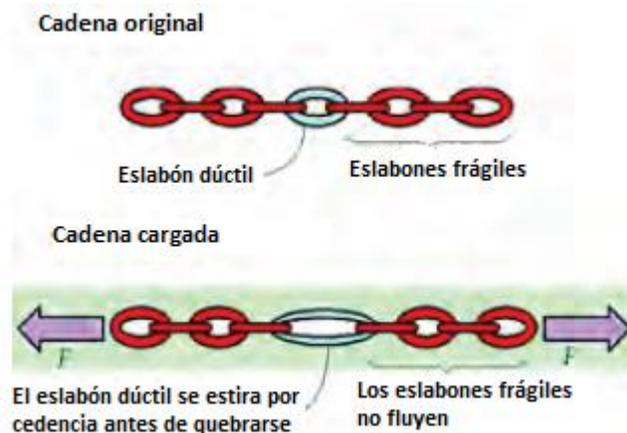


Figura 33. El Método de Diseño por Capacidad puede asegurar que la cadena falle de manera dúctil (fuente: Murty 2005).

Es deseable el comportamiento dúctil de los edificios de marcos de CR en sismos ya que ayuda a asegurar la vida de los ocupantes del edificio. El comportamiento dúctil se asegura diseñando cuidadosamente las vigas, columnas y uniones, de manera que se prevenga el colapso aunque se dé un sismo devastador.

Las estructuras dúctiles absorben la energía sísmica a través de daños localizados, previniendo así el colapso

Hay que notar que, en casos extremos, se pueden dar daños significativos en los edificios dúctiles. La principal estrategia es prevenir la ocurrencia de modos de falla frágiles antes de que el modo de falla dúctil se inicie.

El detallado dúctil es el proceso de asegurar que los principios anteriores se apliquen cuando se proporcionan los miembros de marcos de CR y se provee el refuerzo requerido. Esto se alcanza escogiendo adecuadamente las dimensiones de las barras de refuerzo y su colocación, en las vigas, columnas y uniones, como se discute a continuación.

## Vigas

### **Modos de falla**

Las vigas pueden experimentar uno de los siguientes modos de falla:

Las vigas, columnas y uniones pueden ser diseñadas cuidadosamente de manera que se prevenga el colapso aunque se dé un sismo devastador

- (a) *Falla por flexión* (frágil o dúctil); la falla frágil ocurre cuando hay mucho refuerzo horizontal en la zona de tracción de la viga, mientras que la falla dúctil ocurre si la viga está diseñada a la inversa, con relativamente menos acero en el área de tracción.

- (b) *Falla a cortante*; esto ocurre cuando la cantidad (tamaño y/o espaciamiento) de los estribos no es adecuado. Esta falla, caracterizada por agrietamiento diagonal en las zonas finales de las vigas, siempre es frágil y se debe evitar proveyendo estribos cerrados con poca separación entre sí.

No se desea tener modos de falla frágiles y deben evitarse por medio del diseño y detallado cuidadoso del refuerzo horizontal y de los estribos, como se discute en esta sección.

### **Ubicación y cantidad de las barras de refuerzo horizontal**

Las barras de refuerzo horizontal deben colocarse a lo largo de la longitud de la viga para resistir el agrietamiento por flexión en las caras sujetas a tracción. A diferencia del caso de cargas por gravedad, donde la dirección de la carga siempre es conocida, las fuerzas laterales cambian de dirección durante la sacudida sísmica del suelo. Como resultado, las caras superior e inferior pueden estar sujetas a tracción y requerir refuerzo horizontal (ver Figura 34). El comportamiento de una viga es diferente ante las diferentes cargas. La viga sin deformar y sin ninguna carga no tiene tracción en ninguna de las caras (condición A). Sin embargo, ante las cargas gravitacionales, cuando la dirección no cambia (condición B), la cara inferior en el centro de la viga está en tracción, (ver el polígono rojo que ahora es más grande que el rectángulo original en la condición A), mientras que la cara superior está en compresión (ver el polígono azul que es ahora menor al rectángulo original en A). Por el otro lado, para las sacudidas sísmicas en una dirección (condición C), la cara superior en un lado de la viga está en tracción y la cara inferior del mismo lado está en compresión (ver los polígonos rojo y azul). Al mismo tiempo, debido al momento inverso en

el otro lado, la cara superior está en tracción y la cara inferior en compresión.

Cuando se revierte la dirección de la carga, la situación en la viga es la opuesta. Cualquier porción de la viga que se espera este en tracción (polígonos rojos) debe tener barras de refuerzo horizontal para resistir el agrietamiento del concreto. Ante cargas sísmicas, ambas caras de la viga requieren refuerzo, a diferencia de las cargas gravitacionales, donde la dirección de la carga no cambia y la tracción se genera solo en una de las caras. Así, diferentes secciones de la viga necesitan refuerzo dependiendo de la condición de carga.

En general, es buena práctica de diseño sísmico colocar al menos dos barras (con el total del área de acero no menor a la obtenida de los cálculos) en las caras superior e inferior a lo largo de *toda la longitud* de la viga. En los lados de la viga, la cantidad de acero inferior debe ser al menos igual a la mitad de la que se coloque en el lado superior.

Ya que en la construcción no es práctico usar barras de refuerzo muy largas, generalmente es necesario usar barras de menor longitud y unir las para que puedan cubrir toda la distancia requerida. Para asegurarse que el refuerzo es lo suficientemente fuerte cuando se une con otras piezas, las barras se deben traslapar una distancia específica, dependiendo de su diámetro. Esta distancia se llama *traslape*. El traslape se debe evitar en regiones donde se espera que las barras horizontales fluyan por tracción. Las barras superiores deben traslaparse en el tercio medio de la longitud de tramo efectiva (ver Figura 35). El traslape debe tener una longitud adecuada y la longitud de traslape debe confinarse por medio de estribos cerrados. En general, los códigos sísmicos establecen que en cualquier sección no debe traslaparse más del 50% de las barras.

Se debe evitar la falla frágil de la viga debido a cortante

Deben proveerse estribos con poca separación cerca de los bordes de la viga y en las longitudes de traslape

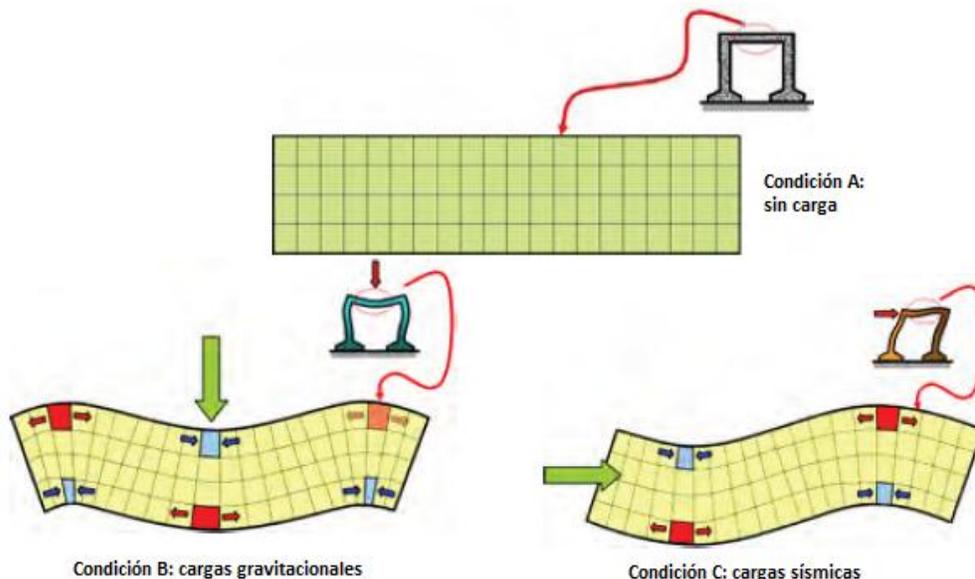


Figura 34. El comportamiento de la viga ante diferentes condiciones de carga: (A) sin carga; (B) cargas gravitacionales; (C) sacudidas sísmicas en una dirección; el refuerzo requerido en diferentes zonas de la viga dependen de la condición de carga (fuente: H. Faison).

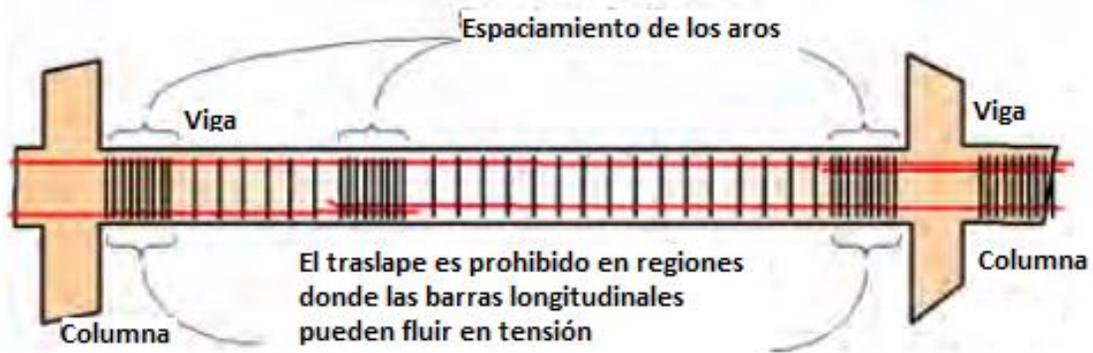


Figura 35. Los estribos deben tener poca separación en los extremos de las vigas y en el los tralapes (fuente: Murty 2005).

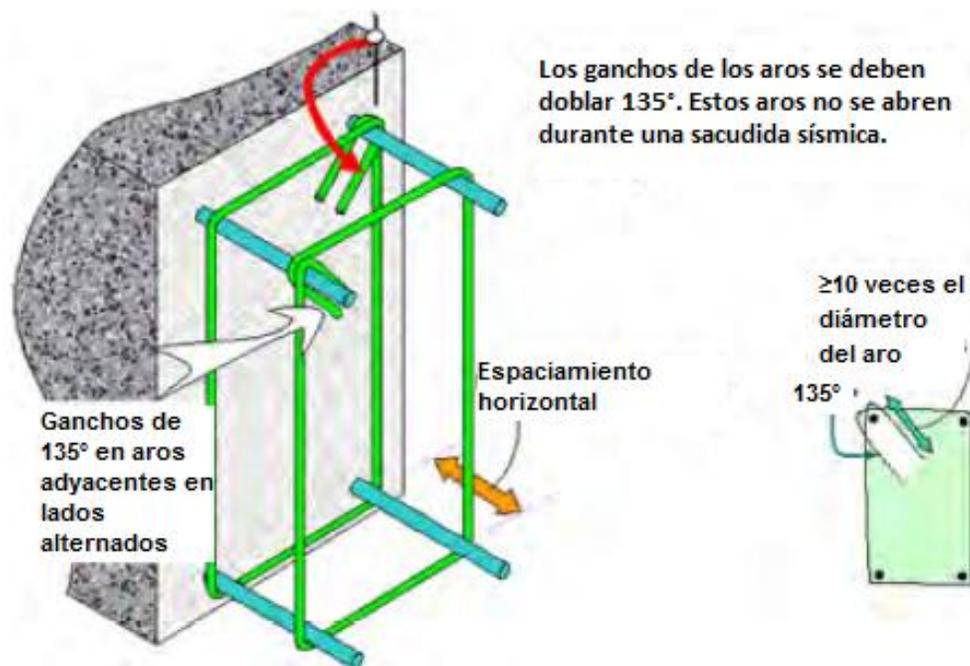


Figura 36. Las vigas de CR deben tener estribos con ganchos de 135° alrededor de las barras horizontales (fuente: Murty 2005).

## **Estribos**

Los estribos previenen la falla frágil a cortante en vigas de CR, resistiendo las grietas de cortante diagonales y evitando que el concreto sea expulsado debido a la flexión; los estribos además dan confinamiento y previenen el pandeo de las barras horizontales en compresión.

Todos los estribos cerrados deben tener un gancho de 135° colocado en lados alternos en estribos adyacentes. Tales estribos no se abren durante sacudidas sísmicas fuertes (ver Figura 36) ya que el final del estribo está embebido en el núcleo confinado. De manera simple, estos estribos actúan como las fajas metálicas de un barril de madera con agua. El agua dentro del barril ejerce una presión que empuja las tablas de madera hacia afuera. Las fajas de metal resisten esta presión y previenen que el barril se reviente. De manera similar, los estribos en la viga resisten la presión desde dentro de la viga, y mantienen el núcleo de concreto intacto. El espaciamiento de los estribos en cualquier porción de la viga se determina de los cálculos de diseño. En general, los códigos sísmicos establecen que se deben colocar estribos muy cercanos cerca de la cara de la columna, por una longitud igual a dos veces la profundidad de la viga.

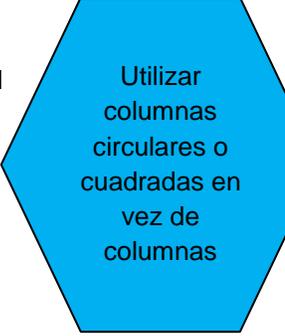
## **Columnas**

### ***Modos de falla***

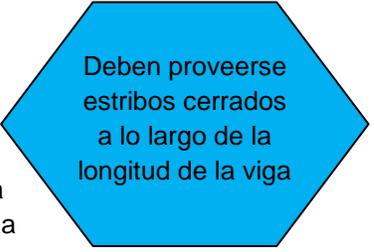
Las columnas de CR pueden experimentar dos modos de falla, llamados falla de flexocompresión y falla a cortante. Idealmente, la resistencia de la columna a los efectos de flexocompresión se limita haciendo las columnas más fuertes que las vigas (como se discutió en el Capítulo 2). Como resultado, las vigas, y no las columnas, absorben la energía sísmica y sufren daños en el proceso. Esta resistencia

se determina, entre otros factores, por el área total transversal del refuerzo de acero vertical. La falla a cortante es frágil y debe evitarse en las columnas mediante la colocación de estribos con poca separación entre sí que confinen todas las barras verticales.

Las columnas altas y esbeltas generalmente tienden a ser más débiles cuando el ancho de la columna en la dirección del marco es pequeño. Para prevenir el efecto no deseado de “columna débil-viga fuerte” (discutido en el Capítulo 2), los códigos de diseño sísmico requieren que las columnas sean más fuertes que las vigas. Ya que las columnas son generalmente más anchas que las vigas que se le unen formando el marco, y tienen una mayor cantidad de acero de refuerzo, el ancho de las columnas en la dirección de acción del marco debe ser generalmente igual o mayor al ancho de las vigas que se le unen. Además, las columnas circulares con refuerzo en espiral tienden a mostrar un comportamiento sísmico superior sobre las columnas rectangulares de una misma área transversal. Sin embargo, el refuerzo en espiral no es común en las prácticas de diseño, particularmente en las columnas rectangulares o cuadradas. Adicionalmente, toda la longitud de la espiral debe hacerse con una sola barra. Además, los extremos de la espiral deben ser anclados de manera segura a la unión viga-columna o al sistema viga-entrepiso.



Utilizar columnas circulares o cuadradas en vez de columnas



Deben proveerse estribos cerrados a lo largo de la longitud de la viga

### ***Barras de refuerzo vertical***

Las barras de refuerzo vertical resisten cargas axiales y momentos flectores desarrollados en la columna debido a las cargas gravitacionales así como por

Deben evitarse las barras que se extienden más allá de las columnas, con la intención de construir ampliaciones futuras, ya que se corroen extensamente después de pocos años.

sacudidas sísmicas. Las barras verticales deben distribuirse en todos los lados de la columna. Se prefiere utilizar un mayor número de barras más pequeñas que menos barras de un diámetro mayor, aunque tengan la misma área transversal total.

No debe traslaparse más del 50% de las barras en cualquier punto (ver Figura 37). Los traslapes deben realizarse solo en la zona del medio de la longitud del elemento – no se recomienda colocar traslapes en las regiones superior e inferior de la columna (ver Figura 38).

### ***Estribos horizontales***

Los traslapes de las barras de refuerzo longitudinal solo deben realizarse a media altura de las columnas

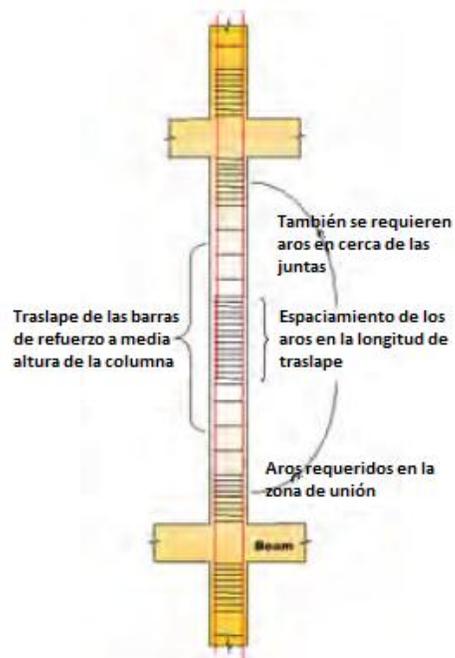
Mientras que las cargas verticales y momentos flectores son resistidos por el acero de refuerzo vertical, las fuerzas sísmicas laterales son resistidas por estribos horizontales cerrados (ver Figura 39). Los estribos horizontales deben diseñarse para restringir el desarrollo de

grietas de cortante diagonales. Más aún, los estribos horizontales mantienen unidas las barras verticales y previenen que sufran pandeo excesivo, y confinan el núcleo de concreto dentro de la columna. Por lo tanto, los estribos ayudan a prevenir el aplastamiento del núcleo de concreto para que pueda continuar resistiendo las cargas verticales. Varios sismos han revelado fallas en las columnas debido a que los estribos están muy separados, no tienen ganchos de 135°, o están diseñados inadecuadamente (ver Figura 40).

Los estribos deben terminar con un gancho de 135° con una extensión suficiente para asegurar un confinamiento adecuado del concreto dentro del estribo. Estas longitudes son usualmente establecidas por los códigos nacionales. Los ganchos deben estar embebidos dentro del núcleo de concreto de manera que no se abran durante las sacudidas sísmicas comprometiendo la integridad del núcleo de concreto. Si alguno de los lados de la columna, y por consiguiente del estribo, es muy grande, deben utilizarse ganchos que eviten que el estribo se abra (ver Figura 41). Deben proveerse estribos con poco espaciamiento entre sí en los extremos de la columna, por lo menos en la longitud establecida por los códigos nacionales.

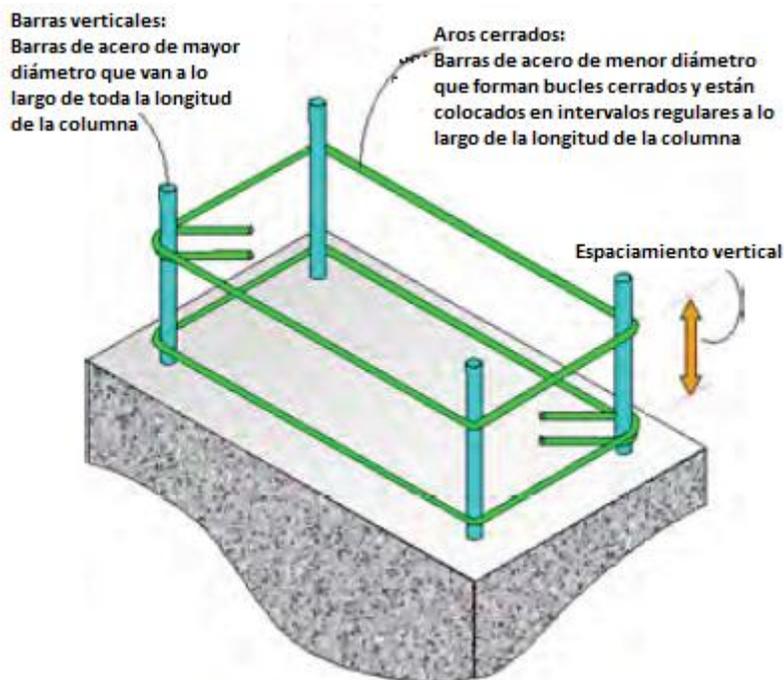


**Figura 37. Inadecuada longitud de traslape y ubicación para futuras construcciones – el 100% de los traslapes está en la base de la columna (fuente: Mejía 2002).**



Los estribos cerrados horizontales aportan confinamiento al núcleo de concreto de las columnas, de manera que el edificio no pierda capacidad para soportar las cargas verticales

Figura 38. Los estribos deben tener poco espaciamiento entre sí en el extremo superior e inferior de las columnas y en los traslapes (fuente: Murty 2005).



Todos los estribos de columnas, uniones y vigas deben tener ganchos de 135°

Figura 39. El acero de refuerzo en columnas debe tener estribos con ganchos de 135° alrededor de las barras verticales (fuente: Murty 2005).

Las uniones deben tener concreto con suficiente resistencia para transmitir cargas entre vigas y columnas



Figura 40. Ejemplos de columnas que fallaron durante el sismo de 2001 en Bhuj, India: (a) pandeo de las varillas verticales de refuerzo en columnas debido a un inadecuado espaciamiento de estribos horizontales (fuente: EERI 2001); (b) daño severo de una columna de planta baja debido a un inapropiado confinamiento del concreto y el traslape de un gran número de varillas longitudinales (fuente: Jaiswal et al. 2002); (c) Estribos horizontales con ganchos de 90° muy separados, los cuales no fueron capaces de confinar el núcleo de concreto (se debían usar ganchos de 135°) (fuente: Jaiswal et al. 2002).

Las barras longitudinales de vigas y columnas deben confinarse con estribos cerrados en la región del nudo

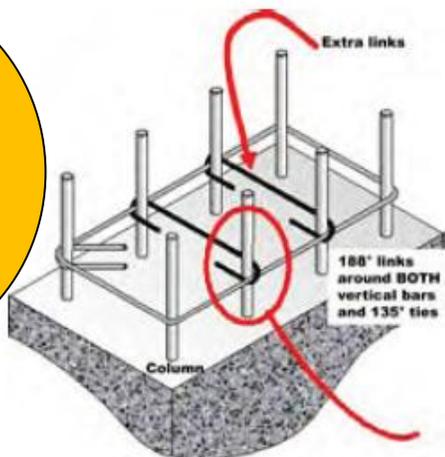
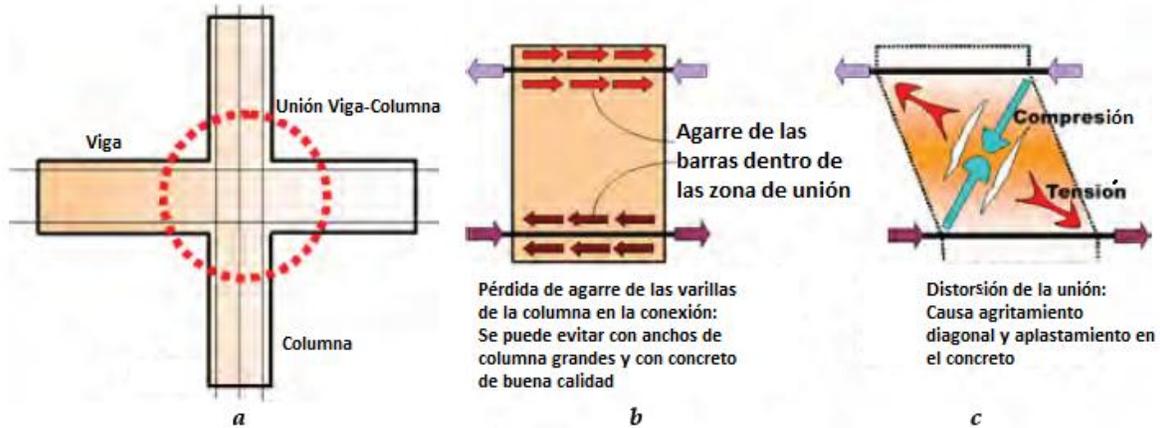


Figura 41. Se requieren ganchos adicionales en la dirección horizontal a intervalos regulares para mantener el concreto en su lugar y para prevenir que las barras de refuerzo verticales de la columna se pandeen (fuente: Murty 2005).

## Uniones Viga-Columna

La unión viga-columna es el área donde se intersecan las vigas y columnas (ver Figura 42a). Durante una sacudida sísmica, las uniones viga-columna pueden sufrir daños severos si no se le presta la atención debida al diseño y detallado. Las fuerzas sísmicas causan que la unión viga-columna sea halada en una dirección en el refuerzo superior y en la otra dirección en el refuerzo inferior (ver Figura 42b). Estas fuerzas son resistidas por la adherencia del concreto y el

acero en la región de la conexión. Cuando la columna no es lo suficientemente ancha o la resistencia del concreto en la unión es muy baja, hay insuficiente adherencia entre el concreto y el acero de refuerzo; esto causa que las barras de refuerzo deslicen y pierdan su capacidad de llevar cargas. Si las fuerzas que halan y empujan son muy grandes para que la unión las resista, puede ocurrir una distorsión geométrica en la región de la conexión, ocasionando la formación de grietas diagonales de cortante (ver Figura 42c).



**Figura 42. Uniones viga-columna: (a) la intersección de vigas y columnas se conoce como uniones viga-columna; (b) Las fuerzas que halan y empujan la unión durante las sacudidas sísmicas causan fuerzas de tracción y compresión que ocasionan daños irreparables en la unión; (c) Distorsión de la unión causa agrietamiento diagonal y aplastamiento del concreto (fuente C.V.R. Murty).**

La importante demanda de esfuerzos que se da en las barras de acero y el concreto en la zona de unión de viga y columna obliga que se le dé atención especial al diseño y detallado de estas regiones. Cuando la unión viga-columna no es capaz de transmitir las fuerzas internas de vigas a columnas, es probable que fallen prematuramente de manera frágil, poniendo en peligro la seguridad de todo el edificio (ver Figura 43).

Se deben asegurar dos factores importantes en el diseño de las uniones viga-columna:

- (a) Las barras de acero deben ser continuas en la zona de conexión; esto aplica para las uniones internas y externas (ver Figura 44); y
- (b) Las barras de refuerzo vertical en las columnas deben mantenerse en su lugar por medio de estribos transversales cerrados poco espaciados en la unión viga-columna (ver Figura 45). Experimentos de laboratorio han demostrado que a mayor volumen de concreto confinado en la región de la unión viga-columna, mejor es el comportamiento sísmico de la unión.

horizontales de la viga deben ser ancladas dentro de la columna para asegurar una adherencia adecuada de estas barras en la conexión. Generalmente esto se logra doblando la barra en ganchos a 90° (ver Figura 46). En las uniones internas, las barras de la viga deben ser continuas a través de la unión. Es más, estas barras deben colocarse dentro de la armadura de la columna, entre las barras verticales y los estribos horizontales y sin ningún doblez (ver Figura 47).

Cuando las columnas rectangulares son necesarias, debe considerarse el uso de ganchos transversales para prevenir el pandeo de las barras verticales

En las uniones exteriores, donde las vigas terminan en las columnas, las barras



Figura 43. Falla a cortante de una unión viga-columna de CR durante el sismo de 1985 en Ciudad de México, debido a que las barras de refuerzo de la viga se colocaron afuera de la armadura de la columna (fuente: EERI 2000).



Figura 44. Detallado inapropiado del refuerzo de una unión viga-columna en India: las barras de refuerzo de la viga son discontinuas en la unión; se requiere que estas barras sean continuas y que aporten confinamiento al concreto en la zona de la unión (notar la ausencia de estribos en la unión) (fuente: Jaiswal et al. 2002).

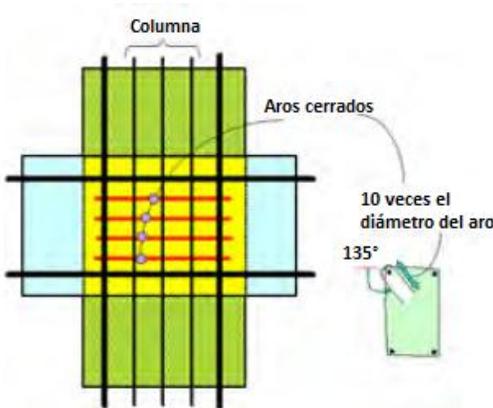


Figura 45. Deben proveerse estribos cerrados con poco espaciado entre sí en la zona de la unión viga-columna (fuente: Murty 2005).

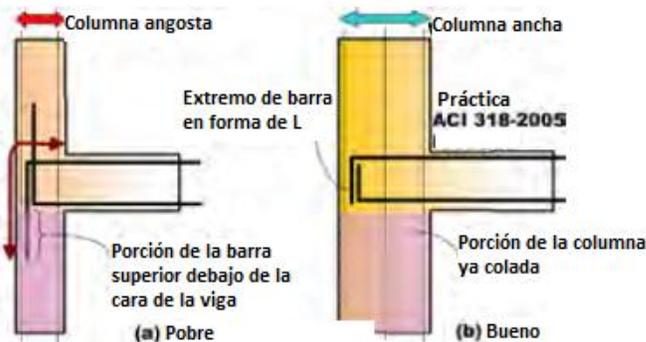


Figura 46. Detallado del anclaje de las barras de vigas en uniones exteriores (fuente: Murty 2005).

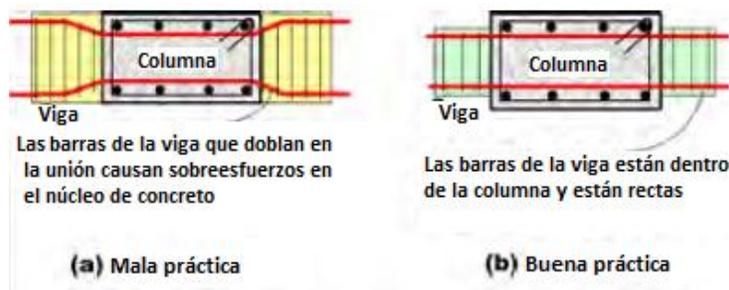


Figura 47. Detallado del refuerzo en la unión que muestra la importancia de colocar el acero de refuerzo horizontal de la viga dentro de la armadura de la columna (fuente: Murty 2005).

## Muros de relleno de mampostería

Como se discutió en el Capítulo 2, hay dos diferentes enfoques para los muros de relleno de mampostería en edificios de marcos de CR. Estos son:

- Aislar estos muros del marco (se deben diseñar como marcos dúctiles) y,
- Integrar la mampostería al marco (se deben diseñar como marcos rellenos dúctiles).

Para cada uno de los enfoques para los muros de relleno de mampostería se requieren diferentes prácticas de diseño y detallado. Cuando los muros de mampostería de relleno se van a aislar del marco adjunto, hay dos formas para asegurar la estabilidad fuera del plano del muro de mampostería de relleno:

- (a) Separar los paneles de muros de mampostería de relleno grandes en unos más pequeños; esto se puede lograr colocando miembros rígidos de madera o concreto levemente reforzado en la dirección diagonal, vertical u horizontal, y
- (b) Colocar refuerzo en los muros de relleno; el refuerzo se debe colocar a un espaciamiento regular horizontal y verticalmente. Códigos de diseño en algunos países (ej. Indonesia)

establecen como mejorar el desempeño fuera del plano de los muros de mampostería de relleno sin interferir con los miembros del marco. Se sugiere colocar *columnas prácticas*, es decir, columnas levemente reforzadas de CR de una pequeña sección transversal con barras de acero vertical que entren en la viga superior, en intervalos regulares a lo largo de la viga y en los extremos del muro. Esto se ilustra en la Figura 48. Aislar los muros de relleno no es fácil. Es difícil mantener la brecha entre las columnas prácticas y las columnas del marco, además de asegurarse que las condiciones climáticas no afecten el interior del edificio.

Cuando se integran los muros de mampostería de relleno con el marco adjunto, deben proveerse anclajes del acero horizontal (dovelas) para amarrar el muro con las columnas del marco; estos deben estar regularmente espaciados, para asegurar la transmisión de fuerzas entre el muro y el marco (ver Figura 49). Cuando los paneles del muro son muy largos, debe colocarse una columna práctica para mejorar la resistencia fuera del plano del muro de mampostería de relleno. De nuevo, es difícil hacer los muros de mampostería de relleno de bloques sólidos de arcilla. Se ha observado que las barras de refuerzo tienden a corroerse, por lo que se dilatan y agrietan la mampostería. En algunos proyectos, se usan barras de acero inoxidable para evitar este problema. Pero en

Si no se toman en cuenta en el diseño estructural, muchos elementos no estructurales, como las escaleras, pueden alterar la respuesta del edificio ante un sismo y ocasionar grandes daños

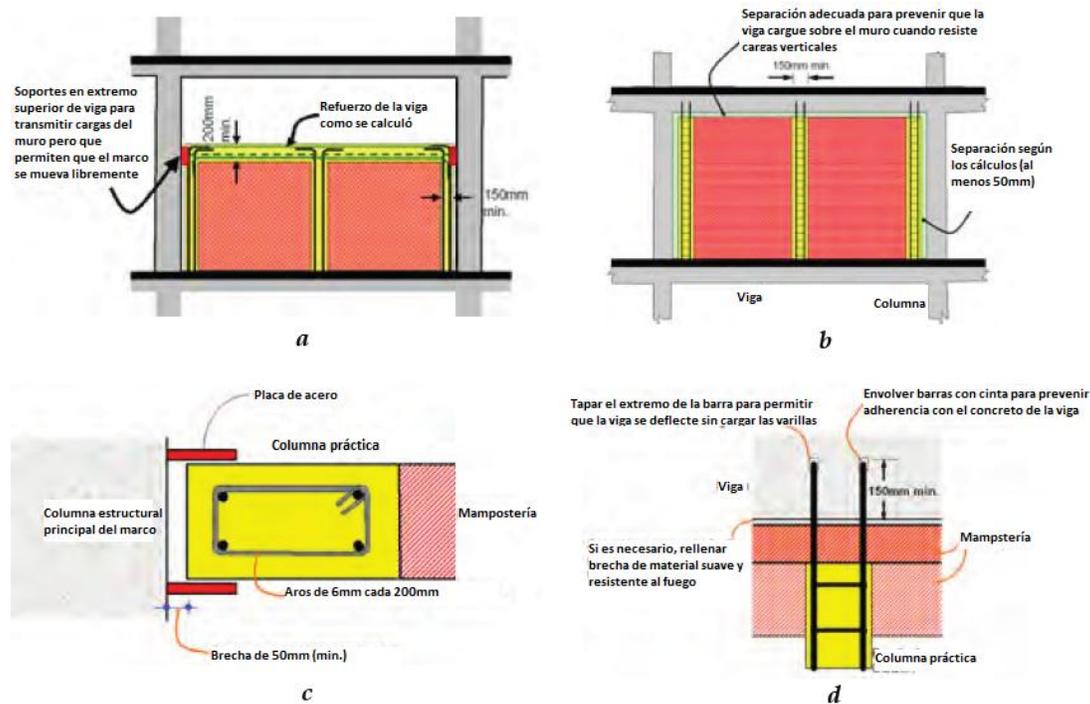


Figura 48. Las columnas prácticas para aislar los muros de mampostería de relleno en Indonesia: (a) relleno de altura parcial, (b) relleno de altura completa, (c) acercamiento de los detalles de una columna práctica, y (d) acercamiento de los detalles del anclaje de las columnas prácticas dentro de la viga superior, pero sin ofrecer resistencia a la deformación lateral del marco del edificio (fuente: Murty et al.)

general, no se provee una conexión adecuada entre el marco y el muro de relleno; simplemente se construyen a la par de la superficie del marco.

## Elementos No Estructurales

Las partes de edificios que resisten y transmiten las cargas generadas durante una sacudida sísmica se llaman *elementos estructurales* (ej. vigas, columnas, muros y losas), mientras que su contenido y algunos otros elementos se conocen como *elementos no estructurales*. Igual que en los elementos estructurales, los elementos no estructurales deben diseñarse para resistir los efectos sísmicos (fuerzas inducidas y desplazamientos relativos). Además, se requieren conexiones adecuadas para que los elementos no estructurales puedan transmitir cargas a los elementos

estructurales (ver Figura 50a). A veces, son de mayor preocupación los desplazamientos relativos que las fuerzas a las que los elementos no estructurales puedan estar sometidos. Por ejemplo, cuando las tuberías de aguas residuales pasan de un nivel a otro, estas deben ser capaces de moverse lateralmente de manera diferente en los distintos niveles y poder mantenerse en funcionamiento (ver Figura 50b).

La forma en que se instalan los elementos no estructurales puede tener un efecto significativo – normalmente perjudicial – en el comportamiento del sistema estructural. Por ejemplo, los muros de relleno construidos integralmente con las vigas y columnas son considerados como elementos no estructurales, y no se le presta atención en los efectos que tienen sobre el edificio. Sin embargo, en realidad, estos muros son elementos estructurales, ya que intervienen

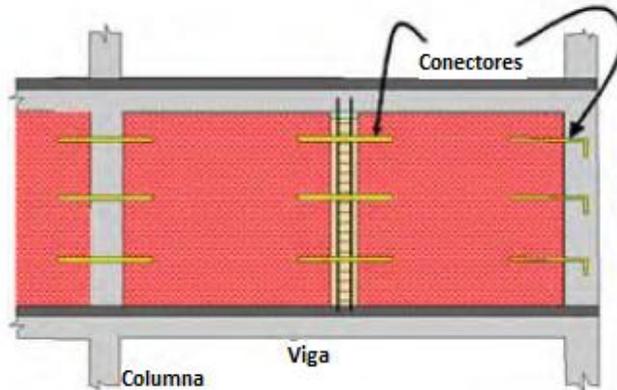


Figura 49. Detallado de los anclajes entre el muro de relleno y el marco cuando se necesita integrar el muro de mampostería con el marco del edificio (fuente: Murty et al. 2006).

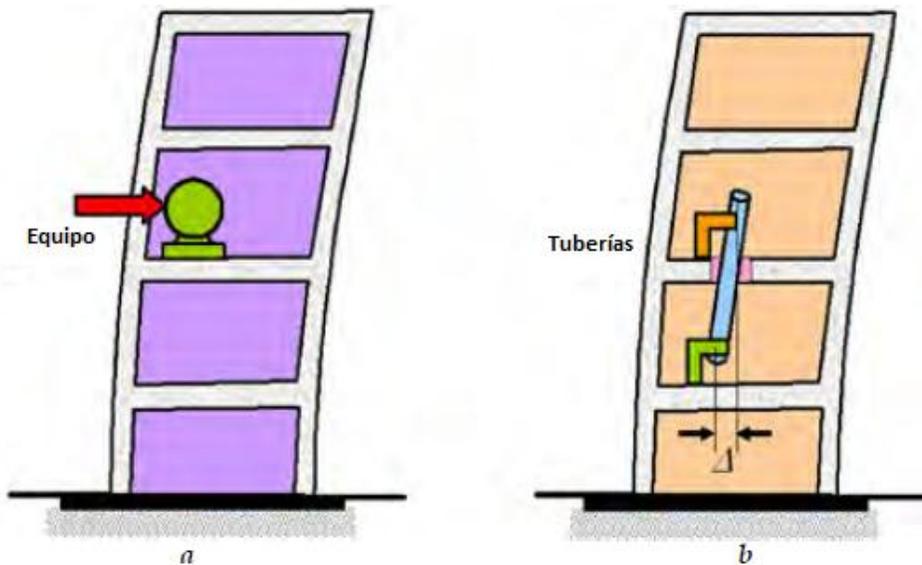


Figura 50. El diseño de los elementos no estructurales debe tomar en cuenta: (a) las fuerzas laterales transferidas a los elementos estructurales, y (b) movimientos laterales relativos a lo alto del edificio (fuente: C.V.R. Murty).

en el movimiento lateral de las columnas, alterando significativamente el comportamiento del edificio (ver discusión de los muros de relleno en el Capítulo 2). En ningún caso debe permitirse ninguna adición, agregado, retiro de material o alteración de cualquier tipo, que modifique el comportamiento de un elemento estructural de su diseño original. El diseño e instalación de todos los elementos no estructurales se debe realizar de acuerdo a los códigos y especificaciones pertinentes (ver Figura 51).

En algunos casos, elementos estructurales muy rígidos y fuertes pueden ser

discontinuos del resto del sistema estructural, y se convierten en no estructurales. Por ejemplo, en las áreas de escaleras en los edificios, las losas y vigas inclinadas de la escalera ofrecen gran rigidez e interfieren con la sacudida del edificio, que de otra manera podría ser simétrica. En tales casos, si los elementos diagonales son aislados de manera que solo descansen y se deslicen en la dirección horizontal, se mejorará de manera significativa el desempeño del edificio.



Figura 51. Ejemplos de malas prácticas constructivas: (a) instalación inaceptable de tuberías a través de la armadura de la columna, y (b) instalación inaceptable de conductos eléctricos por el daño ocasionado a la viga de CR existente (fotos: A. Irfanoglu).

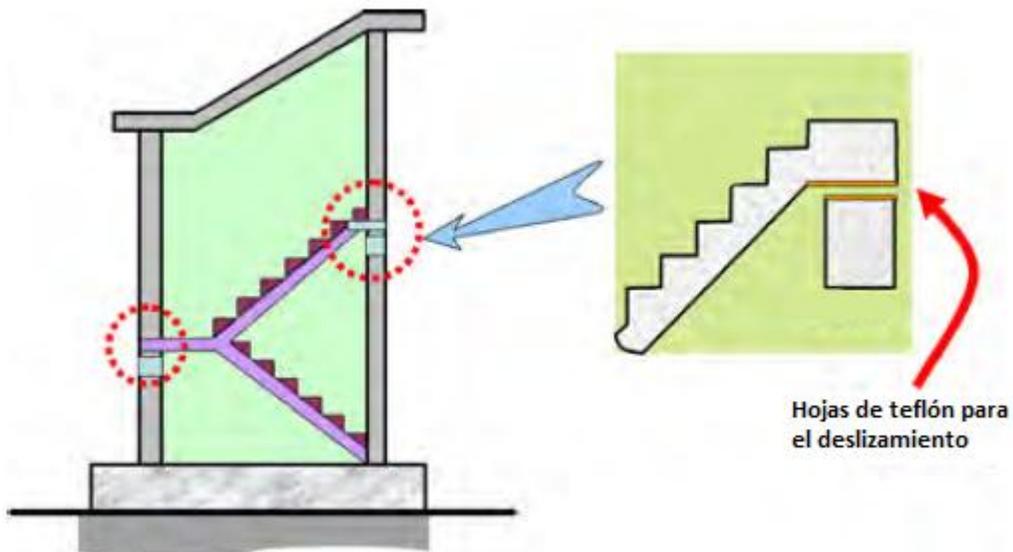


Figura 52. Las vigas y losas diagonales en las escaleras atraen grandes fuerzas sísmicas, y por lo tanto incurren en daños: es efectivo colocar un soporte de deslizamiento para limitar la magnitud de las fuerzas sísmicas (fuente: C.V.R. Murty).

## 4. Consideraciones de construcción

La calidad de la construcción tiene un impacto directo en el desempeño dúctil de los edificios durante un sismo – una mala construcción lleva a un pobre desempeño sísmico. Por lo tanto, una buena estructura sismorresistente requiere que se completen todos los pasos para construir exitosamente un edificio, principalmente:

- *Diseño*: desarrollo conceptual de un diseño racional basado en códigos actuales;
- *Construcción*: construcción física, ej. implementación del diseño concebido; y
- *Mantenimiento*: inspección, mantenimiento, monitoreo y remodelación durante la vida del edificio.

El proceso anterior es como fabricar una cadena: para tener una cadena fuerte, todos los enlaces tiene que ser lo suficientemente fuertes. De manera similar, para construir un buen edificio, todos los pasos en la *etapa constructiva* deben realizarse de acuerdo a las especificaciones dispuestas en el diseño. Los problemas relacionados con el *diseño* de un edificio típico de marcos de concreto reforzado fueron cubiertos anteriormente en este documento, mientras que los problemas de la *construcción* se resumen a continuación; los problemas asociados al *mantenimiento* no se discuten en este documento.

Lo construcción física de un edificio de CR puede considerarse exitosa si:

- (a) El edificio se construye de acuerdo a los planos estructurales obtenidos a partir de la *etapa de diseño*;
- (b) En la construcción se utilizan materiales apropiados y de buena

calidad, según establecen los códigos de materiales aplicables;

- (c) La construcción se lleva a cabo con los procedimientos establecidos por los códigos de construcción, acompañado por una inspección competente, exhaustiva y honesta.

Construir, desde su inicio, un edificio de buena calidad, es significativamente más fácil y barato que construir uno de mala calidad y después incurrir en los costos, las inconveniencias y los retrasos que implican reemplazar los elementos o sistemas estructurales mal contruidos o defectuosos. Los siguientes aspectos constructivos tienen prácticas correctas establecidas en los códigos nacionales pertinentes y se enumeran a continuación:

- Calidad de los materiales,
- Mano de obra, e
- Inspección.

Para una discusión más profunda de este tema, se refiere a los lectores a la publicación *Built to Resist Earthquakes*, la cual trata sobre los problemas del diseño y la construcción para los arquitectos, ingenieros e inspectores (ATC/SEAOC 1999). La siguiente sección resume algunos de los mayores problemas relacionados con la calidad de la construcción.

### Calidad de los Materiales

La selección y uso de materiales apropiados y de buena calidad son prerrequisitos para una construcción exitosa.



Un diseño, construcción y mantenimiento apropiados son críticos para que el edificio tenga un buen comportamiento durante un sismo



La calidad de los materiales, la mano de obra y la inspección son sumamente importantes para la seguridad sísmica

## Selección y control de materiales

Los elementos usados para una mezcla de concreto (cemento, agregados, agua, y cualquier aditivo) deben ser debidamente seleccionados y utilizados. Hay varios puntos importantes respecto a la selección de materiales:

- Un ingeniero civil, o ingeniero en materiales, competente debe ser el que desarrolla el diseño de mezcla de concreto y determina las proporciones para los componentes de la mezcla. Es importante que estas proporciones no se alteren una vez que fueron diseñadas por el ingeniero.
- Se debe usar el cemento especificado en los códigos. Debe escogerse un cemento y/o agregado adecuado que no ocasione una reacción perjudicial entre la pasta y el agregado.
- El agregado debe escogerse para que tenga las mismas propiedades (tipo y distribución granulométrica) especificadas en el diseño de mezcla del concreto. Nunca debe usarse arena de playa.
- La adherencia entre la pasta y el agregado es esencial para la calidad del concreto. Para esto, si es necesario, el agregado debe lavarse con agua limpia y drenarse o secarse

para remover cualquier suciedad, polvo o material orgánico (ver Figura 53).

- Debe utilizarse agua limpia para la preparación de la mezcla de concreto. Si se utiliza agua salada, sucia, con barro, o con materiales orgánicos en la preparación de la mezcla, puede darse un desempeño inadecuado. El uso de agua inapropiada puede resultar en un deterioro rápido del concreto, así como en corrosión del acero de refuerzo.

La mezcla de concreto usada en la construcción debe ser diseñada por un ingeniero

## Preparación, manejo y curado del concreto

El concreto se prepara mejor en una planta donde es fácil alcanzar un alto nivel de control de calidad. Cuando no es posible el concreto de planta, las mezcladoras en sitio son la segunda opción. La opción menos deseable es el concreto hecho en sitio manualmente. Esta debe evitarse en todo lo posible ya que es casi imposible preparar mezclas de concreto consistentes y de buena calidad de esta manera (ver Figura 54). A continuación se discuten algunas consideraciones importantes en el manejo del concreto:

El concreto debe prepararse en planta



**Figura 53. Tamaño de agregado inapropiado; Nótese el concreto de baja calidad, altamente poroso, y las barras corroidas y lisas (foto: A. Irfanoglu).**



Deben asegurarse condiciones de humedad adecuadas durante el curado del concreto

**Figura 54. La preparación y mezcla manual del concreto es la última opción que se debe utilizar, por la incapacidad de poder asegurar una calidad consistente (foto: A. Irfanoglu).**

### **Mezcla fresca de concreto**

Una vez que la mezcla está lista, debe manejarse adecuadamente y debe usarse en la construcción lo más pronto posible. Nunca debe permitirse que el concreto fresco seque antes de ser colocado. Durante el transporte desde donde fue hecho hasta donde será colocado, el concreto puede segregarse o separarse. En otras palabras, el agregado puede agruparse produciendo anomalías, o el agua puede acumularse en la superficie o drenarse de la mezcla. En estos casos, debe restablecerse la correcta mezcla de concreto por medio del remezclado exhaustivo. Puede ser necesario agregar agua para reemplazar la que se ha perdido. Sin embargo, debe recordarse que cualquier adición o aumento en la relación agua-cemento disminuye la resistencia del concreto.

### **Fraguado del concreto**

Una vez que el concreto ha sido colado, deben tenerse los cuidados para la etapa de fraguado (endurecimiento). Si se envuelven o cubren los elementos con plástico, puede proveerse un ambiente adecuado para que el concreto endurezca. Una vez que el concreto endurece, lo cual toma pocas horas en

condiciones normales, comienza el proceso de curado. Durante el curado, es importante mantener los niveles de humedad y temperatura apropiados en y alrededor del elemento. Normalmente es suficiente colocar tejido de yute húmedo sobre el elemento colado y unas láminas de plástico sobre el mismo. Usualmente, para mantener la humedad apropiada, se debe mojar ocasionalmente el yute. Si se utiliza un encofrado de madera, los niveles de humedad deben monitorearse atentamente ya que la madera puede absorber mucha agua del concreto que se esté curando.

### **Selección y control del acero**

El refuerzo de acero debe concordar con lo especificado en los planos estructurales. Las consideraciones específicas incluyen:

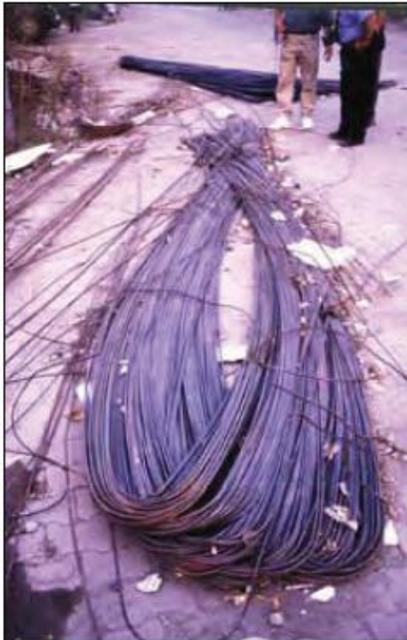
- Solo debe usarse tipos de acero certificados por el fabricante para uso de construcciones sismorresistentes.

Las barras de acero de refuerzo deben estar certificadas por el fabricante

Usar grados de acero diferentes a los especificados puede ser dañino para el edificio

- El grado del acero debe coincidir con las especificaciones dadas en los planos estructurales.
  - Cuando sea posible, debe evitarse el uso de barras lisas (a menos que esté especificado y tomado en cuenta en el diseño estructural).
- Debe evitarse el acero laminado o rolado en frío (acero formado a partir de trozos sobrantes de acero). Este acero tiene mucha variación en su calidad y es inapropiado para las construcciones de concreto reforzado.
- No deben usarse en la construcción barras inapropiadamente deformadas. Segmentos doblados o estirados excesivamente pueden formar puntos débiles en el refuerzo (ver Figura 55).
- Deben evitarse las barras corroídas. Esto no solo requiere la compra de acero de refuerzo de buena calidad y su debido almacenamiento, sino que también debe programarse el proceso constructivo de manera que se minimice la exposición del refuerzo a elementos corrosivos (siendo agua/humedad y aire los más naturales). Deben removerse las partículas sueltas de la superficie del acero usando cepillos metálicos. En todos los casos, la extensión de la corrosión no debe ser excesiva para que el material no sea inaceptable según los estándares aplicables.

La mano de obra es el último pero vital enlace para convertir el diseño en realidad



**Figura 55. Barras lisas de acero de refuerzo entregadas a una construcción en Turquía, dobladas en forma de “U” (fuente: Gulkan et al. 2002).**

## Mano de obra

En la construcción de marcos de concreto reforzado, es muy importante tener mano de obra calificada, con habilidad y competencia apropiadas. También es muy importante tener una secuencia constructiva realizable y bien pensada, de manera que los trabajadores realicen sus tareas de manera apropiada y a tiempo. El personal de construcción es el último, pero vital, enlace en el proceso constructivo.

El ingeniero diseñador y el arquitecto desempeñan funciones fundamentales asegurando que el diseño pueda ser construido y que todo el personal de construcción pueda entenderlo.

El ingeniero diseñador debe mantener la configuración estructural y el detallado de los sistemas estructurales y sus subsistemas lo más simple y directo posible. Es buena práctica usar, tanto como sea posible, un detallado típico o estándar. Por supuesto, es responsabilidad de todo el equipo constructivo – desde el arquitecto e ingeniero estructural hasta el personal de construcción – construir un edificio de buena calidad.

Los diseñadores deben asegurarse que los planos constructivos sean simples y se puedan construir

Los procesos claves en la construcción, donde la mano de obra es crítica son:

- 1) *Trabajo con acero*: este debe dar como resultado la colocación del refuerzo según las especificaciones de los planos estructurales. Los elementos de refuerzo deben estar limpios y no deben tener suciedad o aceite (ver Figura 56).
- 2) *Encofrado*: se necesita un encofrado de buena calidad para poder colar los elementos de concreto reforzado correctamente. Esto requiere que se usen formaletas limpias, sin fugas y construidas adecuadamente, caracterizados por una rigidez y resistencia adecuada. De ser necesario, debe colocarse obra falsa provisoria para poder soportar el encofrado.
- 3) *Colocación adecuada de la armadura en el encofrado*: las armaduras de acero deben colocarse y asegurarse dentro el encofrado de manera que se cumplan las especificaciones de diseño (tales como recubrimiento mínimo de concreto). Esto previene corrosión futura del acero de refuerzo y desprendimiento del concreto. La armadura no debe moverse ni distorsionarse cuando se está colocando el concreto fresco.
- 4) *Trabajo en concreto*: el transporte, manejo, colocación y consolidación del concreto fresco debe realizarse adecuadamente. Se debe evitar al máximo la acumulación o pérdida de agua, o la segregación del agregado en la mezcla de concreto. Si se dan estas alteraciones en el concreto, debe reconstituirse la mezcla antes de ser colocada.

El concreto fresco debe colocarse en el encofrado entre el acero de refuerzo y alrededor de este, distribuido apropiadamente (consolidado). Se recomienda el uso de vibradores y otros instrumentos que mejoren la

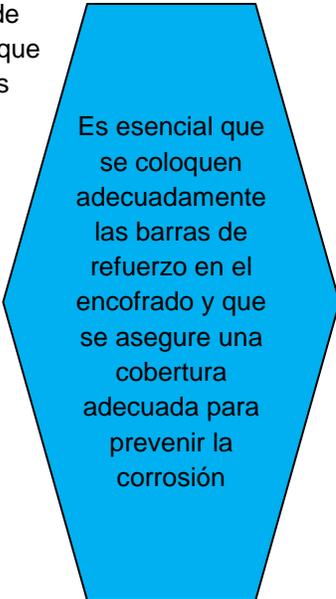
consolidación del concreto dentro del encofrado. Es importante obtener una buena adherencia entre el concreto y el acero. Por esto, no deben haber vacíos excesivos o puntos débiles en el concreto. La mala consolidación del concreto fresco, debido al uso indebido de vibradores u otros instrumentos, resulta en cantidades de agua excesivas alrededor del acero de refuerzo. El resultado es una pobre adherencia entre el concreto y el acero de refuerzo.

- 5) *Elementos no estructurales*: La forma en que se instalan los elementos no estructurales puede tener efectos significativos – y generalmente perjudiciales – en el desempeño sísmico. El efecto de los muros de relleno, por ejemplo, se discute en este documento. En ningún caso deben permitirse adiciones, agregados, eliminación de material o alteraciones de cualquier tipo que alteren el comportamiento deseado, en el diseño original, de un elemento estructural. Ejemplos de instalaciones inapropiadas de elementos no estructurales que pueden tener consecuencias peligrosas en el comportamiento sísmico de todo el edificio se muestran en la Figura 51. El diseño e instalación de los elementos no estructurales deben hacerse siguiendo los códigos y especificaciones aplicables.

Los miembros del equipo de construcción, desde el ingeniero diseñador y el arquitecto hasta el personal constructivo y el ingeniero encargado, deben tener claro las



Se recomienda el uso de vibradores para consolidar el concreto fresco



Es esencial que se coloquen adecuadamente las barras de refuerzo en el encofrado y que se asegure una cobertura adecuada para prevenir la corrosión

responsabilidades propias y de los otros. Deben saber cómo es la línea de mando y su lugar en esta. Esto significa, por ejemplo, no tomar atajos, ni permitir que los subordinados tomen atajos, sin consideraciones racionales de los posibles efectos de tales actos y sin la aprobación explícita del ingeniero a cargo de la construcción. Es importante recordar que, una vez que se construye un elemento defectuoso, se requiere gran cantidad de tiempo y dinero para removerlo y remplazarlo por uno adecuado.



**Figura 56. Mal trabajo constructivo: suciedad en área de trabajo y anclaje inapropiado de las barras de la columna (fuente: Mejía 2002).**

estribos en una columna o la ausencia de ganchos de 135° puede llevar al colapso de todo el edificio.

Las consideraciones claves para el inspector de la obra se resumen a continuación:

Todas las partes involucradas en el proceso constructivo deben tener claras sus responsabilidades

- 1) Cuando se lleve a cabo la inspección, el inspector debe estar libre de cualquier conflicto de intereses (presente o futuro).
- 2) El inspector debe tener, en todo momento, acceso libre y sin obstrucciones a todas las actividades que se realicen en la construcción y a todos los documentos relevantes.
- 3) Como mínimo, el inspector debe estar presente donde y cuando los códigos de construcción requieren que se lleve a cabo una inspección independiente. Con frecuencia, cuando el concreto ya ha sido colocado, es muy poco lo que los inspectores pueden hacer respecto a la verificación de la calidad de la construcción y su concordancia con los planos, especificaciones y códigos constructivos aplicables.
- 4) El inspector debe documentar sus observaciones diligentemente y llevar un registro de ellas.
- 5) El inspector debe interactuar y, cuando sea necesario, retroalimentar regularmente al ingeniero de sitio sobre sus observaciones.
- 6) El inspector debe señalar con prontitud al ingeniero a cargo cualquier problema relacionado con la calidad de la construcción.

Es responsabilidad del inspector ser competente y minucioso en el monitoreo e inspección de la construcción. Y por supuesto, es responsabilidad del contratista y

## Inspección

La construcción no debe ser inspeccionada solamente por un control interno (en general el ingeniero residente), sino también por un inspector certificado independiente. El proceso de inspección debe realizarse por un inspector competente de manera honesta y rigurosa. La inspección es una tarea crítica para el proceso constructivo – la falta de un par de

La inspección debe realizarse por un inspector certificado que no tenga conflicto de intereses en la tarea por realizar

del personal constructivo llevar a cabo sus tareas con un nivel de calidad no menor al que establecen los códigos, documentos y planos constructivos.

## 5. Alternativas a los Marcos de CR con Muros de Relleno de Mampostería en Regiones de Alto Riesgo Sísmico

### Por qué son necesarias las alternativas

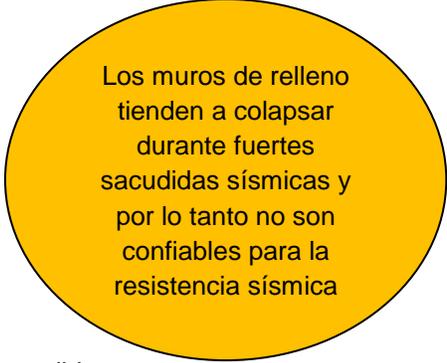
Los ingenieros alrededor del mundo han diseñado edificios de marcos CR por varias décadas. La experiencia obtenida con sismos ocurridos alrededor del mundo ha demostrado claramente que no se puede garantizar la resistencia sísmica en los edificios de CR cuando su seguridad sísmica depende únicamente de los marcos resistentes a momentos (a menos que estos marcos hayan sido especialmente detallados para este fin). El problema se agrava aún más con el uso de muros de relleno de mampostería. Si bien se requieren los muros de relleno para definir los espacios del edificio, su presencia puede perjudicar el comportamiento sísmico. No es fácil alcanzar un comportamiento sísmico dúctil en edificios de marcos de CR; se requiere un detallado sísmico especial y un nivel avanzado de destreza constructiva y control de calidad. La construcción de edificios de marcos de CR no es una tarea fácil, e incluye un alto nivel de habilidades relacionadas con la construcción de vigas, columnas y uniones viga-columna. Un refuerzo inadecuado de estas conexiones se torna en una amenaza seria al comportamiento básico del marco y puede llevar a consecuencia desastrosas, incluyendo el colapso de todo el edificio. En general, hasta en países industrializados con tecnología de construcción avanzada, se

considera un desafío lograr un comportamiento sísmico satisfactorio en edificios de marcos de CR sujetos a varios ciclos de sacudidas sísmicas,

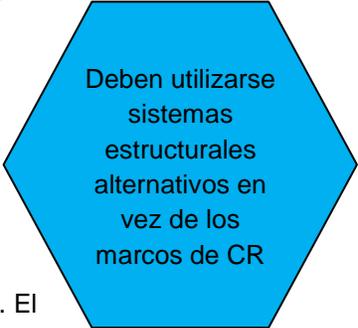
A pesar de estas limitaciones, diseñadores y constructores en varios países han convertido a los marcos de CR resistentes a momentos en el sistema *dominante* para edificios de varios niveles, y la construcción de estos sistemas sigue en alza a lo largo del mundo. Los autores de este tutorial quieren enfatizar que no se debe confiar en los marcos de CR, con muros de relleno diseñados para resistir momentos, como sistemas capaces de proveer un nivel satisfactorio de seguridad en regiones de alta sismicidad. Consecuentemente, se espera que los sistemas alternativos para edificios discutidos en este capítulo proporcionen un mejor nivel de seguridad sísmica que la que proveen los sistemas actuales de edificios de marcos de CR no dúctiles con muros de relleno de mampostería.

### Las Alternativas

Los dos sistemas alternativos son mampostería confinada y marcos de CR con muros de CR. El primer sistema sirve para construcciones de bajo nivel (de 3 a 4 niveles



Los muros de relleno tienden a colapsar durante fuertes sacudidas sísmicas y por lo tanto no son confiables para la resistencia sísmica



Deben utilizarse sistemas estructurales alternativos en vez de los marcos de CR

máximo), mientras que el segundo se puede usar para una gran variedad de alturas, pero es considerado más económicamente realizable para construcciones de media y gran altura. Los aspectos más destacados de estos sistemas se describen a continuación.

## Edificios de Mampostería Confinada

### Antecedentes

La construcción de mampostería confinada consiste de muros de mampostería (hechos de bloques de arcilla o de concreto) y elementos confinantes de concreto horizontales y verticales, provistos en los cuatro lados del muro de mampostería. Los elementos verticales, llamados columnas de amarre, asemejan a las columnas en la construcción de marcos de concreto reforzado. Los elementos horizontales, llamados vigas de amarre, asemejan a las vigas en la construcción de marcos de concreto reforzado.

Los componentes estructurales de los edificios de mampostería confinada son:

- (a) *Muros de mampostería* – transmiten las cargas gravitacionales de la losa hasta las fundaciones, y también resisten fuerzas sísmicas. Los muros deben estar confinados por vigas y columnas de amarre para asegurar un desempeño sísmico satisfactorio.
- (b) *Elementos confinantes (columnas y vigas de amarre)* – proveen restricción a los muros de mampostería y los protegen de la desintegración total ante sismos mayores; estos elementos no resisten cargas gravitacionales.

- (c) *Losas de techo y piso* – transmiten cargas gravitacionales y laterales a los muros. Durante un sismo, las losas se comportan como vigas horizontales y se conocen como diafragmas.
- (d) *Zócalo* – transmite las cargas de los muros a las fundaciones. Además, protege los muros del nivel inferior de asentamientos excesivos en condiciones de suelos suaves.
- (e) *Fundación* – transmite las cargas de la estructura al suelo.

Los componentes de un edificio típico de mampostería confinada se muestran en la Figura 57.

La apariencia de las construcciones de mampostería confinada y la de marcos con muros de relleno de mampostería pueden parecer muy similares para la persona común. Sin embargo, estos sistemas constructivos son sustancialmente diferentes. Las diferencias principales se relacionan con la secuencia constructiva, así como con su comportamiento ante condiciones sísmicas.

Los edificios de mampostería confinada parecen similares a los de marcos de CR con muros de relleno, pero se comportan significativamente mejor durante un sismo

Utilícese la mampostería confinada para la construcción de edificios de 1 a 4 pisos de altura

El detallado de refuerzo para la mampostería confinada es simple

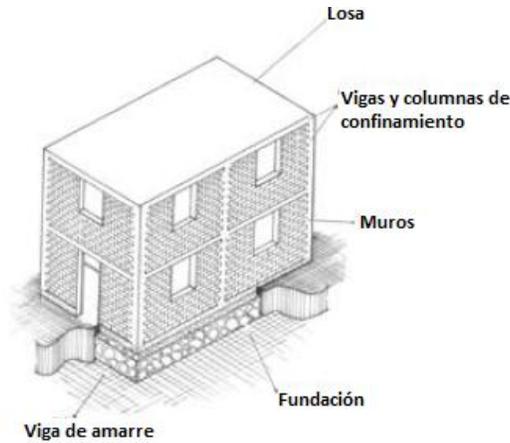


Figura 57. Edificio típico de mampostería confinada (fuente: Blondet 2005).

Tabla 1. Comparación de los edificios de marcos de CR y de mampostería confinada.

Item	Edificio de marcos de CR	Edificio de mampostería confinada
<i>Sistema resistente de cargas gravitacionales y laterales</i>	El marco de CR resiste las cargas laterales y gravitacionales a través de las vigas, columnas y sus conexiones.	Los muros de mampostería son los elementos portantes principales y se espera que lleven las cargas laterales y gravitacionales. Las cargas laterales se resisten por puntales diagonales que se forman en el muro y por fuerzas de tracción y compresión en las columnas de confinamiento.
<i>Construcción de la fundación</i>	Una fundación aislada debajo de cada columna.	Una fundación corrida a lo largo de todo el muro con una viga de amarre de CR.
<i>Secuencia constructiva de la superestructura</i>	1. Se construye el marco primero. 2. Se construyen los muros de mampostería en una etapa posterior.	1. Se construyen primero los muros de mampostería. 2. Seguidamente, se cuelan en sitio las columnas de amarre. 3. Finalmente, se construyen las vigas de amarre junto con la losas de piso o techo.

### Ventajas

La mampostería confinada ofrece una alternativa tanto para la mampostería sin refuerzo como para la construcción con marcos de CR. Esta práctica constructiva ha evolucionado a través de un proceso informal basado en un comportamiento satisfactorio en sismos anteriores. El primer uso reportado de mampostería confinada fue en la reconstrucción de los edificios destruidos por el sismo de 1908 en Messina, Italia (magnitud 7.2), el cual mató a más de 70000 personas. Subsecuentemente, en la década de 1940, esta tecnología constructiva se introdujo en Chile y México. En los últimos 30

Estas diferencias se resumen en la Tabla 1 y se ilustran en la Figura 58. En la construcción con mampostería confinada, los elementos confinantes no están diseñados como marcos para resistir momentos; como resultado de esto, el detallado de refuerzo es simple. En general, los elementos confinantes poseen una menor sección transversal que las que tendrían las vigas y columnas del marco de CR. Los elementos confinantes requieren una menor cantidad de refuerzo que las vigas y columnas de un marco de CR.

La construcción con mampostería confinada requiere menos refuerzo que la de marcos de CR

Los muros de corte de CR reducen el desplazamiento lateral del edificio, lo cual generalmente reduce los daños estructurales y no estructurales

años, la construcción con mampostería confinada se ha desarrollado en la región

mediterránea de Europa (Italia, Eslovenia, Serbia), Latinoamérica (México, Chile, Perú, Argentina, y otros países), el Medio Oriente (Irán), y Asia (Indonesia, China).

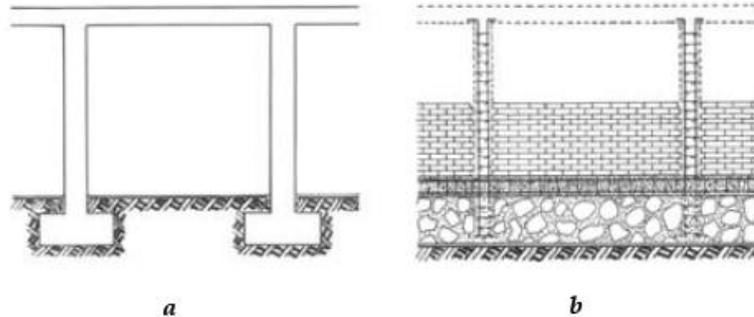


Figura 58. (a) Un edificio de marco de CR, y (b) un edificio de mampostería confinada durante su construcción, antes de construir la altura completa del muro de mampostería (fuente: Brzev 2006).

Es importante notar que la construcción con mampostería confinada se practica en países y regiones con alto riesgo sísmico. Varios ejemplos de construcciones con mampostería confinada alrededor del mundo, de Argentina, Chile, Irán, Serbia y Eslovenia, se presentan en la WHE (EERI/IAEE 2000). En las publicaciones de Blondet (2005), Brzev (2006) y Anthoine y Taucer (2006) se explican más detalles de la construcción con mampostería confinada.

de CR con *muros de corte* de CR tienen dos sistemas para resistir los efectos de un sismo fuerte:

- (a) Un marco de CR tridimensional resistente a momentos (con vigas, columnas y losas interconectadas) (ver Figura 59a), y
- (b) Muros de corte de CR orientados en una o dos direcciones del edificio (ver Figura 59b).

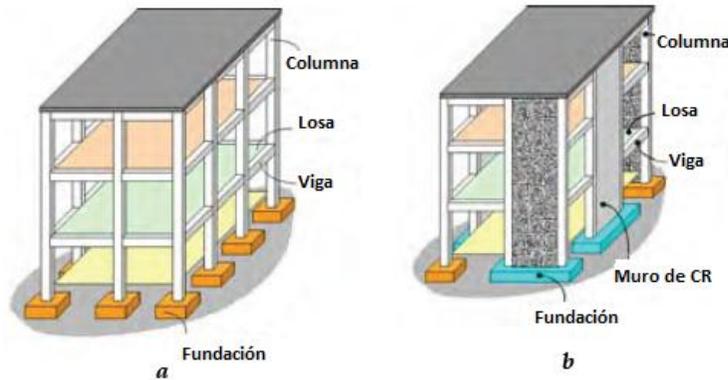
## Edificios de Marcos de CR con Muros de Corte de CR

### Antecedentes

Los edificios de marcos de CR pueden proveerse de muros de CR similares a placas verticales (usualmente llamados *muros de corte*), además de las losas, vigas, columnas y muros de relleno, como se muestra en la Figura 59. Estos muros de CR deben ser continuos a lo alto de todo el edificio, empezando desde el nivel de la fundación. El espesor puede variar desde 150 mm para edificios de baja altura hasta 400 mm para edificios de gran altura. Estos muros usualmente se colocan tanto a lo largo como a lo ancho del edificio. Estos actúan como vigas *orientadas verticalmente* las cuales transmiten las cargas sísmicas hacia la fundación. Por ende, los edificios de marcos

Las columnas de los edificios de marcos y con muros de corte de CR se encargan principalmente de transmitir cargas gravitacionales (ej. las cargas por el peso propio y los contenidos del edificio). Los muros de corte de CR proveen gran resistencia y rigidez en la dirección de su orientación; esto reduce significativamente el desplazamiento lateral del edificio y, por lo tanto, los daños de los componentes estructurales y no estructurales. Ya que los muros de corte de CR también resisten fuerzas sísmicas horizontales grandes, los efectos de vuelco también son grandes. Por esto, debe ponerse atención especial al diseño de sus fundaciones. Es preferible incluir muros de corte en ambas direcciones del edificio. Sin embargo, cuando solo se proveen en una dirección, debe proveerse un marco sismorresistente capaz de resistir momentos (ej. cuadrícula de vigas y

columnas) a lo largo de la otra dirección para resistir los efectos sísmicos.



**Figura 59. Edificios de marcos de CR: (a) solo con marcos tridimensionales columna-viga-losa de CR, y (b) con marcos tridimensionales columna-viga-losa y muros de corte de CR (fuente: Murty 2005).**

Pueden hacerse aberturas de puertas y ventanas en los muros de CR, pero su tamaño debe limitarse, para asegurarse una interrupción mínima del flujo de las cargas a través del muro. Además, estas aberturas deben colocarse de manera simétrica. Se requieren revisiones especiales en el diseño para asegurar que el área del muro en la abertura sea suficiente para resistir las cargas sísmicas horizontales. Para reducir los efectos dañinos de la torsión en el edificio, sus muros de CR deben colocarse simétricamente en planta (ver Figura 60). Los mismos pueden colocarse simétricamente en planta en una o en sus dos direcciones. Estos muros son más efectivos cuando se colocan a lo largo del perímetro exterior del edificio: tal disposición aumenta la resistencia del edificio a la torsión.

Los muros de CR son alargados en su sección transversal, o sea, una dimensión de la sección es mucho mayor que la otra. Aunque la sección rectangular es la más común, también se usan formas en L, C o U (ver Figura

Deben usarse muros de corte de CR para edificio de media y gran altura

La ubicación simétrica de los muros de corte a lo largo del perímetro asegura un mejor desempeño sísmico

61). Los ductos de CR vacíos de los ascensores también actúan como muros de corte.

Los muros de corte de CR deben diseñarse y construirse de manera que se asegure el comportamiento dúctil. Las proporciones geométricas generales del muro, el tipo y cantidad de refuerzo, y las conexiones con los otros elementos del edificio pueden ayudar a mejorar la ductilidad. Las disposiciones sísmicas de los códigos constructivos en los diferentes países proveen guías para el detallado dúctil de los muros de corte de CR.

En los muros de corte de CR, deben proveerse barras de acero de refuerzo espaciadas en intervalos regulares horizontal y verticalmente (ver Figura 62a). El refuerzo vertical y horizontal puede colocarse en una o dos capas paralelas (también llamadas mallas). El refuerzo horizontal debe estar anclado en los extremos del muro. Este refuerzo debe distribuirse uniformemente a lo largo de la sección transversal del muro.

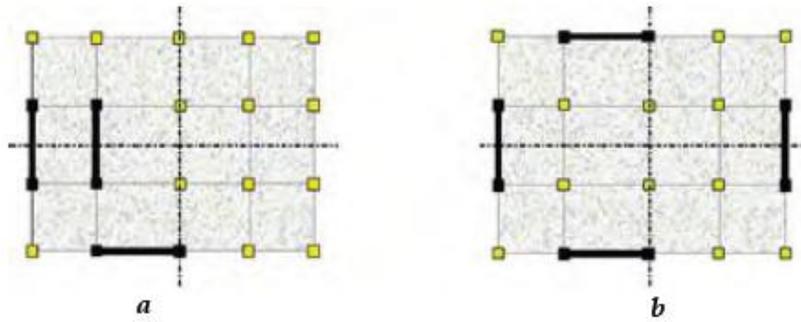


Figura 60. La disposición de los muros de CR debe ser simétrica para evitar efectos torsionales: (a) no se desea una ubicación asimétrica de los muros de CR, y (b) se desea una disposición simétrica de los muros de CR en los dos ejes y a lo largo del perímetro (fuente: Murty 2005).

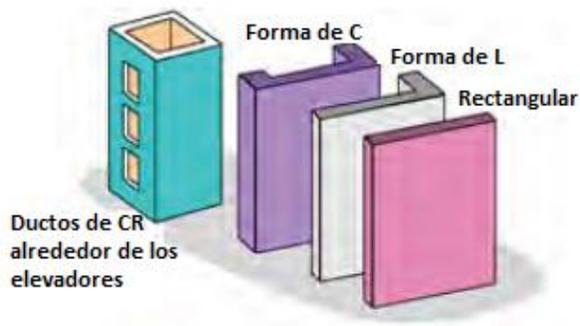


Figura 61. Muros de corte en edificios de CR -- diferentes geometrías son posibles (fuente: Murty 2005).

Las regiones extremas de los muros de corte experimentan esfuerzos grandes de compresión y tracción debido a los efectos de vuelco que se generan por las fuerzas sísmicas horizontales. Para asegurar que el muro de corte tenga un comportamiento dúctil, los extremos del muro deben reforzarse de una manera especial para resistir estas reversiones de carga (ver Figura 62b). Las regiones extremas del muro con un aumento de confinamiento se llaman *elementos de borde*. El refuerzo de confinamiento transversal especial en los elementos de borde es similar al que se provee en las columnas de marcos de CR. Algunas veces, el espesor del muro de corte se aumenta en los elementos de borde. Los elementos de borde en muros de CR aumentan la resistencia a la flexión y la capacidad para soportar fuerzas horizontales de cortante y son, por lo tanto, menos susceptibles a los daños ocasionados por sismos que los muros sin elementos de borde. Para más detalles sobre los muros de corte de CR, referirse a Paulay & Priestley (1992).

### Ventajas

Los edificios con muros de corte de CR diseñados y detallados apropiadamente han demostrado un buen comportamiento sísmico en sismos anteriores. Muchos edificios de CR con muros de corte estuvieron expuestos a

sacudidas severas extremas durante el sismo de 1985 en Lolleo, Chile (M 7.8). Muchos de estos edificios sufrieron daños menores o se mantuvieron intactos (Moroni y Gómez, 2002). Durante los sismos de 1999 en Izmit y de 2003 en Bingol (Turquía), miles de personas murieron, muchas de estas aplastadas por el colapso de edificios de marcos con muros de relleno. Sin embargo, los edificios con muros de corte de CR tuvieron un gran desempeño y no se reportaron daños (Yakut y Gulkan, 2003). Lo mismo sucedió en los edificios tipo "Fagure" en Rumania después del sismo de 1977 en Vrancea (M 7.2) (Bostenaru y Sandu, 2002). Edificios con muros de corte estuvieron expuestos a los sismos de 1979 en Montenegro (M 7.2) y de 1993 en Boumerdes, Argelia (M 6.8). Los edificios sufrieron daños debido a sacudidas severas del suelo, sin embargo se evitó el colapso.

Los muros de corte de CR en regiones de alta sismicidad requieren un detallado especial. Sin embargo, en sismos anteriores, hasta edificios con muros de corte de CR que no fueron detallados cuidadosamente para un comportamiento sísmico, pero que tenían suficiente cantidad de refuerzo bien distribuido, se comportaron de buena manera.

Los elementos de borde = regiones en ambos extremos del muro con gran cantidad de refuerzo y estribos cerrados

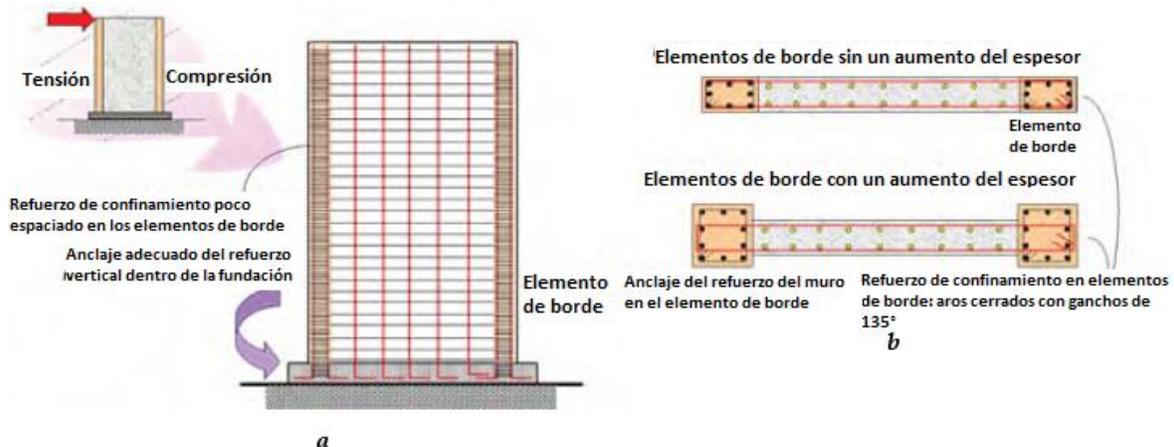
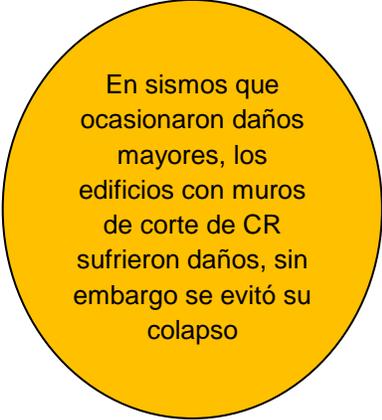


Figura 62. Disposición del refuerzo principal en los muros de corte según IS: 13920-1993 – el detallado es la clave para un buen desempeño sísmico (fuente: Murty 2005).

Los edificios de marcos de CR con muros de corte son de elección popular en muchos países propensos a sismos, como Chile, Nueva Zelanda y EEUU, gracias a las siguientes ventajas:

- (a) Los muros de corte de CR son efectivos aportando seguridad sísmica y evitando el colapso.
- (b) El detallado del refuerzo en los muros de corte de CR es menos complejo que el detallado de los marcos dúctiles de CR.
- (c) El costo constructivo de un edificio de marcos de CR con muros de corte es generalmente menor que al de un edificio casi idéntico de marcos de CR sin muros de corte.



En sismos que ocasionaron daños mayores, los edificios con muros de corte de CR sufrieron daños, sin embargo se evitó su colapso

## 6. Adecuación de los Edificios de Marcos de CR

### Introducción

Hasta ahora, este documento se ha enfocado en los problemas asociados con el planeamiento y diseño de edificios nuevos de marcos de CR con muros de mampostería de relleno. Sin embargo, existe una gran cantidad de edificios de marcos de CR en países y regiones propensas a sismos moderados o severos. Estos edificios están concentrados principalmente en áreas urbanas de gran crecimiento. En muchos casos, la población local los considera el tipo de construcción por excelencia para los edificios residenciales. Desafortunadamente, una de las mayores causas de vulnerabilidad sísmica en estos edificios es que, en los países en desarrollo, un gran número han sido diseñados por arquitectos e ingenieros que no han tenido la formación adecuada para el diseño sísmico y su construcción o son construidos por mano de obra entrenada inadecuadamente.

El número estimado de edificios de marcos de CR vulnerables en zonas sísmicas alrededor del mundo es pasmoso. En un mundo ideal, sería excelente reforzar todos estos edificios, para protegerlos de los efectos de futuros sismos y minimizar las fatalidades y daños a la propiedad. El *reforzamiento sísmico* (también conocido como *adecuación sísmica*) consiste en una modificación importante en los componentes estructurales de un edificio con el propósito de mejorar su desempeño ante sismos futuros. El reforzamiento sísmico puede realizarse antes de un sismo (como medida preventiva) o después de un sismo, cuando se combina con la reparación de los daños ocasionados por el sismo. Debe aclararse que la adecuación sísmica no se requiere solo en las estructuras del edificio (incluyendo las fundaciones) sino que también en los *elementos no estructurales*, ej. los acabados y contenidos del edificio.

Como los acabados y contenidos del edificio pueden llegar a representar dos tercios del costo total del proyecto, debe prestársele la atención debida al reforzamiento sísmico de los elementos no estructurales, para asegurarse que el daño a la propiedad se minimice durante un sismo.

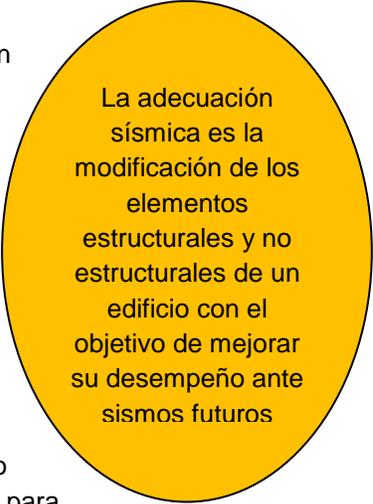
En teoría, es posible reforzar la mayoría de los edificios existentes de marcos de CR. Sin embargo, antes de un sismo, es poco probable conseguir el financiamiento para reforzar un número significativo de estos edificios en una comunidad.

Consecuentemente, es necesario desarrollar estrategias y políticas para priorizar los edificios que deben reforzarse según su importancia y capacidad de financiamiento. Esta sección discute algunas de las estrategias de reforzamiento sísmico utilizables en las estructuras de marcos de CR.

En algunos países, se están implementando metodologías de reforzamiento prescriptivas. En estos casos, no se realizan cálculos para entender la capacidad soportante y ductilidad de los edificios existentes sino que se realizan cambios genéricos en todos los edificios. Esto es un enfoque inaceptable y puede resultar en edificios inseguros.

### Valoración de la vulnerabilidad

Los procedimientos para valorar la vulnerabilidad sísmica de edificios están bien establecidos. Se efectúan tres niveles de valoración de vulnerabilidad sísmica, a saber: *Detección Visual Rápida*, *Evaluación Estructural Rápida*, y *Valoración Detallada*. Estas valoraciones se realizan en una



La adecuación sísmica es la modificación de los elementos estructurales y no estructurales de un edificio con el objetivo de mejorar su desempeño ante sismos futuros

La valoración de la vulnerabilidad sísmica ayuda a determinar posibles fallas sísmicas y ayuda a determinar si es necesario el refuerzo estructural

secuencia telescópica; cuando el edificio falla en una de las valoraciones, este es sujeto al siguiente nivel de evaluación. La Detección Visual Rápida es una valoración rápida para determinar los edificios vulnerables. Usualmente consiste en revisiones

relacionadas con la configuración, basada en la distribución y configuración del edificio, discutidos en el Capítulo 2 de este documento, incluyendo el recorrido de las cargas, piso débil, piso suave, geometría, masa efectiva, torsión y martilleo.

Una vez que se identifica un edificio vulnerable a través de la Detección Visual Rápida, este es sujeto al siguiente nivel de valoración, la Evaluación Estructural Rápida.

Esta incluye la revisión general de las resistencias basada en aspectos del diseño estructural como los esfuerzos de cortante y axiales en los elementos verticales resistentes a cargas sísmicas. Nuevamente, una vez que el edificio se identifica como vulnerable en esta etapa, este es sujeto del siguiente nivel de valoración, la Valoración Detallada.

Esta valoración detallada es una evaluación cuantitativa y rigurosa de la vulnerabilidad del edificio.

La Valoración Detallada evalúa la vulnerabilidad de los *sistemas estructurales* que resisten las cargas sísmicas, así como de los *elementos no estructurales* (ej. los contenidos, acabados y elementos que no resisten cargas sísmicas). Las provisiones genéricas para reforzar los elementos no estructurales están descritas en FEMA 274 (1994). Internacionalmente, existe una gran cantidad de literatura en este tema, ej. FEMA 154 (1988), ATC 20 (1989), FEMA 310 (1998), FEMA 356 (2000), y más recientemente ASCE (2003), ASCE (2006) e ICC (2006).

## Formas de Reforzar Edificios Existentes de Marcos de CR

Usualmente, los *ingenieros* dirigen los esfuerzos para la adecuación sísmica de los sistemas estructurales y los *arquitectos* dirigen los esfuerzos para los elementos no estructurales. Mientras que las estrategias para reforzar los elementos no estructurales son generalmente uniformes, esto no aplica en el reforzamiento de los elementos estructurales. Las medidas para la adecuación sísmica de un edificio de marcos de CR pueden no ser adecuadas para otro. Por lo tanto es muy importante desarrollar soluciones para reforzar cada edificio de manera separada.

La resistencia sísmica de los edificios de marcos de CR puede ser mejorada:

- (a) *Aumentando la capacidad sísmica* – aumentando la rigidez, resistencia y ductilidad, y reduciendo las irregularidades – este es el enfoque convencional para el reforzamiento sísmico que se ha seguido en las últimas décadas, o;
- (b) *Reduciendo la respuesta sísmica* – aumentando el amortiguamiento por medio de dispositivos de disipación de energía, reduciendo la masa, o aislando al edificio del suelo.

Ambos conjuntos de medidas requieren una apreciación de la respuesta sísmica general del edificio, y no solo una evaluación de los elementos estructurales individuales (ver Figura 63).

La capacidad sísmica de los edificios existentes se aumenta típicamente aumentando la resistencia o la ductilidad de los miembros estructurales individuales *existentes* (ej. revistiendo las vigas y columnas existentes con acero, concreto o láminas de fibra) o introduciendo *nuevos* miembros estructurales (ej. muros de corte).

El desempeño sísmico de un edificio se puede mejorar aumentando su capacidad sísmica o reduciendo su respuesta sísmica

En todo caso, el propósito es aumentar significativamente la habilidad de la estructura del edificio para resistir los efectos sísmicos.

El enfoque alternativo es reducir las fuerzas sísmicas en la estructura ya sea instalando dispositivos especiales que pueden aumentar el amortiguamiento de la estructura (llamados *amortiguadores sísmicos*) o aislando al edificio de suelo por medio de *dispositivos aislantes de la base*. Estas tecnologías emergentes pueden utilizarse para reforzar estructuras existentes de marcos de CR; sin embargo, su alto costo y conocimiento sofisticado que se requiere para diseñar e implementar tales proyectos representan impedimentos para una aplicación más amplia por el momento.

de acero unidas al marco existente.

- Refuerzo de los muros de mampostería de relleno *existentes* con compuestos de fibra reforzada.
- Revestimiento de los elementos estructurales individuales *existentes*, tales como columnas y vigas, usando concreto, acero o compuestos de fibra adherida a su superficie.

Para aumentar la capacidad de los sistemas estructuras, los componentes individuales pueden reforzarse o se pueden agregar nuevos miembros estructurales

El refuerzo más efectivo para las estructuras de marcos de CR es agregar nuevos muros de corte de CR en lugares estratégicos

Las siguientes estrategias de reforzamiento para los edificios de CR que se describen en este documento han sido utilizadas después de sismos recientes en varios países, o tienen la posibilidad de ser usados extensamente en el futuro:

- Colocación de *nuevos* muros de corte o riostras

### Instalación de Nuevos Muros de Corte de CR o Riostras de Acero

El método más común, y tal vez el más efectivo, para reforzar estructuras de marcos de concreto reforzado consiste en la colocación de nuevos muros de corte de CR, como se muestra en la Figura 64. Estos muros son usualmente de concreto reforzado o de mampostería reforzada (menos común).

Los nuevos muros de corte de CR deben colocarse en lugares estratégicos para minimizar los efectos de torsión no deseados. Además, estos muros deben reforzarse de manera que actúen en conjunto con la estructura existente. Se requiere un

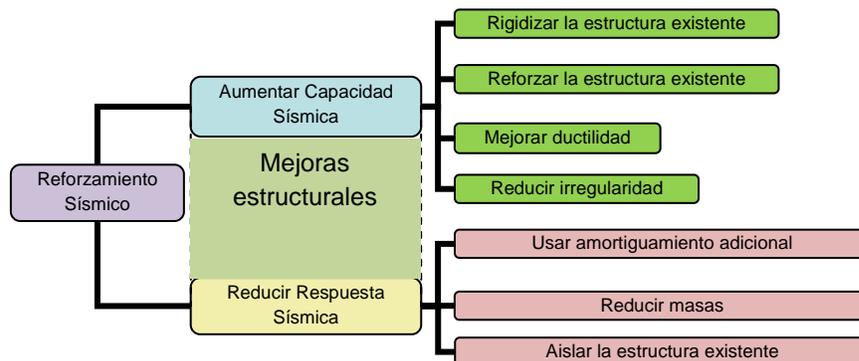


Figura 63. Las estrategias para el reforzamiento sísmico de sistemas estructurales que resisten cargas laterales (fuente: Durgesh C. Rai).

Los muros de corte de CR deben colocarse de manera que se minimicen los efectos torsionales

detallado y selección cuidadosos de materiales para asegurar una conexión efectiva entre la estructura nueva y la existente. La adición de muros de corte altera substancialmente la distribución de fuerzas en la estructura ante cargas laterales, y por lo tanto normalmente se requiere reforzar las fundaciones. Este método fue usado extensamente en Turquía después del sismo de 1999 (Gulkan et al. 2002) y en Taiwán después del sismo de 1999 en Chi Chi (Yao y Sheu 2002). La Figura 65 muestra un concepto de refuerzo para marcos de CR basado en la instalación de nuevos muros de corte.

Los nuevos muros de corte deben reforzarse de manera que actúen al unísono con la estructura existente

En algunos casos, la instalación de nuevos muros de corte de concreto reforzado se combina con el revestimiento de las columnas como

se muestra en la Figura 66. Como se discutió anteriormente, el revestimiento también tiene un efecto beneficioso, aumentando la capacidad y ductilidad de las columnas existentes de concreto reforzado. Esta técnica se implementa usualmente cuando no es posible lograr una conexión efectiva entre la estructura nueva y la existente usando dovelas de acero. (En algunos países, la práctica de colocar anclajes unidos mediante químicos, los cuales actúan como dovelas, no está bien desarrollada.)

Como alternativa a la instalación de nuevos muros de corte de CR o de mampostería, pueden proveerse riostras de acero para aumentar la resistencia sísmica de estos edificios. La Figura 67 ilustra un ejemplo de reforzamiento de una prueba reciente en Japón.

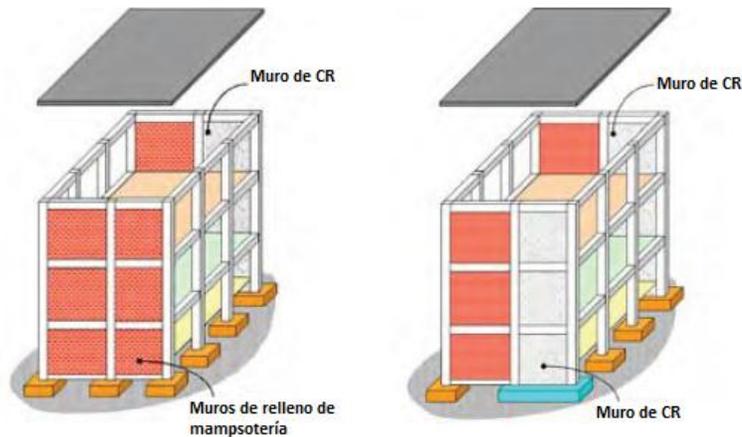


Figura 64. Instalación de nuevos muros de corte (fuente: C.V.R. Murty).

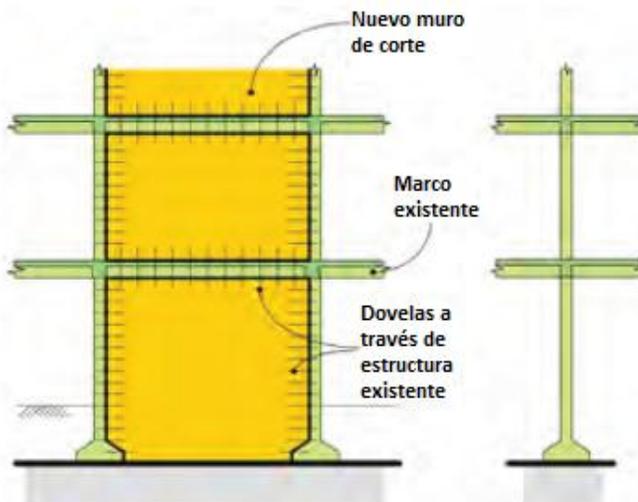


Figura 65. Instalación de nuevos muros de corte de CR en un edificio existente de marcos de CR – notar que se proveen dovelas para amarrar la nueva estructura con la vieja (fuente: C.V.R. Murty, adaptado de Gulkan et al. 2002).

Usar dovelas para conectar el nuevo muro de corte con la losa y vigas existentes

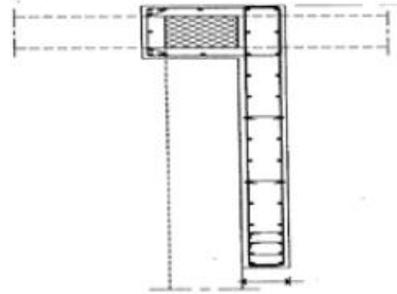


Figura 66. Reforzamiento de edificios de CR existentes usando nuevos muros de CR y revestimiento de las columnas existentes después del sismo de 2003 en Boumerdes, Argelia (foto: M. Farsi; dibujos cortesía de CTC Argiers).



*a*



*b*

Figura 67. Refuerzo de marcos de CR con riostras de acero – pruebas en mesas vibratorias realizadas en E-Defense, Japón: a) falla por columna corta en el nivel inferior; b) refuerzo usando riostras de acero (fuente: C. Comartin).

El revestimiento puede aumentar la capacidad y ductilidad de las columnas

## Revestimiento

El revestimiento o encamisado consiste en instalar nuevas barras de acero de refuerzo (estribos laterales y barras verticales) de manera que se aumente la capacidad y ductilidad de los elementos existentes de concreto (usualmente las columnas), como se muestra en la Figura 68. Como resultado del revestimiento, se aumenta la sección transversal de la columna. Cuando se instalan nuevos estribos en la unión viga-columna, el concreto existente en la región de la conexión debe removerse cuidadosamente.

Las Figuras 69 y 70 muestran el revestimiento de marcos de CR en Colombia.

El revestimiento con Polímeros Reforzados con Fibra (FRP) pueden usarse para reforzar muros de mampostería de relleno o para revestir columnas

Alternativamente, el revestimiento puede lograrse por medio de pletinas y angulares de acero, como se muestra en la Figura 71. En este caso, las pletinas actúan como refuerzo lateral (estribos), mientras que los angulares trabajan como refuerzo vertical. Estos componentes son soldados para asegurar la integridad del sistema de refuerzo.

El revestimiento de las columnas de CR fue utilizado para reforzar edificios de marcos de CR en India después del sismo de 2001 en Bhuj; antes también se utilizó en Rumania, después del sismo de 1977 en Vrancea (Bostenaru 2004). Algunas de las fallas observadas en la implementación son:

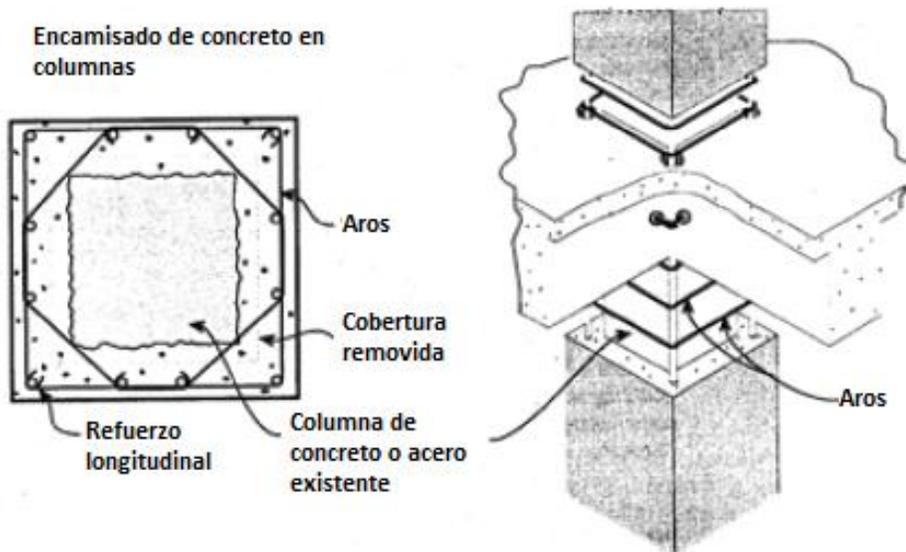
- En algunos casos, el refuerzo se limitó nada más a las columnas del nivel inferior, lo que puede no ser suficiente; en algunos casos, las barras longitudinales que se agregaron al concreto se

proyectaron hacia afuera sin ninguna conexión con las columnas y vigas de CR existentes, así como la fundación inferior (ver Figura 72).

- En muchos casos, las columnas existentes fueron ajustadas con los angulares y pletinas de acero (ver Figura 72) antes de que se colocara el concreto. Y, en muchos casos, el revestimiento se realizó sin ninguna preparación de la superficie existente de concreto (¡la superficie de la columna debe picarse!).
- En muchos casos, el tamaño de la columna revestida era inadecuado hasta para las cargas gravitacionales; sin embargo, en algunos casos el tamaño de la columna se volvió ridículamente grande después del revestimiento (ver Figura 73).
- En algunos casos, el revestimiento de las columnas se discontinuó en el nivel inferior sin que se extendiera hasta las fundaciones.

En años recientes, el uso de bandas de fibra compuesta como envolturas para confinar las columnas de concreto reforzado se ha vuelto bastante común. Esta tecnología es mucho más simple y finalmente menos costosa que usar barras de acero. Los revestimientos con Polímeros Reforzados con Fibra (FRP por sus siglas en inglés) pueden aplicarse circunferencialmente alrededor de las columnas de concreto reforzado para proveer refuerzo confinante; se ha demostrado que esto aumenta la capacidad y la ductilidad. La tecnología del revestimiento con fibra ha sido usada alrededor del mundo en la última década para el reforzamiento sísmico de pilotes reforzados en puentes y columnas en edificios. Los procedimientos detallados para el diseño están descritos en publicaciones desarrolladas por ISIS Canadá (2001, 2003 y 2004).

El reforzamiento usando FRP debe realizarse cuidadosamente, considerando su comportamiento frágil



El revestimiento debe proveerse continuamente a través de las losas de piso para ser efectivas

Figura 68. Revestimiento de columnas existente de CR usando un encamisado nuevo de CR (fuente: NRC 1995).



Figura 69. Instalación de revestimientos de concreto reforzado desde el nivel de la fundación hasta la parte inferior de la viga; ejemplos de Colombia (fuente: Mejía 2002).

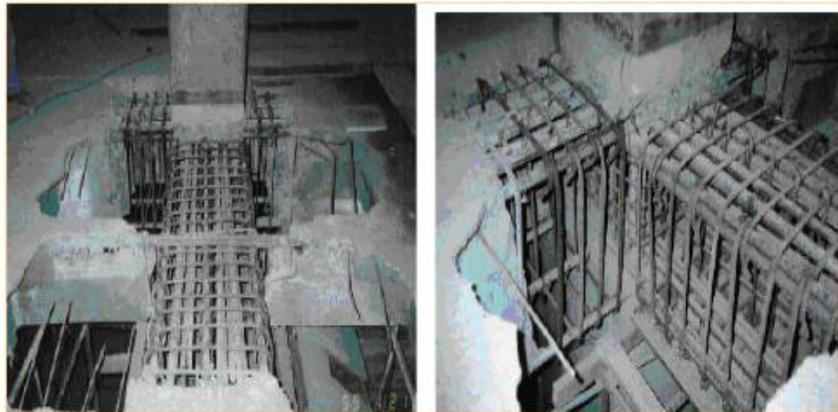
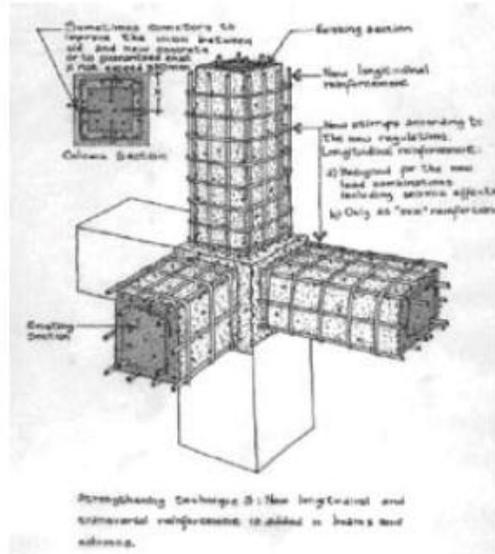


Figura 70. Revestimiento de la conexión viga-columna; ejemplos de Colombia (fuente: Mejía, 2002).

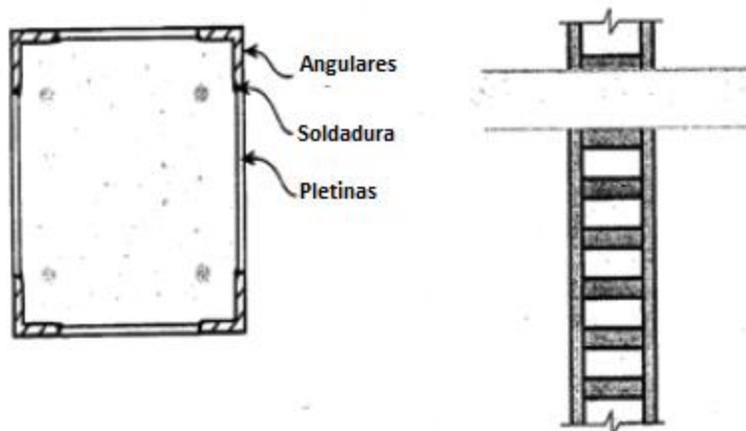


Figura 71. Encamisado de acero en columnas existentes de CR (fuente: NRC 1995).

El revestimiento consiste en instalar nuevas barras de refuerzo (estribos laterales y barras verticales) que aumenten la sección transversal de la



Figura 72. Un ejemplo de encamisado inadecuado en acero: angulares de acero verticales asegurados con barras de refuerzo horizontal soldado, seguidos por la colocación del concreto; los listones no continúan hasta las vigas del nivel superior ni empiezan desde el nivel de la fundación. El encamisado se limita al nivel inferior (foto: C.V.R. Murty).



Figura 73. Un ejemplo de una práctica de refuerzo inapropiada: el encamisado de las columnas de CR resultó en tamaños de columnas extremadamente grandes (notar la ausencia de continuidad con respecto al nivel superior y a las fundaciones) (foto: C.V.R. Murty).

## Refuerzo de Muros de Mampostería de Relleno Existente

La colocación de nuevos muros de corte de CR en edificios existentes consume bastante tiempo. La aplicación de este método es viable después de un sismo, cuando un edificio se dañó y debe ser desalojado. Sin embargo, puede que no sea posible desalojar un edificio sin daños. La necesidad de realizar el reforzamiento de un edificio desalojado de manera rápida y efectiva ha promovido investigaciones enfocadas en el uso de revestimientos de Polímeros Reforzados con Fibra (FRP) para reforzar muros de mampostería de relleno. El uso de esta tecnología emergente está aumentando en el refuerzo de puentes y edificios en situaciones antes y después de un sismo. Los FRP son materiales de bajo peso caracterizados por una alta capacidad en tracción comparados con el acero de refuerzo. Varios tipos de fibras (incluyendo los que están hechos de vidrio y carbón) embebidos en resina con epóxicos son usados para formar láminas o barras. Otra característica de los FRP es su comportamiento frágil; una vez que alcanzan su capacidad, estos materiales fallan repentinamente (similar al vidrio).

Una ventaja importante de este sistema de refuerzo es su rápida implementación, que se puede realizar en días o hasta horas (dependiendo del alcance del trabajo) y no requiere reubicación de los habitantes del edificio. Debe notarse, sin embargo, que el costo del material de las láminas de FRP puede ser restrictivo para algunos dueños de edificios.

Se usaron láminas de Polímeros Reforzados con Fibra de Carbono (CFRP) en formas de tiras diagonales para reforzar muros de mampostería de relleno existentes hechos con bloques de arcilla huecos. La meta del refuerzo era transformar estos paneles no estructurales en muros de corte capaces de proveer resistencia a las cargas sísmicas laterales. Las tiras se unieron a los marcos de CR por medio de dovelas especiales hechas de láminas de CFRP. Los resultados de este estudio demostraron que este método puede usarse de manera efectiva para aumentar la resistencia y rigidez de los marcos de CR; sin embargo, la efectividad depende fuertemente de la extensión del anclaje entre las tiras y el marco. Debe notarse que, debido a la naturaleza frágil del material CFRP y de los muros de mampostería de relleno, esta solución de reforzamiento solo tiene una influencia marginal en la ductilidad de la estructura existente. La Figura 74 muestra la configuración de la prueba realizada por METU.

## Refuerzo de Edificios de Marcos de CR con su Planta Baja Abierta

Un gran número de edificios de marcos de CR existentes a lo largo del mundo poseen una planta baja abierta, flexible o débil; tales edificios son extremadamente vulnerables ante un sismo, como se discutió previamente en este documento. Dado que este sistema sísmicamente vulnerable se sigue construyendo, se discute a continuación un sistema de refuerzo práctico. Generalmente, el reforzamiento de tales edificios debería asegurar que se eliminen las reducciones súbitas y significativas de la rigidez o resistencia del edificio en cualquier nivel. Hay varias opciones para reforzar edificios existentes que tenga una planta baja abierta, como se muestra en la Figura 75. A menudo es posible retener la función original de la planta baja (ej. parqueo) al mismo tiempo

La *Middle East Technical University (METU)* condujo una investigación exhaustiva en este tema en Turquía (Erdem et al. 2004; Ozcebe et al. 2004).

Los edificios con plantas bajas abiertas, flexibles o débiles son **EXTREMADAMENTE vulnerables** ante un sismo

que se reduce la flexibilidad o debilidad del edificio. La tarea de desarrollar soluciones detalladas para el reforzamiento consume mucho tiempo y requiere un nivel avanzado de habilidad y conocimiento. Debido a varias restricciones, incluidos recursos humanos y monetarios, no es posible reforzar todos los edificios vulnerables de este tipo en zonas de alto riesgo sísmico. Por lo tanto, se proponen las siguientes dos estrategias para lidiar con este problema: una meta a corto plazo (prevenir el colapso), y una a largo plazo (asegurarse que el desempeño sísmico mejore como resultado del refuerzo).

### **Meta a Corto Plazo = Prevenir el Colapso**

Una vez que se ha identificado el edificio con planta baja vulnerable, la responsabilidad principal es mejorar urgentemente la seguridad de estos edificios, antes de que suceda el siguiente sismo y ocasione el colapso. Una solución rápida es colocar muros de mampostería de relleno en la planta baja entre tantas columnas de la planta baja como sea posible (ver Figuras 75a y 76).

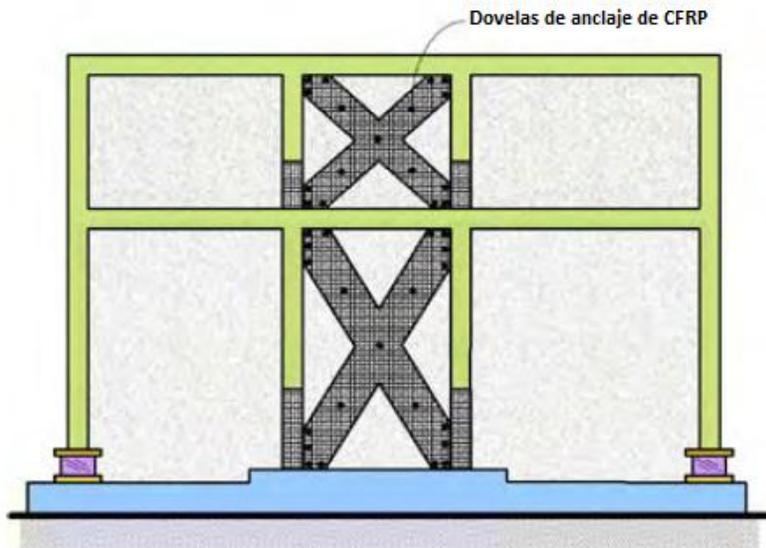


Figura 74. Configuración de tiras de CFRP y ubicación de dovelas de anclaje (fuente: C.V.R. Murty, adaptado de Erdem et al. 2004).

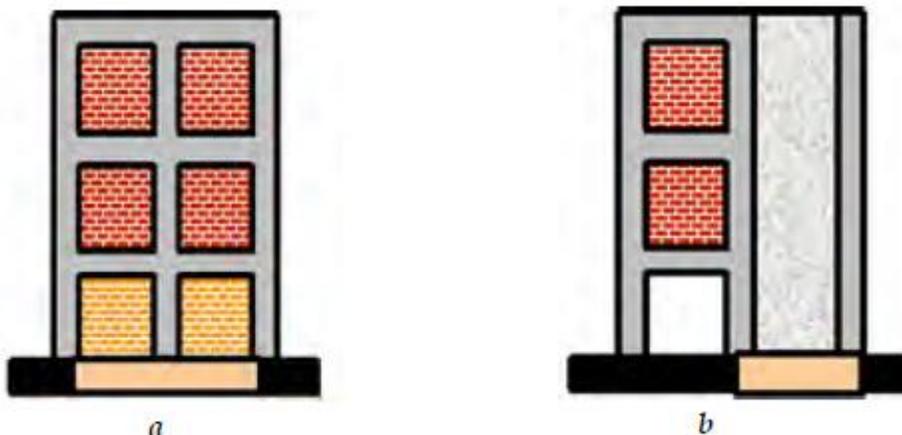


Figura 75. Las opciones para reforzar los edificios con planta baja abierta: (a) Rellenar las aberturas en la planta baja; y (b) instalación de muros de corte de CR continuos (fuente: C.V.R. Murty).

## **Meta a Largo Plazo = Mejorar el Desempeño Sísmico**

Para algunos edificios existentes y para todos los nuevos con una planta baja abierta, las irregularidades en la rigidez y la resistencia deben minimizarse, o si es posible eliminarlas. En la planta baja, los muros de CR pueden colocarse en ciertos claros entre columnas, pero deben ser continuos para toda la altura del edificio (ver Figuras 75b y 77); los otros claros pueden rellenarse con muros de mampostería o permanecer abiertos. Por supuesto, en los niveles superiores, los otros claros se rellenan con muros de mampostería. Usando este tipo de soluciones (diseñadas por un ingeniero calificado para cada edificio en particular), se asegura un buen comportamiento sísmico.

## **Cómo la Adecuación Sísmica Afecta las Propiedades Estructurales**

Cuando se implementan correctamente, los métodos de adecuación y reforzamiento

anteriores tienen influencia en una o más de las siguientes propiedades estructurales:

- *Resistencia* – es deseable que el refuerzo aumente la resistencia de una estructura existente, eso es, el nivel al que la estructura o sus componentes comienzan a fallar.
- *Rigidez* – muchos de los métodos de refuerzo también afectan la rigidez de la estructura, eso es, la habilidad para deformarse, desplazándose lateralmente, cuando es sometida a fuerzas sísmicas – las estructuras rígidas se deforman menos que las flexibles cuando están sometidas a las mismas cargas laterales.
- *Ductilidad* – es muy deseable que el método de refuerzo aumente la ductilidad de la estructura existente, eso es, la habilidad de deformarse sustancialmente antes de la falla.

Las irregularidades en la rigidez y resistencia en la planta baja deben minimizarse o eliminarse completamente



**Figura 76. Una solución de corto plazo a la vulnerabilidad sísmica de un edificio con planta baja abierta, después del sismo de 2001 en Bhuj; notar que las aberturas en la planta baja se rellenaron con muros de mampostería nuevos (foto: C.V.R. Murty).**

Usualmente, los métodos de refuerzo influyen una o más propiedades estructurales. Los efectos de los métodos de refuerzo discutidos en este documento se resumen en la Tabla 2.

## Refuerzo de Marcos de CR con Muros de Mampostería de Relleno: Retos de Implementación

En esta sección se han discutido algunos de los métodos más comunes para reforzar marcos de CR con muros de relleno. Las descripciones han tenido el propósito de explicar los conceptos del refuerzo, más que ofrecer soluciones detalladas. El diseño para el refuerzo debe realizarse por profesionales calificados antes de que se dé la implementación. Debe realizarse un análisis sísmico profundo, donde se desarrolle un

modelo de análisis de la estructura existente, y deben cuantificarse los efectos de reforzar cada miembro estructural. Los nuevos miembros estructurales (ej. muros de corte de CR) agregados a la estructura existente deben incorporarse al modelo estructural en la etapa de análisis. Hay varios programas de software disponibles para el análisis de estas situaciones. Sin embargo, la clave para el éxito de los propietarios de edificios y las agencias de implementación es incorporar ingenieros capacitados con conocimientos en el diseño y adecuación estructural y de ingeniería estructural en general.

En situaciones post-sismo, los gobiernos y agencias privadas se enfrentan con la enorme tarea asociada con el manejo masivo de proyectos enfocados en la rehabilitación de cientos o miles de edificios. Sin embargo, debe reconocerse que cada edificio es único y que el sistema de refuerzo sísmico diseñado para un edificio de marcos

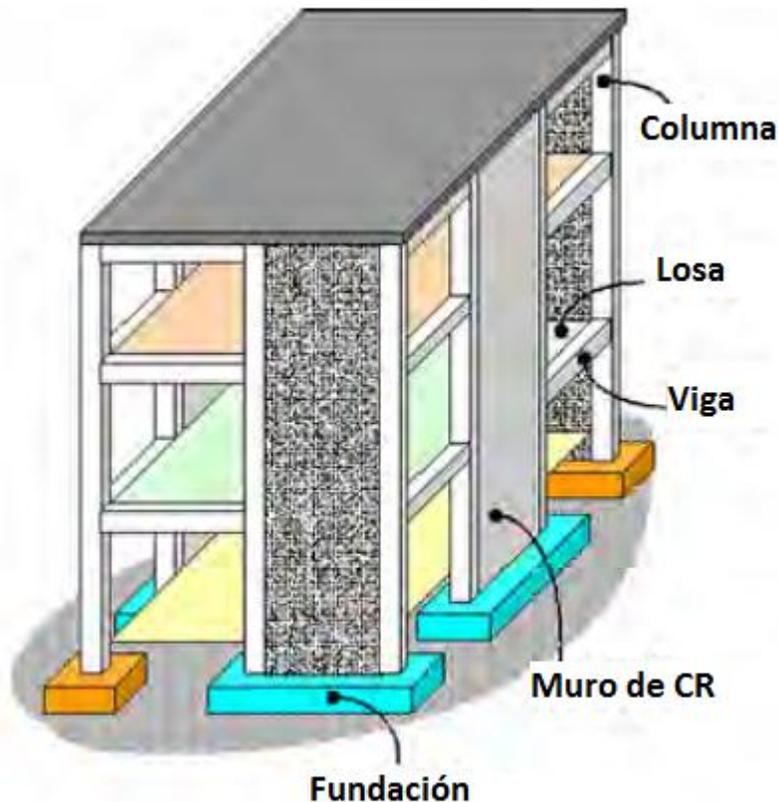


Figura 77. Una solución a largo plazo para los edificios con planta baja abierta: deben proveerse muros de corte de CR continuos a lo largo de la altura del edificio para superar la reducción de la rigidez y capacidad ocasionada por la estructura de la planta baja abierta (fuente: Murty 2005).

Las estrategias de refuerzo deben evaluarse cuidadosamente por su influencia en la *capacidad, rigidez y ductilidad* del edificio

**Tabla 2. Métodos de refuerzo y sus efectos en las propiedades estructurales.**

Método de refuerzo	Resultados en el aumento de:		
	Resistencia	Rigidez	Ductilidad
Instalación de nuevos muros de CR	SÍ	SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO
Reforzar los muros de mampostería de relleno con CFRP	SÍ	SIGNIFICATIVO	MUY PEQUEÑO
Revestimiento	SÍ	MODERADO	MODERADO

de CR puede no ser el adecuado para otro. Los requerimientos para el reforzamiento y la adecuación dependen de muchos factores, incluyendo el peligro sísmico de la ubicación del edificio, condiciones locales del suelo, desempeño sísmico esperado, y tipo y edad de la estructura. Por eso, no son muy efectivas las estrategias masivas de adecuación para edificios de marcos de CR, a menos que estos edificios tengan las mismas deficiencias y modos de falla.

- Identificar y utilizar el equipo requerido para llevar a cabo las modificaciones o mejoras de los elementos estructurales existentes;
- Estimar el tiempo requerido para completar la adecuación para un edificio específico dependiendo del tamaño y tipo de construcción; y
- Encontrar la mano de obra con las habilidades requeridas para implementar la adecuación.

Se requieren “hojas de ruta” para estimar los recursos humanos y equipo que se requieren para realizar el refuerzo sísmico de los edificios de marcos de CR en zonas de alto riesgo sísmico alrededor del mundo

Otro reto asociado con la implementación de la adecuación de edificios de marcos de CR con muros de relleno es el limitado conocimiento y experiencia en el diseño y construcción de proyectos de adecuación sísmica. La adecuación es un proceso complejo y, en la mayoría de los casos, demanda un nivel mayor de conocimiento y experiencia que el que se requiere para

Los retos descritos anteriormente destacan la urgente necesidad de un diálogo entre todas las partes interesadas en países y regiones en riesgo de desastres sísmicos. Se requiere contar con “hojas de ruta” para estimar los recursos humanos y el equipo requeridos, así como establecer sistemas eficaces de gestión de la construcción, para implementar proyectos de adecuación sísmica en edificios de marcos de CR en situaciones anteriores y posteriores a un sismo en todo el mundo.

diseñar y construir un edificio nuevo. En los países en desarrollo este problema se acentúa, particularmente en una situación post-sismo. Algunos de los retos que enfrentan las agencias de implementación debido a la falta de habilidad y experiencia son los siguientes:

- Encontrar el costo estimado de la adecuación de diferentes tipos de estructuras (marcos de CR, edificios de mampostería, etc.);

En la mayoría de los casos, el diseño de la adecuación y su ejecución en edificios existentes requiere un nivel de habilidad mayor al que se requiere para diseñar y construir nuevos edificios

## 7. Conclusiones

Este documento resalta el pobre desempeño sísmico de los edificios de marcos de concreto con muros de mampostería de relleno, y documenta los factores principales en el diseño y construcción que ocasionan ese desempeño. Existe una preocupación importante en la comunidad de ingenieros estructurales que muchos de estos edificios, ya construidos y en pie alrededor del mundo, son potenciales trampas mortales en futuros sismos. Aun los nuevos que se están construyendo, pueden ser potencialmente peligrosos si no se presta atención especial a aquellos temas críticos de su diseño, construcción y gestión.

### Desafíos técnicos

El diseño y construcción de los edificios de marcos de CR requieren muchos pequeños pero importantes factores para hacerlos sismorresistentes. Como se discutió en este documento, los desafíos primordiales en la construcción de marcos de CR son asegurarse que:

- (a) Las columnas sean más fuertes que las vigas
- (b) Las barras de refuerzo en la conexión viga-columna permitan un colado adecuado en la unión
- (c) Las vigas sean dúctiles, a través de un detallado adecuado del refuerzo, y
- (d) El marco no sea muy débil o flexible en la dirección horizontal, ya sea en un solo nivel o en su totalidad.

En general, es muy difícil diseñar, detallar y construir marcos de CR para que se comporten de manera adecuada durante un sismo, a pesar que los factores adicionales que se requieren, incluyendo los costos, son

solo incrementales en su naturaleza,. Por ejemplo, los estribos de columnas deben proveerse con ganchos de 135°, a diferencia de los dobleces de 90° en los marcos de CR realizados en las zonas no sísmicas. El costo y el esfuerzo adicionales son mínimos, pero las consecuencias de no hacer estos cambios pueden ser catastróficas. Cuando no se presta atención especial al diseño, detallado y construcción, no debe confiarse solamente en los marcos de CR para resistir las cargas laterales. Se requieren sistemas alternativos resistentes a cargas laterales.

Este tutorial sobre edificios de marcos de CR exhorta al uso de los siguientes sistemas estructurales alternativos para resistir las cargas laterales:

- (a) Muros de corte de CR continuos desde la fundación hasta el techo provistos en los edificios de marcos de CR de mediana y gran altura; y
- (b) Construcción con mampostería confinada, esto es, la combinación de elementos de CR confinantes (vigas y columnas de amarre) y muros de mampostería, que son adecuados para edificios de baja altura (de uno a cuatro niveles de altura).



Todos los arquitectos, propietarios de edificios, constructores, diseñadores, ingenieros y agencias municipales juegan un papel importante en mejorar el desempeño sísmico de los edificios de marcos de CR con muros de mampostería de relleno

### Partes interesadas

Existen varios e importantes actores para la tarea de prestar la atención necesaria a estos problemas. Los lectores de este documento deben evaluar cuál es su papel en los procesos de la construcción, para propiciar un diseño y construcción seguros. Este gran problema puede volverse manejable si cada

individuo con un papel en el proceso de diseño y construcción toma responsabilidad en aprender cómo puede influenciar el proceso. Las partes interesadas claves y sus papeles respectivos se resumen a continuación:

- **Los arquitectos** deben entender que sus diseños pueden influenciar directamente el desempeño sísmico del edificio, y deben abstenerse de diseñar formas complejas que causen problemas torsionales. Deben entender que los muros de mampostería de relleno no son solo componentes arquitectónicos, sino que tienen una influencia fundamental en el comportamiento estructural de un edificio.
- **Los propietarios de edificios** deben jugar un papel absolutamente crítico al entender la importancia de la resistencia sísmica e insistir que los aspectos sísmicos sean parte de todo nuevo diseño y construcción.
- **Los administradores de la construcción** pueden, de manera explícita, mejorar la resistencia sísmica de los edificios nuevos, asegurando materiales de construcción de calidad y mano de obra de calidad.
- **Los diseñadores** deben entender que sus diseños tienen consecuencias importantes en el desempeño sísmico del edificio. Desde asuntos simples como la ubicación de una puerta o ventana, a temas más complejos de configuración, los diseñadores deben ser concientes que cada una de tales decisiones tiene implicaciones en el desempeño sísmico.
- **Los ingenieros** tienen un papel primordial de mejorar el comportamiento sísmico de los marcos de CR, poniendo especial atención a los problemas del diseño y construcción descritos en este tutorial.

- **Las agencias municipales** tales como autoridades de construcción, departamentos de planificación urbana y gestores municipales deben hacer que los códigos de construcción y de diseño sísmico se cumplan en las comunidades. Esta función es esencial. Sin la aplicación e imposición que pueden ejercer estas autoridades, las prácticas de diseño sismorresistente no se aplicarán uniformemente. Un propietario educado o un ingeniero sofisticado puede incorporar tales prácticas en un diseño particular, pero las agencias gubernamentales tienen la oportunidad, de hecho la responsabilidad, de asegurarse que tales prácticas se cumplan en toda la comunidad y no solo un edificio a la vez.

## Comentarios finales

Conforme los países en desarrollo se vuelven más y más urbanizados, los riesgos sísmicos aumentarán drásticamente a menos de que se implementen cambios fundamentales en las políticas, el diseño y la construcción. Hace mucho tiempo que estos cambios debieron haberse dado. Por lo tanto, es responsabilidad de todas las partes interesadas involucradas en el proceso de diseño y construcción abogar por prácticas seguras en el diseño y construcción de edificios.

Finalmente, el problema de la construcción de marcos de CR con muros de mampostería de relleno no es solo de la ingeniería. Los autores de este documento creen que la toda comunidad se beneficiaría de las mejoradas prácticas de diseño y construcción sugeridas aquí, y que como resultado se perderán menos vidas y habrá menos daños a la propiedad en sismos futuros.

## 8. Referencias

American Concrete Institute, (2002), **Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures**, ACI 440.2R-02, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA.

American Society of Civil Engineers/Structural Engineering Institute, (2006), **Seismic Rehabilitation of Existing Buildings**, ASCE/SEI 41-06. American Society of Civil Engineers, Washington DC.

American Society of Civil Engineers/Structural Engineering Institute, (2003), **Seismic Evaluation of Existing Buildings**, ASCE Standard No. 31-03. American Society of Civil Engineers, Washington DC, 444 pages.

Anthoine, A. and Taucer, F., (2006), **Seismic Assessment of a Reinforced Concrete Block Masonry House. PROARES Project in El Salvador**, European Laboratory for Structural Assessment, Joint Research Centre of the European Commission, EUR22324 EN, Ispra, Italy.

Applied Technology Council, (1989), **Procedures for Postearthquake Safety Evaluation of Buildings, ATC-20**, Applied Technology Council, Redwood City, California.

Applied Technology Council and SEAOC Joint Venture, (1999), **Built To Resist Earthquakes. ATC/SEAOC Training Curriculum: The Path to Quality Seismic Design and Construction**. Applied Technology Council, Redwood City, California.

Blondet, M. ed, (2005), **Construcción y Mantenimiento de Viviendas de Albañilería – Para Albañiles y Maestro de Obra**, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú, ([www.world-housing.net](http://www.world-housing.net)).

Bostenaru, M.D., (2004), “Early Reinforced Concrete Frame Condominium Building with Masonry Infill Walls Designed for Gravity Loads only,” WHE Report 96 (Romania), **World Housing Encyclopedia** ([www.worldhousing.net](http://www.worldhousing.net)), Earthquake Engineering Research Institute and International Association for Earthquake Engineering.

Bostenaru, M, and Sandu, I. (2002), “Reinforced concrete cast-in situ shear wall buildings “OD”-type, with “fagure” plan”, WHE Report 78 (Romania), **World Housing Encyclopedia** ([www.world-housing.net](http://www.world-housing.net)). Earthquake Engineering Research Institute and International Association for Earthquake Engineering.

Brzev, S., (2007), **Confined Masonry Construction: A Guide for Architects and Builders**, National Information Center for Earthquake Engineering, Indian Institute of Technology Kanpur, India.

EERI, (2000), **Annotated Slide Collection, CD Publication**, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA.

EERI, (2001). **Annotated Images from the Bhuj, India Earthquake of January 26, 2001 (CD)**. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA.

EERI/IAEE, (2000), **World Housing Encyclopedia** ([www.worldhousing.net](http://www.worldhousing.net)). Earthquake Engineering Research Institute and the International Association for Earthquake Engineering.

Englekirk, R.E., (2003), **Seismic Design of Reinforced and Precast Concrete Buildings**, John Wiley & Sons, Inc., U.S.A.

Erdem, I., Akyuz, U., and Ozcebe, G., (2004), "Experimental and Analytical Studies on the Strengthening of RC Frames", **Proceedings, 13th World Conference on Earthquake Engineering**, Vancouver, Canada, Paper No. 673.

Faison, H., Comartin, C., and Elwood, K. (2004), "Reinforced Concrete Moment Frame Building without Seismic Details" WHE Report 111 (U.S.A.), **World Housing Encyclopedia** ([www.worldhousing.net](http://www.worldhousing.net)). Earthquake Engineering Research Institute and International Association for Earthquake Engineering.

Federal Emergency Management Agency, (2000), **Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 356)**. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., USA.

Federal Emergency Management Agency, (1999a), **Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings- Basic Procedures Manual (FEMA 306)**, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.

Federal Emergency Management Agency, (1999b), **Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings- Technical Resources (FEMA 307)**, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.

Federal Emergency Management Agency, (1999c), **Repair of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings (FEMA 308)**, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.

Federal Emergency Management Agency, (1998), **Handbook for the Seismic Evaluation of Buildings – A Prestandard (FEMA 310)**, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C. (currently ASCE Standard 31-02).

Federal Emergency Management Agency, (1994), **Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage (FEMA 74)**, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., USA,. (<http://www.fema.gov/plan/prevent/earthquake/homeowners.shtm>).

Federal Emergency Management Agency, (1988), **Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook (FEMA 154)**, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., USA.

Gulkan, P., Ascheim, M. and Spence, R., (2002), "Reinforced concrete frame building with masonry infills," WHE Report 64 (Turkey), **World Housing Encyclopedia** ([www.worldhousing.net](http://www.worldhousing.net)), Earthquake Engineering Research Institute and International Association for Earthquake Engineering.

International Code Council, 2006. "Appendix Chapter A5: Earthquake Hazard Reduction in Existing Concrete Buildings and Concrete with Masonry Infill Buildings", **2006 Edition of the International Existing Building Code (IEBC)**. Available for purchase at [www.iccsafe.org](http://www.iccsafe.org).

ISIS, (2001), **Strengthening Reinforced Concrete Structures With Externally-Bonded Fibre Reinforced Polymers**, Intelligent Sensing for Innovative Structures (ISIS) Canada Research Network, Winnipeg, Manitoba.

ISIS, (2003), **An Introduction to FRP Composites for Construction**, ISIS Educational Module No. 2, Intelligent Sensing for Innovative Structures (ISIS) Canada Research Network, Winnipeg, Manitoba (free download from <http://www.isiscanada.com/education/education.html>).

ISIS, (2004), **An Introduction to FRP Strengthening of Concrete Structures**, ISIS Educational Module No. 4, Intelligent Sensing for Innovative Structures (ISIS) Canada Research Network, Winnipeg, Manitoba (free download from <http://www.isiscanada.com/education/education.html>).

Jaiswal, K., Sinha, R., Goyal, A., (2003), "Reinforced Concrete Frame Building with Masonry Infill Walls Designed for Gravity Loads". WHE Report 19 (India), **World Housing Encyclopedia** ([www.world-housing.net](http://www.world-housing.net)). Earthquake Engineering Research Institute and International Association for Earthquake Engineering.

Levtchitch, V., (2002), "Gravity designed reinforced concrete frame buildings with unreinforced masonry infill walls," WHE Report 13 (Cyprus), **World Housing Encyclopedia** ([www.world-housing.net](http://www.world-housing.net)), Earthquake Engineering Research Institute and International Association for Earthquake Engineering.

MacGregor, J.G. and Wight, J.K., (2005), **Reinforced Concrete Mechanics and Design, Fourth Edition**, Pearson Education Inc., Upper Saddle River, NJ, U.S.A.

Mejia, L., (2002), "Gravity Concrete Frame Building (predating seismic codes)," WHE Report 11 (Colombia), **World Housing Encyclopedia** ([www.worldhousing.net](http://www.worldhousing.net)), Earthquake Engineering Research Institute and International Association for Earthquake Engineering.

Moroni, O. and Gomez, C., (2002a), "Concrete shear wall building" WHE Report 4 (Chile), **World Housing Encyclopedia** ([www.world-housing.net](http://www.world-housing.net)). Earthquake Engineering Research Institute and International Association for Earthquake Engineering.

Moroni, O. and Gomez, C., (2002b), "Concrete frame and shear wall building". WHE Report 6 (Chile), **World Housing Encyclopedia** ([www.world-housing.net](http://www.world-housing.net)). Earthquake Engineering Research Institute and International Association for Earthquake Engineering.

Murty, C.V.R., (2005), IITKBMTPC  
**Earthquake Tips**  
– **Learning Earthquake**  
**Design and Construction**,  
National Information Center  
of Earthquake Engineering, IIT  
Kanpur, India, September.

Murty, C.V.R., Charleson, A.W., and  
Sanyal, S.A., (2006), **Earthquake**  
**Design Concepts for Teachres**  
**of Architecture Colleges**,  
National Information Center  
of Earthquake Engineering, IIT  
Kanpur, India.

Naeim, F., (2001), **The Seismic**  
**Design Handbook, Second**  
**Edition**, Kluwer Academic  
Publishers, Boston MA.

Newman,A., (2001), **Structural**  
**Renovation of Buildings -**  
**Methods, Details and Design**  
**Examples**, McGraw-Hill  
Professional Engineering.

NRC, (1995), **Guideline for Seismic**  
**Upgrading of Building**  
**Structures, Institute for**  
**Research in Construction**,  
National Research Council of  
Canada, Ottawa.

Ozcebe, G. et al., (2004),  
“Rehabilitation of Existing  
Reinforced Concrete Structures  
Using CFRP Fabrics”,  
**Proceedings, 13th World**  
**Conference on Earthquake**  
**Engineering**, Vancouver,  
Canada, Paper No. 1393.

Pao, J., and Brzev, S., (2002),  
“Concrete shear wall highrise  
buildings”. WHE Report 79  
(Canada), **World Housing**  
**Encyclopedia** (www.worldhousing.  
net). Earthquake  
Engineering Research Institute  
and International Association for  
Earthquake Engineering.

Paulay,T., and Priestley,M.J.N., (1992),  
**Seismic Design of Reinforced**  
**Concrete and Masonry Buildings**,  
John Wiley & Sons, USA.

Penelis, G.G., and Kappos, A.J., (1997),  
**Earthquake Resistant Concrete**  
**Structures**, E&FNSPON, U.K.

Rodriguez, M. and Jarque, F.G.,  
(2005), “Reinforced concrete  
multistory buildings”, WHE  
Report 115 (Mexico), **World**  
**Housing Encyclopedia** (www.  
world-housing.net). Earthquake  
Engineering Research Institute  
and International Association for  
Earthquake Engineering.

UNIDO, (1983), **Repair and**  
**Strengthening of Reinforced**  
**Concrete, Stone and Brick**  
**Masonry Buildings**, Building  
Construction Under Seismic  
Conditions in the Balkan  
Region, UNDP/UNIDO Project  
RER/79/015, Vol. 5, Vienna,  
Austria.

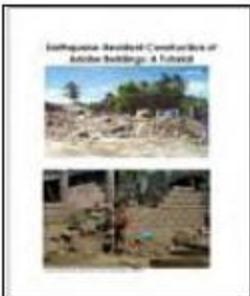
Yakut, A. (2004), “Reinforced Concrete  
Frame Construction”, **World**  
**Housing Encyclopedia – Summary**  
**Publication 2004**, Earthquake  
Engineering Research Institute,  
Oakland, California, pp.9-1 to 9-8.

Yakut, A., and Gulkan, P., (2003),  
“Tunnel Form Building”, WHE  
Report 101 (Turkey), **World**  
**Housing Encyclopedia** (www.  
world-housing.net). Earthquake  
Engineering Research Institute  
and International Association for  
Earthquake Engineering.

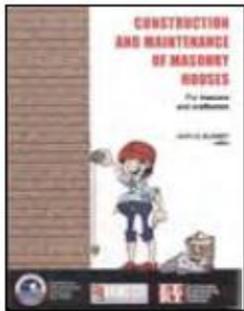
Yao, G.C., and Sheu,M.S., (2002),  
“Street-front building with arcade  
at the first floor (contemporary  
construction)”, WHE Report  
62 (Taiwan), **World Housing**  
**Encyclopedia** (www.worldhousing.  
net). Earthquake  
Engineering Research Institute  
and International Association for  
Earthquake Engineering.

## TUTORIALES WHE

Desarrollados por voluntarios de la *World Housing Encyclopedia Project* de EERI y IAEE  
Disponibles para descarga gratis en <http://www.world-housing.net/Tutorials/Tutorial.asp>  
Pueden comprarse copias en papel de la librería en línea de EERI en [www.eeri.org](http://www.eeri.org)

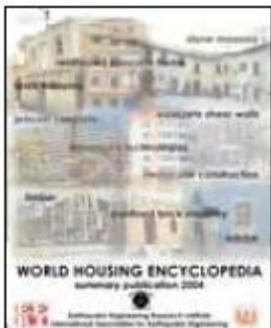


Construcciones de Adobe Resistentes a los Terremotos (disponible en Español e Inglés) Publicación EERI # WHE-2006-01 (publicado en la web el 2003; copia en papel el 2006, USD \$10)



Construcción y Mantenimiento de Viviendas de Albañilería para albañiles y maestros de obra (disponible en Español e Inglés) Publicación EERI # WHE- 2006-02 (publicado en la web el 2005 copia en papel el 2006, USD \$15)

## OTRAS PUBLICACIONES DE WHE



World Housing Encyclopedia summary publication 2004 (Editores técnicos: Svetlana Brzev, Marjorie Greene). Incluye un resumen de una página de todos los reportes de WHE hasta Agosto 2004, así como tecnologías constructivas representadas en la página web de WHE. Publicación EERI # WHE-2004-01, USD \$25 con CD-ROM.