

# Evaluación postsísmica de la infraestructura física educativa de México

VOLUMEN 2: INTRODUCCIÓN AL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS PARA FINES DE EVALUACIÓN







## **Directorio INIFED**

### **Secretaría de Educación Pública**

Esteban Moctezuma Barragán  
Secretario de Educación Pública

### **Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa, en Liquidación**

Jorge Javier Jiménez Alcaraz  
Director General

Gabriela Quiroga García  
Coordinadora Técnica

Ildefonso González Morales  
Director de Infraestructura

Alberto Israel Sánchez López  
Gerente de Asuntos Jurídicos

Tonatiuh Balanzario Salazar  
Asesor de la Dirección General

# Evaluación postsísmica de la infraestructura física educativa de México.

## Volumen 2: Introducción al comportamiento sísmico de estructuras para fines de evaluación



GOBIERNO DE  
**MÉXICO**

**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



EN LIQUIDACIÓN

**BANBRAS**  
BANCO NACIONAL DE OBRAS Y SERVICIOS PÚBLICOS S.N.C.



**INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM**

Enero, 2021



Se agradece la participación del Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos S.N.C., en su carácter de Institución Fiduciaria en el Fideicomiso Número 1936, denominado Fondo Nacional de Infraestructura (FONADIN), por haber otorgado los recursos necesarios para realizar esta obra.

# Evaluación postsísmica de la infraestructura física educativa de México.

## Volumen 2: Introducción al comportamiento sísmico de estructuras para fines de evaluación

Preparada por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México en colaboración con el Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa, en Liquidación

### **Autores Instituto de Ingeniería, UNAM**

Sergio M. Alcocer Martínez de Castro  
Gianella A. Valencia Ronquillo  
Rubén Bautista Monroy

### **Los autores agradecen a las siguientes personas la elaboración de figuras:**

Andrés Ayala Ventura  
Renato Berrón Alvarado  
Sebastián Martínez Negrete



Enero, 2021

Responsable de la edición: Sergio M. Alcocer Martínez de Castro  
Coordinación de la edición: Mercedes Gallardo Gutiérrez  
Corrección de estilo: Adriana Guerrero Tinoco  
Diseño editorial: Tania Zaldívar Martínez  
Primera edición: 28 de enero 2021

D.R. 2021

**INIFED, en Liquidación**

Av. Vito Alessio Robles No. 380,  
Col. Florida, Álvaro Obregón,  
Ciudad de México, C.P. 01030  
[www.gob.mx/inifed](http://www.gob.mx/inifed)

ISBN: En trámite

Esta edición y sus características son propiedad del Instituto Nacional de Infraestructura Física Educativa, en Liquidación y del Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos.

Cualquier copia o reproducción del material de esta publicación deberá de contar de manera previa con las autorizaciones que para cada caso se requiera.

Impreso y hecho en México



## **Asesores y revisores**

Ramón Abud Ramírez  
*Facultad de Arquitectura, UNAM*

Javier Alonso García  
*Alonso y Asociados*

Tonatiuh Balanzario Salazar  
*Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa*

Alberto Cuevas Rivas  
*Ingenieros Cuevas Asociados*

Óscar de la Torre Rangel  
*Proyecto Estructural*

Óscar M. González Cuevas  
*Universidad Autónoma Metropolitana – Azcapotzalco*

Miguel Ángel Guzmán Escudero  
*Consultor independiente*

Raúl Jean Perrilliat  
*Jean Ingenieros*

Michael E. Kreger  
*Universidad de Alabama, Estados Unidos de América*

Óscar A. López Bátiz  
*Centro Nacional de Prevención de Desastres*



# Índice

Prefacio	13
Capítulo 1	
<b>Introducción</b>	<b>15</b>
1.1 Propósito, alcance y limitaciones	15
1.2 ¿A quién va dirigido este documento?	16
1.3 Organización del documento	16
1.4 Utilización de las tablas 6.5 a 6.10 de este documento	17
Capítulo 2	
<b>Notación</b>	<b>19</b>
Capítulo 3	
<b>Propiedades generales de las estructuras</b>	<b>21</b>
3.1 Resistencia	22
3.2 Rigidez	22
3.3 Capacidad de deformación inelástica	24
3.4 Amortiguamiento	24
3.5 Repaso sobre el comportamiento de marcos y muros ante fuerzas laterales	25
Capítulo 4	
<b>Características adversas de diseño arquitectónico y estructural, y de construcción</b>	<b>29</b>
4.1 Falta de un mecanismo de transmisión de cargas directo	29
4.2 Irregularidades	31
4.2.1 Irregularidades verticales o en elevación	31
4.2.2 Irregularidades horizontales o en planta	32
4.3 Falta de redundancia	33
4.4 Falta de capacidad de deformación inelástica	33
4.5 Edificios adyacentes	34
Capítulo 5	
<b>Deterioro de los elementos estructurales y su efecto en la respuesta ante sismo</b>	<b>35</b>
5.1 Problema	35

5.2	Mampostería	36
5.2.1	Adobe	36
5.2.2	Mampostería simple de ladrillos o bloques artesanales o industriales	36
5.3	Concreto	36
5.3.1	Concreto simple	36
5.3.2	Concreto reforzado, mampostería confinada, mampostería reforzada interiormente	36
5.4	Acero estructural	37

## Capítulo 6

### **Comportamiento de estructuras de mampostería 39**

6.1	Introducción	39
6.1.1	Muros	39
6.1.2	Sistemas de piso y techo	40
6.2	Estructuras de mampostería simple	40
6.2.1	Materiales y estructuración	42
6.2.2	Elementos no estructurales de mampostería simple	43
6.2.3	Componentes de muros de mampostería simple y modos de comportamiento	43
6.3	Estructuras de mampostería confinada	53
6.3.1	Materiales y estructuración	53
6.3.2	Componentes de muros de mampostería confinada y modos de comportamiento	54
6.4	Estructuras de mampostería reforzada interiormente	63
6.4.1	Materiales y estructuración	63
6.4.2	Componentes de muros de mampostería reforzada interiormente y modos de comportamiento	63

## Capítulo 7

### **Comportamiento de estructuras de concreto 73**

7.1	Introducción	73
7.1.1	Sistemas de piso y techo	74
7.1.2	Marcos resistentes a momento	75
7.1.3	Muros de concreto	75
7.1.4	Marcos de concreto con muros diafragma	76
7.2	Marcos de concreto	76
7.2.1	Componentes de marcos de concreto y sus modos de comportamiento	76
7.3	Estructuras a base de muros de concreto	86
7.3.1	Componentes de estructuras a base de muros de concreto y sus modos de comportamiento	86
7.4	Estructuras a base de columnas unidas por losas planas	97
7.4.1	Componentes de estructuras a base de columnas unidas por losas planas y sus modos de comportamiento	97

<b>Capítulo 8</b>	
<b>Comportamiento de estructuras de acero</b>	<b>103</b>
8.1 Introducción	103
8.1.1 Marcos de acero resistentes a momento	104
8.1.2 Marcos contraventeados	104
8.1.3 Edificios de marcos de acero con elementos hechos con perfiles de lámina doblados en frío	105
8.1.4 Marcos de acero con muros diafragma	105
8.1.5 Marcos de acero con muros de concreto colados en sitio o de mampostería reforzada interiormente	105
8.2 Componentes de marcos de acero, con y sin contraventeo, y sus modos de comportamiento	105
8.2.1 Fallas por tensión	107
8.2.2 Fallas por compresión	108
8.2.3 Fallas por flexión	110
8.2.4 Falla por cortante	111
8.2.5 Fallas en conexiones	111
<b>Capítulo 9</b>	
<b>Marcos de concreto o acero con muros diafragma</b>	<b>117</b>
9.1 Materiales y estructuración	118
9.2 Componentes de marcos con muros diafragma y modos de comportamiento	120
<b>Capítulo 10</b>	
<b>Fallas y peligros de índole geotécnico más frecuentes</b>	<b>131</b>
10.1 Introducción	131
10.2 Hundimientos de cimentaciones provocados por el sismo	132
10.3 Desplazamiento lateral del suelo causado por licuación	133
10.4 Agrietamiento de suelos	135
10.5 Inestabilidad de laderas	137
10.6 Movimientos del terreno adyacente a fallas superficiales	140
<b>Glosario</b>	<b>141</b>
<b>Referencias</b>	<b>155</b>
<b>Apéndice</b>	<b>159</b>
<b>A. Investigación de estructuras de concreto y mampostería para fines de rehabilitación</b>	<b>159</b>
A.1 General	159
A.2 Grietas	160
A.3 Planeación de la investigación	162
A.4 Procedimiento sugerido para la investigación	164



# Prefacio

Como resultado de la reflexión sobre las lecciones aprendidas tras los sismos de 2017, la Secretaría de Educación Pública, mediante el Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa, en Liquidación (INIFED), decidió elaborar una metodología de evaluación postsísmica de la seguridad estructural de escuelas, la cual se planteó con los siguientes objetivos:

- Comunicar a los usuarios (estudiantes, profesorado y personal administrativo), a los directivos del plantel y de la zona escolar (propietarios, directores, supervisores), así como a los padres de familia sobre el nivel de seguridad y posibilidades de ocupación y uso de la escuela, en general, y de los edificios que integran el plantel, en particular, inmediatamente después de un sismo.
- Informar a la comunidad escolar (usuarios, directivos y padres de familia) sobre las acciones a ejecutar como resultado de la evaluación.
- Dar certeza a la población escolar sobre el destino y uso inmediato y mediano del plantel, ya sea que pueda continuar en uso o funcionar como albergue, o bien, que deba quedar cerrado, total o parcialmente, mientras se rehabilita o demuele.
- Informar a autoridades locales y federales en materia de infraestructura educativa sobre la severidad y extensión de los daños, con el fin de presupuestar y planear la consecución de recursos para la rehabilitación, o en su caso, la demolición y reconstrucción del edificio escolar.

La elaboración de la metodología es consistente con una de las funciones del INIFED, a saber: coordinar las actividades derivadas de la prevención y atención de daños causados en la infraestructura física educativa, ocasionados por desastres naturales, y proporcionar capacitación, consultoría y asistencia técnica.

Para el diseño de la metodología y la elaboración del material de apoyo correspondiente, el INIFED solicitó la colaboración del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) (Alcocer et al., 2020). Entre los documentos elaborados están:

- *Evaluación postsísmica de la infraestructura física educativa de México. Volumen 1: Metodología.*
- *Evaluación postsísmica de la infraestructura física educativa de México. Volumen 2: Introducción al comportamiento sísmico de estructuras para fines de evaluación* —este documento.
- *Evaluación postsísmica de la infraestructura física educativa. Manual de campo.*

Los documentos citados facilitarán la aplicación de la metodología de evaluación postsísmica de una manera uniforme e integral en las escuelas sujetas a peligro sísmico. Además, servirán de base técnica para la implantación de una estrategia nacional de incremento de la seguridad sísmica de las escuelas con visión preventiva y de largo aliento.



# Introducción

## 1.1 PROPÓSITO, ALCANCE Y LIMITACIONES

El propósito de *Evaluación postsísmica de la infraestructura física educativa de México. Volumen 2: Introducción al comportamiento sísmico de estructuras para fines de evaluación*, es servir de complemento a *Evaluación postsísmica de la infraestructura física educativa de México. Volumen 1: Metodología* (INIFED, 2020b), de la serie “Evaluación postsísmica de la infraestructura física educativa” del Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa, en Liquidación (INIFED).

En este documento se explican las propiedades de una estructura que son determinantes en su respuesta ante un sismo. Se ilustran las diferencias entre resistencia, rigidez, capacidad de deformación inelástica y amortiguamiento. Se discuten los

efectos adversos de malas prácticas de proyecto arquitectónico, diseño y construcción. Asimismo, se describen los principales impactos del deterioro de los materiales. Se presentan los modos de comportamiento y de falla más frecuentes en estructuras de mampostería, concreto y acero. Para cada material de construcción, se ilustran los principales modos de falla (o de comportamiento) con fotografías de daño observadas en campo o en laboratorio, o bien, por medio de dibujos. Con objeto de diferenciar las intensidades de daño, se presentan descripciones del deterioro de la estructura ante sismos y sus correspondientes efectos en la capacidad de resistencia, rigidez y deformación inelástica. Finalmente, se explican los conceptos básicos del desarrollo de fallas y peligros de origen geotécnico y geológico.

Con la lectura y estudio de este documento, se pretende que los inspectores de daños de los Niveles 1 (Evaluación Rápida, MER) y 2 (Evaluación Intermedia, MEI) tengan conocimientos uniformes, de modo que la inspección de un mismo edificio ejecutada por dos evaluadores, conduzca a resultados iguales, tanto en lo referente a la clasificación de la intensidad del daño, la determinación sobre su posible ocupación y uso (es decir, sobre el tipo de Aviso por colocar en la estructura), así como con respecto a la decisión sobre su reparación, reforzamiento/rigidización, o incluso su demolición y reemplazo.

Este documento es complementario también del Manual de campo y es útil como referencia para la aplicación de la metodología de evaluación para fines de rehabilitación de Nivel 3 (Evaluación Profunda) establecida en el documento *Rehabilitación sísmica de la infraestructura física educativa de México. Guía técnica* (INIFED, 2020a).

El contenido de este documento, en especial lo relacionado con modos de comportamiento, descripción del daño y factores reductivos propuestos para estimar la respuesta de una estructura dañada, es de aplicación para cualquier estructura dañada, sin importar su función o tipo de ocupación. Es

decir, es aplicable para edificios de uso escolar, habitacional o comercial, entre otros.

## 1.2 ¿A QUIÉN VA DIRIGIDO ESTE DOCUMENTO?

---

Este título introductorio fue desarrollado para que pueda ser comprendido y aplicado por inspectores de daños de escuelas con un nivel de preparación consistente con el requerido y establecido en *Evaluación postsísmica de la infraestructura física educativa de México. Volumen 1: Metodología*. Al igual que en la citada obra, en su contenido y presentación se incluyeron las opiniones de ingenieros y arquitectos de distintas entidades federativas que han participado en inspecciones de escuelas en el pasado. Para el desarrollo del documento se consultaron diversas referencias de México y Estados Unidos de América, principalmente.

También está dirigido a los proyectistas, directores responsables de obra y corresponsables en seguridad estructural que participen en la rehabilitación sísmica de inmuebles educativos y que utilicen el documento *Rehabilitación sísmica de la infraestructura física educativa de México. Guía técnica* (INIFED, 2020a).

Adicionalmente, como ha sido señalado, se puede utilizar para la evaluación de cualquier estructura, con o sin daño, sin importar su función o tipo de ocupación.

## 1.3 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

---

El contenido de esta obra está organizado en capítulos. La notación usada se presenta en el capítulo 2. En el apartado 3 se incluye una descripción de las propiedades de una estructura que determinan el desempeño del edificio ante un sismo. Las principales características del diseño

arquitectónico y estructural, y los rasgos constructivos más relevantes que afectan o impiden el desarrollo de la capacidad estructural de los componentes o de todo el edificio se discuten en el capítulo 4. En el 5 se explica el efecto del deterioro de los elementos estructurales en la respuesta sísmica. El comportamiento, los modos de falla (o de comportamiento), el daño observable según la intensidad del sismo, así como sus efectos en las capacidades de resistencia, de rigidez y de deformación de las estructuras de mampostería, concreto, acero y de marcos con muros diafragma se exponen en los capítulos 6 a 9, respectivamente. En el apartado 10 se describen las fallas y peligros de origen geotécnico y sus rasgos observables en el campo. En el apéndice A se incluyen consideraciones y recomendaciones para lograr una eficaz inspección en campo que permita entender los principales modos de comportamiento que rigen el desempeño de la estructura, así como los tipos e intensidad de daños causados por el sismo o por otras acciones (INIFED, 2020b).

## 1.4 UTILIZACIÓN DE LAS TABLAS 6.5 A 6.10 DE ESTE DOCUMENTO

---

Con el propósito de apoyar la aplicación de la Evaluación Intermedia (INIFED, 2020b) y la Evaluación Profunda (INIFED, 2020a), se incluyen las tablas 6.2, 6.4, 6.6, 7.2, 7.4, 7.6, 8.2 y 9.2, correspondientes a los sistemas estructurales y materiales constructivos más usuales en inmuebles educativos. Como se ha mencionado, estas tablas son aplicables también a edificios destinados para otros usos. En la tabla 1.1 se puede consultar el contenido tipo de dichas tablas. En la columna 1 se señala el tipo de componente del sistema estructural. Para cada material y sistema estructural (mampostería simple, confinada, y otros) se han identificado los principales componentes

estructurales. Así, para marcos de concreto reforzado, por ejemplo, se han identificado cinco tipos de componentes (véase tabla 7.1). En la columna 2 se identifica el modo de comportamiento observado en cada tipo de componente (por flexión, tensión diagonal pura, entre otros); en la columna 3 se incluye una descripción del modo de comportamiento a partir de la observación del daño; en la columna 4 se clasifica la intensidad del daño en cuatro categorías (nulo, ligero, moderado y severo); en la columna 5 se describe, para cada categoría, el daño característico en términos de ancho de grietas, posibles desconchamientos y/o pandeo del acero de refuerzo, y desplazamiento horizontal residual de la estructura o del entrepiso más deformado, entre otros. En la columna 6 se presentan valores del factor reductor  $\lambda$ . Se consideran tres factores  $\lambda$ , uno para rigidez lateral,  $\lambda_R$ , otro para resistencia lateral,  $\lambda_R$ , y el tercero referido a la capacidad de deformación lateral,  $\lambda_D$ . El objetivo de los factores  $\lambda$  es modificar la estimación de las propiedades nominales referidas, calculadas para estructuras sin daño (rigidez, resistencia y capacidad de deformación laterales) tomando en cuenta el nivel de daño en el elemento estructural. De esta forma, por ejemplo, la resistencia lateral de un elemento con daño moderado se calcularía multiplicando su resistencia nominal (sin daño y sin la aplicación del factor de resistencia) por el factor  $\lambda_R$  obtenido de alguna de las tablas señaladas con anterioridad (según su material y sistema constructivo), aplicable y correspondiente al nivel de daño moderado.

Las tablas 6.2, 6.4, 6.6, 7.2, 7.4, 7.6, 8.2 y 9.2 permiten:

- Mediante la observación del daño, clasificar su intensidad (o severidad) usando mediciones de ancho de grieta, de desplazamientos residuales y descripciones de daño.
- Estimar, según el tipo e intensidad del daño, la rigidez, resistencia y/o capacidad de deformación lateral remanentes de un componente y/o de la estructura en su conjunto.

Tabla 1.1 Tabla tipo de apoyo a la aplicación del MEI (INIFED, 2020b) y del MEP (INIFED, 2020a)

1 Componente	2 Modo de comportamiento	3 Descripción (a partir de observación)	4 Nivel de daño	5 Descripción del daño (uno o más elementos)	6 Factor reductivo $\lambda$		
					$\lambda_R$	$\lambda_{R'}$	$\lambda_D$
			Nulo	Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero				
			Moderado				
			Severo				

En la aplicación del MEI tras la ocurrencia de un sismo (o bien, para fines preventivos en una evaluación presísmica), así como del MEP, las tablas citadas:

- Facilitan la identificación y clasificación del daño del elemento estructural.
- Permiten seleccionar el factor reductivo  $\lambda$  por usar en la estimación de la seguridad estructural ante fuerzas laterales.

# Notación

- $DR$**  Desplazamiento residual de la estructura o del entrepiso más deformado, mm.
- $F_R$**  Fuerzas resistentes en la base de una cimentación, kg.
- $G$**  Ancho de una grieta perpendicular al eje, usualmente por flexión, mm.
- $GI$**  Ancho de una grieta inclinada, usualmente por tensión diagonal, mm.
- $H$**  Altura de un muro o columna, m.
- $L$**  Longitud de un muro o columna, m.
- $M$**  Momento flexionante, kg·m.
- $S_a$**  Aceleración espectral, m/s<sup>2</sup>.
- $t$**  Espesor de un muro, mm.
- $T$**  Periodo fundamental de vibración de un edificio, s.

- $V$  Fuerza cortante o fuerza cortante basal, kg.
- $\lambda$  Factor reductivo de la capacidad estructural que depende del nivel de daño del elemento estructural.
- $\lambda_D$  Factor reductivo de la capacidad de desplazamiento en función del nivel de daño en el elemento estructural.
- $\lambda_K$  Factor reductivo de la rigidez lateral que depende del nivel de daño en el elemento estructural.
- $\lambda_R$  Factor reductivo de la resistencia lateral en función del nivel de daño del elemento estructural.



## CAPÍTULO 3

# Propiedades generales de las estructuras

La respuesta de una estructura ante un sismo está controlada por su resistencia, rigidez, capacidad de deformación inelástica y amortiguamiento. Una estructura ideal poseería una combinación óptima de estas propiedades, sin embargo, es difícil lograrlo, aun en estructuras nuevas. Las edificaciones existentes, diseñadas arquitectónica y estructuralmente, y construidas bajo requisitos reglamentarios y normativos superados, a menudo exhiben desequilibrios e insuficiencias de una o más propiedades, lo que suele traducirse en un mal comportamiento, daños e, incluso, en colapsos parciales o totales.

Las propiedades mencionadas con anterioridad están interrelacionadas, de modo que la deficiencia de una de ellas conduce a la carencia o imperfección de las demás.

En este documento se usará el término “capacidad estructural” para englobar las propiedades anteriores. Así, a la “resistencia” se le podrá llamar “capacidad de resistir

cargas” y a la “deformabilidad” se le denominará como “capacidad de deformación inelástica”. En los documentos técnicos es frecuente la confusión entre “capacidad” y “resistencia”, siendo esta última un componente de la primera.

En la figura 3.1 se muestra una curva hipotética carga-desplazamiento lateral de una estructura. En ella se ilustran los conceptos que se describen a continuación.

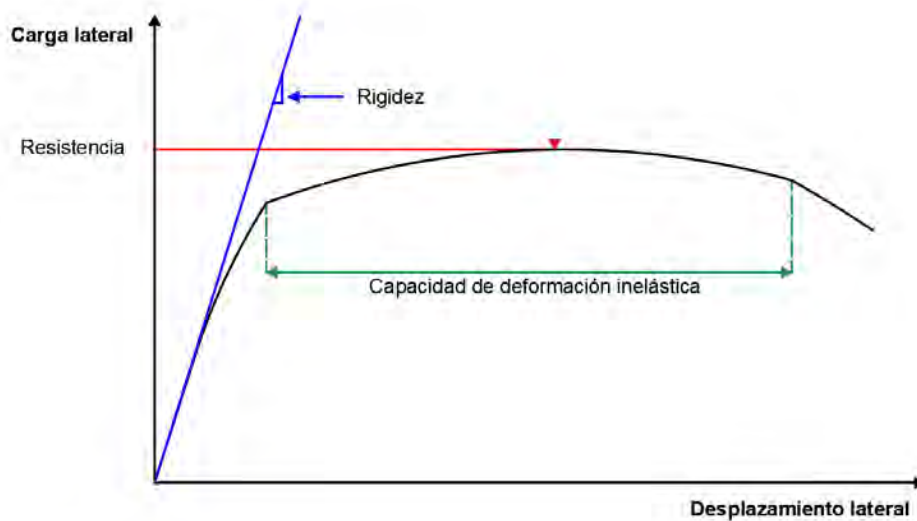


Figura 3.1 Propiedades de una estructura identificadas en una curva carga lateral-desplazamiento lateral. Fuente: elaboración propia.

### 3.1 RESISTENCIA

La propiedad más obvia de una estructura es la resistencia. En la figura 3.1 la resistencia está marcada por la línea de color rojo. Una estructura diseñada ante cargas gravitacionales y/o fuerzas inducidas por sismo usando reglamentos antiguos, frecuentemente tiene resistencias bajas en comparación con las requeridas por reglamentos de construcción más recientes. De igual forma, si la edificación se construyó con materiales de baja resistencia, la resistencia global de la estructura puede ser escasa. En general, una estructura con una misma configuración y geometría es más resistente si los materiales con los que fue construida también lo son.

### 3.2 RIGIDEZ

La rigidez es la propiedad de las estructuras de limitar sus deformaciones ante las cargas impuestas, sean gravitacionales o inducidas por el sismo. En la figura 3.1 dicho atributo se ilustra mediante la línea de color azul (en el intervalo elástico). La rigidez es especialmente importante para limitar los desplazamientos laterales producidos por el sismo. A mayor rigidez de la estructura, menores serán los desplazamientos laterales y, como se mencionará más adelante, menores serán los daños en los elementos estructurales.

Adicionalmente, es un factor que determina el nivel de fuerzas de diseño por sismo, ya que de la



rigidez y de la masa depende el valor del periodo fundamental de vibración del edificio. Según el valor del periodo fundamental de vibración y su ubicación en el espectro de diseño, la demanda sísmica será menor o mayor. En la figura 3.2 se muestra el efecto del periodo fundamental de vibración de una estructura,  $T$ , en el valor de pseudoaceleraciones,  $S_a$ , obtenidas de un espectro de diseño hipotético. Un espectro es una gráfica (función) que relaciona el periodo fundamental de un sistema (edificio, puente, por ejemplo) con la respuesta máxima a la que puede ser sujeta. Si el espectro es de aceleración (como los espectros de los reglamentos de construcción), la respuesta estará dada en unidades de aceleración (como el de la figura 3.2). Con este valor, multiplicado por la masa del sistema, se obtiene la fuerza cortante basal (o fuerza lateral total) que debe resistir un edificio. En dicha figura se aprecia la diferencia de la magnitud de valores de  $S_a$  obtenidos para distintos periodos del edificio. Un periodo corto usualmente se refiere a un edificio rígido y de baja altura; un periodo alto está asociado a edificios flexibles y frecuentemente de muchos pisos.

El periodo fundamental de vibración de un edificio (incluida la estructura, cimentación y suelo) depende también del tipo de suelo y de la flexibilidad relativa de la cimentación. Así, un mismo edificio construido en suelos blandos tendrá un mayor periodo de vibración, medido en segundos, que otro localizado sobre suelo firme o roca. La respuesta de un edificio depende de la relación entre el periodo fundamental del edificio y el periodo característico del suelo de desplante. Cuando este cociente es igual o cercano a 1.0, la respuesta aumenta de manera muy significativa. De ahí que una consideración para un buen comportamiento es que los periodos fundamentales de la estructura y del suelo estén alejados.

Por otro lado, la transmisión de cargas y fuerzas inducidas por el sismo entre los elementos de una estructura depende de la rigidez relativa de éstos. Así, en una estructura a base de muros y columnas, la fuerza lateral que deba resistir el muro será mayor que la de una columna. En la figura 3.3 se muestra un edificio a base de muros y columnas en el que se aprecia, de manera esquemática, cómo los elementos más rígidos (los muros) deben resistir mayor carga lateral que las columnas.

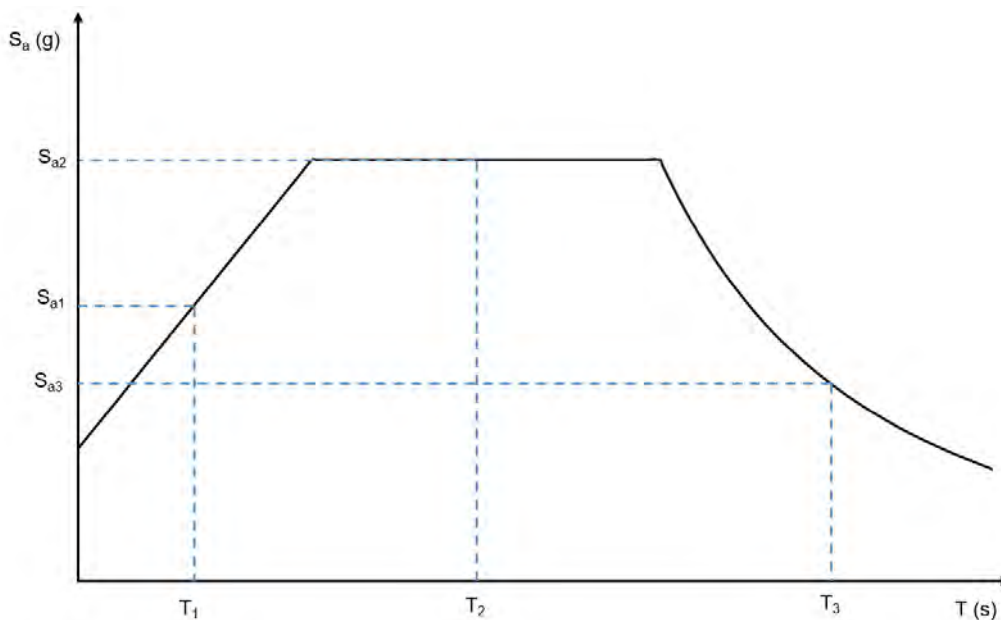


Figura 3.2 Efecto del periodo fundamental de vibración de un edificio,  $T$ , en la demanda de aceleración de diseño,  $S_a$ , observado en un espectro de diseño hipotético. Fuente: elaboración propia.

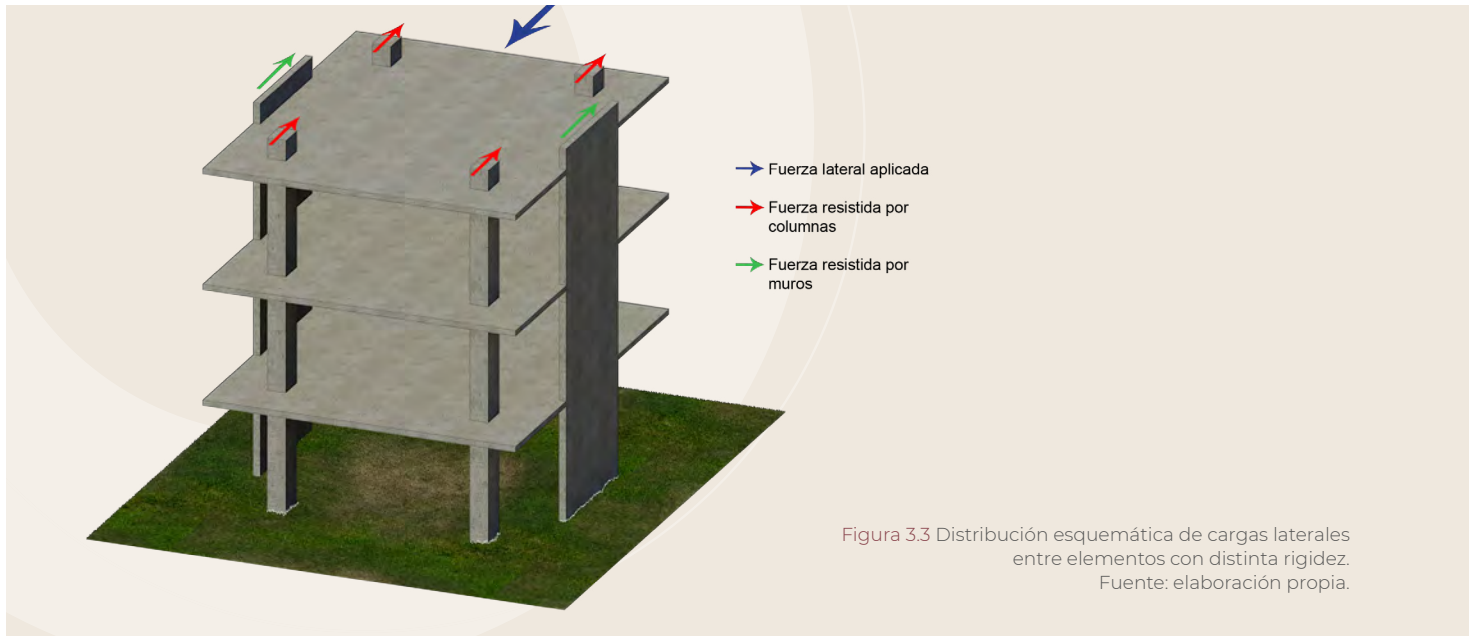


Figura 3.3 Distribución esquemática de cargas laterales entre elementos con distinta rigidez.  
Fuente: elaboración propia.

### 3.3 CAPACIDAD DE DEFORMACIÓN INELÁSTICA

La capacidad de deformación inelástica, señalada en verde en la figura 3.1, es la propiedad de un elemento o de la estructura en su conjunto para deformarse lateralmente más allá del límite elástico sin una caída significativa de su capacidad resistente. En este documento se usa como sinónimo de “capacidad de desplazamiento” o “deformabilidad”.

Algunos materiales, como el acero, tienen un comportamiento dúctil, lo que les permite deformarse ante los ciclos que produce un sismo sin un deterioro apreciable en su capacidad resistente. En contraste, tenemos a la mampostería, natural o industrializada, que tiene un comportamiento frágil, tal que al alcanzar su resistencia agota su capacidad de deformación inelástica dada la caída abrupta de la capacidad de resistir cargas.

La capacidad de deformación inelástica de un edificio depende, además del material con el que está construido, del detallado. Si las estructuras, aun siendo de acero, no están detalladas para

resistir desplazamientos laterales o distorsiones significativas como las inducidas por un sismo, sufrirán degradaciones de resistencia y rigidez que conducirán a un mal desempeño y daños.

El detallado se refiere, por ejemplo, a la cuantía de estribos (diámetro, número de estribos y separación) en una columna de concreto. A cuantía más altas, mayor será el confinamiento del acero en el concreto y, por tanto, mejor será la capacidad de deformación inelástica. Los edificios existentes diseñados en México antes de 1985 carecen, en general, de un detallado que les permita deformaciones inelásticas significativas. En los capítulos 6 a 9 se presentan los modos de comportamiento más comunes en elementos estructurales de mampostería, concreto, acero y marcos con muros diafragma, respectivamente. Ahí se podrá apreciar el efecto del detallado en el comportamiento sísmico de una estructura.

### 3.4 AMORTIGUAMIENTO

Durante un sismo, el edificio generalmente amplificará el movimiento aplicado en su base. Esta

amplificación incluye, además, la ocasionada por el tipo de suelo en que se encuentre desplantado el edificio. La magnitud de la amplificación del movimiento de la base por la estructura está limitada por el amortiguamiento estructural, que es la propiedad para disipar la energía introducida por el movimiento sísmico. En la figura 3.4 se

ilustra una curva de amplificación del movimiento para distintos niveles de amortiguamiento (en forma de un espectro). Conforme aumenta el amortiguamiento, disminuye la respuesta del edificio. Normalmente, las estructuras de concreto y mampostería tienen mayor amortiguamiento que una de acero.

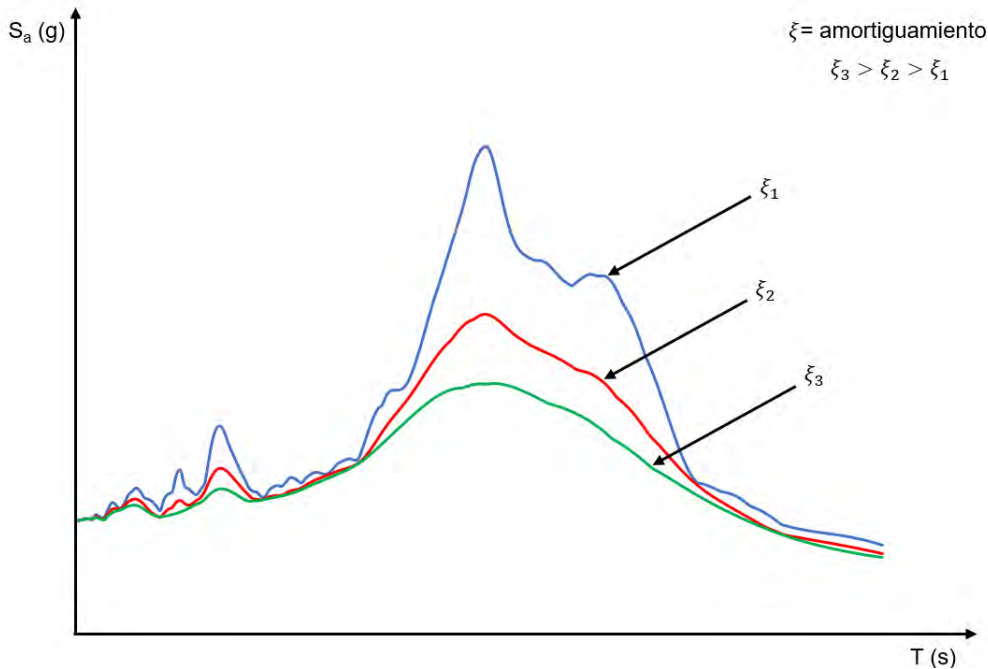


Figura 3.4 Curva de amplificación del movimiento de un sismo para distintos niveles de amortiguamiento de la estructura. Fuente: elaboración propia.

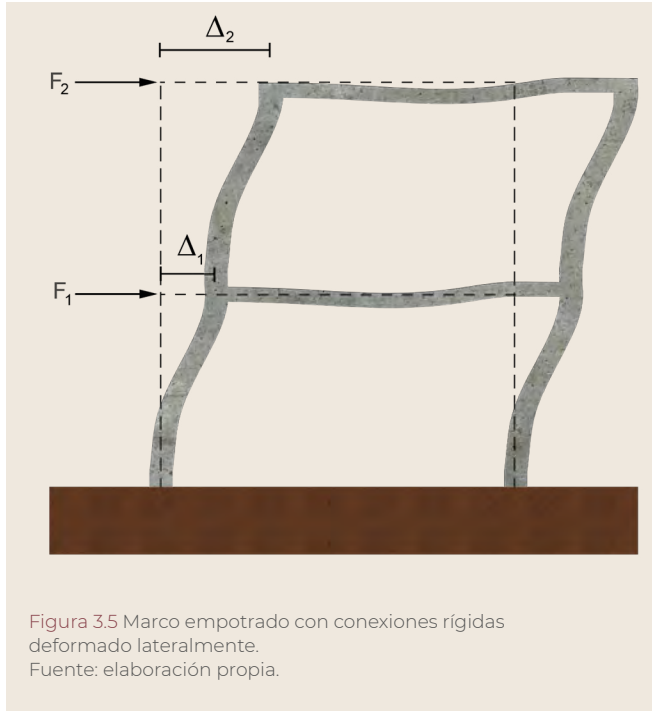
### 3.5 REPASO SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE MARCOS Y MUROS ANTE FUERZAS LATERALES

En esta sección se presenta un breve recordatorio sobre cómo resisten las fuerzas laterales los edificios a base de marcos, muros y de marcos con muros diafragma. En la referencia Meli (2001) se puede abundar sobre el tema.

Ante fuerzas laterales como las inducidas por un sismo, los elementos (columnas y vigas) de

una estructura a base de marcos resistentes a momento se deforman esencialmente por flexión. Dependiendo de sus condiciones de borde (empotramiento o articulación), las vigas y columnas se pueden deformar en curvatura doble o sencilla. Debido a que las dimensiones de la sección transversal de las columnas y vigas con respecto a su altura y longitud, respectivamente, son pequeñas, por lo general se desprecian las deformaciones por fuerza cortante. Las deformaciones debidas a carga axial son relevantes cuando el edificio es muy alto y/o las cargas axiales en las columnas son de magnitud significativa. En la figura 3.5 se ilustra un marco empotrado y

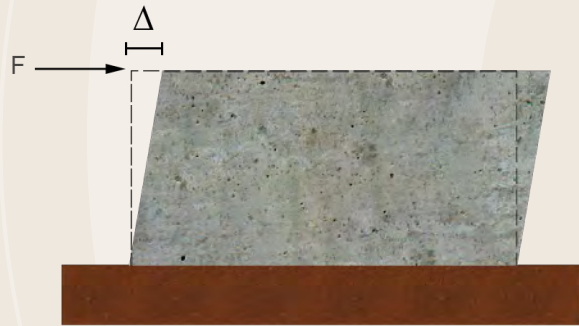
con conexiones rígidas deformado lateralmente. En el dibujo, el marco está representado por los ejes longitudinales de columnas y vigas.



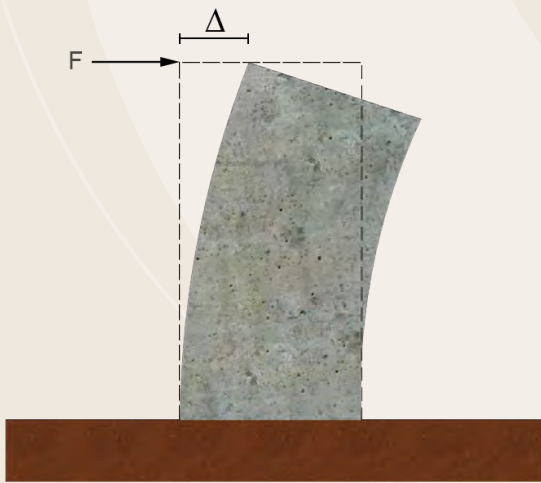
En los edificios con muros, las cargas gravitacionales y las fuerzas laterales son resistidas por esos elementos. Los muros resisten las fuerzas laterales mediante una combinación de deformaciones de cortante y flexión que se superponen a las causadas por las cargas gravitacionales. La relevancia de estos tipos de deformación depende de diversos factores (relación entre momento y fuerza cortante aplicados y esbeltez del muro, entre otros); en la práctica, se acepta usar el parámetro altura/longitud del muro para distinguir entre ellas. Si el muro es robusto, es decir, tiene una relación altura/longitud baja (menor que 1.5), se supone que el comportamiento estará controlado por fuerza cortante y, por ello, las principales deformaciones serán de cortante. Si

la relación altura/longitud es mayor que 2.0 (en los llamados muros esbeltos), las deformaciones por flexión predominan sobre las de cortante, de modo que conforme aumente la relación, se promueve un mecanismo resistente controlado por la flexión del muro. En la figura 3.6a se muestra un muro robusto deformado lateralmente, en el cual se han exagerado las deformaciones por cortante para hacer más explícito su comportamiento. En la figura 3.6b se puede observar un muro esbelto aislado, o en voladizo. En la figura 3.6c se puede observar la deformación lateral de un sistema de marcos y muros. En estos casos, la respuesta del sistema estructural depende de la interacción entre marcos y muros. En los primeros pisos, los muros contribuyen a rigidizar a los marcos, de modo de disminuir los desplazamientos laterales. En los últimos pisos, en especial en edificios altos, los muros tienden a recargarse en los marcos. La interacción descrita tiene implicaciones en el diseño de los elementos estructurales y requiere ser evaluada con cuidado como parte de la fase de análisis estructural.

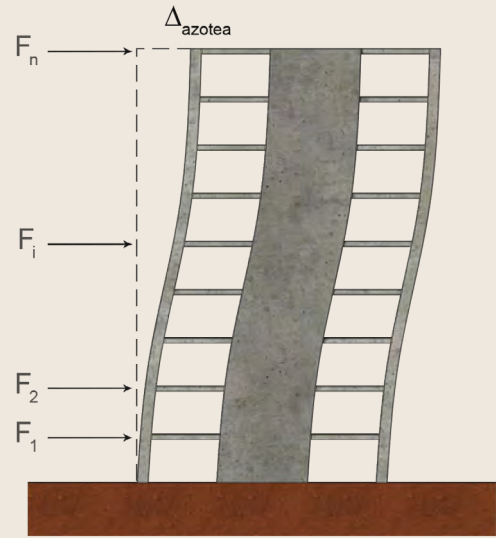
A diferencia de los muros de carga ya descritos que se construyen simultáneamente con los sistemas de piso, los muros diafragma se instalan después que los marcos, de acero o de concreto, se han construido. Esta diferencia explica el comportamiento distinto que se observa en estos sistemas estructurales con respecto a edificios con marcos y muros construidos monolíticamente. Como se ilustra en la figura 3.7, mientras que el marco se deforma por flexión, el muro diafragma se deforma por cortante obligado por el contacto e interacción del muro con el marco en esquinas opuestas. Esta interacción explica por qué uno de los modos de falla observados es por aplastamiento en el marco o en las esquinas del muro de mampostería.



a) Muro robusto



b) Muro esbelto



c) Sistema marco-muro

Figura 3.6 Deformación lateral de a) muro robusto, b) muro esbelto y c) sistema marco-muro.  
 Fuente: elaboración propia.

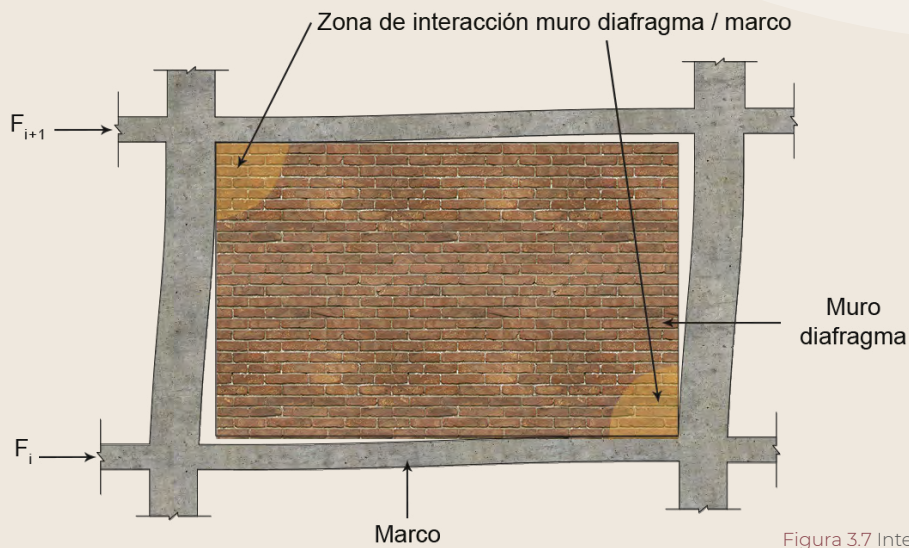


Figura 3.7 Interacción del muro diafragma con el marco.  
 Fuente: elaboración propia.



# Características adversas de diseño arquitectónico y estructural, y de construcción

En las secciones 4.1 a 4.5 se describen las principales características del diseño arquitectónico y estructural, y los rasgos constructivos más relevantes que afectan o impiden el desarrollo de la capacidad estructural de los componentes o de todo el edificio.

### 4.1 FALTA DE UN MECANISMO DE TRANSMISIÓN DE CARGAS DIRECTO

---

Uno de los requisitos esenciales para lograr un desempeño sísmico adecuado es que el edificio cuente con un mecanismo de transmisión de cargas directo. Ello

implica que exista un sistema resistente a cargas gravitacionales y a fuerzas laterales que forme un mecanismo de transmisión de cargas directo entre la cimentación, los elementos verticales (muros, columnas) y los diafragmas de piso, además de que conecte o integre las partes del edificio. Este mecanismo y la trayectoria de cargas que se desarrolla a través de él debe ser completo y suficientemente resistente. En general, una trayectoria de fuerzas generadas por un sismo es como sigue:

- Las fuerzas de inercia, producto de las aceleraciones y las masas de los distintos pisos del edificio, se generan a nivel de los diafragmas horizontales.

- Los diafragmas distribuyen las fuerzas entre los componentes verticales del sistema resistente a fuerzas laterales, tales como muros y marcos.
- Los elementos verticales transmiten las fuerzas a la cimentación.
- La cimentación transmite las fuerzas al suelo.

El mecanismo de transmisión de cargas comprende elementos en y entre los siguientes subsistemas: elementos verticales, diafragmas y cimentación. En la figura 4.1 se muestran dos ejemplos de edificios, uno con un mecanismo de transmisión de cargas completo y resistente (tomado de la figura 3.3) y otro deficiente.

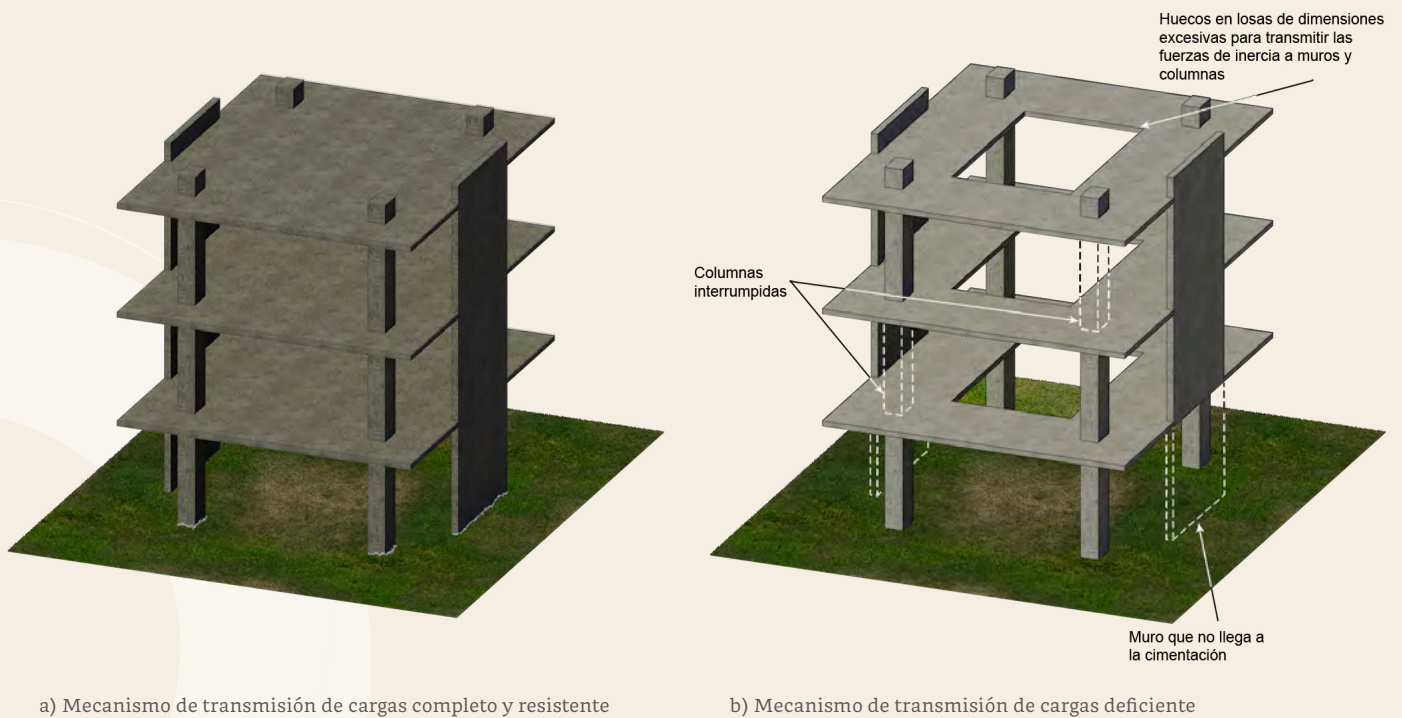


Figura 4.1 Ejemplos de edificios con mecanismos de transmisión de cargas: a) completo y resistente, b) deficiente. Fuente: elaboración propia.



## 4.2 IRREGULARIDADES

---

La mayor parte de los reglamentos de construcción establece niveles de fuerzas de diseño por sismo (demandas sísmicas) menores que las que ocurrirían en una estructura que se comportara elásticamente ante sismos intensos. La base de este criterio de diseño es suponer que la estructura desarrollará un comportamiento inelástico controlado (gracias a la ductilidad y amortiguamiento), tal que se proteja la vida sin que se alcance el colapso del edificio. En la figura 3.1 la zona marcada con verde se refiere al comportamiento inelástico de una estructura.

Si bien este método de diseño es una aproximación de la realidad, presume que la estructura es regular y sensiblemente simétrica, de modo que no existan concentraciones de fuerzas y/o deformaciones en el edificio. La existencia de irregularidades en elevación o en planta puede resultar en fuerzas y desplazamientos muy distintos en magnitud y sentido a los supuestos en diseño. A pesar de que irregularidades menores no tienen un efecto apreciable en la respuesta, las de grado significativo pueden impactar de forma negativa la capacidad estructural y facilitar la aparición de daños e, incluso, el colapso ante fuerzas laterales inducidas por sismo.

### 4.2.1 Irregularidades verticales o en elevación

Existen varios tipos de irregularidades en elevación que pueden afectar el desempeño de la estructura. En la figura 4.2 se muestran varios ejemplos de irregularidades en elevación, a saber:

- Irregularidades de rigidez, cuando uno o más pisos presentan mayor flexibilidad que los pisos ubicados directamente arriba o abajo. Estos pisos más flexibles estarán sujetos a mayores deformaciones (figuras 4.2.a a 4.2.d, 4.2.j).
- Irregularidades de masa o peso, cuando la masa efectiva (o el peso entre la aceleración de la gravedad) en un piso es significativamente mayor que la masa efectiva del piso adyacente (figura 4.2.k).
- Irregularidad de geometría, cuando se tienen recesos o discontinuidades en elevación, como cuando la parte superior del edificio tiene una significativa menor dimensión en planta que la parte inferior (figura 4.2.l).
- Discontinuidad en la resistencia, cuando la resistencia a fuerza cortante de un entrepiso es significativamente menor que la del entrepiso superior o inferior. La resistencia a fuerza cortante de entrepiso se define como la suma de las contribuciones a la resistencia de todos los elementos resistentes en la dirección considerada (figuras 4.2.a a 4.2.e, 4.2.j).
- Discontinuidad en el mecanismo de transmisión de carga, cuando los elementos resistentes a fuerzas laterales (marcos a momento, muros, marcos con contraventeos) no son continuos de un piso a otro (figura 4.2.e a 4.2.i).

Las irregularidades en elevación a menudo exhiben deficiencias en la resistencia a fuerza cortante de diafragmas. Así, un diafragma en la base de un muro discontinuo en los pisos inferiores debe ser capaz de transmitir las fuerzas cortantes acumuladas en el muro provenientes de los niveles superiores al de la discontinuidad.

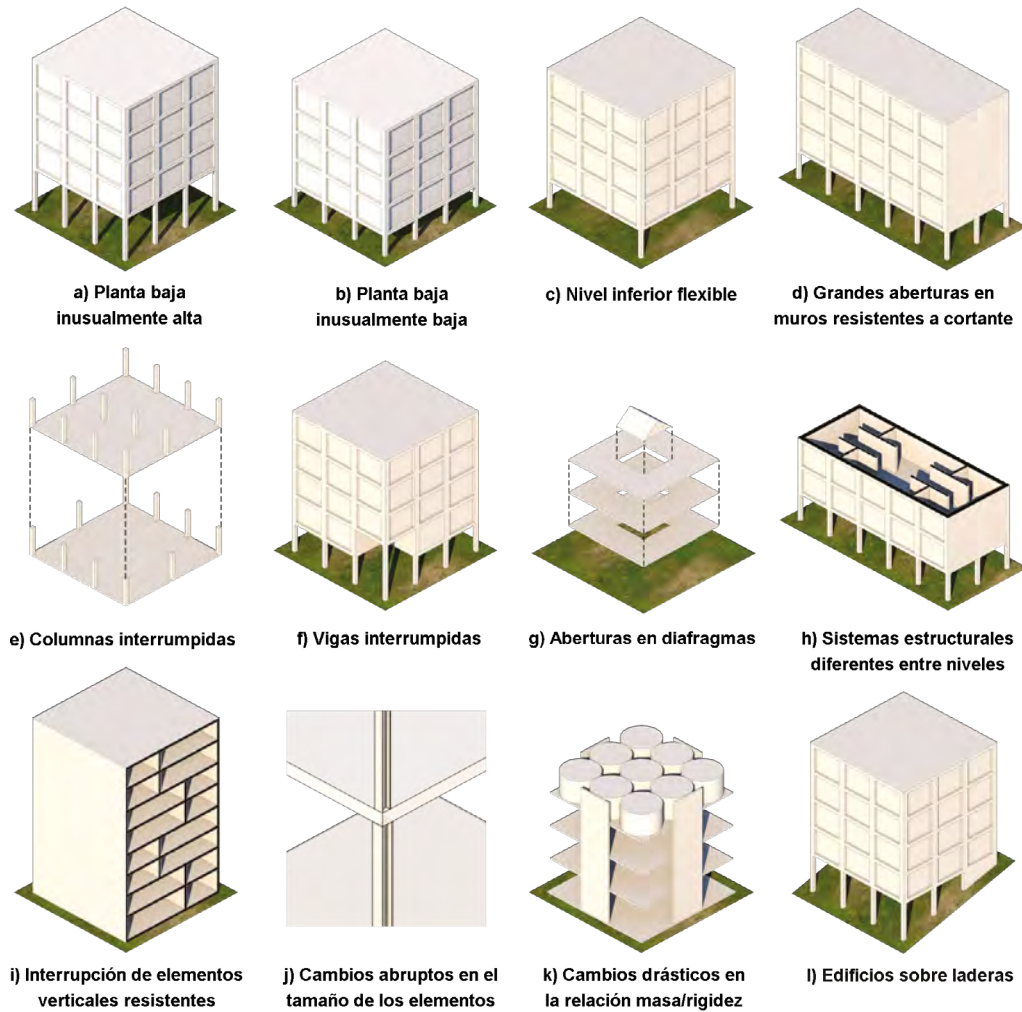


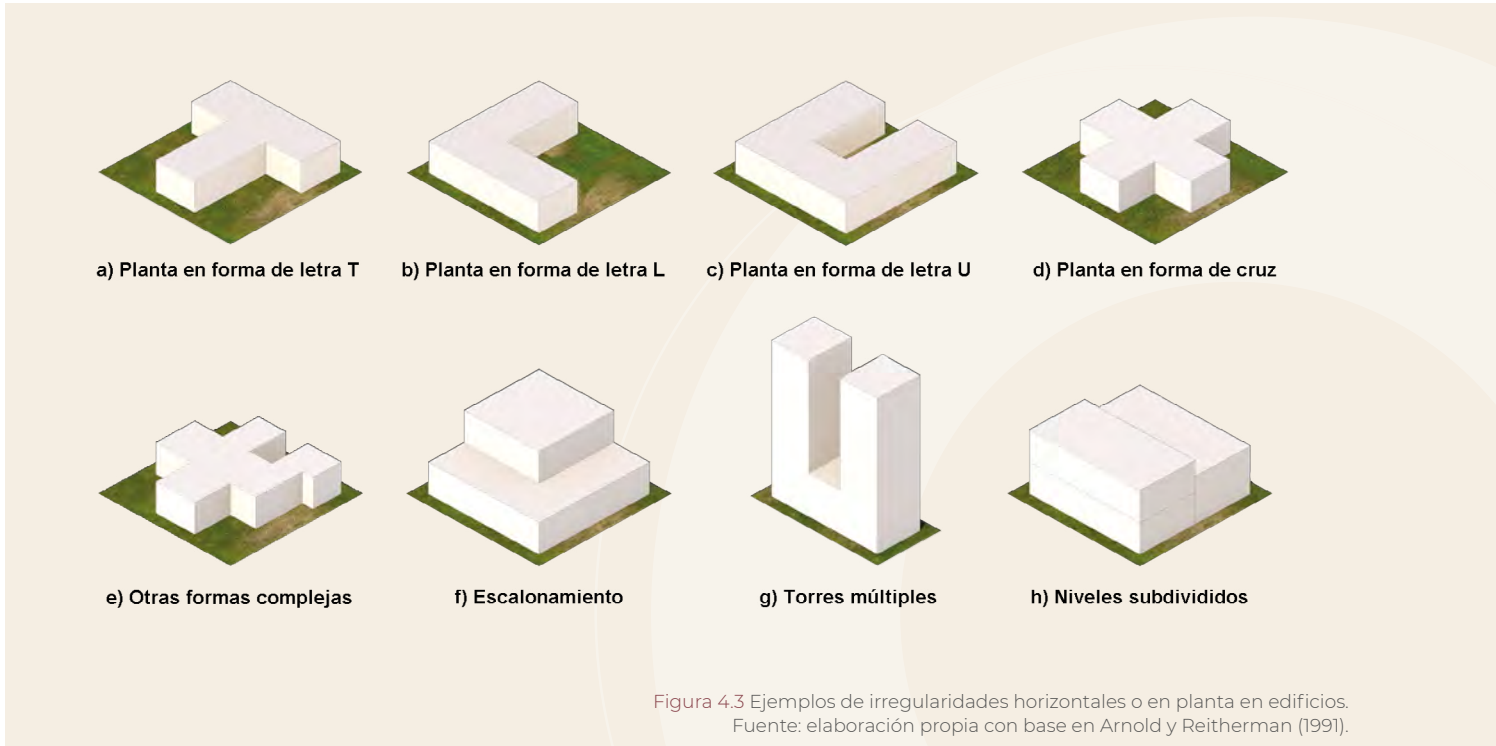
Figura 4.2 Ejemplos de irregularidades verticales o en elevación en edificios.  
Fuente: elaboración propia con base en Arnold y Reitherman (1991).

## 4.2.2 Irregularidades horizontales o en planta

Las irregularidades en planta que pueden afectar la capacidad sísmica de la estructura se describen en seguida y se ilustran en la figura 4.3.

- Irregularidad en planta que puede generar torsión, cuando en estructuras con diafragmas rígidos, el centro de masa en un piso es excéntrico con respecto al centro de rigidez de los elementos verticales resistentes a cargas laterales (figuras 4.3.a a 4.3.e y 4.3.g).
- Esquinas re-entrantes en la planta de los edificios que causan esfuerzos cortantes excesivos en las esquinas (figura 4.3.f, 4.3.h).

- Discontinuidad del diafragma, cuando éste tiene variaciones abruptas en su rigidez. Tal es el caso de diafragmas interrumpidos por cambios de niveles, como en construcciones a base de medios niveles. También ocurre cuando los diafragmas tienen grandes huecos entre un piso y otro (figura 4.2.g, 4.3.g).
- Sistemas no paralelos, cuando los sistemas verticales resistentes a fuerzas laterales no son paralelos entre sí, o bien, no son simétricos con respecto a los ejes ortogonales del sistema completo resistente a fuerzas laterales.



### 4.3 FALTA DE REDUNDANCIA

Se entiende por estructuras redundantes aquellas que exhiben múltiples mecanismos o trayectorias de transmisión de carga. En una estructura redundante sometida a sismo, las fuerzas transitorias que producen sobrecargas en algunos elementos o en conexiones se pueden redistribuir mediante trayectorias o mecanismos alternos. La idoneidad del comportamiento de una estructura poco redundante depende de un comportamiento no lineal de los elementos resistentes muy cuidadosamente estudiado. En la figura 4.4 se muestran ejemplos de estructuras con distintos niveles de redundancia. Una estructura cuyo sistema resistente a fuerzas laterales se limita a algunos elementos (como las columnas en un péndulo invertido) o pocos componentes (como en edificios con marcos planos resistentes a sismo solamente en la fachada) es menos redundante y, por ende, más susceptible de experimentar daño que otra con marcos tridimensionales resistentes a sismo.



Figura 4.4 Ejemplos de estructuras con distintos niveles de redundancia: a) edificio a base de marcos de concreto; b) estructura en forma de péndulo invertido.  
 Fuente: archivo personal de Sergio Alcocer (2019) y cortesía del INIFED (2019).

### 4.4 FALTA DE CAPACIDAD DE DEFORMACIÓN INELÁSTICA

Para que una estructura tenga una adecuada capacidad de deformación inelástica se deben diseñar y detallar los elementos estructurales

y sus conexiones. Por ejemplo, una conexión viga-columna de concreto, sin estribos, tendrá una capacidad de deformación muy inferior a otra con estribos que confinen el concreto dentro del nudo. Para ilustrar el concepto de capacidad de deformación inelástica, en la figura 4.5 se muestran fotografías de una estructura de adobe (figura 4.5.a) y de una de acero (figura 4.5.b). La primera tiene una mucho menor capacidad de deformación inelástica de modo que, ante las demandas laterales de desplazamientos sísmicos, la estructura exhibe daños y puede colapsar. En contraste, una estructura de acero (o de concreto o mampostería confinada, por ejemplo) bien diseñada, detallada y construida tiene una suficiente capacidad de desplazamiento que le permite resistir las demandas sísmicas impuestas con daños menores (o sin daño), pero sin colapsar. Para lograr una adecuada capacidad de desplazamiento, las estructuras deben estar

hechas de materiales que tengan esa característica, y que sus elementos y conexiones estén debidamente diseñados y detallados para deformarse sin fallar.

## 4.5 EDIFICIOS ADYACENTES

Cuando la junta (separación) entre edificios adyacentes es insuficiente para que ocurran los desplazamientos laterales de ambos de manera simultánea, se puede producir daño estructural debido al golpeteo cuando colisionen. Esta condición es particularmente severa cuando los niveles de las losas de los dos edificios no coinciden y el sistema de piso de uno impacta a las columnas o muros del vecino. En la figura 4.6 se muestran ejemplos de estructuras dañadas por el golpeteo con estructuras adyacentes.



a)



b)

Figura 4.5 Ejemplos de estructuras con diferentes capacidades de deformación inelástica: a) escuela de adobe severamente dañada; b) edificio escolar de acero. Fuente: cortesía del INIFED (2019).



Figura 4.6 Ejemplos de golpeteo entre estructuras adyacentes durante los sismos de 2017 y 1985 en la Ciudad de México. Fuente: cortesía de Oriol Arnau (2017) y archivo personal de Sergio Alcocer (1985).



## CAPÍTULO 5

# Deterioro de los elementos estructurales y su efecto en la respuesta ante sismo

### 5.1 PROBLEMA

---

El deterioro en los materiales de una estructura puede afectar negativamente el desempeño del edificio durante sismos intensos (FEMA 172, 1992). Por lo general, el deterioro se debe a la combinación de una mala calidad de la construcción (baja calidad de los materiales y/o procesos constructivos ejecutados deficientemente) y de un mantenimiento inadecuado. A continuación, se describen los problemas más comunes asociados al deterioro.

## 5.2 MAMPOSTERÍA

### 5.2.1 Adobe

Los elementos más débiles en estructuras de adobe son el mortero de lodo y los adobes mismos, en especial si no están recubiertos con alguna capa de yeso o mortero. Es frecuente que los adobes expuestos al exterior pierdan paulatinamente sus dimensiones debido a la humedad y al viento (figura 5.1). Esta reducción en la sección transversal del muro reduce la capacidad resistente de la estructura.



Figura 5.1 Deterioro de muros de adobe.  
Fuente: archivo personal de Sergio Alcocer (1999).

### 5.2.2 Mampostería simple de ladrillos o bloques artesanales o industriales

La mampostería simple es aquella que carece totalmente de acero de refuerzo en el perímetro o en su interior. Por tanto, su capacidad estructural depende de la resistencia a tensión de la mampostería, la cual usualmente es muy baja. En el caso de mampostería simple, con ladrillos o bloques de fabricación artesanal o industrial, el elemento más débil es la junta de mortero, en especial si el mortero es de cal y ésta ha eflorecido debido a su exposición al medio ambiente. Las grietas en los muros se presentarán siguiendo las juntas de mortero; en ocasiones, podrán atravesar las piezas si el mortero es de mayor resistencia. En la figura 5.2 se presenta un muro de mampostería simple agrietado y con humedades.



Figura 5.2 Deterioro de una estructura de mampostería simple.  
Fuente: cortesía del CENAPRED (2020b).

## 5.3 CONCRETO

### 5.3.1 Concreto simple

El concreto simple puede ser sujeto de agrietamiento, desconchamiento y desintegración. El agrietamiento se puede deber a una excesiva contracción por secado del concreto durante su curado, o bien, a asentamientos diferenciales de la cimentación. El desconchamiento puede ser causado por el uso de agregados reactivos. La desintegración es producto de utilizar agregados sucios o contaminados, cemento viejo o defectuoso, o agua contaminada, como es el caso de agua con altos contenidos de sales (agua de mar, por ejemplo) o minerales.

### 5.3.2 Concreto reforzado, mampostería confinada, mampostería reforzada interiormente

El concreto reforzado y la mampostería confinada o reforzada interiormente se pueden deteriorar y dañar como el concreto simple y la mampostería simple (figura 5.3). Adicionalmente, concretos

o mamposterías deficientes, con recubrimientos escasos o agrietados, facilitan la penetración de humedad y oxígeno en el acero de refuerzo, lo que da inicio a la corrosión. Grietas mayores que 0.4 mm en condiciones secas, 0.3 mm en contacto con humedad, o 0.15 mm en contacto con agua y brisa de mar facilitan la corrosión (ACI 224R, 2001).

La naturaleza expansiva de los productos de la corrosión produce un mayor agrietamiento del concreto o la mampostería, lo que extiende y acelera el proceso de corrosión. La corrosión avanzada se manifiesta, además, por la reducción de la sección transversal (área) de las barras de refuerzo, lo que disminuye la resistencia del elemento.



Figura 5.3 Deterioro de estructuras de concreto reforzado y de mampostería confinada. Fuente: cortesía del INIFED (2019).

## 5.4 ACERO ESTRUCTURAL

La humedad que genera la lluvia o por producto de la condensación puede provocar la corrosión y la subsecuente pérdida de sección de un elemento de acero estructural. Ello es característico de elementos con un detallado deficiente y/o mal mantenimiento. Es frecuente que la corrosión se

observe en las conexiones entre elementos, como en la unión viga-columna. Incluso si los elementos estructurales están bien diseñados, pero no reciben un mantenimiento adecuado al estar expuestos al exterior, mediante capas de pintura o de material de protección contra la corrosión, pueden reducir su capacidad de carga. En la figura 5.4 se ilustran ejemplos de deterioro de estructuras de acero.



Figura 5.4 Deterioro de estructuras de acero estructural. Fuente: cortesía del INIFED (2019).





# Comportamiento de estructuras de mampostería

## 6.1 INTRODUCCIÓN

---

### 6.1.1 Muros

La capacidad sísmica de una estructura de mampostería depende fundamentalmente de los muros. La construcción de los muros de mampostería varía según el material y el sistema para transmitir cargas verticales. En el libro de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural (SMIE, 2019) se puede profundizar en el conocimiento de estructuras de mampostería. El comportamiento y las características del daño en muros (de mampostería o de concreto) durante un sismo son función de las dimensiones físicas

y la configuración de los muros, incluyendo sus aberturas y perforaciones. Se entiende por perforaciones a las aberturas pequeñas en relación con las dimensiones del muro (alto y largo).

Existen dos sistemas básicos para transmitir las cargas gravitacionales del techo y pisos a la cimentación: muros de carga y muros diafragma.

- Los muros de carga resisten una parte de la carga vertical, además de su propio peso. En algunos edificios, adicional a muros de carga, se usan marcos, columnas o losas para resistir una porción de la carga vertical. Los muros pueden ser de mampostería simple (incluido el adobe), mampostería confinada o mampostería reforzada interiormente.
- Los muros diafragma son muros de mampostería construidos dentro de un marco a base de columnas y vigas. Los muros diafragma resisten su propio peso, ya que la carga vertical de la estructura es soportada por las vigas y columnas. El muro diafragma puede ser de mampostería simple, confinada o reforzada interiormente. Los muros diafragma se construyen en contacto con el marco para poder contribuir de manera efectiva a la rigidez y resistencia laterales del edificio. Si no están en contacto, se les considera muros divisorios, los cuales son elementos no estructurales. Debido al uso tan extendido de marcos con muros diafragma, los componentes y modos de comportamiento de marcos de concreto y de acero con muros diafragma se tratan en el capítulo 9.

Vistos en elevación, los muros (de carga o diafragma), de mampostería o de concreto, se pueden clasificar en tres categorías (figura 6.1) (FEMA 306, 1998):

1. Muros en voladizo, los cuales no tienen aberturas o perforaciones.
2. Muros acoplados, con un patrón regular de aberturas que forman segmentos de muros verticales y vigas de acoplamiento horizontales. Su comportamiento depende de la rigidez y resistencia relativas entre los muros y vigas de acoplamiento. Las resistencias relativas

que definen el comportamiento son a flexión y a tensión diagonal.

3. Muros perforados, en los cuales el patrón de aberturas es irregular. Si la suma de las áreas de las perforaciones es baja en relación con el área del muro, el comportamiento será parecido al de un muro en voladizo.

En planta, los muros pueden tener configuraciones en forma de letras L, T, C o similares.

La respuesta sísmica de estructuras a base de muros depende, en buena medida, de su distribución en planta, ya que si no es sensiblemente simétrica puede producir concentraciones de fuerzas y desplazamientos producto de la torsión (véase inciso 4.2.2).

El comportamiento de los muros se ve afectado por la flexibilidad y deformabilidad de la cimentación. Dependiendo del nivel de flexibilidad de la cimentación, la magnitud de las fuerzas laterales inducidas por el sismo que deben resistir los muros pueden ser mayores o menores que si la flexibilidad es muy baja.

### 6.1.2 Sistemas de piso y techo

Los sistemas de piso y techo tienen una doble función. Por un lado, transfieren las cargas gravitacionales a los muros. Por otro, durante un sismo, trabajan como diafragmas distribuyendo las fuerzas laterales inducidas entre los muros. Los sistemas de piso y techo pueden ser de concreto (losas macizas o losas prefabricadas) o de madera (ya sean horizontales o inclinados).

## 6.2 ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA SIMPLE

Las estructuras de mampostería simple son la modalidad más susceptible de dañarse ante sismos. Se caracterizan por no tener ningún tipo de acero de refuerzo en el interior o exterior del muro. En esta modalidad se incluyen las construidas

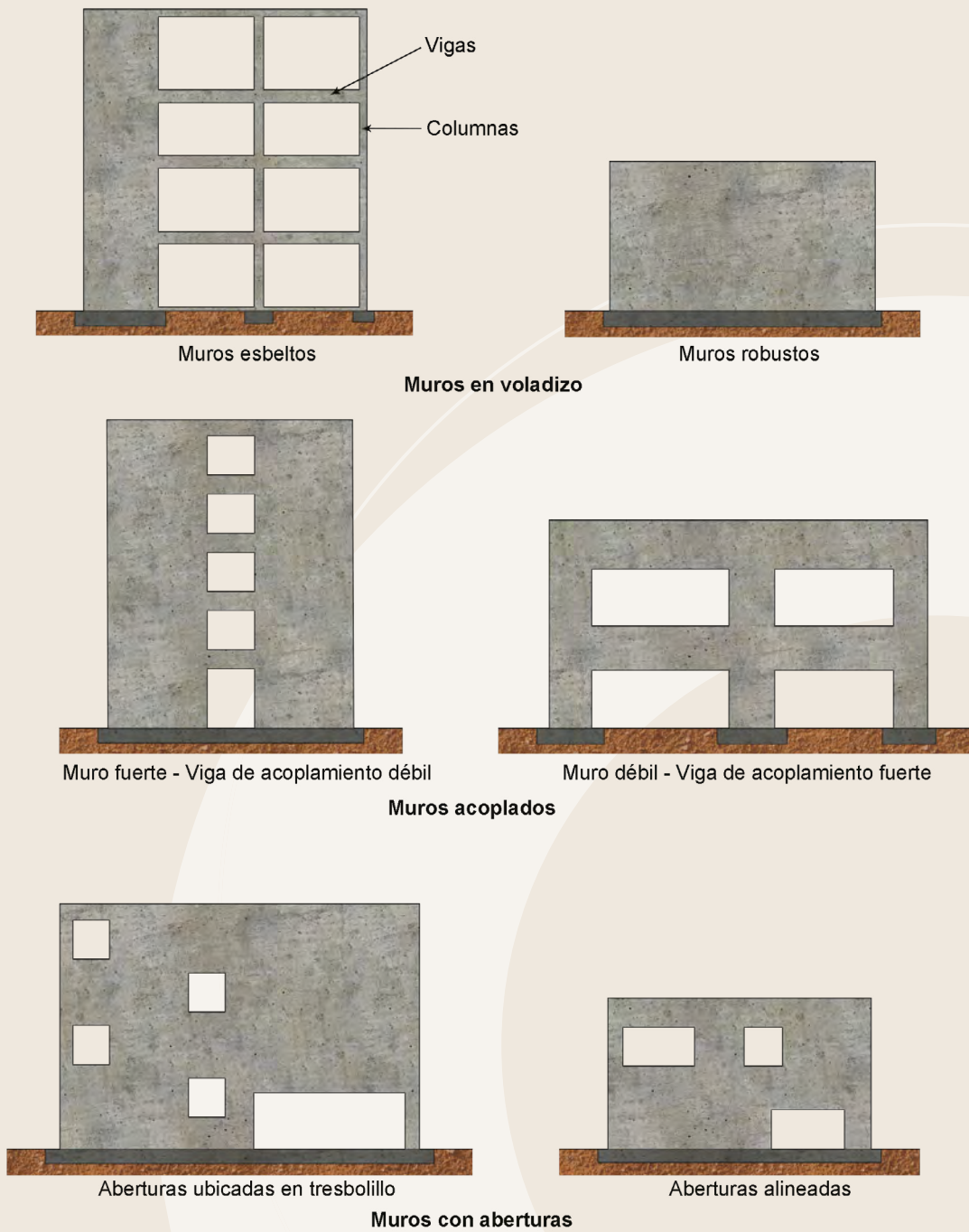


Figura 6.1 Tipos de muros vistos en elevación.  
Fuente: elaboración propia con base en FEMA 306 (1998).

con piezas unidas por mortero y las hechas a base de adobes y mortero de lodo. Es común que después de un sismo, si estas construcciones no han colapsado, sí hayan experimentado niveles de daño severos que las obligan a ser demolidas. En la mayoría de los casos, sus sistemas de piso y techo están simplemente apoyados sobre muros. Durante un sismo, la falta de una conexión entre el piso y/o techo y los muros permite el desplazamiento relativo y los consecuentes daños. Adicionalmente, en estructuras antiguas y/o sin adecuado mantenimiento, el deterioro de la mampostería (piezas y mortero) incrementa su vulnerabilidad (véanse figuras 5.1 y 5.2). Por otro lado, la ausencia de elementos de refuerzo y adecuada unión entre los muros facilita las fallas fuera de plano y el total volteo de los muros.

### 6.2.1 Materiales y estructuración

La mampostería simple es uno de los materiales de construcción más antiguos y diversos. Las variaciones en materiales incluyen el tipo de pieza, la modalidad de construcción y las propiedades de sus materiales constitutivos.

El material más utilizado es el tabique de arcilla macizo artesanal (de barro recocido). También se encuentran tabiques de arcilla huecos, tabiques de concreto macizos o huecos, piedra y adobe.

Normalmente, los muros se construyen con un aparejo en tresbolillo, aunque en algunos estados (como Puebla) se encuentran muros hechos a base de adobe colado en cimbras de madera. En edificios antiguos se pueden observar muros capuchinos (muros paralelos unidos por conectores o piezas perpendiculares que resisten conjuntamente las cargas).

La mampostería simple tiene propiedades mecánicas (resistencia a la compresión, tensión, compresión diagonal y módulos de rigidez a compresión y cortante) muy variables. En estructuras antiguas, los morteros fueron fabricados a base de cal y son usualmente más débiles que las piezas que unen.

Los morteros de cemento, si bien son más resistentes, provocan que el agrietamiento ocurra a través de las piezas, lo cual resulta en una menor capacidad de deformación inelástica.

Las estructuras de adobe son un caso particular de edificaciones de mampostería simple. En México, se encuentran dos tipos de estructuras de adobe: a) las fabricadas con piezas de tierra unidas por mortero de lodo, y b) las hechas con muros de tierra vaciada en cimbras. Las primeras son conocidas como “estructuras de adobe” y son muy comunes en el medio rural mexicano. Las segundas, referidas como “muros de tapia”, se construyen en los estados de Puebla y Oaxaca, principalmente. En la figura 6.2 se presentan ejemplos de muros de adobe (a) y de tapia (b).

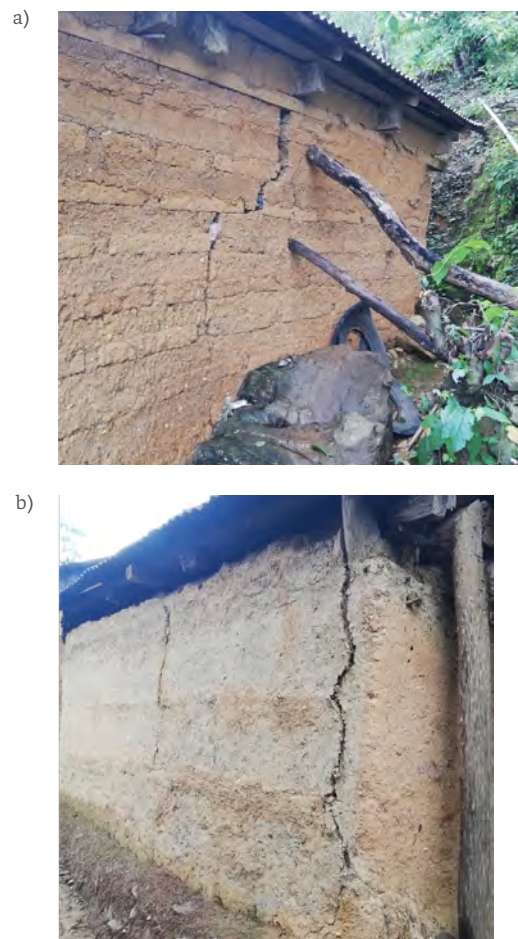


Figura 6.2 Muros de adobes y de tapia.  
 Fuente: cortesía del CENAPRED (2020b).

### 6.2.2 Elementos no estructurales de mampostería simple

Estos elementos incluyen pretilos y apéndices. Los pretilos son extensiones cortas de muros por arriba del techo, normalmente en el perímetro de los edificios. Por lo general, los pretilos no están arriostrados fuera de plano, lo que los hace susceptibles de fallas frágiles por flexión fuera de plano. Los apéndices incluyen fachadas, cornisas, frisos, estatuas y demás elementos susceptibles de caer. Durante los sismos, estos elementos se agrietan y se desacoplan de la estructura de soporte. Una vez sueltos, el golpeteo contra la estructura de soporte provoca agrietamiento y desconchamientos locales.

Si bien no es tan frecuente, los planteles escolares pueden estar delimitados por bardas de mampostería simple, altamente vulnerables a fallas fuera de plano.

### 6.2.3 Componentes de muros de mampostería simple y modos de comportamiento

Los componentes de muros se pueden dividir en cinco tipos (figura 6.3). La notación MMS se refiere a un Muro de Mampostería Simple. En la tabla 6.1 se resumen las características de los tipos de componentes en estructuras a base de muros de mampostería simple (FEMA 306, 1998).

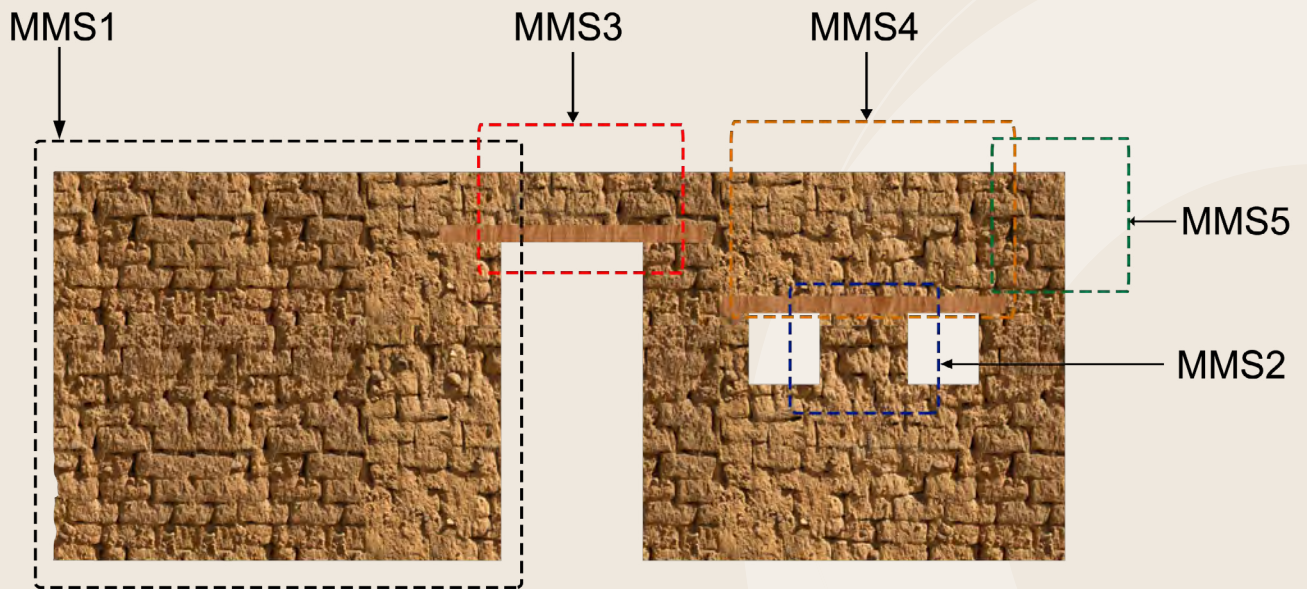


Figura 6.3 Componentes de muros de mampostería simple. Fuente: elaboración propia con base en FEMA 306 (1998).

Tabla 6.1 Tipos de componentes en muros de mampostería simple (MMS)

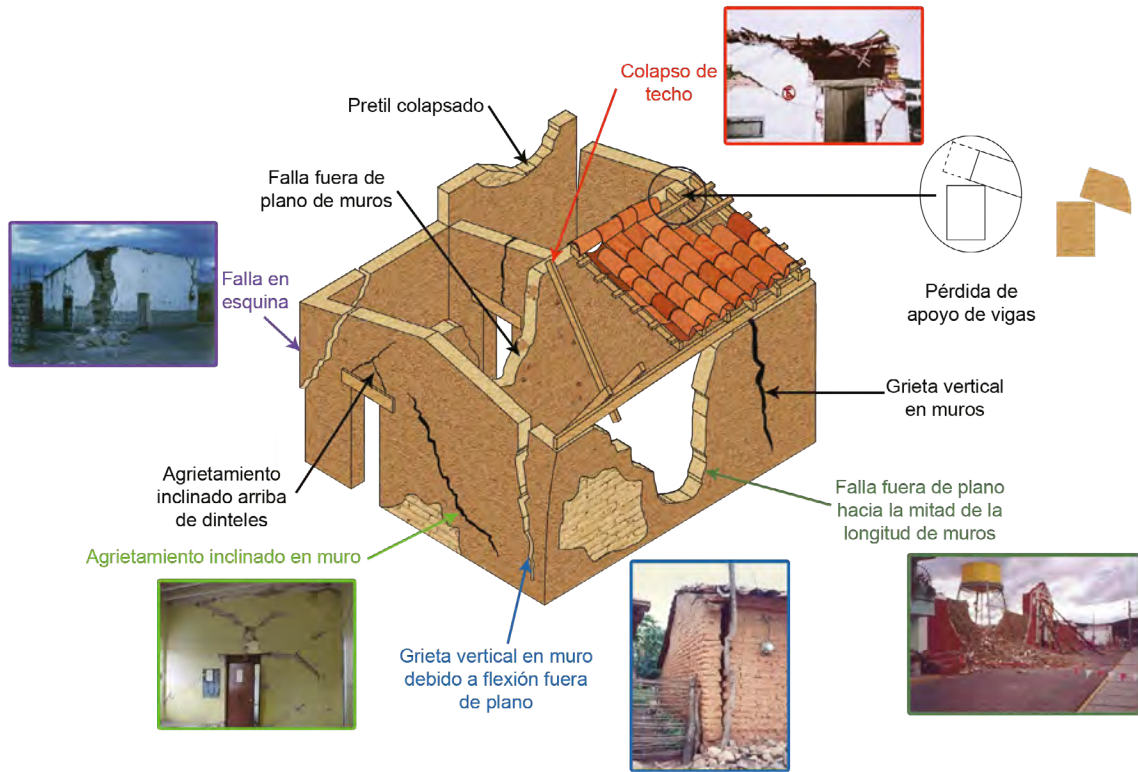
Tipo de componente		Descripción
MMS1	Muro sin aberturas en voladizo	Este componente es más resistente a flexión y/o a fuerza cortante que las vigas que se unen a él (si existen). Sus modos de comportamiento pueden ser por: cabeceo del muro, aplastamiento de la punta del muro, por cortante (grietas siguiendo las juntas), tensión diagonal, deslizamiento del muro con respecto a la cimentación o cabeceo de la cimentación.
MMS2	Segmento de muro débil, en muros con aberturas	Este componente es más débil a flexión y/o a fuerza cortante que las vigas que se conectan a él. El daño se caracteriza por: grietas de tensión diagonal, grietas por cortante, aplastamiento de la punta del muro, cabeceo del segmento.
MMS3	Viga de acoplamiento débil	Este componente es más débil a flexión y/o a fuerza cortante que el segmento de muro al que está unido. El daño se caracteriza por agrietamiento inclinado por tensión diagonal en la viga o vertical en la cara del muro y la viga.
MMS4	Viga de acoplamiento fuerte	Este componente usualmente no se daña, ya que es más resistente a flexión y/o a fuerza cortante que el segmento al que está conectado.
MMS5	Conexión segmento de muro – viga de acoplamiento	Este componente puede exhibir agrietamiento inclinado, si bien no es muy común en estructuras de mampostería simple.

Nota: se entiende por “punta” del muro al extremo del muro a compresión debida a la flexión del elemento. El lado opuesto se denomina “talón”.

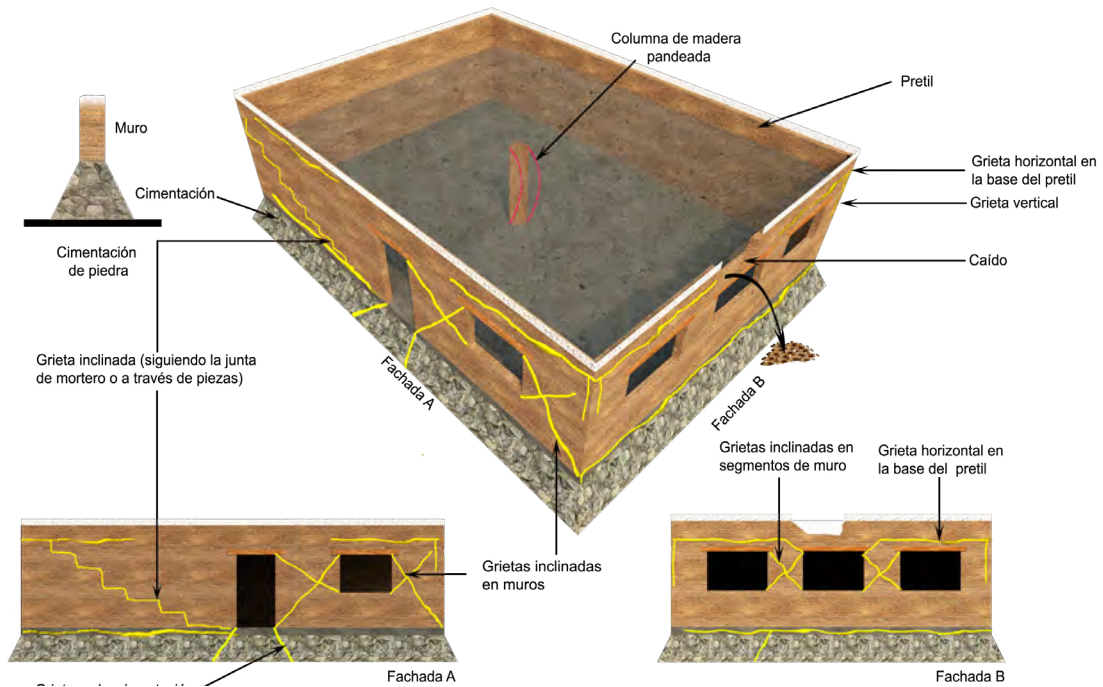
En la tabla anterior, un componente es más resistente que otro al que está unido si sus resistencias, a flexión y/o a fuerza cortante, son superiores. Es factible que un componente sea más resistente a flexión, por ejemplo, pero menos a fuerza cortante, de forma que su comportamiento quede controlado por ésta.

En el cuadro 6.1 se describen brevemente los modos de comportamiento de muros de mampostería simple. Junto a cada explicación se muestran fotografías de los modos de comportamiento. En la figura 6.4 se presentan los modos de comportamiento en construcciones idealizadas de mampostería simple y de adobe. Estas

figuras no deben interpretarse como que todos los modos de comportamiento pueden ocurrir simultáneamente, ya que existe una jerarquía de modos de comportamiento que depende de la estructuración, las dimensiones de muros, las propiedades mecánicas de los materiales, la calidad de la construcción y mantenimiento, entre otros. Se entiende por jerarquía de modos de comportamiento al orden en que pueden presentarse en un componente o estructura; usualmente se refieren como los que tienen mayor probabilidad de ocurrir a los que tienen asociadas menores resistencias. Por ejemplo, si el modo de comportamiento por tensión diagonal tiene la menor resistencia será el modo con mayor probabilidad de ocurrencia.



a) Construcciones de adobe

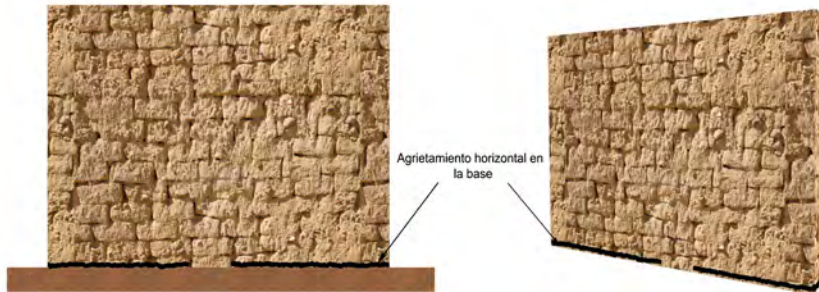


b) Edificaciones de mampostería simple

Figura 6.4 Modos de comportamiento en: a) construcciones de adobe, y b) edificaciones de mampostería simple. Fuente: a) elaboración propia con base en CENAPRED (2019) y b) elaboración propia.

### Cuadro 6.1 Descripción de los modos de comportamiento de muros de mampostería simple

- a. Cabeceo de la cimentación junto con el muro. Se produce cuando la cimentación se desprende durante el sismo. Es un modo de falla que permite disipar energía cada vez que el edificio golpea al suelo. Usualmente no implica el colapso de la estructura.



Fuente: elaboración propia.

- b. Cabeceo de muros o de segmentos de muros. Una vez que el segmento de muro se agrieta a flexión (grieta horizontal) en su talón, el muro o segmento de muro trabaja como un cuerpo rígido que gira alrededor de la punta. Ese tipo de falla se da en muros resistentes, con carga axial baja (pocos pisos) y en segmentos de muro esbeltos (más altos que largos). Un daño excesivo de los segmentos puede conducir a una falla fuera de plano.



Fuente: elaboración propia.

- c. Cortante por deslizamiento. Característico del deslizamiento a lo largo de las juntas. Puede ser horizontal o en forma de escalera siguiendo una traza inclinada (frecuentemente en diagonal). Es un modo de falla que permite que la estructura experimente desplazamientos laterales importantes.

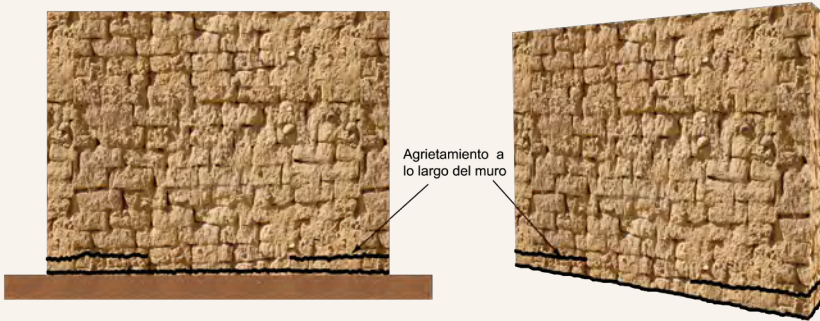


Fuente: cortesía del INIFED (2019).



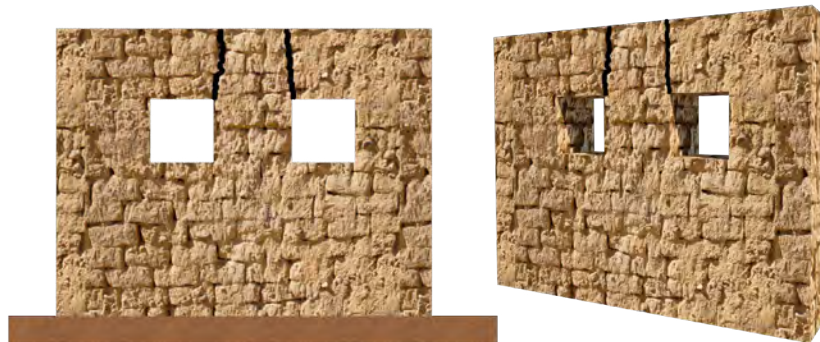


- d. Deslizamiento del muro en su base. Es una variación del modo anterior, en la cual el deslizamiento ocurre en la superficie de contacto del muro con la cimentación.



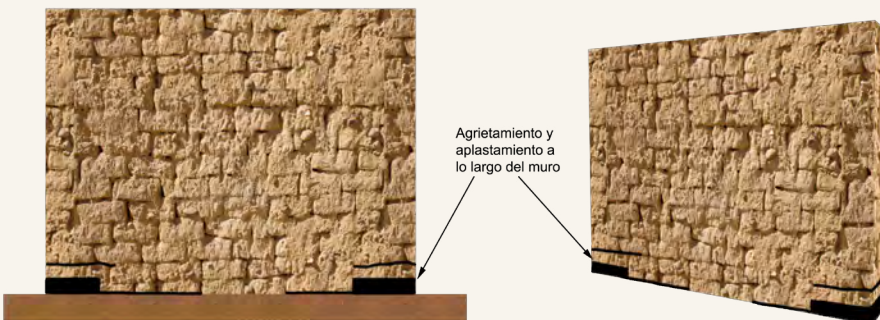
Fuente: elaboración propia.

- e. Agrietamiento vertical en vigas de acoplamiento que conectan dos muros. Se presenta cuando la resistencia a flexión se alcanza antes que la resistencia a fuerza cortante de la viga.



Fuente: elaboración propia.

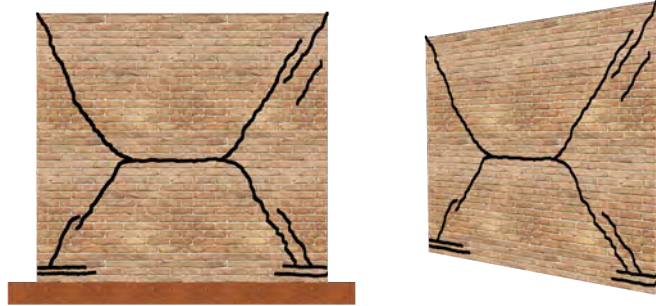
- f. Cabeceo y aplastamiento de la punta del muro. Una vez que se da el cabeceo del muro, tras varios ciclos del sismo, la mampostería se aplasta y falla localmente.



Fuente: elaboración propia.

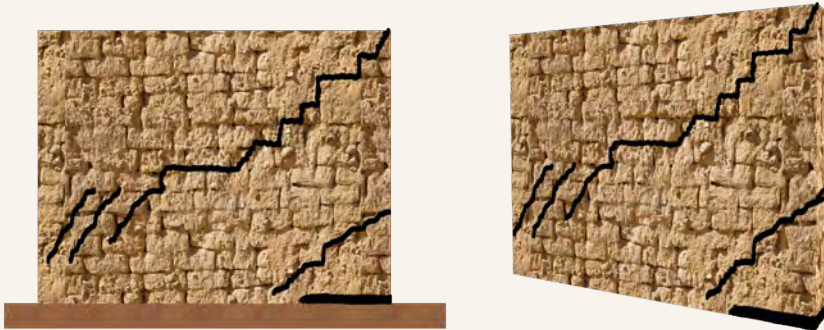


- g. Tensión diagonal posterior a agrietamiento por flexión. Inicia con la formación de una grieta a flexión en el talón del muro, lo cual provoca que la fuerza cortante, al redistribuirse hacia la punta, cause una grieta por tensión diagonal (normalmente con una inclinación de 45 grados).



Fuente: elaboración propia.

- h. Agrietamiento por flexión y aplastamiento de la punta del muro. Se origina con una grieta a flexión (horizontal) en el talón del muro, seguida por un deslizamiento en la base del muro. La fuerza cortante se concentra en la punta del muro, lo que causa el agrietamiento inclinado y el posterior aplastamiento y falla local de la mampostería. Ocurre en muros muy robustos (donde la longitud del muro,  $L$ , es mayor que 1.5 veces la altura,  $H$ ).



Fuente: elaboración propia.

- i. Agrietamiento vertical en las esquinas. Ocurre en la intersección de muros con el techo y es debido a las demandas en el plano y fuera de él. Este agrietamiento puede tener tres causas:
- » El techo se desliza con respecto al muro, empujándolo. Si se excede la resistencia a tensión de la mampostería localmente, la esquina falla.
  - » El daño puede aumentar por la flexión del muro en el sentido horizontal. Si el momento en los extremos del muro (vector de momentos vertical) excede la resistencia a tensión del muro, se forma una grieta vertical cerca de la esquina.
  - » En muros con aberturas cerca de la esquina se genera una concentración de momentos entre el segmento de muro y la viga o sistema de techo. Estos momentos pueden causar una grieta inclinada.



Fuente: archivo personal de Sergio Alcocer (1999).



- j. Tensión diagonal pura. Se forma prácticamente sin agrietamiento a flexión.
- » Se caracteriza por grietas inclinadas (en forma de letra X) a través de mortero y piezas cuando el mortero es resistente, las piezas son de baja resistencia y los esfuerzos axiales son altos, en términos relativos. Dado que este modo de falla es muy frágil puede conducir a pérdida de la capacidad de carga vertical. Las grietas usualmente penetran la punta del muro, lo que provoca que los triángulos superior e inferior, delimitados por la grieta inclinada, se separen.
  - » Otra forma de agrietamiento por tensión diagonal es siguiendo las juntas de mortero en forma de escalera. Éste ocurre en mamposterías con morteros de baja resistencia, piezas resistentes y esfuerzos axiales bajos, en términos relativos. También se observa cuando falta mortero en las juntas verticales de la mampostería. Se conoce como "falla por cortante".



Fuente: cortesía del INIFED (2019).

- k. Flexión fuera de plano. Puede ocurrir porque el diafragma del techo o piso se desprende del muro, facilitando que su coceo empuje al muro fuera de plano. Normalmente, la falla se caracteriza por agrietamiento horizontal en la base del muro y su caída. En ocasiones, se han observado grietas horizontales en los extremos superior e inferior del muro y a la mitad de la altura.



a



b



c

Fuente: archivo personal de Sergio Alcocer (a. 1999 y c. 2003), y b. cortesía del INIFED (2019).

En la tabla 6.2 se describen los modos de comportamiento más usuales y los daños asociados por componente estructural de estructuras a base de muros de mampostería simple. El daño

observable se presenta para tres intensidades de daño (ligero, moderado y severo). Para cada intensidad se incluyen los factores  $\lambda$  que se recomienda aplicar al cálculo de la rigidez, resistencia

y capacidad de deformación para considerar el efecto del daño. Para nivel de daño nulo, el valor de los factores  $\lambda$  es igual a 1.

Conviene hacer notar que la variación en las propiedades mecánicas de la mampostería simple es tan amplia que los cálculos de la resistencia, rigidez o capacidad de deformación empleando factores  $\lambda$  deben ser considerados como meras estimaciones.

En la tabla, el significado de las letras es:

- Al final del nombre del componente (a, b, f...), se refiere al modo de comportamiento descrito en el cuadro 6.1.

- **G**: grieta perpendicular al eje, usualmente por flexión, mm.
- **GI**: grieta inclinada, mm.
- **DR**: desplazamiento horizontal residual de la estructura o del entrepiso más deformado, mm.
- $\lambda_D$ : factor reductor de la capacidad de desplazamiento en función del nivel de daño en el elemento estructural.
- $\lambda_K$ : factor reductor de la rigidez lateral que depende del nivel de daño en el elemento estructural.
- $\lambda_R$ : factor reductor de la resistencia lateral en función del nivel de daño del elemento estructural.

Tabla 6.2 Modos de comportamiento, daños asociados y factores reductivos  $\lambda$  para daños ligeros, moderados y severos en estructuras a base de muros de mampostería simple

Componente	Modo de comportamiento	Descripción [a partir de observación]	Intensidad de daño	Descripción de daño [uno o más elementos]	Valores de $\lambda$		
					$\lambda_K$	$\lambda_R$	$\lambda_D$
<b>MMS2b</b> Segmento de muro débil	Cabeceo de muros o de segmentos de muros	Se identifica por agrietamiento horizontal por flexión en la parte superior e inferior del segmento de muro. Las grietas pueden ser de pequeño ancho. Conforme la intensidad del daño aumenta, se aplastan las piezas y el muro se desfasa fuera de su plano.	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	• $G < 1$ mm sobre juntas, en las partes superior e inferior	0.8	1.0	1.0
			Moderado	• $G < 1$ mm sobre juntas, en las partes superior e inferior y • $G < 1$ mm en el muro	0.6	0.9	1.0
			Severo	• Capacidad de carga vertical comprometida • $G < 1$ mm sobre juntas, en las partes superior e inferior y • $G < 1$ mm en el muro y/o • Posible desfase fuera de plano y/o • Aplastamiento de piezas en las esquinas de los muros	0.4	0.8	0.7
<b>MMS2c</b> Segmento de muro débil	Agiertamiento por cortante – siguiendo juntas (en escalera)	El agrietamiento sigue las juntas de mortero, ya sea horizontal o en forma de escalera. Es un modo de falla dúctil, limitado por el aplastamiento de piezas y la degradación de la grieta hasta alcanzar condiciones de inestabilidad.	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	• $G < 1$ mm y/o desconchamiento de mortero en juntas, siguiendo una trayectoria horizontal o en forma de escalera. La grieta en forma de escalera no se extiende en todo el muro • Las grietas no atraviesan piezas	0.9	0.9	1.0
			Moderado	• Agrietamiento horizontal y/o desconchamiento de mortero en juntas que evidencian una grieta vertical en la junta de 5 mm • 5% de las hiladas o menos experimentan agrietamiento a través de piezas	0.8	0.6	1.0
			Severo	• Capacidad de carga vertical comprometida. • Agrietamiento horizontal y/o desconchamiento de mortero en juntas que evidencian una grieta vertical en la junta de 10 mm • Mayoría de las hiladas experimenta agrietamiento a través de piezas • $DR$ significativo ( $> 0.001$ veces la altura del muro o del segmento de muro), con piezas fuera de lugar	0.6	0.6	0.9



Componente	Modo de comportamiento	Descripción (a partir de observación)	Intensidad de daño	Descripción de daño (uno o más elementos)	Valores de $\lambda$		
					$\lambda_K$	$\lambda_R$	$\lambda_D$
<b>MMS3e</b> <b>Viga de acoplamiento débil</b>	Agrietamiento vertical en vigas de acoplamiento con deslizamiento entre juntas	Grietas verticales que se forman en los extremos de las vigas, siguiendo las juntas en forma escalonada.  Está asociado a mecanismos de ductilidad intermedia. Para grandes intensidades, las deformaciones inelásticas se pueden concentrar en otros componentes.	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	• $G < 1$ mm escalonadas y/o desconchamiento de mortero en juntas y • Sin agrietamiento de piezas	0.9	0.9	1.0
			Moderado	• $G < 1$ mm escalonadas y/o desconchamiento de mortero en juntas, con una grieta vertical de 5 mm en la junta y • Sin agrietamiento de piezas	0.8	0.4	0.9
			Severo	• Capacidad de carga vertical comprometida • $G < 1$ mm escalonadas y/o desconchamiento de mortero en juntas, con una grieta vertical de 10 mm en la junta y • Posible deterioro de piezas en los extremos inferiores de la viga • Posible rotación remanente de la viga con respecto al muro • Posible separación de la viga con respecto al muro	0.6	0.4	0.9
<b>MMS1f</b> <b>Muro sin aberturas en voladizo</b>	Cabeceo y aplastamiento de la punta del muro	Ocurre en muros con relación $L/H = 1.7$ , aproximadamente. Se inicia con agrietamiento en el talón del muro, que se extiende de forma inclinada. Después se produce el aplastamiento de la punta, con extensión de grietas inclinadas hacia el centro del muro. Finalmente, el muro desliza horizontalmente sobre la junta inferior del muro. La falla la controla el aplastamiento en la punta del muro, debido al deslizamiento excesivo.	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	• $G < 1$ mm en la base del muro • Posibles $GI$ y aplastamiento incipiente en punta del muro	1.0	1.0	1.0
			Moderado	• Grietas y desconchamiento en juntas en o cerca de la base del muro, con un desfase en el plano de 5 mm, aproximadamente • $GI$ y aplastamiento en punta del muro • Posible $GI$ en la parte superior del muro	0.9	0.6	0.9
			Severo	• Capacidad de carga vertical comprometida • Grietas y desconchamiento en juntas en o cerca de la base del muro, con un desfase en el plano de 10 mm, aproximadamente • $GI$ y aplastamiento en punta del muro • Posible $GI > 10$ mm en la parte superior del muro • Punta del muro en proceso de desintegración • $DR$ significativo ( $> 0.001$ veces la altura del muro o del segmento de muro), con piezas fuera de su lugar	0.8	0.6	0.9
<b>MMS2j</b> <b>Segmento de muro débil</b>	Tensión diagonal pura	Se identifica por grietas inclinadas en forma de letra X a través de piezas. El agrietamiento es súbito, frágil y conduce a una pérdida de la capacidad de carga vertical. Las grietas se pueden extender en toda la diagonal. También se puede presentar en forma de escalera, si el mortero es más débil que las piezas y el esfuerzo axial es bajo.	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	• $GI < 1$ mm en menos de 5% de las hiladas	1.0	1.0	1.0
			Moderado	• $GI < 5$ mm, que llegan a las esquinas y • Sin aplastamiento de las esquinas	0.8	0.9	1.0
			Severo	• Capacidad de carga vertical comprometida • $GI > 5$ mm y • Aplastamiento/desconchamiento en las esquinas y/o • Movimiento relativo de piezas sobre o a través del plano de la grieta y/o • $DR$ significativo ( $> 0.001$ veces la altura del muro o del segmento de muro), con piezas fuera de lugar	0.4	0.8	0.7



Componente	Modo de comportamiento	Descripción (a partir de observación)	Intensidad de daño	Descripción de daño (uno o más elementos)	Valores de $\lambda$		
					$\lambda_K$	$\lambda_R$	$\lambda_D$
<b>MMS1h</b> <b>Muro sin aberturas en voladizo</b>	Flexión/ aplastamiento de punta del muro	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ocurre en muros con <math>L/H &gt; 1.25</math>. Inicia con agrietamiento por flexión que, al no propagarse en toda la longitud, permite la formación de otras grietas horizontales más arriba. Después se forma una grieta horizontal a media altura del muro. Luego se forman grietas inclinadas a partir de la punta del muro y, finalmente, aparecen grietas en las esquinas superiores del muro. La falla se presenta por la rotación del triángulo superior, delimitado por las grietas inclinadas con respecto a la punta del muro.</li> </ul>	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>G &lt; 1</math> mm en la junta de mortero en el talón del muro y</li> <li>• Grietas horizontales (una a tres) en el centro del muro, sin extenderse en toda la longitud</li> <li>• Sin grietas a través de piezas</li> </ul>	0.9	1.0	1.0
			Moderado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>G &lt; 1</math> mm en la junta de mortero en el talón del muro y</li> <li>• Grietas horizontales (una a tres) en el centro del muro, con algo de desfase</li> <li>• <math>GI</math> en la punta del muro a través de piezas, con algo de desconchamiento</li> </ul>	0.8	0.8	1.0
			Severo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>G &lt; 1</math> mm en la base del muro</li> <li>• <math>G</math> horizontal a media altura del muro con desfase en el plano y</li> <li>• <math>GI</math> en la punta del muro, con aplastamiento de piezas</li> <li>• <math>GI</math> hacia las esquinas superiores del muro. Si el muro es <math>L/H &gt; 1.5</math>, las grietas seguirán la diagonal del muro; en muros más esbeltos, las grietas serán más inclinadas (más verticales) a través de las piezas</li> </ul>	0.6	0.6	0.9
<b>MMS3e</b> <b>Viga de acoplamiento débil</b>	Agrietamiento vertical en vigas de acoplamiento, a través de piezas	Se presenta en forma de agrietamiento vertical a través de la mampostería. La grieta se puede extender en todo el peralte, convirtiéndose en un peligro de caído.	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	• $G$ vertical y/o mortero desconchado a través de una o más hiladas de mampostería	0.9	0.9	1.0
			Moderado	• No se usa			
			Severo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidad de carga vertical comprometida</li> <li>• <math>G</math> vertical y/o mortero desconchado a través del peralte de la viga</li> <li>• Posible deterioro de piezas en la esquina inferior de la viga</li> <li>• Posible separación de la viga de su apoyo</li> <li>• Posible deslizamiento de la viga</li> </ul>	0.2	0.4	0.6
<b>MMS1k</b> <b>Muro sin aberturas en voladizo</b>	Flexión fuera de plano	Es un modo de falla frecuente en mampostería simple. Un modo de falla ocurre por la rotación como cuerpo rígido de dos porciones de muro limitadas por tres grietas horizontales, una en la base, otra a la mitad de la altura y la tercera en la parte superior, debajo de la losa de piso/techo. Con la rotación, el mortero o las piezas se degradan y se acumulan los desplazamientos residuales fuera de plano. Son más vulnerables los muros con bajos esfuerzos y relación $h/t$ elevadas.	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>G &lt; 1</math> mm horizontales, en extremos de muros y a media altura y</li> <li>• Sin desfase fuera de plano</li> </ul>	1.0	1.0	1.0
			Moderado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>G &lt; 3</math> mm</li> <li>• Grietas horizontales con desconchamiento de mortero en la junta en todo su ancho y</li> <li>• Posiblemente, desfase fuera de plano de 3 mm</li> </ul>	0.9	0.9	0.9
			Severo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>G &gt; 3</math> mm</li> <li>• Capacidad de carga vertical comprometida</li> <li>• Grietas horizontales con desconchamiento de mortero en la junta en todo su ancho y</li> <li>• Desconchamiento de piezas sobre el plano de grieta y</li> <li>• Desfase fuera de plano de más de 10 mm</li> </ul>	0.6	0.6	0.6

## 6.3 ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA CONFINADA

Las estructuras de mampostería confinada son aquellas con elementos de concreto en sus extremos verticales y horizontal superior destinados a confinar la mampostería. Los elementos verticales son llamados castillos, mientras que los horizontales son denominados como dalas o cadenas. Ambos se construyen simultáneamente al muro. Por lo común, los castillos y dalas tienen el mismo ancho que el espesor del muro, aunque su peralte puede ser mayor. En el caso de las dalas, a menudo se construyen monolíticamente con el sistema de piso. En tiempos más recientes, los muros se han reforzado de manera horizontal con barras de diámetros pequeños o alambres, los cuales incrementan la capacidad de resistencia lateral y de deformación inelástica.

La mampostería confinada es la modalidad más utilizada en nuestro país. Inicialmente, se usó para mitigar los efectos de los asentamientos diferenciales en los muros. Hoy en día, se construye mediante procesos formales y de autoconstrucción. En general, su comportamiento sísmico ha sido muy favorable cuando los muros son confinados de manera adecuada, es decir, si la posición y detallado de los castillos y dalas es consistente con los establecidos en las normas de construcción.

### 6.3.1 Materiales y estructuración

Las normas de construcción en México, como las NTC-M (GobCdMx, 2017), establecen requisitos para el análisis, diseño y construcción de estructuras hechas de mampostería confinada. En la figura 6.5 se muestran los requisitos básicos que debe cumplir la mampostería confinada de acuerdo con dichas normas.

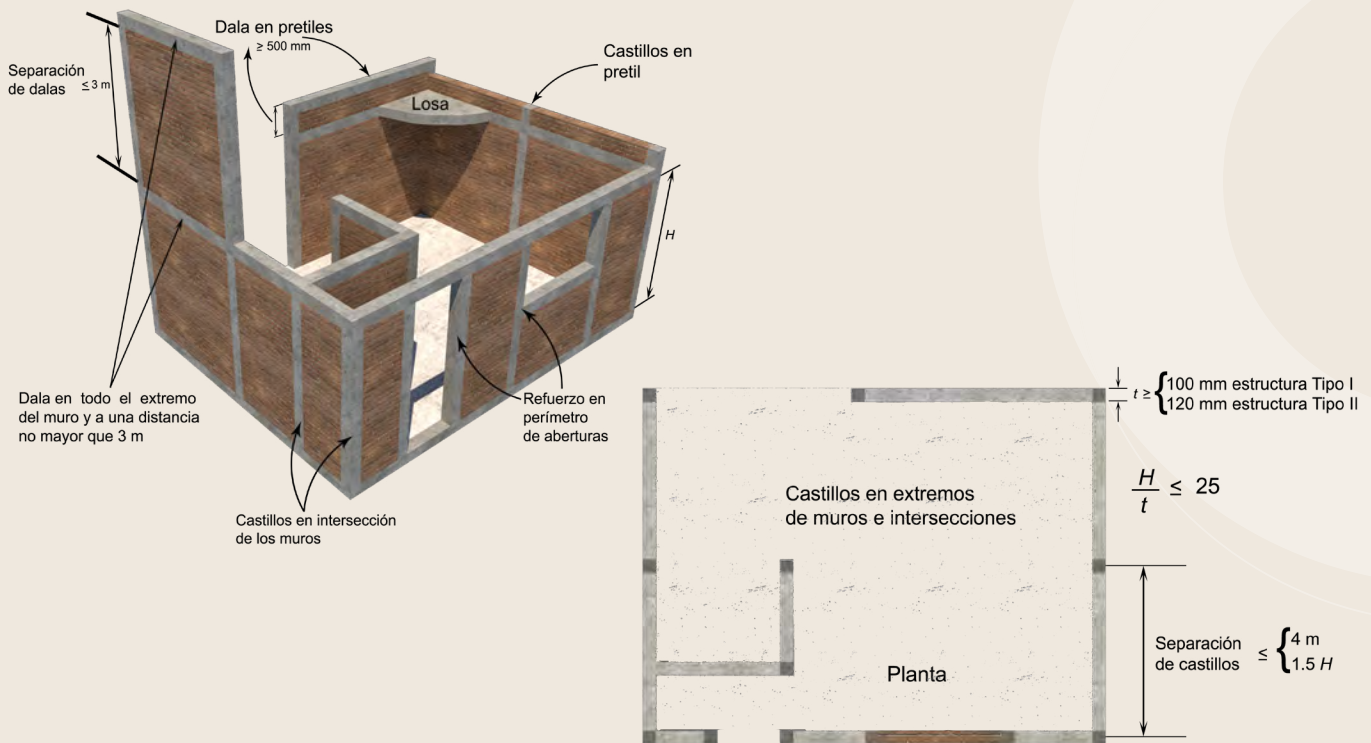


Figura 6.5 Requisitos básicos de una estructura de mampostería confinada. Fuente: elaboración propia con base en NTC-M (GobCdMx, 2017).

Los muros de mampostería confinada pueden estar contruidos con piezas macizas o huecas. El comportamiento de los muros hechos con piezas macizas es más estable, lográndose mantener la resistencia y capacidad de deformación inelástica a desplazamientos laterales considerables. En contraste, los muros de piezas huecas, si bien son más resistentes porque las piezas son de fabricación industrializada, exhiben una caída de la capacidad de resistir carga una vez que han alcanzado la resistencia. Este comportamiento más frágil de la mampostería con piezas huecas es reconocido en las normas de construcción, las cuales aplican factores de seguridad más elevados. En la modalidad confinada con piezas huecas es usual que no se rellenen las celdas.

Una adecuada disposición de los elementos de confinamiento se muestra en la figura 6.5, tomada de las NTC-M (GobCdmx, 2017). Como se aprecia en la figura 6.6, los castillos y dalas deben delimitar todas las aberturas en forma de puerta, así como perforaciones en forma de ventana con anchos superiores a 400 o 600 mm, dependiendo del uso del edificio. Las dalas deben ser continuas sobre los muros. Los castillos se construyen, también, en la intersección de muros transversales. Los sistemas de piso y techo usados en estructuras de mampostería confinada son, por lo general, a base de concreto, ya sea en forma de losas macizas de peralte constante, o bien, de losas prefabricadas del tipo vigueta y bovedilla.

### 6.3.2 Componentes de muros de mampostería confinada y modos de comportamiento

Los componentes de muros se pueden dividir en cuatro tipos (figura 6.6). La notación MMC se refiere a un Muro de Mampostería Confinada. Nótese que en la figura no se ha dibujado el pretil de azotea. En la tabla 6.3 se resumen las características de los tipos de componentes en muros de mampostería confinada (MMC).

En la tabla anterior, un componente es más resistente que otro al que está unido si sus resistencias, a flexión y/o a fuerza cortante, son superiores. Es factible que un componente sea más resistente a flexión, por ejemplo, pero menos a fuerza cortante, de forma que su comportamiento quede controlado por ésta.

En el cuadro 6.2 se describen los principales modos de comportamiento de muros de mampostería confinada. Adyacente a cada explicación se muestran fotografías de los modos de comportamiento observados en el campo. En la figura 6.7 se presentan los modos de comportamiento en una construcción idealizada de mampostería confinada. Esta figura no debe interpretarse como que todos los modos de comportamiento pueden ocurrir simultáneamente. Existe una jerarquía de modos de comportamiento que depende de la estructuración, las dimensiones de muros, las propiedades mecánicas de los materiales, la calidad de la construcción y mantenimiento, entre otros elementos.



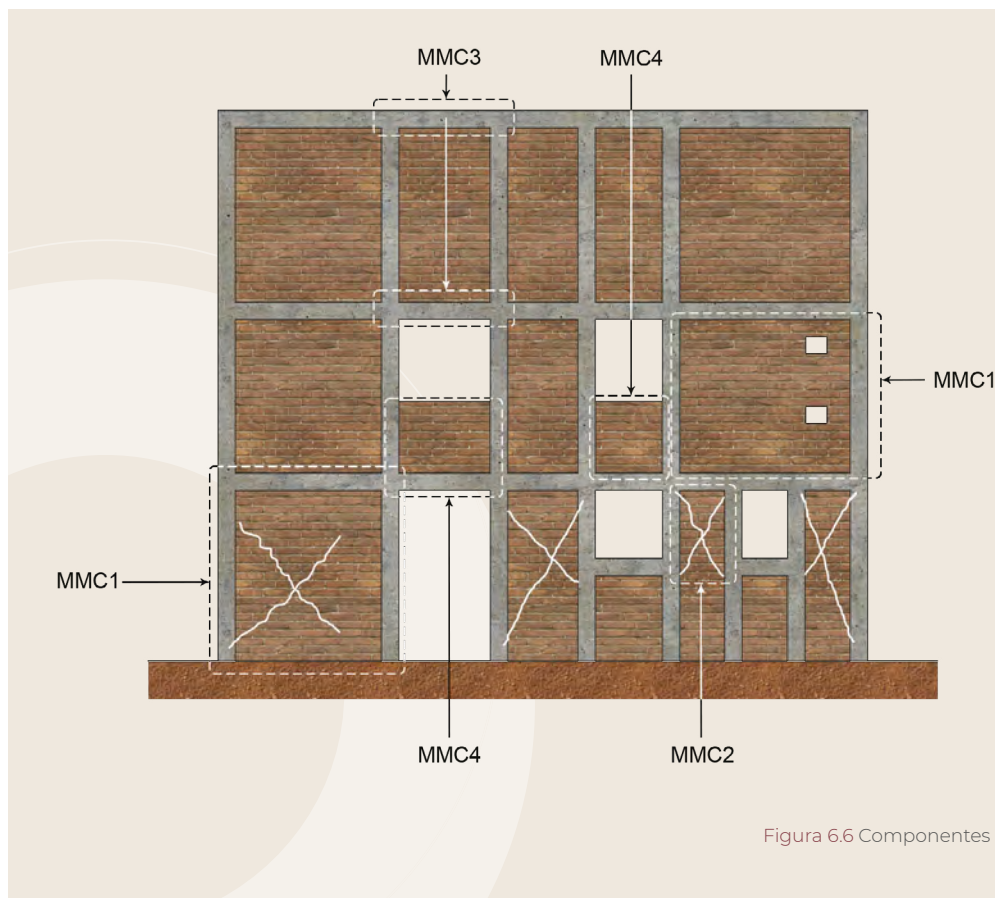


Figura 6.6 Componentes de muros de mampostería confinada. Fuente: elaboración propia.

Tabla 6.3 Tipos de componentes en muros de mampostería confinada (MMC)

Tipo de componente		Descripción
MMC1	Muro en voladizo o segmento de muro fuerte	Este componente es más resistente a flexión y/o a fuerza cortante que las vigas que se unen a él, de modo que el comportamiento inelástico y el daño se concentran en el muro y, más específicamente, en la base. Por lo general, el daño es controlado por fuerza cortante. El agrietamiento inclinado del muro penetra los extremos superior e inferior de los castillos a grandes desplazamientos. Si bien menos frecuente, este componente puede deslizarse en la base o cabecear. Sólo en el caso de muros o segmentos muy esbeltos puede ocurrir agrietamiento por flexión. Los muros y segmentos pueden ser planos o tener patines (muros transversales).
MMC2	Segmento de muro débil	Este componente es más débil a flexión y/o a fuerza cortante que las vigas que se conectan a él. El daño se caracteriza por articulaciones plásticas en los extremos superior e inferior del segmento (menos probable), o por falla por cortante (más probable).
MMC3	Viga de acoplamiento débil	Este componente es más débil a flexión y/o a fuerza cortante que el segmento de muro al que está unido. Por lo común, estas vigas son dadas con patines debidos a la losa construida monolíticamente. En general, su comportamiento está controlado por flexión, aunque no logren desarrollar una articulación plástica.
MMC4	Viga de acoplamiento fuerte	Este componente usualmente no se daña, ya que es más resistente que el segmento al que está conectado.

Nota: se entiende por "punta" del muro al extremo del muro a compresión debida a la flexión del elemento. El lado opuesto se denomina "talón".

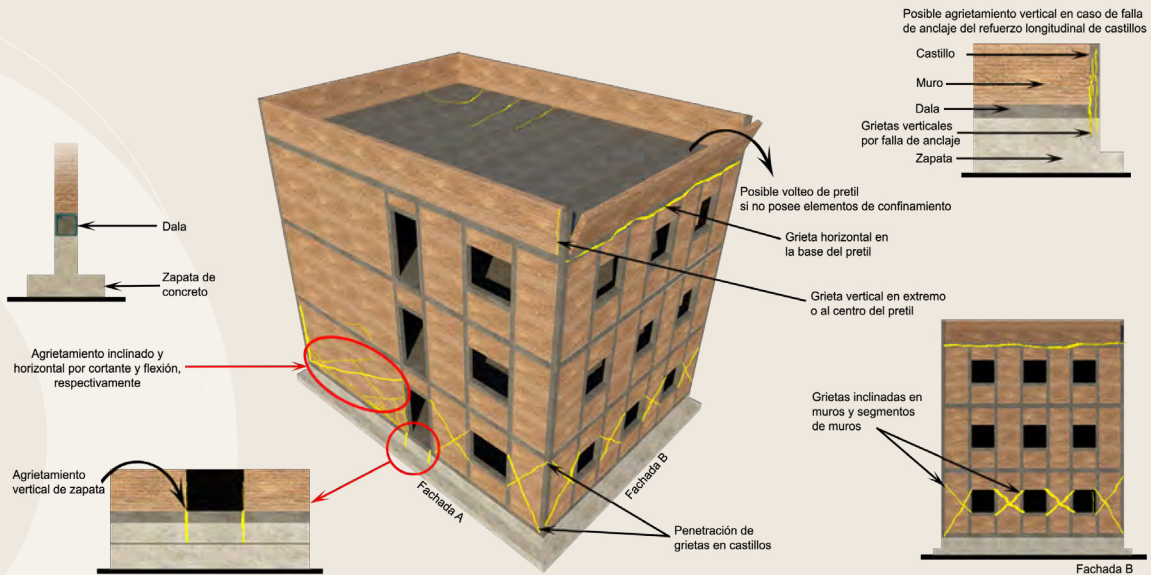
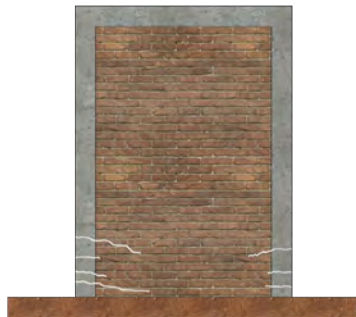


Figura 6.7 Modos de comportamiento en una construcción idealizada de mampostería confinada. Fuente: elaboración propia.

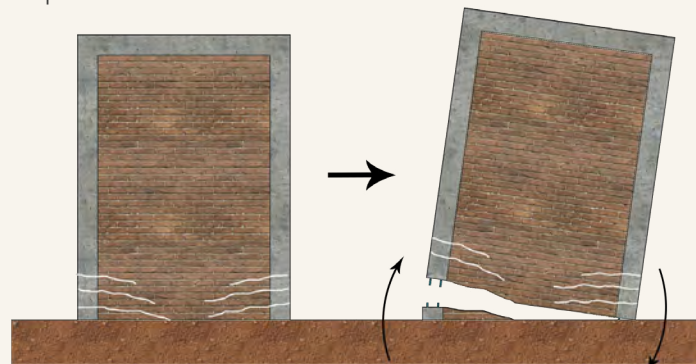
### Cuadro 6.2 Descripción de los modos de comportamiento en una estructura de mampostería confinada

- a. Flexión. Si bien es el modo de falla más deseable por su estabilidad en resistencia y capacidad de deformación, rara vez se observa en estructuras existentes de mampostería confinada.



Fuente: elaboración propia.

- b. Cabeceo de la cimentación junto con el muro. Se produce cuando la cimentación se desprende durante el sismo. Es un modo de falla que permite disipar energía cada vez que el edificio golpea al suelo. Usualmente no conduce al colapso del edificio.



Fuente: elaboración propia.



- c. Flexión-tensión diagonal. Inicia con la formación de una grieta a flexión en el talón del muro, lo cual provoca que la fuerza cortante, al redistribuirse hacia la punta, cause grietas por tensión diagonal (normalmente con una inclinación de 45 grados). Este agrietamiento degrada la resistencia a fuerza cortante del muro. Es uno de los modos de falla más comunes. En la proximidad de los desplazamientos asociados a la resistencia, el agrietamiento penetra los castillos (extremos superior e inferior). El daño en los castillos es peligroso, ya que éstos contribuyen de manera decisiva a resistir las cargas gravitacionales y, consecuentemente, a preservar la estabilidad de la estructura.



Fuente: archivo personal de Sergio Alcocer (1997).

- d. Flexión-compresión diagonal. Es un modo de comportamiento que inicia de manera similar al de flexión-tensión diagonal. Cerca de los desplazamientos asociados a la resistencia, se observa el inicio del aplastamiento de piezas, especialmente en la parte media y media superior del muro. Adicionalmente, el agrietamiento inclinado penetra los castillos (extremos superior e inferior). El aplastamiento de la mampostería es visible, especialmente si las piezas son huecas o multiperforadas.



Fuente: archivo personal de Sergio Alcocer (1992).

- e. Flexión-deslizamiento. Inicia con una grieta por flexión en el talón del muro y paulatinamente se extiende en toda la longitud. Ocurre cuando las cargas axiales son bajas, la cuantía de refuerzo longitudinal en los castillos es baja, la relación de aspecto del muro es baja (muros robustos o largos) o cuando el muro se ha desplazado lateralmente de forma significativa y se ha degradado el mecanismo de transmisión de cortante por fricción. Es un modo de falla que a grandes desplazamientos laterales se caracteriza por aplastamiento local de las primeras hiladas de mampostería, así como por doblez del refuerzo vertical (o longitudinal) de los castillos.



Fuente: cortesía del INIFED (2019).

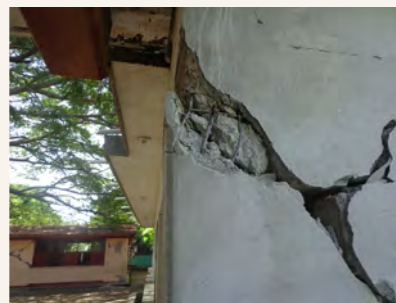


- f. Flexión fuera de plano. Podría ocurrir en muros planos (sin patines y de bajo espesor) y esbeltos sujetos a grandes desplazamientos fuera del plano. Ocurre tras elevadas deformaciones unitarias en el acero de refuerzo vertical que causan inestabilidad en la zona a compresión durante la flexión fuera de plano. Es un modo de falla frecuentemente observado en muros muy largos, o bien, que han perdido o visto disminuida su resistencia a flexión debido a la corrosión del acero de refuerzo vertical de los castillos. La falla frecuentemente está asociada a errores constructivos como son la falta de limpieza en la junta entre la dala de cimentación y la primera hilada de mampostería, la falta de saturación con agua en esa junta antes de colocar el mortero, o bien, deficiencias similares en la junta de colado entre la viga de cimentación y el castillo.



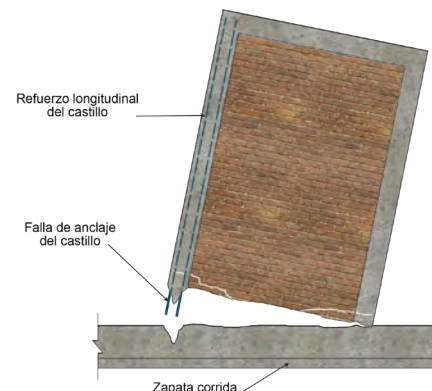
Fuente: archivo personal de Sergio Alcocer (2003).

- g. Tensión diagonal pura. Se forma prácticamente sin agrietamiento a flexión. El daño se caracteriza por una o dos grietas inclinadas de gran ancho, con aplastamiento y desconchamiento de la mampostería en el centro del segmento o muro. Normalmente ocurre en muros con deficiente confinamiento, tal que su comportamiento se parece al de muros de mampostería simple. Es un modo de falla característico en estructuras existentes con deficiente confinamiento.



Fuente: cortesía del INIFED (2019).

- h. Flexión y fallas en anclaje de castillos. Ocurre cuando la longitud de desarrollo del refuerzo longitudinal de los castillos dentro de la cimentación es insuficiente. La falla se hace evidente por medio de grietas verticales a la altura del anclaje. La pérdida de la adherencia entre el acero y el concreto disminuye la capacidad de resistir tensiones, lo que facilita el desprendimiento del muro de la cimentación y su consecuente cabeceo sobre ella.



Fuente: elaboración propia

En la tabla 6.4 se describen los modos de comportamiento más usuales y los daños asociados por componente estructural de estructuras a base de muros de mampostería confinada sin refuerzo horizontal. El daño observable se presenta para tres intensidades de daño (ligero, moderado y severo). Para cada intensidad, se incluyen los factores  $\lambda$  que se recomienda aplicar al cálculo de la rigidez, resistencia y capacidad de deformación para considerar el efecto del daño. Para nivel de daño nulo, el valor de los factores  $\lambda$  es igual a 1.

En la tabla, el significado de las letras es:

- Al final del nombre del componente (a, b, f...), se refiere al modo de comportamiento descrito en el cuadro 6.2.

- **G**: grieta perpendicular al eje, usualmente por flexión, mm.
- **GI**: grieta inclinada, mm.
- **DR**: desplazamiento horizontal residual de la estructura o del entrepiso más deformado, mm.
- **ND**: no disponible (para este nivel de daño, los valores de  $\lambda$  son cercanos a cero).
- $\lambda_D$ : factor reductor de la capacidad de desplazamiento en función del nivel de daño en el elemento estructural.
- $\lambda_K$ : factor reductor de la rigidez lateral que depende del nivel de daño en el elemento estructural.
- $\lambda_R$ : factor reductor de la resistencia lateral en función del nivel de daño del elemento estructural.

**Tabla 6.4 Modos de comportamiento, daños asociados y factores reductivos  $\lambda$  para daños ligeros, moderados y severos en estructuras a base de muros de mampostería confinada sin refuerzo horizontal**

Componente	Modo de comportamiento	Descripción (a partir de observación)	Intensidad de daño	Descripción de daño (uno o más elementos)	Valores de $\lambda$		
					$\lambda_K$	$\lambda_R$	$\lambda_D$
MMCIa  Muro en voladizo o segmento de muro fuerte	Flexión	El agrietamiento por flexión se concentra en la base del muro. El daño se caracteriza por grietas horizontales e inclinadas, estas últimas de anchos pequeños (1 mm). Si el daño por cortante se concentra en una o dos grietas inclinadas, el comportamiento estará controlado por flexión-cortante o por tensión diagonal pura. Si el daño se expresa por un desfase del muro en su base, puede ser indicativo de falla por flexión-cortante por deslizamiento.  Es una falla que puede ocurrir en muros muy esbeltos ( $L/H < 0.5$ ) o con cocientes $M/VL$ altos. Involucra la fluencia del refuerzo vertical en los castillos.  Los valores de $\lambda$ se tomaron de muros de mampostería reforzada interiormente.	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	• $G < 2$ mm y • Sin desconchamiento ni agrietamiento vertical	0.6	1.0	1.0
			Moderado	• $G < 2$ mm y • Desconchamiento moderado de mampostería (especialmente de paredes exteriores de piezas huecas o multiperforadas) en la punta del muro y • Sin pandeo ni fractura del refuerzo y • Sin <b>DR</b> significativo	0.4	0.9	1.0
			Severo	• Refuerzo fracturado y • $G > 2$ mm • <b>DR</b> elevado ( $> 0.005$ veces la altura del muro o del segmento de muro) • Desconchamiento o aplastamiento extendido y • Refuerzo pandeado	ND	ND	ND
MMCIb  Muro en voladizo o segmento de muro fuerte	Cabeceo	Se identifica por agrietamiento horizontal por flexión en la parte superior e inferior del segmento de muro. Las grietas pueden ser de pequeño ancho. Conforme la intensidad del daño aumenta, se aplastan las piezas y el muro se desfasa fuera de plano.	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	• $G < 1$ mm en juntas, especialmente debajo o arriba de la primera hilada	0.8	1.0	1.0



Componente	Modo de comportamiento	Descripción (a partir de observación)	Intensidad de daño	Descripción de daño (uno o más elementos)	Valores de $\lambda$		
					$\lambda_K$	$\lambda_R$	$\lambda_D$
		<p>Ocurre en muros con resistencia a fuerza cortante superior a la resistencia a flexión. Es el caso de muros con refuerzo horizontal dentro de las hiladas o en forma de mallas de alambre soldado, que aumentan la resistencia a corte muy por encima de la de flexión. La falla se produce por la fractura del refuerzo longitudinal de los castillos.</p> <p>Es un modo de falla con gran capacidad de disipación de energía cuando los extremos del muro golpean la cimentación durante los ciclos de carga.</p> <p>Se puede presentar en combinación con MMC1a o MMC1c.</p>	Moderado	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>G &lt; 1</math> mm en juntas, especialmente debajo o arriba de la primera hilada y</li> <li><math>G &lt; 1</math> mm en el muro</li> </ul>	0.6	0.9	1.0
			Severo	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>G &lt; 1</math> mm en juntas, especialmente debajo o arriba de la primera hilada y</li> <li><math>G &lt; 1</math> mm en el muro y/o</li> <li>Posible desfase fuera de plano y/o</li> <li>Aplastamiento de concreto de los castillos</li> </ul>	0.4	0.8	0.7
<p><b>MMC1c</b></p> <p>Muro en voladizo o segmento de muro fuerte</p>	Flexión-tensión diagonal	<p>El daño inicia en la base del muro. Predomina el agrietamiento inclinado; a grandes intensidades de daño, concentrado en una o dos grietas inclinadas.</p> <p>Es un modo de falla de ductilidad media. Es el modo de falla más usual.</p>	Nulo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sin daño</li> </ul>	1.0	1.0	1.0
			Ligero	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>G &lt; 1.5</math> mm y</li> <li><math>GI &lt; 1.5</math> mm y</li> <li>Sin desconchamiento ni agrietamiento vertical</li> </ul>	0.8	1.0	1.0
			Moderado	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>G &lt; 3</math> mm</li> <li><math>GI &lt; 5</math> mm y</li> <li><math>GI &lt; 0.2</math> mm que penetran en los extremos de los castillos y</li> <li>Desconchamiento moderado de mampostería (especialmente de paredes exteriores de piezas huecas o multiperforadas) y concreto cerca de la punta del muro y</li> <li>Sin pandeo ni fractura del refuerzo y</li> <li>Sin <math>DR</math> significativo</li> </ul>	0.5	0.9	0.9
			Severo	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>G &gt; 3</math> mm, normalmente concentrado en una grieta y</li> <li><math>GI &gt; 5</math> mm, concentrado en una o dos grietas inclinadas o</li> <li><math>GI &gt; 2</math> mm en varias grietas si tiene refuerzo horizontal y éste no se ha fracturado y</li> <li><math>GI &gt; 5</math> mm en los extremos de los castillos</li> <li><math>DR</math> elevado (<math>&gt; 0.003</math> veces la altura del muro o del segmento de muro), y</li> <li>Desconchamiento o aplastamiento en los extremos de los castillos sobre una longitud de dos veces el peralte del castillo y</li> <li>Acero fracturado, pandeado o doblado</li> </ul>	0.2	0.5	0.7
<p><b>MMC1d</b></p> <p>Muro en voladizo o segmento de muro fuerte</p>	Flexión-compresión diagonal	El daño inicia como en MMC1c. Para desplazamientos laterales elevados, se aplasta la mampostería en la parte media y/o media superior del muro.	Nulo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sin daño</li> </ul>	1.0	1.0	1.0
			Ligero	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>G &lt; 1.5</math> mm y</li> <li><math>GI &lt; 1.5</math> mm y</li> <li>Sin desconchamiento ni agrietamiento vertical</li> </ul>	0.6	1.0	1.0



Componente	Modo de comportamiento	Descripción (a partir de observación)	Intensidad de daño	Descripción de daño (uno o más elementos)	Valores de $\lambda$		
					$\lambda_K$	$\lambda_R$	$\lambda_D$
		Ocurre cuando el muro está reforzado horizontalmente, ya sea por medio de barras o alambres dentro de las juntas o por mallas de alambre soldado, cuya resistencia es superior a la resistencia al aplastamiento de la mampostería. Esta última es menor que la resistencia a compresión simple en virtud de la ocurrencia de agrietamiento oblicuo al eje del puntal inclinado que se desarrolla en el muro para resistir la carga lateral.	Moderado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>G &lt; 3</math> mm</li> <li>• <math>GI &lt; 3</math> mm y</li> <li>• <math>GI &lt; 0.2</math> mm que penetran en los extremos de los castillos y</li> <li>• Desconchamiento moderado de mampostería (especialmente de paredes exteriores de piezas huecas o multiperforadas) y/o concreto en la punta del muro y</li> <li>• Sin pandeo ni fractura del refuerzo y</li> <li>• Sin <math>DR</math> significativo</li> </ul>	0.4	0.8	0.9
			Severo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>GI &lt; 3</math> mm, distribuido en una o dos grietas o</li> <li>• <math>GI &lt; 3</math> mm en varias grietas (si el muro tiene refuerzo horizontal y éste no se ha fracturado) y</li> <li>• Aplastamiento de piezas en la parte media y media superior del muro y</li> <li>• <math>GI &gt; 2</math> mm en los extremos de los castillos</li> <li>• <math>DR</math> elevado (<math>&gt; 0.003</math> veces la altura del muro o del segmento de muro)</li> </ul>	ND	ND	ND
<b>MMC1e</b>  <b>Muro en voladizo o segmento de muro fuerte</b>	Flexión-cortante por deslizamiento	El daño se evidencia por mortero de la junta pulverizado en la base del muro. Para deslizamientos importantes, se llega a observar aplastamiento en la hilada inferior del muro.	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	• Similar a MMR1a o MMR1b	0.5	0.9	1.0
			Moderado	• Similar a MMR1a o MMR1b, con grietas más extendidas	0.2	0.8	0.9
			Severo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Similar a MMR1a o MMR1b, con desconchamiento y aplastamiento en la hilada inferior y</li> <li>• Muro desfasado por <math>DR</math> significativo (<math>&gt; 0.003</math> veces la altura del muro o del segmento de muro)</li> </ul>	ND	ND	ND
<b>MMC1f</b>  <b>Muro en voladizo o segmento de muro fuerte</b>	Flexión fuera de plano	Como ocurre con modos de falla inestables, no hay mucho daño antes de la falla. Rara vez se presenta en muros de carga. Su falla es más frecuente en bardas limitrofes, las cuales trabajan en voladizo. La falla inicia tras la aparición de grietas horizontales de flexión y deformaciones unitarias elevadas en el acero que atraviesa esas grietas. Después de la ocurrencia de la falla, el muro exhibirá un desplazamiento fuera del plano, aplastamiento localizado e incluso el volteo completo de la barda o de un segmento de ella.	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>G &lt; 2</math> mm y</li> <li>• Sin desconchamiento ni agrietamiento vertical y</li> <li>• <math>DR</math> imperceptible</li> </ul>	0.6	1.0	1.0
			Moderado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>G &lt; 4</math> mm y</li> <li>• Desconchamiento moderado de mampostería (paredes exteriores de piezas huecas) y/o concreto y</li> <li>• Sin pandeo ni fractura del refuerzo y</li> <li>• Sin <math>DR</math> visible a simple vista</li> </ul>	0.4	0.9	1.0
			Severo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Punta del muro a compresión pandeado (por efecto de cargas en el plano más flexión fuera del plano) o</li> <li>• <math>G &gt; 4</math> mm en la base del muro</li> <li>• Refuerzo expuesto y/o fracturado y</li> <li>• Posible desplazamiento lateral de piezas</li> <li>• Aplastamiento y desconchamiento localizados</li> </ul>	0.4	0.5	0.5



Componente	Modo de comportamiento	Descripción (a partir de observación)	Intensidad de daño	Descripción de daño (uno o más elementos)	Valores de $\lambda$		
					$\lambda_K$	$\lambda_R$	$\lambda_D$
MMC1h  Muro en voladizo o segmento de muro fuerte	Flexión y fallas por adherencia en traslapes	Son muros que, controlados por flexión o flexión-tensión diagonal, su resistencia es determinada por el deslizamiento y falla en el traslape del refuerzo vertical en la base del muro. El daño es similar a MM1a y MM1b hasta que falla el traslape por adherencia. El deslizamiento a lo largo del traslape se traduce en grietas verticales paralelas a las barras traslapadas.	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	• $G < 2\text{ mm}$ y • Sin desconchamiento ni agrietamiento vertical	0.6	1.0	1.0
			Moderado	• $G < 2\text{ mm}$ y • Desconchamiento moderado de mampostería (especialmente de paredes exteriores de piezas huecas o multiperforadas) en la punta del muro y • Agrietamiento vertical en la punta del muro	0.4	0.5	0.8
			Severo	• Agrietamiento vertical, paralelo al refuerzo longitudinal del castillo y • Desconchamiento del concreto a lo largo del traslape, exponiendo el acero de refuerzo	ND	ND	ND
MMC2f  Segmento de muro débil	Tensión diagonal pura	El daño es similar a MMC1c para bajas intensidades. Para mayores niveles de daño, las grietas inclinadas son de mayor ancho que las horizontales (por flexión). Prácticamente no hay grietas horizontales. Se puede observar aplastamiento de piezas o desprendimiento de paredes exteriores de piezas huecas hacia el centro del muro y/o en los extremos del muro.	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	• $GI < 1\text{ mm}$ y • $G$ por flexión $< 1\text{ mm}$ y • Sin desconchamiento significativo ni agrietamiento vertical.	0.6	1.0	1.0
			Moderado	• $GI < 5\text{ mm}$ concentradas en una o dos grietas y • $GI < 0.2\text{ mm}$ que penetró en los castillos. • Sin desconchamiento significativo ni agrietamiento vertical	0.5	0.8	0.9
			Severo	• $GI > 5\text{ mm}$ y • $GI > 5\text{ mm}$ que penetró en los castillos • Refuerzo longitudinal de los castillos doblado o fracturado • Aplastamiento o desconchamiento en el centro del muro o en los extremos del muro • $DR > 0.003$ veces la altura del edificio o del entrepiso más deformado	0.2	0.3	0.7
MMC3a  Viga de acoplamiento débil	Flexión	La falla por flexión de la dala rara vez ocurre, aunque en teoría podría ocurrir si los muros que une fallan por flexión.	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	• $G < 2\text{ mm}$ y • Sin desconchamiento significativo	0.8	0.9	1.0
			Moderado	• $G < 5\text{ mm}$ y • Desconchamiento en los extremos de vigas con extensión equivalente a un peralte de la dala (incluida la losa, si es monolítica)	0.6	0.8	1.0
			Severo	• Refuerzo fracturado • $G > 5\text{ mm}$ y • Desconchamiento o aplastamiento significativo en la sección dala-segmento de muro	0.2	0.5	0.7



## 6.4 ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA REFORZADA INTERIORMENTE

Las estructuras de mampostería reforzada interiormente son aquellas que cuentan con barras de acero de refuerzo, horizontales y verticales dentro del muro. Esta modalidad de mampostería requiere, por tanto, de piezas huecas de concreto o de arcilla. Con respecto al relleno de las celdas de las piezas huecas, la mampostería reforzada interiormente puede ser rellena de manera total o parcial. En el primer caso, todas las celdas se rellenan con concreto o mortero fluido, independientemente de que alojen o no refuerzo vertical; en la parcialmente rellena, sólo se coloca mortero fluido en aquellas celdas reforzadas. El comportamiento de la mampostería totalmente rellena se aproxima al de muros de concreto.

En comparación con el uso de la mampostería confinada, la mampostería reforzada interiormente es escasa en México. Se ha observado que su comportamiento sísmico depende de la calidad del relleno de sus celdas. Si el relleno es insuficiente en la altura del muro y, según la modalidad, en la longitud del muro, su desempeño será más parecido al de un muro de mampostería simple.

En cuanto al sistema de piso y techo, por lo general, son a base de concreto, ya sea en forma de losas macizas de peralte constante, o bien, de losas prefabricadas del tipo vigueta y bovedilla.

### 6.4.1 Materiales y estructuración

Las normas de construcción en México, como las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería de la Ciudad de México, NTC-M (GobCdMx, 2017),

establecen requisitos para mampostería reforzada interiormente (figura 6.8).

En general, las propiedades mecánicas de piezas huecas de concreto y arcilla, a la compresión y a la flexión en el plano y fuera de él, son similares en términos de la capacidad de deformación inelástica y de disipación de energía. La mampostería de piezas huecas de arcilla puede desarrollar fallas más frágiles que las de concreto, caracterizadas por la separación de las caras externas del mortero fluido y su eventual desprendimiento. La mampostería de piezas de concreto, bien construida, tiene un comportamiento más homogéneo.

A nivel internacional, el comportamiento sísmico de la mampostería parcialmente rellena no está tan documentado como el de la modalidad totalmente rellena. Si bien el patrón de agrietamiento es similar entre ambas modalidades, la totalmente rellena resiste mayores fuerzas cortantes y tiene una mejor capacidad de deformación inelástica.

### 6.4.2 Componentes de muros de mampostería reforzada interiormente y modos de comportamiento

Los componentes de muros se pueden dividir en cuatro tipos (figura 6.9); son similares a los componentes de estructuras de concreto a base de muros (véase sección 7.3). La notación MMR se refiere a Muros de Mampostería Reforzada. En la tabla 6.5 se resumen las características de los tipos de componentes en muros de mampostería reforzada interiormente. Los tipos de componentes y modos de comportamiento que se presentan a continuación son para la modalidad totalmente rellena.

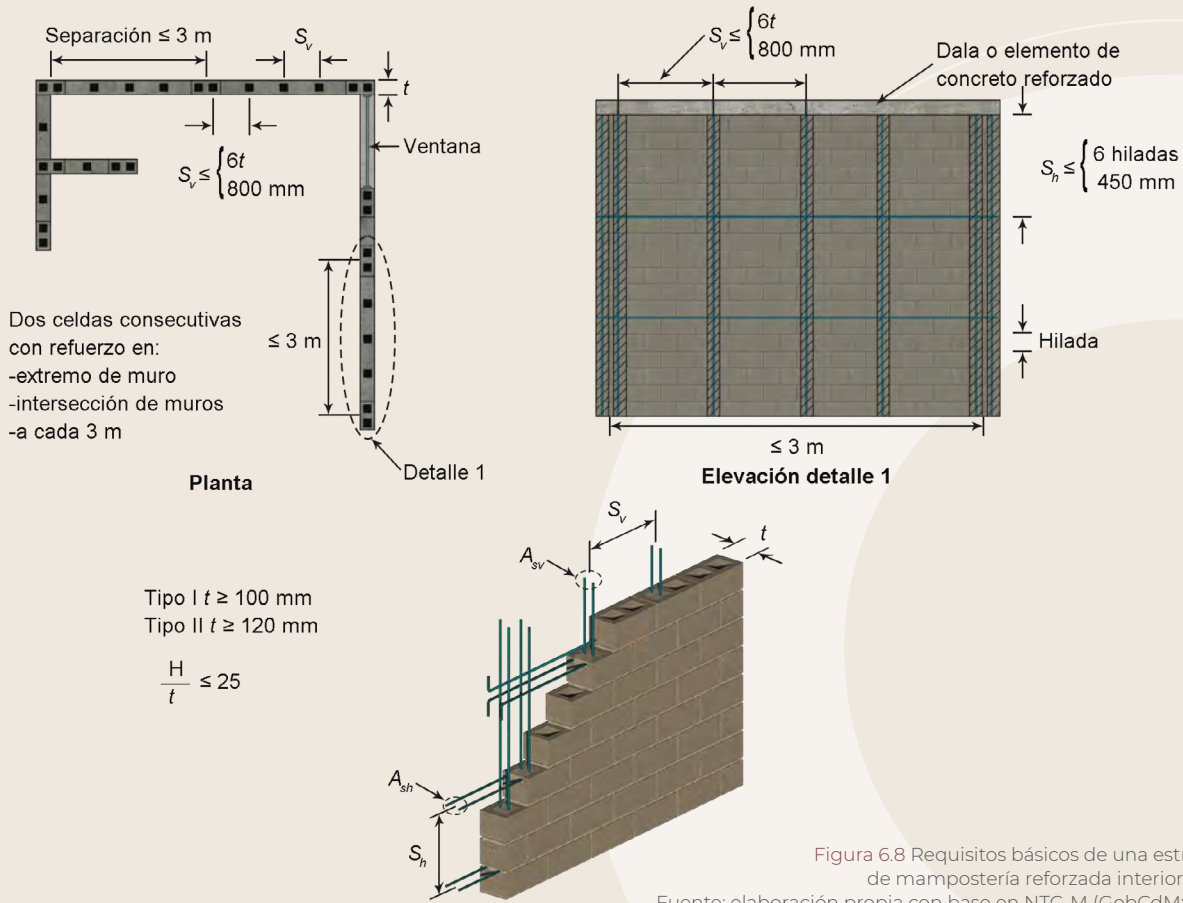
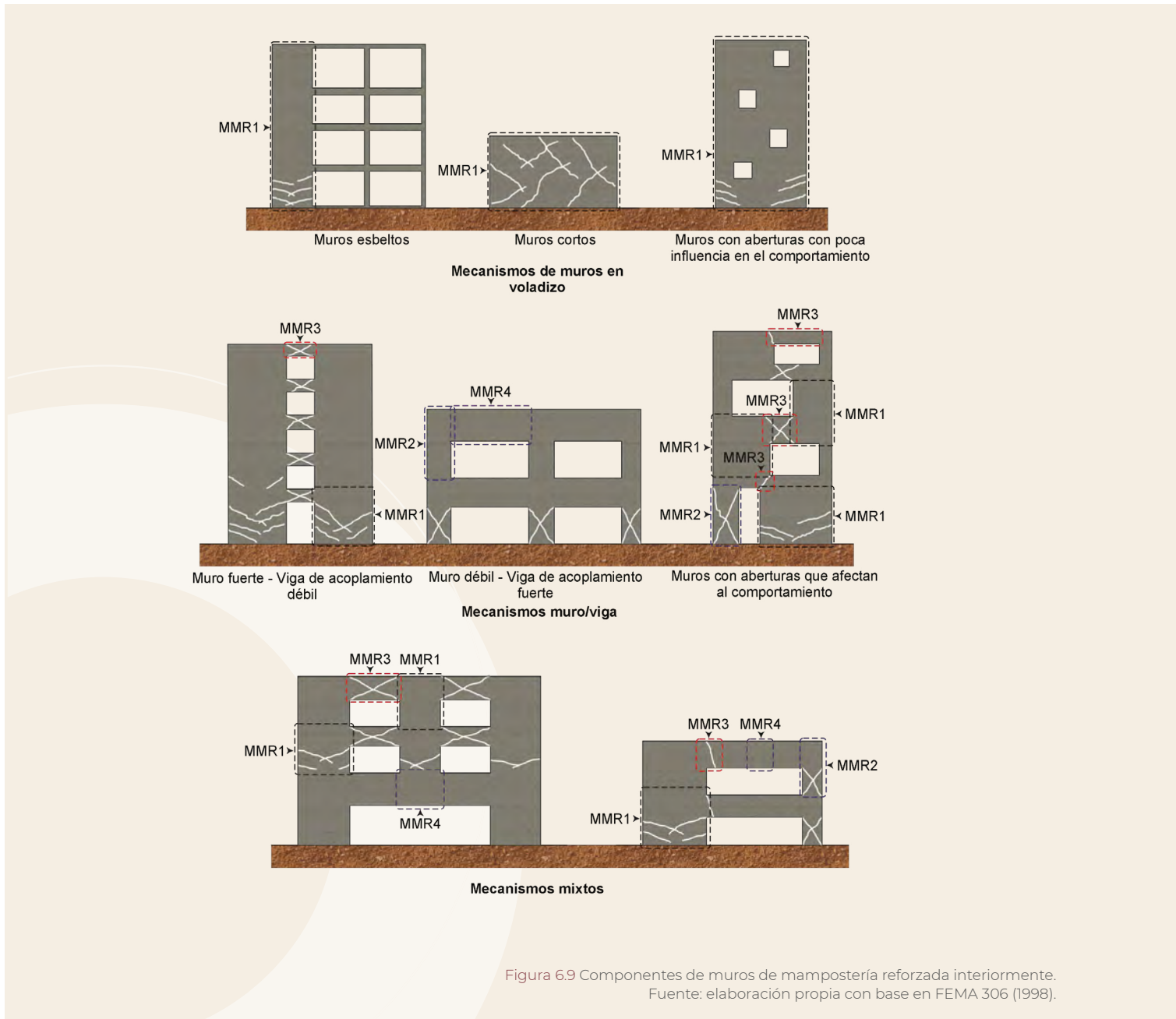


Figura 6.8 Requisitos básicos de una estructura de mampostería reforzada interiormente. Fuente: elaboración propia con base en NTC-M (GobCdmx, 2017).

Tabla 6.5 Tipos de componentes en muros de mampostería reforzada interiormente (MMR)

Tipo de componente		Descripción
MMR1	Muro en voladizo o segmento de muro fuerte	Este componente es más resistente a flexión y/o a fuerza cortante que las vigas que se unen a él, de modo que el comportamiento inelástico y daño se concentran en la base, ya sea con una falla a flexión (articulación plástica), a cortante o por cabeceo. Los muros pueden ser planos o tener patines, lo que modifica su comportamiento.
MMR2	Segmento de muro débil	Este componente es más débil a flexión y/o a fuerza cortante que las vigas, usualmente muy peraltadas, que se conectan a él. El daño se caracteriza por articulaciones plásticas en los extremos superior e inferior del segmento (menos probable), o por falla por cortante (más probable). Los muros pueden ser planos o tener patines, lo que modifica su comportamiento.
MMR3	Viga de acoplamiento débil	Este componente es más débil a flexión y/o a fuerza cortante que el segmento de muro al que está unido. El daño está generalmente controlado por cortante (tensión diagonal o deslizamiento), y menos frecuentemente por articulaciones plásticas en cada extremo.
MMR4	Viga de acoplamiento fuerte	Por lo regular, este componente no se daña, ya que es más resistente que el segmento al que está conectado.



En la tabla anterior, un componente es más resistente que otro al que está unido si sus resistencias, a flexión y/o a fuerza cortante, son superiores. Es factible que un componente sea más resistente a flexión, por ejemplo, pero menos a fuerza cortante, de forma que su comportamiento quede controlado por ésta.

En el cuadro 6.3 se describen de manera breve los modos de comportamiento de muros de

mampostería reforzada interiormente. Estas fallas se pueden acentuar por una deficiente colocación del mortero/concreto fluido. Si los muros no cuentan con la cantidad de refuerzo requerido en las normas de construcción, su comportamiento será más cercano al de la mampostería simple.

Adyacentes a cada explicación, se muestran fotografías de los modos de comportamiento observados en el campo. En la figura 6.10 se

presentan los modos de comportamiento en una construcción idealizada de mampostería reforzada interiormente. Esta figura no debe interpretarse como que todos los modos de comportamiento pueden ocurrir de manera simultánea. Existe

una jerarquía de modos de comportamiento que depende de la estructuración, las dimensiones de muros, las propiedades mecánicas de los materiales, la calidad de la construcción y mantenimiento, entre otros elementos.

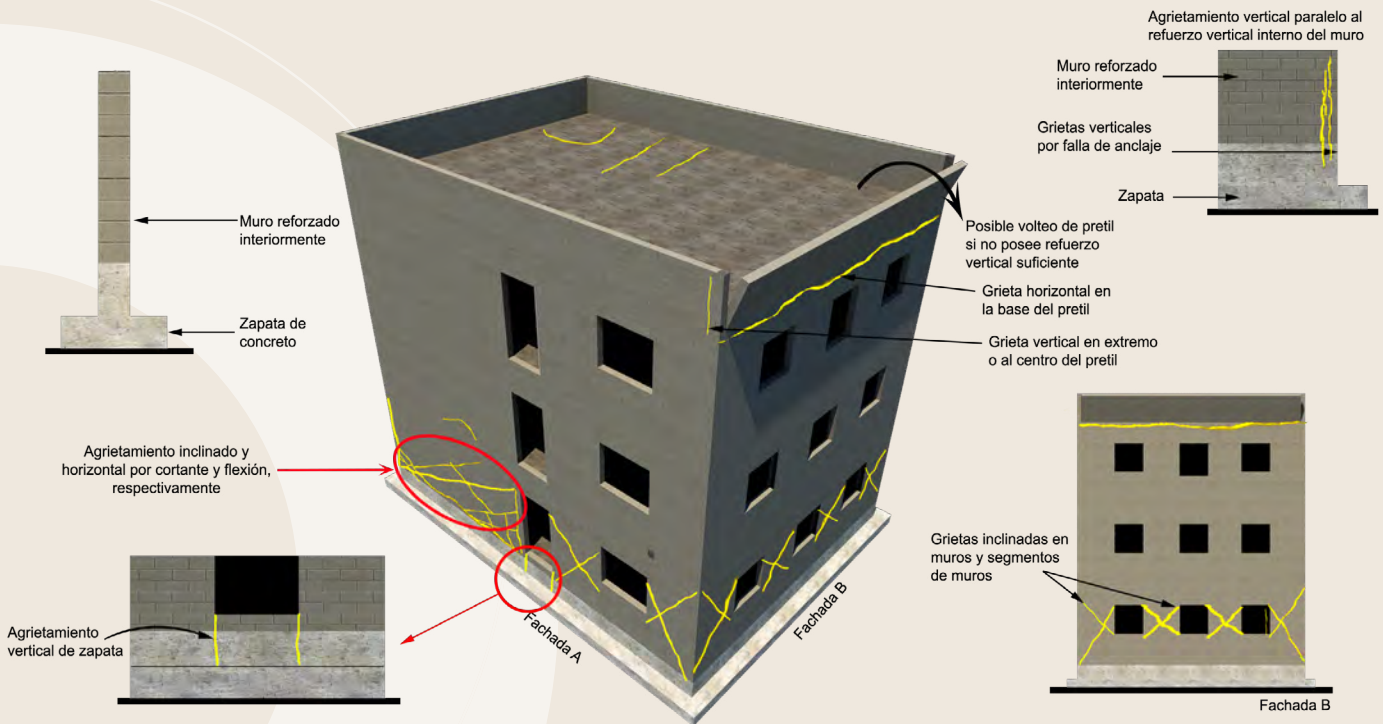


Figura 6.10 Modos de comportamiento en una construcción idealizada de mampostería reforzada interiormente. Fuente: elaboración propia.

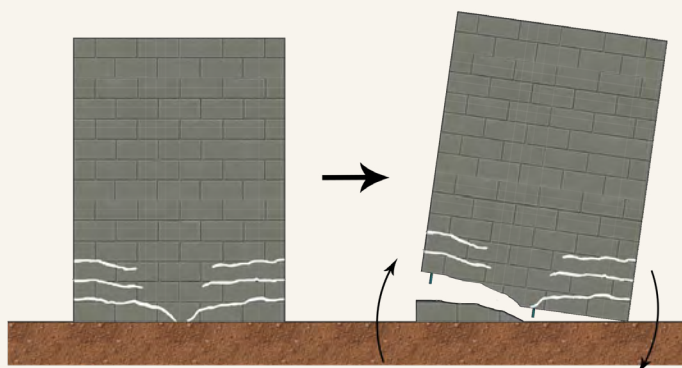
### Cuadro 6.3 Descripción de los modos de comportamiento de estructuras de mampostería reforzada interiormente

- a. Flexión. Si bien es el modo de falla más deseable por su estabilidad en resistencia y capacidad de deformación, rara vez se observa en estructuras existentes con varias décadas de antigüedad. Se caracteriza por agrietamiento horizontal en la base del muro, el cual se extiende en la altura del muro formando una articulación plástica. Esta extensión varía en función de la relación altura-longitud del muro y de la cuantía de refuerzo vertical.



Fuente: elaboración propia con base en FEMA 306 (1998).

- b. Cabeceo de la cimentación junto con el muro. Se produce cuando la cimentación se desprende durante el sismo. Es un modo de falla que permite disipar energía cada vez que el edificio golpea al suelo. Usualmente no conduce al colapso del edificio.



Fuente: elaboración propia con base en FEMA 306 (1998).

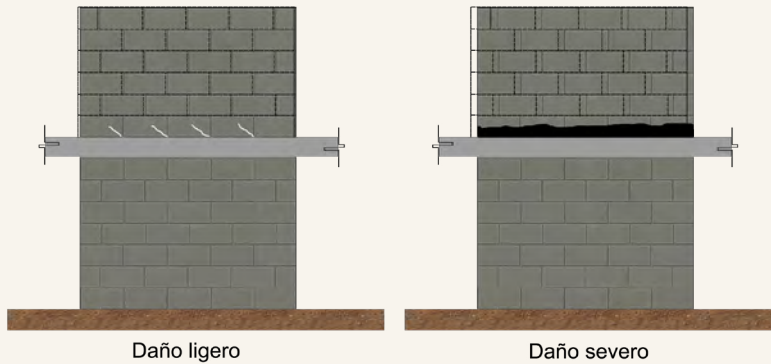
- c. Flexión-tensión diagonal. Inicia con la formación de una grieta a flexión en el talón del muro, lo cual provoca que la fuerza cortante, al redistribuirse hacia la punta, cause grieta por tensión diagonal (normalmente con una inclinación de 45 grados). Este agrietamiento degrada la resistencia a fuerza cortante del muro.



Fuente: elaboración propia con base en FEMA 306 (1998).

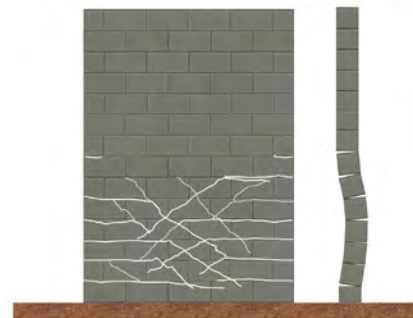


- d. Flexión-deslizamiento. Inicia con una grieta por flexión en el talón del muro y paulatinamente se extiende en toda la longitud. Ocurre cuando las cargas axiales son bajas, la cuantía de refuerzo vertical es baja o cuando el muro se ha desplazado lateralmente de forma significativa y se ha degradado el mecanismo de transmisión de cortante por fricción. Es un modo de falla que a grandes desplazamientos laterales se caracteriza por aplastamiento local de las primeras hiladas de mampostería, así como por doblez del refuerzo vertical.



Fuente: elaboración propia con base en FEMA 306 (1998).

- e. Flexión fuera de plano. Podría ocurrir en muros planos (sin patines y de bajo espesor) y esbeltos sujetos a grandes desplazamientos fuera del plano. Ocurre tras elevadas deformaciones unitarias en el acero de refuerzo vertical que causan inestabilidad en la zona a compresión durante la flexión fuera de plano. Es un modo de falla frecuentemente observado en bardas muy largas, o bien, que han perdido o visto disminuida su resistencia a flexión debido a la corrosión del acero de refuerzo vertical en el interior de los muros.



Fuente: elaboración propia con base en FEMA 306 (1998).

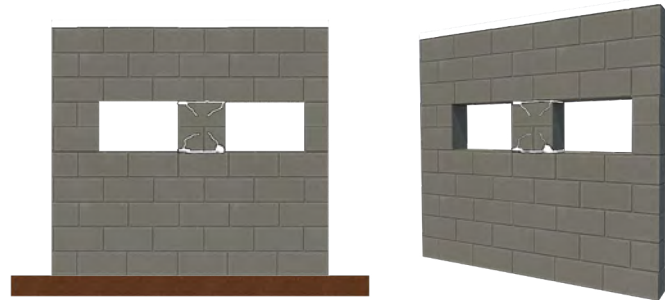
- f. Flexión y fallas por adherencia en traslapes. Ocurre cuando las barras en la base del muro ("disparos") tienen una longitud insuficiente. La falla se hace evidente por medio de grietas verticales a la altura de los traslapes y el eventual aplastamiento de la mampostería en la punta del muro. La falla de adherencia puede producir el cabeceo del muro sobre la cimentación.



Fuente: elaboración propia con base en FEMA 306 (1998).



- g. Cabeceo de muros o segmentos de muros. Una vez que el segmento de muros se agrieta a flexión (grieta horizontal) en su talón, el muro o segmento de muro trabaja como un cuerpo rígido que gira alrededor de la punta. Ese tipo de falla se da en muros resistentes, con carga axial baja (pocos pisos) y en segmentos de muro esbeltos (más altos que largos). Un daño excesivo de los segmentos puede conducir a una falla fuera de plano.



Fuente: elaboración propia con base en FEMA 306 (1998).

- h. Tensión diagonal pura. Se forma prácticamente sin agrietamiento a flexión. El daño se caracteriza por una o dos grietas inclinadas de gran ancho, con aplastamiento y desconchamiento de la mampostería en el centro del segmento o muro.
- » Se caracteriza por grietas inclinadas (letra X) a través de mortero y piezas cuando el mortero es resistente, las piezas son de baja resistencia y los esfuerzos axiales son altos, en términos relativos. En virtud de que es un modo de falla muy frágil puede conducir a pérdida de la capacidad de carga vertical. Las grietas usualmente penetran la punta del muro, lo que provoca que los triángulos superior e inferior, delimitados por la grieta inclinada, se separen.
  - » Otra forma de agrietamiento por tensión diagonal es siguiendo las juntas en forma de escalera. Éste ocurre en mamposterías con morteros de baja resistencia, piezas resistentes y esfuerzos axiales bajos, en términos relativos. Se conoce como "falla por cortante".



Fuente: archivo personal de Sergio Alcocer (1999).

- i. Deslizamiento puro del muro en su base. Es una variación del modo "flexión-deslizamiento" en la que no se alcanza a desarrollar la resistencia a flexión, tal que el deslizamiento en la superficie de contacto del muro con la cimentación facilita grandes desplazamientos sin una considerable disipación de energía. El daño se caracteriza por muy bajo agrietamiento, aplastamiento y desprendimiento concentrados en la primera hilada de mampostería.



Fuente: elaboración propia con base en FEMA 306 (1998).



En la tabla 6.6 se describen los modos de comportamiento más usuales y los daños asociados por componente estructural de estructuras a base de muros de mampostería reforzada interiormente. El daño observable se presenta para tres intensidades de daño (ligero, moderado y severo). Para cada intensidad, se incluyen los factores  $\lambda$  que se recomienda aplicar al cálculo de la rigidez, resistencia y capacidad de deformación para considerar el efecto del daño. Para nivel de daño nulo, el valor de los factores  $\lambda$  es igual a 1.

En la tabla, el significado de las letras es:

- Al final del nombre del componente (a, b, f...), se refiere al modo de comportamiento descrito en el cuadro 6.3.

- **G**: grieta perpendicular al eje, usualmente por flexión, mm.
- **GI**: grieta inclinada, mm.
- **DR**: desplazamiento horizontal residual de la estructura o del entrepiso más deformado, mm.
- **ND**: no disponible (para este nivel de daño, los valores de  $\lambda$  son cercanos a cero).
- $\lambda_D$ : factor reductor de la capacidad de desplazamiento en función del nivel de daño en el elemento estructural.
- $\lambda_K$ : factor reductor de la rigidez lateral que depende del nivel de daño en el elemento estructural.
- $\lambda_R$ : factor reductor de la resistencia lateral en función del nivel de daño del elemento estructural.

**Tabla 6.6 Modos de comportamiento, daños asociados y factores reductivos  $\lambda$  para daños ligeros, moderados y severos en estructuras a base de muros de mampostería reforzada interiormente**

Componente	Modo de comportamiento	Descripción (a partir de observación)	Intensidad de daño	Descripción de daño (uno o más elementos)	Valores de $\lambda$		
					$\lambda_K$	$\lambda_R$	$\lambda_D$
MMR1a Muro en voladizo o segmento de muro fuerte	Flexión	El agrietamiento por flexión se concentra en una articulación plástica cuya extensión es igual a dos veces la longitud del muro, aproximadamente. El daño se caracteriza por grietas horizontales e inclinadas, estas últimas de anchos pequeños (1.5 mm). Si el daño por cortante se concentra en una o dos grietas inclinadas, el comportamiento será por flexión-cortante o por tensión diagonal pura. Si el daño se expresa por un desfase del muro en su base, puede ser indicativo de falla por flexión-cortante por deslizamiento. Ocurre en muros con suficiente refuerzo horizontal que permite el desarrollo de una articulación plástica mediante la fluencia del refuerzo vertical.	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	• $G < 3$ mm y • Sin desconchamiento ni agrietamiento vertical	0.6	1.0	1.0
			Moderado	• $G < 3$ mm y • Desconchamiento moderado de mampostería (paredes exteriores de piezas huecas) y punta del muro y • Sin pandeo ni fractura del refuerzo y • Sin DR significativo	0.4	0.9	1.0
			Severo	• Refuerzo fracturado y • $G > 3$ mm • DR elevado (> 0.01 veces la altura del muro o del segmento de muro) • Desconchamiento o aplastamiento extendido y • Acero fracturado o pandeado	ND	ND	ND
MMR1c Muro en voladizo o segmento de muro fuerte	Flexión-tensión diagonal	El daño se localiza en la base del muro, dentro de la articulación plástica. Predomina el agrietamiento inclinado; a grandes intensidades de daño, se concentra en una o dos grietas inclinadas.	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	• $G < 3$ mm y • Sin desconchamiento ni agrietamiento vertical	0.6	1.0	1.0
			Moderado	• $G < 5$ mm y • Desconchamiento moderado de mampostería (paredes exteriores de piezas huecas) y punta del muro y • Sin pandeo ni fractura del refuerzo y • Sin DR significativo	0.4	0.9	1.0





Componente	Modo de comportamiento	Descripción (a partir de observación)	Intensidad de daño	Descripción de daño (uno o más elementos)	Valores de $\lambda$		
					$\lambda_K$	$\lambda_R$	$\lambda_D$
			Severo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Refuerzo fracturado y</li> <li><math>G &gt; 5</math> mm, normalmente concentrado en una grieta y</li> <li><math>GI &gt; 5</math> mm, concentrado en una o dos grietas inclinadas y</li> <li><math>DR</math> elevado (<math>&gt; 0.003</math> veces la altura del muro o del segmento de muro), y</li> <li>Desconchamiento o aplastamiento en el talón y punta del muro sobre una a dos veces el peralte de la hilada y</li> <li>Acero fracturado o pandeado</li> </ul>	ND	ND	ND
MMR1d  Muro en voladizo o segmento de muro fuerte	Flexión-cortante por deslizamiento	El daño se evidencia por mortero de la junta pulverizado en la base del muro. También se pueden presentar grietas inclinadas coincidentes con las celdas rellenas. Para deslizamientos importantes, se llega a observar aplastamiento en la hilada inferior del muro.	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	• Similar a MMR1a o MMR1b	0.5	0.9	1.0
			Moderado	• Similar a MMR1a o MMR1b, con grietas más extendidas	0.2	0.8	0.9
			Severo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Similar a MMR1a o MMR1b, con desconchamiento y aplastamiento en la hilada inferior y</li> <li>Muro desfasado por <math>DR</math> significativo</li> </ul>	ND	ND	ND
MMR1e  Muro en voladizo o segmento de muro fuerte	Flexión fuera de plano	Como ocurre con modos de falla inestables, no hay mucho daño antes de la falla. La falla por pandeo de la punta del muro a compresión ocurre tras la aparición de grietas horizontales de flexión y deformaciones unitarias elevadas en el acero que atraviesa esas grietas. Si aparecen distribuidas en la zona de la articulación plástica, serán indicativas de una falla incipiente. Después de la ocurrencia de la falla, el muro exhibirá un desplazamiento fuera de plano, así como aplastamiento localizado.	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>G &lt; 3</math> mm y</li> <li>Sin desconchamiento ni agrietamiento vertical</li> </ul>	0.6	1.0	1.0
			Moderado	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>G &lt; 3</math> mm y</li> <li>Desconchamiento moderado de mampostería (paredes exteriores de piezas huecas) y punta del muro y</li> <li>Sin pandeo ni fractura del refuerzo y</li> <li>Sin <math>DR</math> significativo</li> </ul>	0.4	0.9	1.0
			Severo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Punta del muro a compresión pandeado</li> <li>Refuerzo fracturado y</li> <li>Agrietamiento por flexión considerable</li> <li>Desplazamiento lateral de piezas</li> <li>Aplastamiento y desconchamiento localizados</li> </ul>	0.4	0.5	0.5
MMR1f  Muro en voladizo o segmento de muro fuerte	Flexión y fallas por adherencia en traslapes	Son muros que, controlados por flexión o flexión-tensión diagonal, alcanzan su resistencia controlada por el deslizamiento y falla en el traslape del refuerzo vertical en la base del muro. El daño es similar a MMR1a y MMR1b hasta que falla el traslape. El deslizamiento a lo largo del traslape se traduce en grietas verticales paralelas a las barras traslapadas.	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>G &lt; 3</math> mm y</li> <li>Sin desconchamiento ni agrietamiento vertical</li> </ul>	0.6	1.0	1.0
			Moderado	• Agrietamiento vertical en la punta del muro	0.4	0.5	0.8
			Severo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Desprendimiento de paredes exteriores de piezas huecas en la punta del muro</li> <li>Aplastamiento de paredes exteriores de piezas huecas</li> <li>Agrietamiento por flexión y aplastamiento de piezas en la base del muro</li> <li>Mortero pulverizado en la base del muro</li> </ul>	ND	ND	ND
MMR2c Segmento de muro débil	Flexión-tensión diagonal	El daño se puede localizar en el primer piso (planta baja) y se puede extender hacia arriba. Aparecen grietas horizontales e inclinadas, predominando éstas en forma de grietas diagonales, independientes de las de flexión.  A grandes intensidades de daño, el agrietamiento parece concentrado en una o dos grietas diagonales.	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>G &lt; 3</math> mm y</li> <li>Desconchamiento moderado de paredes externas de piezas o grietas verticales en la punta a compresión del muro y</li> <li>Sin pandeo o fractura del refuerzo y</li> <li>Sin <math>DR</math> significativo</li> </ul>	0.6	1.0	1.0



Componente	Modo de comportamiento	Descripción (a partir de observación)	Intensidad de daño	Descripción de daño (uno o más elementos)	Valores de $\lambda$		
					$\lambda_K$	$\lambda_R$	$\lambda_D$
			Moderado	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>G &lt; 5</math> mm</li> <li>Desconchamiento moderado de paredes externas de piezas o grietas verticales en la punta a compresión del muro y</li> <li>Sin pandeo o fractura del refuerzo y</li> <li>Sin <math>DR</math> significativo</li> </ul>	0.4	0.8	0.9
			Severo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fractura del refuerzo y</li> <li><math>G &gt; 5</math> mm en una grieta y</li> <li><math>GI</math> en una o dos grietas</li> <li>Aplastamiento o desconchamiento extendido en extremos de muros y desprendimiento de paredes exteriores de piezas huecas</li> </ul>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>
MMR2h Segmento de muro débil	Tensión diagonal pura	El daño es similar a MMR2b para bajas intensidades. Para mayores niveles de daño, las grietas inclinadas son de mayor ancho que las horizontales (por flexión). Se puede observar aplastamiento o desprendimiento de paredes exteriores de piezas huecas, hacia el centro del muro y/o en los extremos del muro.	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>G &lt; 1.5</math> mm y</li> <li>Sin desconchamiento significativo ni agrietamiento vertical</li> </ul>	0.8	1.0	1.0
			Moderado	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>GI &lt; 1.5</math> mm, concentradas en una o dos grietas, y</li> <li>Sin desconchamiento significativo ni agrietamiento vertical</li> </ul>	0.5	0.8	0.9
			Severo	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>GI &gt; 10</math> mm</li> <li>Refuerzo fracturado</li> <li>Aplastamiento o desconchamiento en el centro del muro o en punta y talón del muro</li> </ul>	0.3	0.4	0.5
MMR3a Viga de acoplamiento débil	Flexión	Ocurre en marcos de mampostería reforzada, en los cuales el daño se concentra en la zona de articulación plástica.	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>G &lt; 3</math> mm y</li> <li>Sin desconchamiento significativo</li> </ul>	0.8	0.9	1.0
			Moderado	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>G &lt; 5</math> mm y</li> <li>Desconchamiento en los extremos de vigas con extensión equivalente a un espesor de hilada</li> </ul>	0.6	0.8	1.0
			Severo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Refuerzo fracturado</li> <li><math>G &gt; 10</math> mm, y</li> <li>Desconchamiento o aplastamiento significativo en la sección viga-segmento de muro</li> </ul>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>
MMR3h Viga de acoplamiento débil	Tensión diagonal pura	Ocurre en vigas cuyo refuerzo transversal es insuficiente para evitar una falla controlada por cortante. El agrietamiento puede aparecer como continuación de grietas en losas o en muros, tal que se debe revisar de manera integral y no sólo la viga aislada.	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	• $G < 1$ mm	0.9	1.0	1.0
			Moderado	• $G < 3$ mm	0.8	0.8	1.0
			Severo	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>G &gt; 3</math> mm</li> <li>Acero fracturado y</li> <li>Aplastamiento o desconchamiento en los extremos de la viga y</li> <li>Agrietamiento inclinado y/o desconchamiento al centro del muro</li> </ul>	0.3	0.5	0.9

# Comportamiento de estructuras de concreto

## 7.1 INTRODUCCIÓN

---

Las estructuras de concreto pueden ser coladas en sitio, prefabricadas o una combinación de las anteriores. Las estructuras coladas en sitio pueden sufrir daño por sismo por su carencia de detallado dúctil (en el caso de columnas y vigas), así como por deficiencias o ausencia de refuerzo de confinamiento en la unión viga-columna y en los extremos de muros de concreto. Si además del pobre diseño y detallado la estructura posee una configuración inadecuada, como irregularidades o falta de redundancia, su comportamiento tiende a deteriorarse muy rápidamente (véase

inciso 4.2.2). En estas condiciones, las estructuras de concreto pierden de manera acelerada su capacidad de resistir cargas laterales, rigidez y de deformación inelástica produciendo daños muy severos e, incluso, alcanzando el colapso parcial o total.

Con respecto a las estructuras prefabricadas, los principales puntos críticos son las juntas y conexiones. Es frecuente observar daños en ellos, los cuales, de ser severos, pueden conducir a colapsos locales o totales de un inmueble.

Los sistemas estructurales más comunes en estructuras de concreto colado en sitio y prefabricado son (figura 7.1):

- a. Marcos resistentes a momento.
- b. Muros de concreto.
- c. Muros diafragma en marcos de concreto.

Son comunes los edificios con sistemas estructurales que son resultado de la combinación de los anteriores.



a)



b)



c)

Figura 7.1 Sistemas estructurales comunes en edificios de concreto:  
a) a base de muros de concreto; b) marcos resistentes a momento; c) con muros diafragma de mampostería.  
Fuente: archivos personales de Sergio Alcocer (2019) y Rubén Bautista (2019).

### 7.1.1 Sistemas de piso y techo

Los sistemas de piso y techo de estructuras de concreto sirven como diafragmas horizontales para distribuir las fuerzas laterales inducidas por sismo entre los elementos o componentes verticales. Los sistemas de piso pueden ser (figura 7.2):

- a. Vigas y losas en una dirección.
- b. Vigas y losas en dos direcciones.

- c. Vigas y losas a base de viguetas.
- d. Losas planas macizas, apoyadas en vigas o planas.
- e. Losas planas reticulares (o encasetonadas), apoyadas perimetralmente en vigas o planas.

Las losas pueden ser de concreto reforzado con barras de acero corrugado, o bien, presforzadas o postensadas.



### 7.1.2 Marcos resistentes a momento

Los marcos de concreto pueden ser clasificados como dúctiles o no dúctiles. Su diferencia radica en el detallado de los elementos estructurales, en especial de la cuantía de estribos en vigas, columnas y nudos. Además de un mayor confinamiento del concreto mediante estribos, los marcos dúctiles de concreto requieren dimensiones de sus elementos que faciliten el desarrollo estable de articulaciones plásticas, acero de refuerzo con las características que permitan la plasticidad de una sección, así como longitudes de desarrollo, de uniones mediante traslapes y de anclaje adecuadas y ubicadas en las zonas de menor demanda sísmica dentro de los elementos. Estas zonas por lo regular se consideran en la mitad del claro o de

la altura de una viga o columna, respectivamente. Los marcos no dúctiles usualmente tienen menos estribos y a mayores separaciones, concreto mal confinado y, frecuentemente, estribos con dobles a 90 grados. En ocasiones, las longitudes de desarrollo y de traslape del refuerzo longitudinal son escasas. Lo anterior hace que su respuesta ante sismos se caracterice por daños moderados a severos e, incluso, colapsos. En ocasiones, su respuesta se ve agravada por la presencia de muros de altura media que producen el fenómeno de columna corta.

### 7.1.3 Muros de concreto

Los muros de concreto pueden ser de carga o no, dependiendo de su disposición y capacidad para

resistir cargas verticales y fuerzas horizontales. En general, los edificios a base de muros de concreto experimentan menores desplazamientos laterales que los marcos resistentes a momento. Estos menores desplazamientos laterales conducen a daños estructurales y no estructurales de intensidad más baja que los observados en marcos.

Un aspecto que controla el comportamiento de edificios a base de muros es la disposición en planta y el tamaño de éstos. Una disposición asimétrica produce deformaciones de torsión que, a su vez, causan concentraciones de desplazamientos, fuerzas y daño (véase inciso 4.2.2).

Los muros de edificios existentes con varios años de antigüedad no poseen elementos de refuerzo en los bordes (usualmente llamados elementos de borde). En muros modernos, estos elementos se diseñan y construyen para confinar el concreto en el pie y talón del muro y lograr así un comportamiento superior con una mayor capacidad de rotación del muro en la base.

Una zona crítica para lograr un buen comportamiento ante sismos es la junta constructiva o junta de colado. Es importante lograr un mecanismo de transmisión de cortante por fricción estable y resistente, lo cual requiere que esta junta esté limpia y posea una adecuada cuantía de refuerzo vertical. Es frecuente encontrar daño en la junta en estructuras existentes, ya sea porque no se limpió adecuadamente y/o porque el refuerzo perpendicular a la junta es escaso.

#### **7.1.4 Marcos de concreto con muros diafragma**

En México, el uso de muros diafragma en marcos de concreto es muy común. Los muros pueden ser de mampostería de piezas macizas de arcilla

(tabique de barro recocido) o de concreto (tabicón), o bien, de piezas huecas, ya sea de arcilla o de concreto (en ambos casos, piezas industrializadas). En edificios antiguos, los muros diafragma no fueron considerados y, por tanto, no fueron diseñados ni detallados para contribuir a la resistencia y rigidez laterales del edificio. En la mayoría de los casos, los muros diafragma son de mampostería simple o están reforzados con elementos de concreto en forma de letra X, denominados popularmente “cruces de San Andrés”. También se encuentran, con menos frecuencia, muros confinados o reforzados interiormente. Sin embargo, los muros con castillos adolecen de una dala en la parte superior, lo cual hace que se comporten más como muros de mampostería simple.

Es común que los refuerzos diagonales o cruces de San Andrés no funcionen de manera adecuada porque el anclaje del refuerzo longitudinal en los castillos de borde es insuficiente para desarrollar el esfuerzo especificado de fluencia (figura 7.3).

Debido al uso tan extendido de marcos con muros diafragma, los componentes y modos de comportamiento de marcos de concreto con muros diafragma se tratan en el capítulo 9.

## **7.2 MARCOS DE CONCRETO**

### **7.2.1 Componentes de marcos de concreto y sus modos de comportamiento**

Los componentes de marcos de concreto se pueden clasificar en cinco tipos posibles (figura 7.4). La denominación MCR se refiere a Marcos de Concreto Reforzado. Los tipos de componentes se enlistan y describen en la tabla 7.1.



Figura 7.3 Insuficiente longitud de anclaje del refuerzo de las "cruces de San Andrés".  
 Fuente: archivo personal de Sergio Alcocer (1997).

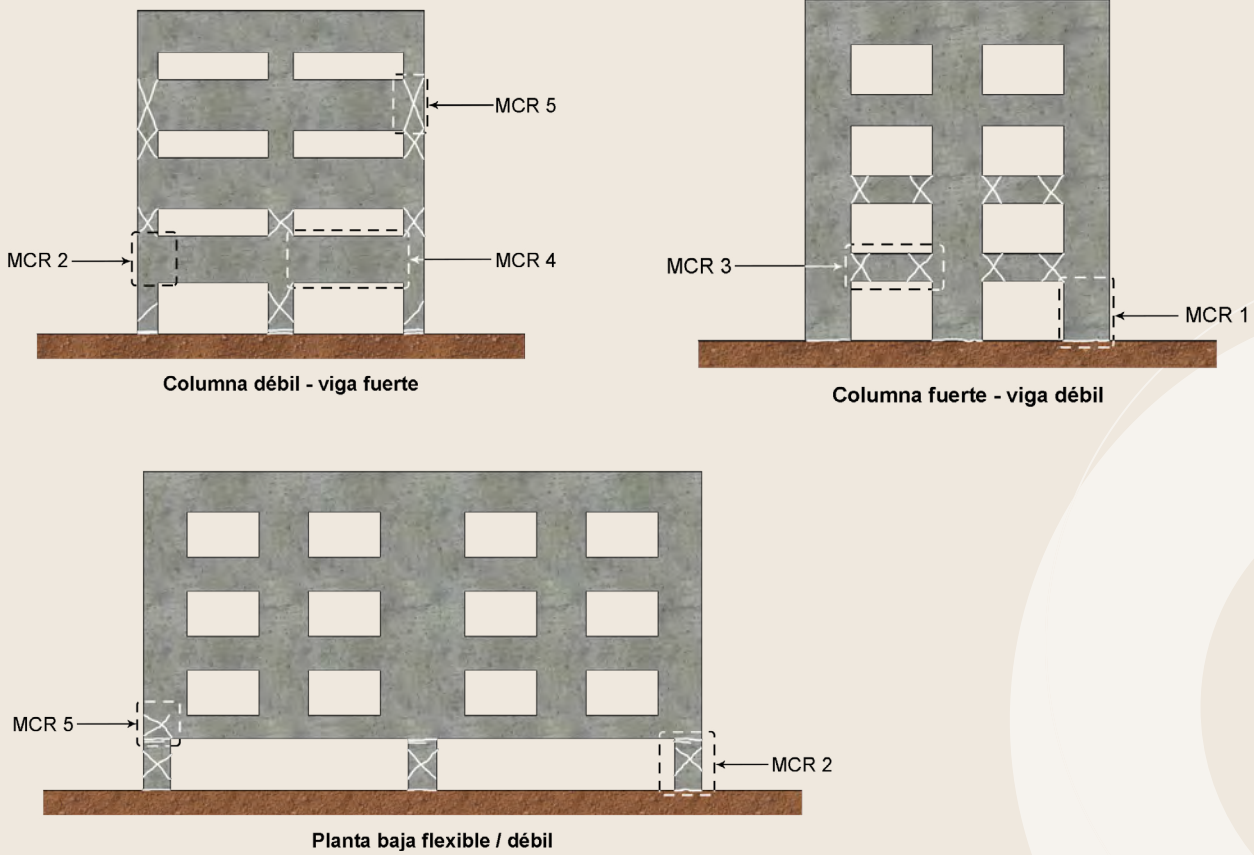


Figura 7.4 Componentes de marcos de concreto.  
 Fuente: elaboración propia.

Tabla 7.1 Tipos de componentes en marcos de concreto reforzado (MCR)

Tipo de componente		Descripción
MCR1	Columna fuerte	Este componente es más resistente a flexión y/o a fuerza cortante que las vigas que se unen a él, de modo que el comportamiento inelástico y el daño se concentran en las vigas y en la base de la columna, con una falla a flexión (articulación plástica), a cortante, por combinación flexión-cortante o por traslapes insuficientes.
MCR2	Columna débil	Este componente es más débil a flexión y/o a fuerza cortante que las vigas que se conectan a él. El daño se caracteriza por articulaciones plásticas en los extremos superior e inferior de la columna o por falla por cortante.
MCR3	Viga débil	Este componente es más débil a flexión y/o a fuerza cortante que la columna al que está unido. El daño está generalmente controlado por flexión (articulaciones plásticas en los extremos) o por cortante (tensión diagonal o por deslizamiento). El cortante por deslizamiento se manifiesta por una grieta vertical que atraviesa todo el peralte de la viga.
MCR4	Viga fuerte	Este componente usualmente no se daña, ya que es más resistente a flexión y/o a fuerza cortante que la columna a la que está conectada.
MCR5	Unión viga-columna	Este componente puede dañarse e, incluso, fallar por cortante (agrietamiento inclinado).

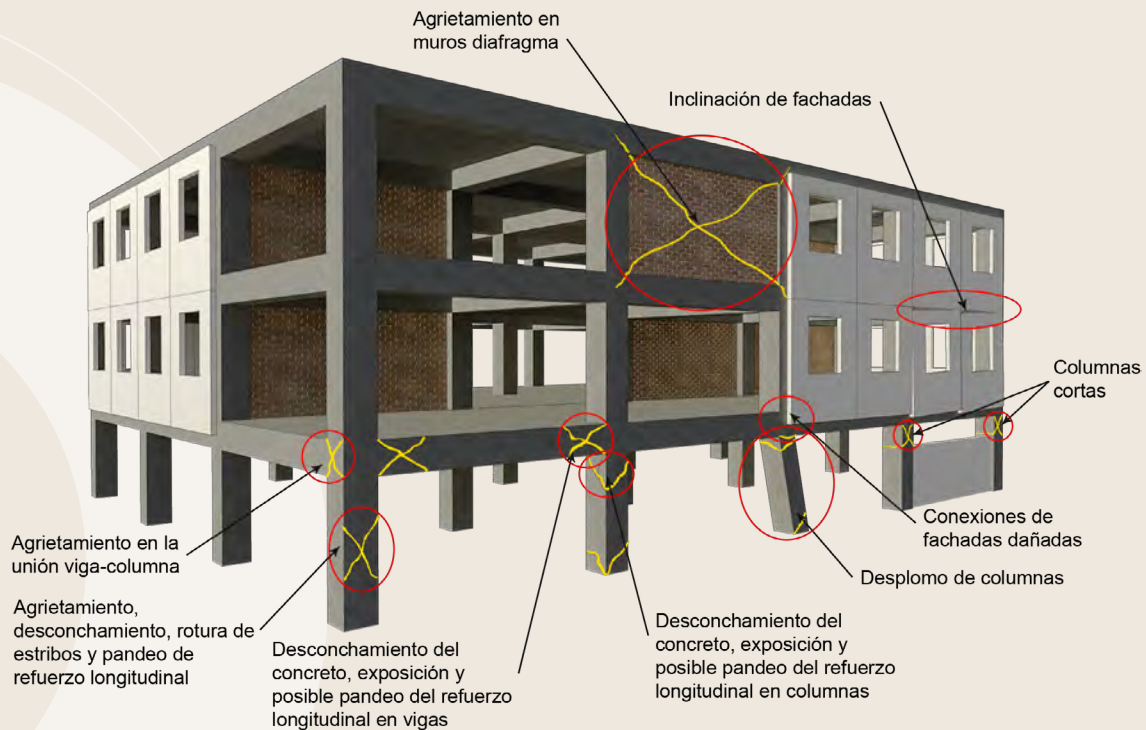


Figura 7.5 Modos de comportamiento en una construcción idealizada de marcos de concreto.  
Fuente: elaboración propia con base en MBIE (2014).



En la tabla anterior, un componente es más resistente que otro al que está unido si sus resistencias, a flexión y/o a fuerza cortante, son superiores. Es factible que un componente sea más resistente a flexión, por ejemplo, pero menos a fuerza cortante, de forma que su comportamiento quede controlado por ésta.

En el cuadro 7.1 se describen brevemente los modos de comportamiento de columnas y vigas de concreto. Estas fallas pueden ser más graves en los componentes que carecen de detallado dúctil. Junto a cada explicación se muestran

fotografías de los modos de comportamiento observados en el campo. En la figura 7.5 se presentan los modos de comportamiento en una construcción idealizada de marcos de concreto. Esta figura no debe interpretarse como que todos los modos de comportamiento pueden ocurrir simultáneamente. Existe una jerarquía de modos de comportamiento que depende de la estructuración, las dimensiones de vigas y columnas, las propiedades mecánicas de los materiales, la calidad de la construcción y mantenimiento, entre otros elementos.

Cuadro 7.1 Descripción de los modos de comportamiento de marcos de concreto

- a. Flexión. Es el modo de falla más deseable por su estabilidad en resistencia y capacidad de deformación; sin embargo, no es común observarlo en estructuras existentes con varias décadas de antigüedad. Se caracteriza por agrietamiento perpendicular al eje del elemento, en uno o en los dos extremos. En un modo de falla de flexión bien desarrollado, el agrietamiento se extiende en la viga o columna formando una articulación plástica. Esta extensión varía en función de la relación peralte-longitud del elemento y de la cuantía de refuerzo longitudinal. En estructuras existentes y sin detallado dúctil, el modo de falla se caracteriza por unas cuantas grietas de flexión de gran ancho, incluso de varios centímetros.



Fuente: cortesía del CENAPRED (2019) y del INIFED (2019).

- b. Flexión-tensión diagonal. Inicia con la formación de una grieta a flexión en la cara a tensión de la viga o columna, lo cual provoca que la fuerza cortante, al redistribuirse hacia el extremo a compresión, cause grietas por tensión diagonal (normalmente con una inclinación de 45 grados). Conforme las grietas se abren y la articulación plástica se degrada, se reduce la resistencia a fuerza cortante del elemento por debajo de la asociada a la flexión, dando lugar a un comportamiento controlado por fuerza cortante.



Fuente: cortesía de Halil Sezen (2020) y archivo personal de Sergio Alcocer (1997).

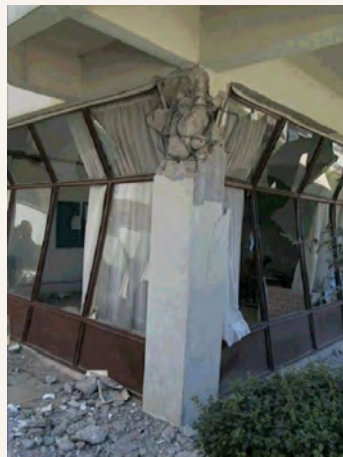


- c. Flexión-compresión diagonal. Ocurre en elementos con elevadas cuantías de refuerzo transversal (estribos) sujetos a fuerza cortante. Puede presentarse en columnas o vigas cortas (o peraltadas) o cuando tienen suficiente cuantía de refuerzo transversal para evitar una falla por tensión diagonal. También la exhiben columnas sujetas a elevadas cargas axiales. El aplastamiento ocurre tras ciclos y degradación por flexión. El aplastamiento está relacionado con el desplazamiento lateral impuesto al elemento. Se caracteriza por agrietamiento inclinado y aplastamiento del concreto hacia la mitad del elemento.



Fuente: archivo personal de Sergio Alcocer (1997).

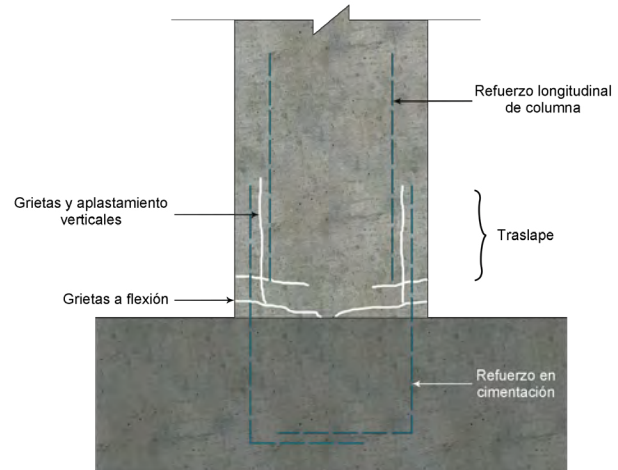
- d. Flexión y falla de compresión en extremo. Se presenta en columnas que desarrollan una falla por flexión en un inicio y que, debido a un confinamiento deficiente del núcleo de concreto, el comportamiento se deteriora por el aplastamiento del concreto e incluso por pandeo del refuerzo longitudinal. Este modo de falla puede verse agravado si en el extremo de la columna se tienen traslapes de refuerzo longitudinal. El daño en la zona de la articulación plástica podría deteriorar el mecanismo de adherencia en el traslape y reducirse o incluso perderse la capacidad de resistir momentos de la columna en esa zona. Este modo de falla ilustra la importancia de confinar el núcleo de concreto de una columna mediante estribos o zunchos a bajas separaciones y restringiendo las barras longitudinales distribuidas en el perímetro de la columna.



Fuente: archivo personal de Sergio Alcocer (1997).

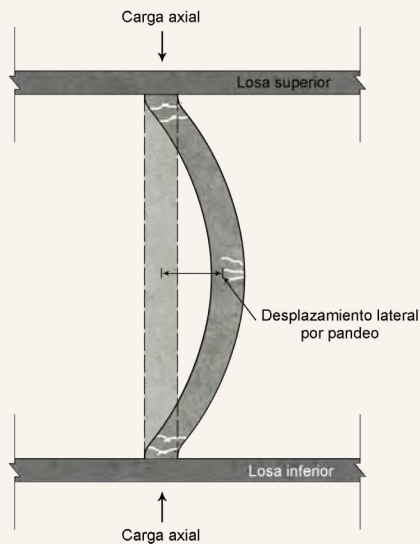


- e. Flexión y falla por adherencia en traslapes. Es frecuente que los edificios existentes tengan traslapes de barras longitudinales en las regiones de articulaciones plásticas de columnas (en su base, normalmente). Los traslapes empiezan a fallar y a deslizar a deformaciones unitarias a compresión en el concreto mayores que 0.002, a menos de que se haya colocado refuerzo transversal alrededor de los traslapes. Este deslizamiento se acompaña de grietas verticales, paralelas a las barras traslapadas. Una vez que los traslapes deslizan, la resistencia cae a un valor igual a la resistencia residual del traslape a tensión más la capacidad de momento que provee la carga axial.



Fuente: elaboración propia.

- f. Flexión y pandeo. Puede ocurrir en columnas esbeltas sujetas a cargas axiales considerables.



Fuente: elaboración propia.



- g. Tensión diagonal pura. Se forma prácticamente sin agrietamiento a flexión. El daño se caracteriza por una o dos grietas inclinadas de gran ancho, con aplastamiento y desconchamiento del concreto en el centro del elemento. Es el caso de columnas cortas generadas por la restricción que imponen muros de altura intermedia al desplazamiento lateral de la columna. Las fallas se ven agravadas por: a) la colocación de estribos con dobleces a 90 grados que tienden a abrirse conforme el núcleo de concreto se agrieta y se expande; b) separaciones de estribos iguales o mayores que un peralte del elemento.



Fuente: cortesía de Francisco García Jarque (2020) y archivo personal de Sergio Alcocer (2017).

- h. Falla por adherencia en traslapes. Sólo puede presentarse si la longitud del empalme es muy corta. La falla ocurriría a desplazamientos menores que los asociados a la resistencia a flexión. En el caso de columnas, eventualmente, se desprenderán de su base, ya sea en la cimentación en una losa de piso. En el caso de vigas, es usual en edificios existentes de varias décadas de antigüedad que el refuerzo longitudinal a momento positivo (es decir, en el lecho inferior) se haya interrumpido en el nudo y no sea continuo a través de la unión viga-columna. Si las barras se interrumpieron dentro del nudo, la resistencia a flexión positiva es prácticamente nula.



Fuente: archivo personal de Sergio Alcocer (1999).

- i. Falla por cortante en uniones viga-columna. Ocurre cuando las fuerzas cortantes que transmiten vigas o columnas conectadas en la unión exceden la resistencia a cortante del nudo. En uniones exteriores y de esquina, la resistencia a cortante del nudo depende de la cuantía de refuerzo transversal, principalmente. La mayoría de las estructuras existentes anteriores a 1985 carece de refuerzo transversal para confinar el nudo, de modo que este modo de comportamiento es usual en edificaciones existentes construidas antes de 1990.



Fuente: archivo personal de Sergio Alcocer (a. 1997), cortesía de James O. Jirsa (b. 1985) y del CENAPRED (c. 2017).

a)

b)

c)

En la tabla 7.2 se describen los modos de comportamiento más usuales y los daños asociados por componente estructural de estructuras a base de marcos de concreto. El daño observable se presenta para tres intensidades de daño (ligero, moderado y severo). Para cada intensidad, se incluyen los factores  $\lambda$  que se recomienda aplicar al cálculo de la rigidez, resistencia y capacidad de deformación para considerar el efecto del daño. Para nivel de daño nulo, el valor de los factores  $\lambda$  es igual a 1.

En la tabla, el significado de las letras es:

- Al final del nombre del componente (a, b, f...), se refiere al modo de comportamiento descrito en el cuadro 7.1.

- **G**: grieta perpendicular al eje, usualmente por flexión, mm.
- **GI**: grieta inclinada, mm.
- **DR**: desplazamiento horizontal residual de la estructura o del entrepiso más deformado, mm.
- **ND**: no disponible (para este nivel de daño los valores de  $\lambda$  son cercanos a cero).
- $\lambda_D$ : factor reductor de la capacidad de desplazamiento en función del nivel de daño en el elemento estructural.
- $\lambda_K$ : factor reductor de la rigidez lateral que depende del nivel de daño en el elemento estructural.
- $\lambda_R$ : factor reductor de la resistencia lateral en función del nivel de daño del elemento estructural.

Tabla 7.2 Modos de comportamiento, daños asociados y factores reductivos  $\lambda$  para daños ligeros, moderados y severos en estructuras a base de marcos de concreto

Componente	Modo de comportamiento	Descripción (a partir de observación)	Intensidad de daño	Descripción de daño (uno o más elementos)	Valores de $\lambda$		
					$\lambda_K$	$\lambda_R$	$\lambda_D$
MCR2a	Flexión en columnas	Se identifica por agrietamiento horizontal por flexión, usualmente en los extremos superior e inferior de columnas de un entrepiso. El agrietamiento se extiende hacia el centro de la columna en forma de grietas inclinadas de muy pequeño ancho, a lo largo de la articulación plástica de la columna. Normalmente, se registra mayor daño en el primer piso sobre banqueta (planta baja).  Ocurre en marcos con vigas más fuertes que columnas. Si la columna es de un edificio anterior a 1985, es probable que el daño sea de unas cuantas grietas de flexión de gran ancho. Puede evolucionar a un modo de comportamiento MCR2d. Si la estructura es posterior a 2004, es posible que el daño dentro de la articulación plástica de la columna se caracterice por grietas de menor ancho.	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	• $G < 5$ mm y • $GI < 3$ mm y • Sin desconchamiento ni agrietamiento vertical y • Sin pandeo ni fractura del refuerzo y • Sin <b>DR</b> significativo	0.6	1.0	1.0
			Moderado	• $G < 5$ mm • Desconchamiento o agrietamiento vertical en la punta del muro en la zona de la articulación plástica y • Sin pandeo ni fractura del refuerzo y • Sin <b>DR</b> significativo	0.5	0.8	0.9
			Severo	• Refuerzo fracturado • $G > 5$ mm, normalmente concentrado en una grieta • <b>DR</b> importante ( $> 0.015$ veces la altura de la columna) • Posible fractura del acero	0.2	0.3	0.7

Componente	Modo de comportamiento	Descripción (a partir de observación)	Intensidad de daño	Descripción de daño (uno o más elementos)	Valores de $\lambda$		
					$\lambda_K$	$\lambda_R$	$\lambda_D$
MCR2b	Flexión-tensión diagonal en columnas	<p>El daño se localiza en los extremos inferior y/o superior de la columna, usualmente dentro de la articulación plástica. Hacia el centro de la columna, predomina el agrietamiento inclinado; a grandes intensidades de daño, se concentra en una o dos grietas inclinadas.</p> <p>Ocurre porque la cuantía de refuerzo transversal (estribos o zunchos) es insuficiente, de modo que la resistencia a fuerza cortante es menor que la asociada a la flexión.</p>	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>GI &lt; 0.5</math> mm y</li> <li>• <math>G</math> por flexión <math>&lt; 1</math> mm y</li> <li>• Sin desconchamiento o agrietamiento vertical significativos</li> </ul>	0.8	1.0	1.0
			Moderado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>GI &lt; 2</math> mm y</li> <li>• <math>G</math> por flexión <math>&lt; 2</math> mm y</li> <li>• <math>GI &gt; 1.5</math> mm o desconchamiento en extremos de la columna y</li> <li>• Sin pandeo ni fractura de refuerzo y</li> <li>• Sin <math>DR</math> significativo</li> </ul>	0.5	0.8	0.9
			Severo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>GI &gt; 2</math> mm, concentrado en unas cuantas grietas</li> <li>• Posible fractura del acero</li> <li>• <math>DR &gt; 0.015</math> veces la altura del edificio o del entrepiso más deformado.</li> </ul>	0.2	0.3	0.7
MCR2d	Flexión-compresión en un extremo de columna	<p>Inicia como el comportamiento MCR2a. Debido a la escasez de refuerzo de confinamiento en los extremos de la columna, el recubrimiento y el núcleo de concreto se desconchan y aplastan. A grandes deformaciones se pandea el refuerzo longitudinal de la columna. Normalmente, ocurre en el extremo superior de la columna, debajo de la cara inferior de las vigas.</p> <p>Es un modo de falla indeseable de tipo frágil.</p>	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>GI &lt; 0.5</math> mm y</li> <li>• <math>G</math> por flexión <math>&lt; 1</math> mm y</li> <li>• Sin desconchamiento o agrietamiento vertical significativos</li> </ul>	0.8	1.0	1.0
			Moderado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>GI &lt; 1.5</math> mm y</li> <li>• <math>G &lt; 2</math> mm y</li> <li>• Desconchamiento limitado en extremos de la columna o <math>GI &gt; 1.5</math> mm y</li> <li>• Sin pandeo ni fractura de refuerzo y</li> <li>• Sin <math>DR</math> significativo</li> </ul>	0.5	0.8	0.9
			Severo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>GI &gt; 2</math> mm</li> <li>• <math>G &gt; 2</math> mm y</li> <li>• Desconchamiento significativo y</li> <li>• Posible pandeo del acero</li> <li>• <math>DR</math> significativo (<math>&gt; 0.015</math> veces la altura de la columna)</li> </ul>	0.2	0.3	0.7
MCR2e	Flexión y falla por adherencia en traslapes en columnas	<p>Son columnas cuyo comportamiento inicial está controlado por flexión o flexión-tensión diagonal. Sin embargo, alcanzan su resistencia cuando se produce el deslizamiento y la falla en el traslape del refuerzo vertical en la base de la columna. El daño es similar a MCR1a y MCR1b hasta que falla el traslape. El deslizamiento a lo largo del traslape se traduce en grietas verticales paralelas a las barras traslapadas.</p> <p>Es un modo de comportamiento poco usual en México.</p>	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>G &lt; 0.5</math> mm</li> <li>• Sin agrietamiento ni desconchamiento vertical</li> </ul>	0.8	1.0	1.0
			Moderado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>G &lt; 2</math> mm</li> <li>• <math>G</math> vertical sobre traslape <math>&gt; 1</math> mm</li> </ul>	0.4	0.6	0.8
			Severo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>G &gt; 2</math> mm y</li> <li>• <math>G</math> vertical sobre traslape <math>&gt; 1</math> mm y</li> <li>• Desconchamiento a lo largo del traslape y</li> <li>• Deslizamiento visible</li> </ul>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>
MCR2g	Tensión diagonal pura en columnas	<p>Si bien para bajos niveles de daño las características son similares a otros modos de comportamiento, pero sin grietas de flexión, las grietas inclinadas (por tensión diagonal) empiezan a controlar. Las grietas por flexión tienen menos de 3 mm de ancho, en virtud de que el refuerzo por flexión no fluye.</p>	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>GI &lt; 0.5</math> mm y</li> <li>• <math>G</math> por flexión <math>&lt; 1</math> mm y</li> <li>• Sin desconchamiento ni agrietamiento vertical y</li> <li>• Sin pandeo ni fractura del refuerzo y</li> <li>• Sin <math>DR</math> significativo</li> </ul>	0.6	1.0	1.0



Componente	Modo de comportamiento	Descripción (a partir de observación)	Intensidad de daño	Descripción de daño (uno o más elementos)	Valores de $\lambda$		
					$\lambda_K$	$\lambda_R$	$\lambda_D$
		<p>Ocurre en columnas con escaso refuerzo horizontal y/o con estribos con ganchos a 90 grados. También en "columnas cortas", las cuales se forman por la restricción de muros a media altura o más altos al desplazamiento lateral de las columnas.</p> <p>Es un modo de falla indeseable por su característica frágil.</p>	Moderado	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>GI &gt; 1.5</math> mm y</li> <li><math>G</math> por flexión <math>&lt; 2</math> mm</li> <li>Sin grietas verticales ni desconchamiento</li> </ul>	0.5	0.8	0.9
			Severo	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>GI &gt; 1.5</math> mm concentrada en una o unas cuantas grietas</li> <li>Aplastamiento en el extremo de grietas y</li> <li>Posible fractura del acero de refuerzo y/o apertura de estribos con doblez a 90 grados</li> <li><math>DR &gt; 0.015</math> veces la altura del edificio o del entrepiso más deformado.</li> </ul>	ND	ND	ND
MCR3a	Flexión en vigas	<p>Se identifica por agrietamiento perpendicular al eje de la viga, que inicia en la cara de la columna y se extiende hacia el centro de la viga a lo largo de la articulación plástica. Se combina con grietas inclinadas de bajo ancho.</p> <p>Es el modo de falla más deseable. Se observa en estructuras diseñadas después de 1985.</p>	Nulo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sin daño</li> </ul>	1.0	1.0	1.0
			Ligero	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>G &lt; 5</math> mm y</li> <li><math>GI &lt; 3</math> mm y</li> <li>Sin desconchamiento ni agrietamiento vertical y</li> <li>Sin pandeo ni fractura del refuerzo y</li> <li>Sin <math>DR</math> significativo</li> </ul>	0.6	1.0	1.0
			Moderado	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>G &lt; 5</math> mm</li> <li>Desconchamiento o agrietamiento vertical en la punta del muro en la zona de la articulación plástica y</li> <li>Sin pandeo ni fractura del refuerzo y</li> <li>Sin <math>DR</math> significativo</li> </ul>	0.5	0.8	0.9
			Severo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Refuerzo fracturado</li> <li><math>G &gt; 5</math> mm, normalmente concentrado en una grieta</li> <li><math>DR</math> importante</li> <li>Posible fractura del acero</li> </ul>	ND	ND	ND
MCR3b	Flexión-tensión diagonal en vigas	<p>El daño inicia como en MCR3a. A mayores desplazamientos laterales, predomina el agrietamiento inclinado; a grandes intensidades de daño, concentrado en una o dos grietas inclinadas.</p> <p>Ocurre porque la cuantía de refuerzo transversal (estribos o zunchos) es insuficiente, de modo que la resistencia a fuerza cortante es menor que la asociada a la flexión.</p>	Nulo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sin daño</li> </ul>	1.0	1.0	1.0
			Ligero	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>GI &lt; 1.5</math> mm y</li> <li><math>G</math> por flexión <math>&lt; 4.5</math> mm y</li> <li>Sin desconchamiento o agrietamiento vertical significativos</li> </ul>	0.8	1.0	1.0
			Moderado	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>GI &lt; 3</math> mm y</li> <li><math>G</math> por flexión <math>&lt; 5</math> mm y</li> <li><math>GI &gt; 1.5</math> mm o desconchamiento en el alma o pie del muro y</li> <li>Sin pandeo ni fractura de refuerzo y</li> <li>Sin <math>DR</math> significativo</li> </ul>	0.5	0.8	0.9
			Severo	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>GI &gt; 3</math> mm concentrado en unas cuantas grietas</li> <li>Posible fractura del acero</li> </ul>	0.2	0.3	0.7
MCR5i	Cortante en uniones viga-columna	<p>Se identifica por agrietamiento inclinado en el nudo, dentro del peralte de las vigas y ancho de la columna. Si el nudo conecta una a tres vigas, el daño será visible en la cara libre. Si el nudo une a cuatro vigas, el agrietamiento será visible en las esquinas de la columna a lo largo del peralte de las vigas.</p> <p>Ocurre en marcos cuyas columnas o vigas adyacentes se agrietan y el refuerzo fluye. Especialmente, en nudos de estructuras anteriores a 1985, dado que los nudos no tenían estribos de confinamiento.</p>	Nulo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sin daño</li> </ul>	1.0	1.0	1.0
			Ligero	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>GI &lt; 0.5</math> mm</li> </ul>	0.6	1.0	1.0
			Moderado	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>GI &lt; 2</math> mm</li> </ul>	0.5	0.8	0.9
			Severo	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>GI &gt; 2</math> mm y</li> <li>Aplastamiento/desconchamiento concreto</li> <li><math>DR &gt; 0.015</math> veces la altura del edificio o del entrepiso más deformado.</li> </ul>	0.2	0.3	0.7

## 7.3 ESTRUCTURAS A BASE DE MUROS DE CONCRETO

### 7.3.1 Componentes de estructuras a base de muros de concreto y sus modos de comportamiento

Los componentes de estructuras compuestas por muros de concreto se pueden clasificar en

cinco tipos posibles (figura 7.6 y tabla 7.3) (FEMA 306, 1998). Los tipos de componentes se enlistan y describen en la tabla 7.3. La denominación mCR corresponde a muros de Concreto Reforzado. Solamente los componentes mCR1, mCR2 y mCR3 sufren daños por los sismos. Por completez se incluyen los componentes mCR4 y mCF5, no obstante que no sufren deterioro por sismo. Estos últimos ya no se discuten con mayor detalle en este documento.

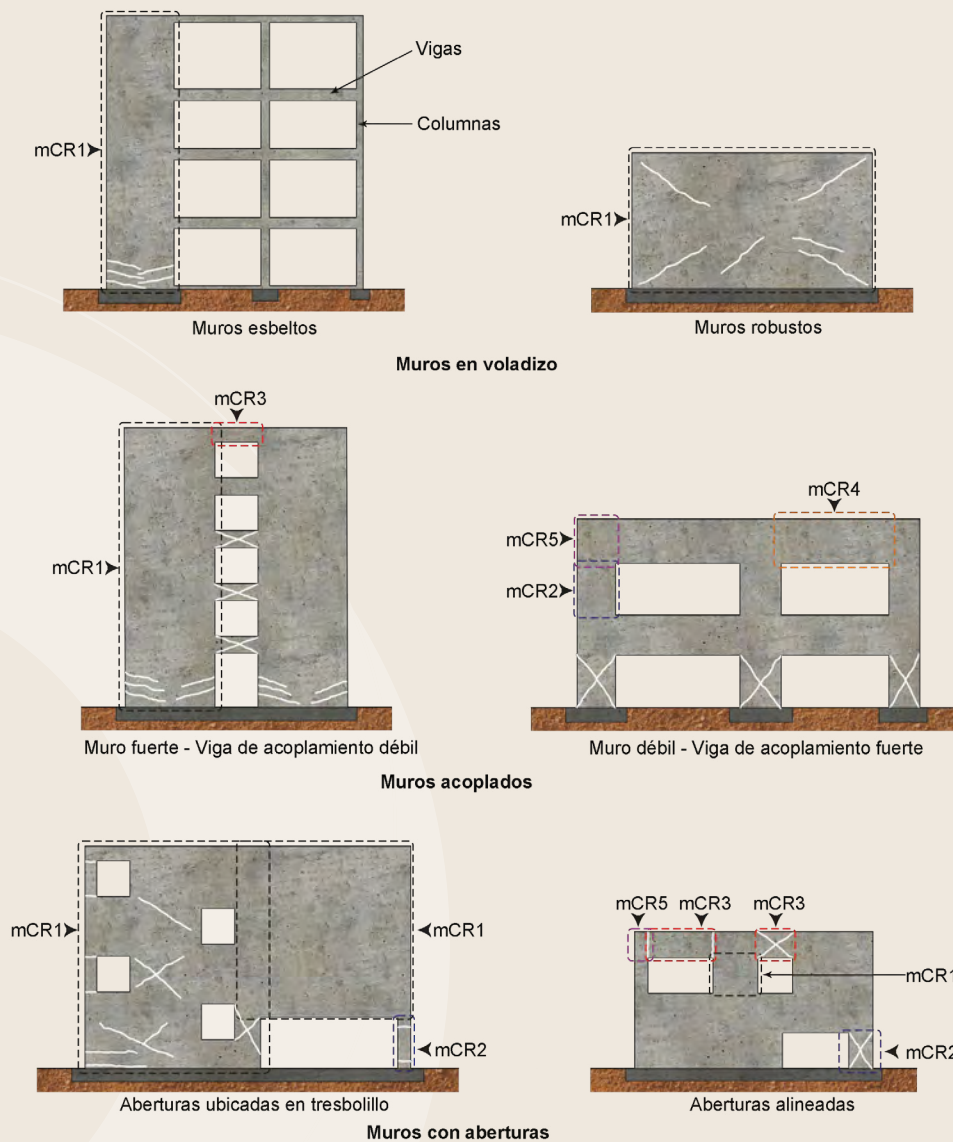


Figura 7.6 Tipos de componentes de estructuras a base de muros de concreto. Fuente: elaboración propia con base en FEMA 306 (1998)



Tabla 7.3 Tipos de componentes de estructuras a base de muros de concreto

Tipo de componente		Descripción
mCR1	Muro aislado o segmento de muro fuerte	Este componente es más resistente a flexión y/o a fuerza cortante que las vigas que se unen a él, de modo que el comportamiento inelástico y el daño se concentran en la base, ya sea con una falla a flexión (articulación plástica) o por cortante. Incluye muros aislados en voladizo. Es posible que se experimente daño localizado si el muro tiene un cambio de geometría o el acero de refuerzo vertical se interrumpió arriba de la base.
mCR2	Segmento de muro débil	Este componente es más débil a flexión y/o a fuerza cortante que las vigas que se conectan a él. El daño se caracteriza por articulaciones plásticas en los extremos superior e inferior del segmento, o por falla por corte.
mCR3	Viga de acoplamiento débil	Este componente es más débil a flexión y/o a fuerza cortante que el segmento de muro al que está unido. El daño se caracteriza por articulación plástica en cada extremo, falla por cortante o por deslizamiento por cortante.
mCR4	Viga de acoplamiento fuerte	Este componente usualmente no se daña, ya que es más resistente a flexión y/o a fuerza cortante que el segmento al que está conectado.
mCR5	Conexión segmento de muro – viga de acoplamiento	No es crítico en estructuras a base de muros de concreto.

En la tabla anterior, un componente es más resistente que otro al que está unido si sus resistencias, a flexión y/o a fuerza cortante, son superiores. Es factible que un componente sea más resistente a flexión, por ejemplo, pero menos a fuerza cortante, de forma que su comportamiento quede controlado por ésta.

En el cuadro 7.2 se describen brevemente los modos de comportamiento de estructuras de muros de concreto. Junto a cada explicación se muestran fotografías de los modos de

comportamiento observados en el campo. En la figura 7.7 se presentan los modos de comportamiento en una construcción idealizada de marcos de concreto. Esta figura no debe interpretarse como que todos los modos de comportamiento pueden ocurrir simultáneamente. Existe una jerarquía de modos de comportamiento que depende de la estructuración, las dimensiones de muros, segmentos de muro y vigas, las propiedades mecánicas de los materiales, la calidad de la construcción y mantenimiento, entre otros.

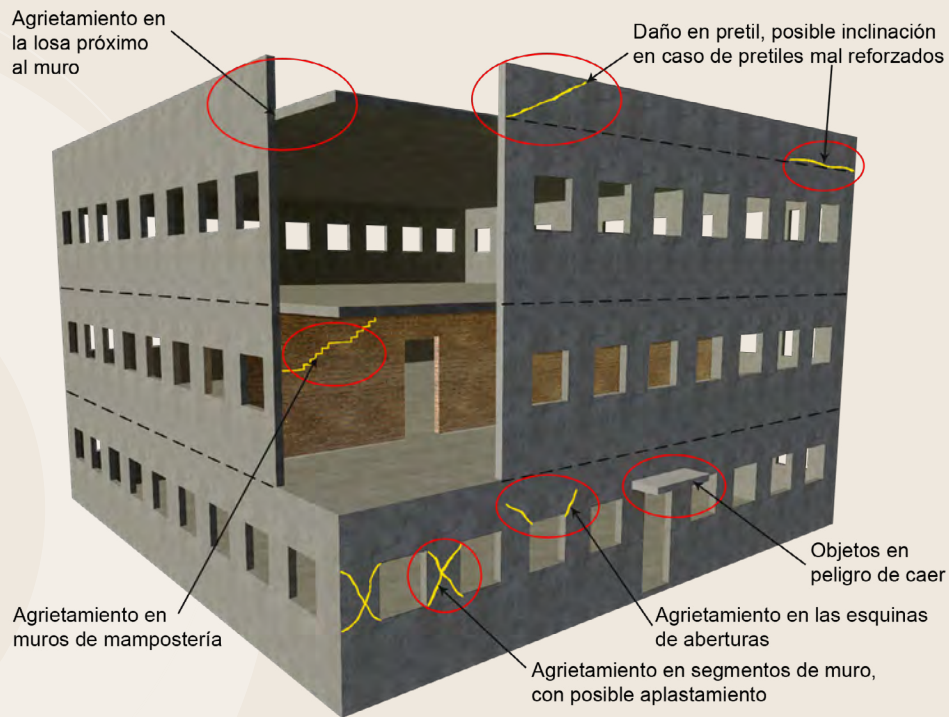
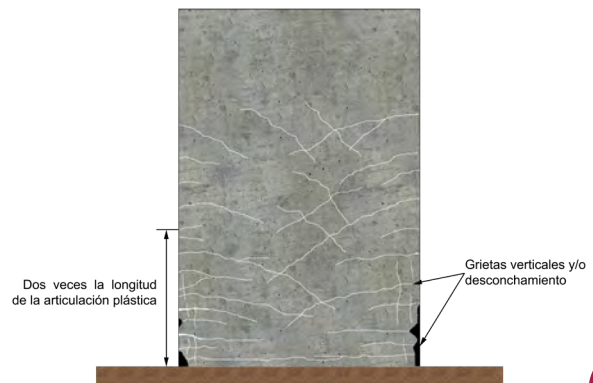


Figura 7.7 Modos de comportamiento en una construcción idealizada de muros de concreto.  
Fuente: elaboración propia con base en MBIE (2014).

Los principales modos de comportamiento de estructuras de muros de concreto se describen a continuación:

**Cuadro 7.2 Descripción de los modos de comportamiento de una construcción a base de muros de concreto**

- a. Flexión. Si bien es el modo de falla más deseable por su estabilidad en resistencia y capacidad de deformación, rara vez se observa en estructuras existentes con varias décadas de antigüedad. Se caracteriza por agrietamiento horizontal en la base del muro, el cual se extiende en la altura del muro formando una articulación plástica. Esta extensión varía en función de la relación altura-longitud del muro y de la cuantía de refuerzo vertical.



Fuente: elaboración propia con base en FEMA 306 (1998).

- b. Flexión-tensión diagonal. Inicia con la formación de una grieta a flexión en el talón del muro, lo cual provoca que la fuerza cortante, al redistribuirse hacia la punta, cause grietas por tensión diagonal (normalmente con una inclinación de 45 grados). Conforme las grietas se abren y la articulación plástica se degrada, se reduce la resistencia a fuerza cortante del muro por debajo de la asociada a la flexión, dando lugar a un comportamiento controlado por fuerza cortante.



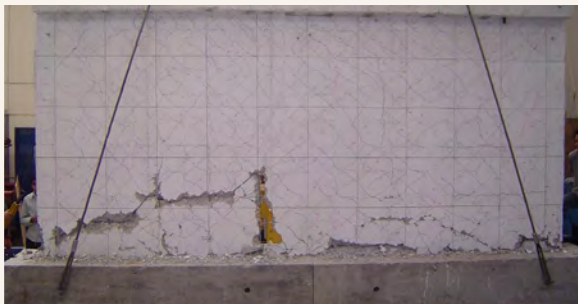
Fuente: cortesía de Alfredo Sánchez (2020).

- c. Flexión-compresión diagonal. Ocurre en muros o segmentos de muros con elevadas cuantías de refuerzo paralelo a la fuerza cortante sujetos a fuerza cortante. Puede presentarse en muros de baja altura o cuando los muros tienen suficiente cuantía de refuerzo para evitar una falla por tensión diagonal. También la exhiben muros sujetos a elevadas cargas axiales. El aplastamiento ocurre tras ciclos de carga y degradación por flexión. El aplastamiento está relacionado linealmente con el desplazamiento lateral impuesto al muro. Se caracteriza por agrietamiento inclinado y aplastamiento del concreto del alma del muro.



Fuente: cortesía de Alfredo Sánchez (2020).

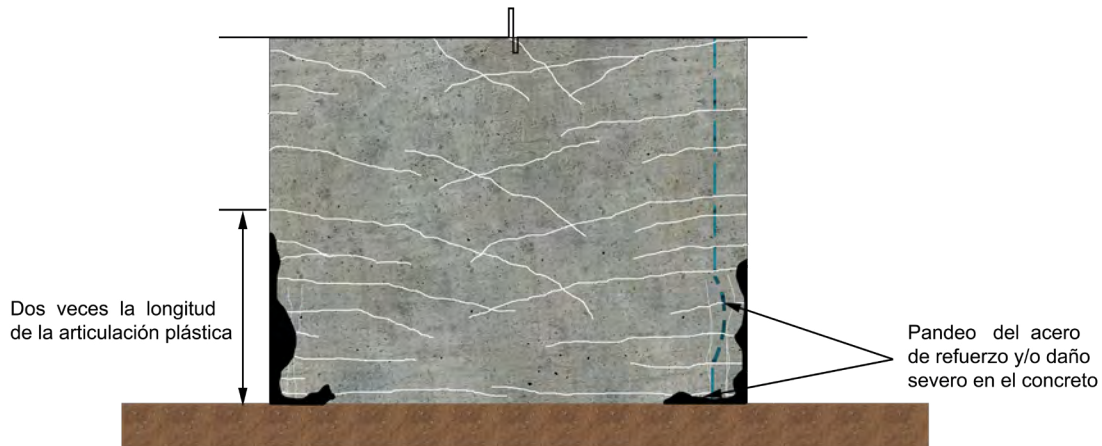
- d. Flexión-cortante por deslizamiento. Inicia con una grieta por flexión en el talón del muro y paulatinamente se extiende en toda la longitud. Ocurre cuando las cargas axiales son bajas, la cuantía de refuerzo vertical es baja o cuando el muro se ha desplazado lateralmente de forma significativa y se ha degradado el mecanismo de transmisión de cortante por fricción. Su presencia se ve acentuada por un detallado y construcción inadecuados en la junta de la base del muro. Es un modo de falla que a grandes desplazamientos laterales se caracteriza por aplastamiento local de la parte baja del muro, así como por doblez del refuerzo vertical perpendicular a su eje.



Fuente: cortesía de Alfredo Sánchez (2020).



- e. Flexión y falla de compresión en el pie del muro. Se presenta en muros altos con adecuada resistencia a fuerza cortante, pero con insuficiente refuerzo transversal en el pie del muro. Ante acciones inelásticas a flexión, las zonas extremas del muro pueden estar sujetas a deformaciones de compresión que puedan provocar el desprendimiento del recubrimiento del concreto. Si la cuantía de refuerzo transversal es baja, las barras verticales pueden pandearse. Aún más, si las deformaciones unitarias exceden 0.004 a 0.005, el núcleo de concreto se puede aplastar. Incluso, si en esa zona existen traslapes de refuerzo longitudinal, se podría deteriorar el mecanismo de adherencia y perderse o disminuirse sensiblemente la capacidad de resistencia a momento flexionante del muro en esa zona.



Fuente: elaboración propia con base en FEMA 306 (1998).

- f. Flexión y falla por adherencia en traslapes. Es frecuente que los edificios existentes tengan traslapes de barras en las regiones de articulaciones plásticas de muros. Los traslapes empiezan a fallar y a deslizar a deformaciones unitarias a compresión en el concreto mayores que 0.002, a menos de que se haya colocado refuerzo transversal alrededor de los traslapes, lo cual es poco factible en muros de edificaciones antiguas. Este deslizamiento se acompaña de grietas verticales, paralelas a las barras traslapadas. Una vez que los traslapes deslizan, la resistencia a flexión cae a un valor igual a la resistencia residual del traslape a tensión más la capacidad de momento que provee la carga axial.



Fuente: elaboración propia.



- g. Flexión y pandeo fuera de plano. Puede ocurrir en muros planos (sin patines y de bajo espesor) y esbeltos sujetos a momentos flexionantes cíclicos. El pandeo del muro puede llegar a ocurrir a grandes desplazamientos. Los muros con una capa de acero de refuerzo en el alma, muros con elevadas cuantías de refuerzo longitudinal (vertical) y muros con alturas de entrepiso grandes son más vulnerables al pandeo fuera del plano. También son más susceptibles aquellos en forma de letra T o L con almas muy delgadas.



Fuente: cortesía de Ken H. Elwood (2020).

- h. Tensión diagonal pura. Se forma prácticamente sin agrietamiento a flexión. El daño se caracteriza por una o dos grietas inclinadas de gran ancho, con aplastamiento y desconchamiento del concreto en el centro del segmento o muro.



Fuente: cortesía de Alfredo Sánchez (2020).

- i. Aplastamiento puro del concreto del alma. El aplastamiento del concreto del alma es una falla producto de fuerzas cortantes elevadas. Se ha observado en laboratorios en muros bajos con elevadas cuantías de refuerzo en los patines o en elementos de borde (o de refuerzo) de muros.



Fuente: cortesía de Shunsuke Otani (2020).

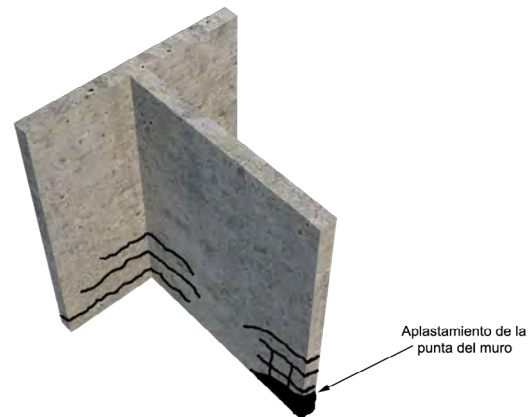


- j. Deslizamiento puro del muro en su base. Es una variación del modo “flexión-deslizamiento” en la que no se alcanza a desarrollar la resistencia a flexión, tal que el deslizamiento en la superficie de contacto del muro con la cimentación permite grandes desplazamientos sin una considerable disipación de energía. El daño se caracteriza por muy bajo agrietamiento, así como aplastamiento y desprendimiento concentrados en la base del muro. Se presenta en muros bajos con deficiente detallado de la junta de construcción.



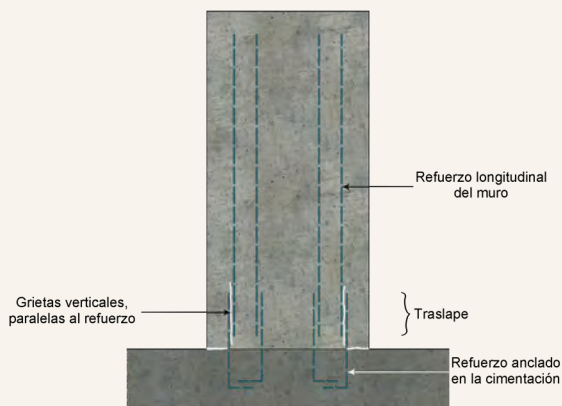
Fuente: elaboración propia.

- k. Aplastamiento del concreto al pie del muro. Ocurre en muros sujetos a cargas axiales arriba de la falla balanceada; los muros en letra T y L son vulnerables cuando los patines están a tensión y el acero transversal del refuerzo de borde del muro es inadecuado para soportar grandes deformaciones de compresión.



Fuente: elaboración propia.

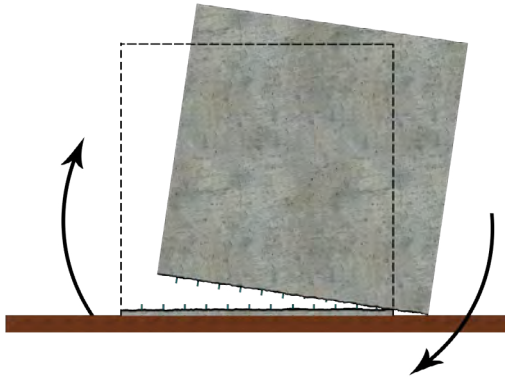
- l. Falla por adherencia en traslapes. Sólo puede presentarse si la longitud del empalme es muy corta. La falla ocurriría a desplazamientos menores que los asociados a la resistencia a flexión. Eventualmente, el muro se desprenderá y cabeceará sobre la cimentación.



Fuente: elaboración propia.

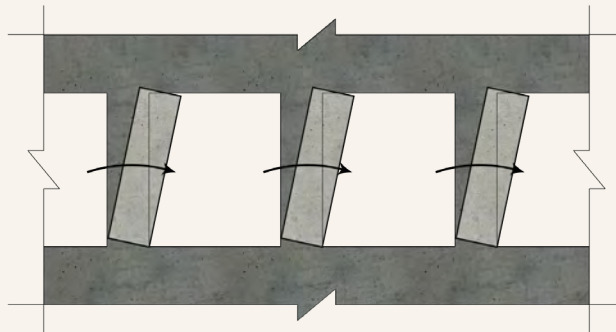


m. Cabeceo de la cimentación junto con el muro. Se produce cuando el muro se desprende de la cimentación durante el sismo; este modo de comportamiento implica el alargamiento y rotura a tensión de las barras de refuerzo vertical en el muro. En este tipo de comportamiento es común que la cuantía del refuerzo vertical del muro sea baja. Es un modo de falla que permite disipar energía cada vez que el edificio golpea al suelo.



Fuente: elaboración propia.

n. Cabeceo de muros o segmentos de muros. Una vez que el segmento de muros se agrieta a flexión (grieta horizontal) en su talón, el muro o segmento de muro trabaja como un cuerpo rígido que gira alrededor de la punta. Ese tipo de falla se da en muros resistentes, con carga axial baja (pocos pisos) y en segmentos de muro esbeltos (más altos que largos). En la figura se ha exagerado la deformación de los segmentos de muro para facilitar su interpretación.



Fuente: elaboración propia.

En la tabla 7.4 se describen los modos de comportamiento más usuales y los daños asociados por componente estructural de estructuras a base de muros de concreto. El daño observable se presenta para tres intensidades de daño (ligero, moderado y severo). Para cada intensidad, se incluyen los factores  $\lambda$  que se recomienda aplicar al cálculo de la rigidez, resistencia y capacidad de deformación para considerar el efecto del daño. Para nivel de daño nulo, el valor de los factores  $\lambda$  es igual a 1.

En la tabla, el significado de las letras es:

- Al final del nombre del componente (a, b, f...), se refiere al modo de comportamiento descrito en el cuadro 7.2.
- **G**: grieta perpendicular al eje, usualmente por flexión, mm.
- **GI**: grieta inclinada, mm.
- **DR**: desplazamiento horizontal residual de la estructura o del entrepiso más deformado, mm.
- **ND**: no disponible (para este nivel de daño, los valores de  $\lambda$  son cercanos a cero).
- $\lambda_p$ : factor reductor de la capacidad de desplazamiento en función del nivel de daño en el elemento estructural.

•  $\lambda_K$ : factor reductivo de la rigidez lateral que depende del nivel de daño en el elemento estructural.

•  $\lambda_R$ : factor reductivo de la resistencia lateral en función del nivel de daño del elemento estructural.

Tabla 7.4 Modos de comportamiento, daños asociados y factores reductivos  $\lambda$  para daños ligeros, moderados y severos en estructuras a base de muros de concreto

Componente	Modo de comportamiento	Descripción (a partir de observación)	Intensidad de daño	Descripción de daño (uno o más elementos)	Valores de $\lambda$		
					$\lambda_K$	$\lambda_R$	$\lambda_D$
mCR1a Muro aislado o segmento de muro fuerte	Flexión	Agrietamiento y desconchamiento del concreto en la zona de la articulación plástica (en la base del muro). Las grietas por cortante no deben exceder 3 mm de ancho. Si son mayores, véase componente mCR1b. En la punta del muro pueden observarse grietas verticales y desconchamiento. Si el desconchamiento y/o aplastamiento se presenta en el centro del alma, véase mCR1c. Si las barras de refuerzo están pandeadas, véase mCR1e.  Es un modo de comportamiento dúctil.	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	• $G < 5$ mm y • $GI < 3$ mm y • Sin desconchamiento ni agrietamiento vertical y • Sin pandeo ni fractura del refuerzo y • Sin $DR$ significativo	0.6	1.0	1.0
			Moderado	• $G < 5$ mm • Desconchamiento o agrietamiento vertical en la punta del muro en la zona de la articulación plástica y • Sin pandeo ni fractura del refuerzo y • Sin $DR$ significativo	0.5	0.8	0.9
			Severo	• Refuerzo fracturado • $G > 5$ mm, normalmente concentrado en una grieta • $DR$ importante ( $> 0.01$ veces la altura del muro o del segmento de muro) • Posible fractura del acero	0.2	0.3	0.7
mCR1b Muro aislado o segmento de muro fuerte	Flexión-tensión diagonal	En niveles de daño ligero y moderado, el daño será similar al mCR1a. Para mayores intensidades, se distingue una grieta principal inclinada (por cortante).  Ocurre en muros con bajas cuantías de refuerzo horizontal o en muros con altas demandas de cortante (comparadas con flexión).	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	• $GI < 1.5$ mm y • $G$ por flexión $< 3$ mm y • Sin desconchamiento o agrietamiento vertical significativos	0.8	1.0	1.0
			Moderado	• $GI < 3$ mm y • $G$ por flexión $< 5$ mm y • $GI > 1.5$ mm o desconchamiento en el alma o pie del muro y • Sin pandeo ni fractura de refuerzo y • Sin $DR$ significativo	0.5	0.8	0.9
			Severo	• $GI > 3$ mm, concentrado en unas cuantas grietas • $G$ flexión $> 5$ mm y • Posible fractura del acero	0.2	0.3	0.7
mRC1c Muro aislado o segmento de muro fuerte	Flexión-compresión diagonal	Para niveles de daño ligeros a moderados, el daño será similar al de mRC1a y mRC1b. Para la intensidad severa, el daño se concentrará en el alma en forma de grietas y desconchamiento.  Ocurre en muros con altas cuantías de refuerzo horizontal y/o vertical (flexión). Ocurre en muros bajos, con altas cargas axiales, y en muros con patines o elementos de refuerzo con elevadas cuantías de acero.	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	• $GI < 1.5$ mm y • $G$ por flexión $< 4$ mm y • Sin desconchamiento o agrietamiento vertical significativos	0.8	1.0	1.0
			Moderado	• $GI < 3$ mm y • $G < 5$ mm y • Desconchamiento limitado en alma o punta del muro o $GI > 1.5$ mm y • Sin pandeo ni fractura de refuerzo y • Sin $DR$ significativo	0.5	0.8	0.9



Componente	Modo de comportamiento	Descripción (a partir de observación)	Intensidad de daño	Descripción de daño (uno o más elementos)	Valores de $\lambda$		
					$\lambda_K$	$\lambda_R$	$\lambda_D$
			Severo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Desconchamiento significativo en el alma y</li> <li>Sin fractura del acero</li> <li>DR significativo (&gt; 0.01 veces la altura del muro o del segmento de muro)</li> </ul>	0.2	0.3	0.7
<b>mRC1d</b> <b>Muro aislado o segmento de muro fuerte</b>	Flexión-cortante por deslizamiento	<p>Para niveles de daño ligeros a moderados, el daño será similar a mRC1a y mRC1b. Para daño severo, se observa agrietamiento y desconchamiento extendidos en el alma.</p> <p>Ocurre en muros con suficientes cuantías de refuerzo horizontal y vertical (por flexión). Se presenta mayormente en muros bajos, con altas cargas axiales y con patines o elementos de refuerzo con elevadas cuantías de acero.</p>	Nulo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sin daño</li> </ul>	1.0	1.0	1.0
			Ligero	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>G &lt; 5</math> mm y</li> <li><math>GI &lt; 3</math> mm y</li> <li>Sin desconchamiento ni agrietamiento vertical y</li> <li>Sin pandeo ni fractura del refuerzo y</li> <li>Sin DR significativo</li> </ul>	0.6	1.0	1.0
			Moderado	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>GI &lt; 3</math> mm y</li> <li>G por flexión &lt; 5 mm y</li> <li>Desconchamiento o agrietamiento vertical limitados o <math>GI &gt; 1.5</math> mm y</li> <li>Sin pandeo ni fractura de refuerzo y</li> <li>Sin DR significativo</li> </ul>	0.5	0.8	0.9
			Severo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Grieta horizontal de ancho considerable a todo lo largo del muro, con deterioro del concreto sobre la grieta</li> </ul>	0.4	0.5	0.8
<b>mRC1e</b> <b>Muro aislado o segmento de muro fuerte</b>	Flexión y falla de compresión en el pie del muro	<p>Daño similar a mRC1a para niveles de daño ligeros a moderados. Para intensidades mayores, los elementos de refuerzo en la zona de la articulación plástica experimentarán desconchamiento y aplastamiento.</p> <p>Ocurre en muros con suficiente refuerzo horizontal sin refuerzo por confinamiento adecuado en los elementos de refuerzo. Con mayor frecuencia, ocurre en muros con altas demandas de momento.</p>	Nulo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sin daño</li> </ul>	1.0	1.0	1.0
			Ligero	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>G &lt; 5</math> mm y</li> <li><math>GI &lt; 3</math> mm y</li> <li>Sin desconchamiento ni agrietamiento vertical y</li> <li>Sin pandeo ni fractura del refuerzo y</li> <li>Sin DR significativo</li> </ul>	0.6	1.0	1.0
			Moderado	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>G &lt; 5</math> mm</li> <li>Desconchamiento o agrietamiento vertical en la punta del muro en la zona de la articulación plástica y</li> <li>Sin pandeo ni fractura del refuerzo y</li> <li>Sin DR significativo</li> </ul>	0.5	0.8	0.9
			Severo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Desconchamiento o grietas verticales en la punta del muro, en la zona de la articulación plástica, y</li> <li>Pandeo del refuerzo vertical en el elemento de refuerzo o concreto del núcleo del elemento de refuerzo muy dañado (más allá del recubrimiento)</li> </ul>	0.4	0.6	0.7
<b>mRC2a</b> <b>Segmento de muro débil</b>	Flexión	<p>Se concentra el agrietamiento y desconchamiento por flexión en la zona de la articulación plástica. Fuera de esta zona, se pueden observar grietas de flexión con anchos menores que 3 mm. Las grietas inclinadas por corte no excederán 3 mm.</p> <p>Se puede observar agrietamiento vertical y desconchamiento en los extremos del muro dentro de la zona de la articulación plástica.</p> <p>Ocurre en segmentos de muros bien diseñados, esbeltos, con suficiente refuerzo horizontal y sin elevadas cuantías de refuerzo de flexión.</p>	Nulo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sin daño</li> </ul>	1.0	1.0	1.0
			Ligero	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>G &lt; 5</math> mm y</li> <li><math>GI &lt; 3</math> mm y</li> <li>Sin desconchamiento ni agrietamiento vertical y</li> <li>Sin pandeo ni fractura del refuerzo y</li> <li>Sin DR significativo</li> </ul>	0.6	1.0	1.0
			Moderado	<ul style="list-style-type: none"> <li>Desconchamiento o agrietamiento vertical en la punta del muro en la zona de la articulación plástica (limitado al recubrimiento) y</li> <li>Sin pandeo ni fractura del refuerzo y</li> <li>Sin DR significativo</li> </ul>	0.5	0.8	0.9



Componente	Modo de comportamiento	Descripción (a partir de observación)	Intensidad de daño	Descripción de daño (uno o más elementos)	Valores de $\lambda$		
					$\lambda_K$	$\lambda_R$	$\lambda_D$
			Severo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Refuerzo fracturado</li> <li><math>G &gt; 5</math> mm, normalmente concentrado en una grieta</li> <li><math>DR</math> importante (<math>&gt; 0.01</math> veces la altura del muro o del segmento de muro)</li> </ul>	ND	ND	ND
mRC2h Segmento de muro débil	Tensión diagonal pura	<p>Si bien para bajos niveles de daño las características son similares a otros modos de comportamiento, pero sin grietas de flexión, las grietas inclinadas (por tensión diagonal) empiezan a controlar. Las grietas por flexión tienen menos de 3 mm de ancho, en virtud de que el refuerzo por flexión no fluye.</p> <p>Ocurre en segmentos de muros sin refuerzo horizontal o con cuantías inadecuadas, y que tienen refuerzo vertical en el alma en mayor cuantía. Sucede en segmentos de muros con bajas demandas de momento relativas a fuerza cortante.</p>	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>G &lt; 5</math> mm y</li> <li><math>GI &lt; 1.5</math> mm y</li> <li>Sin desconchamiento ni agrietamiento vertical y</li> <li>Sin pandeo ni fractura del refuerzo y</li> <li>Sin <math>DR</math> significativo</li> </ul>	0.7	1.0	1.0
			Moderado	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>GI &lt; 3</math> mm y</li> <li>Sin grietas verticales ni desconchamiento</li> <li><math>G</math> por flexión <math>&lt; 3</math> mm</li> </ul>	0.5	0.8	0.9
			Severo	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>GI &gt; 3</math> mm, concentrada en una o unas cuantas grietas</li> <li>Aplastamiento del concreto en los extremos de las grietas</li> <li>Posible fractura del acero</li> </ul>	0.2	0.3	0.7
mRC3b	Flexión-tensión diagonal	<p>Para intensidades de daño ligero a moderado es similar a mRC1a. Conforme aumenta el daño, controla el daño por cortante en forma de una o dos grietas de gran ancho.</p> <p>Este comportamiento ocurre en vigas de acoplamiento sin estribos suficientes y que pueden tener cuantías altas de refuerzo horizontal (por flexión). Más común en vigas peraltadas, pero depende del arreglo del refuerzo.</p>	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>GI &lt; 1.5</math> mm y</li> <li><math>G</math> por flexión <math>&lt; 4</math> mm y</li> <li>Sin desconchamiento o agrietamiento vertical significativos</li> </ul>	0.8	1.0	1.0
			Moderado	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>GI &lt; 3</math> mm y</li> <li><math>G</math> por flexión <math>&lt; 5</math> mm y</li> <li><math>GI &gt; 1.5</math> mm o desconchamiento en el alma o pie del muro y</li> <li>Sin pandeo ni fractura de refuerzo y</li> <li>Sin <math>DR</math> significativo</li> </ul>	0.5	0.8	0.9
			Severo	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>GI &gt; 3</math> mm, concentrado en unas cuantas grietas</li> <li>Posible fractura del acero</li> </ul>	0.2	0.3	0.7
mRC3d	Flexión-cortante por deslizamiento	<p>Para intensidades de daño ligero a moderado es similar a mRC1a. Conforme aumenta el daño, la grieta de flexión en la cara de la viga se extiende en todo el peralte. Sobre ella ocurre deslizamiento y degradación.</p> <p>Este comportamiento ocurre en vigas de acoplamiento sin refuerzo diagonal, con estribos suficientes para evitar una falla por tensión diagonal pura.</p>	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>G &lt; 5</math> mm y</li> <li><math>GI &lt; 3</math> mm y</li> <li>Sin desconchamiento ni agrietamiento vertical y</li> <li>Sin pandeo ni fractura del refuerzo y</li> <li>Sin <math>DR</math> significativo</li> </ul>	0.6	1.0	1.0
			Moderado	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>GI &lt; 3</math> mm y</li> <li><math>G</math> por flexión <math>&lt; 5</math> mm y</li> <li>Desconchamiento o agrietamiento vertical limitados o <math>GI &gt; 1.5</math> mm y</li> <li>Sin pandeo ni fractura de refuerzo y</li> <li>Sin <math>DR</math> significativo</li> </ul>	0.5	0.8	0.9
			Severo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Una grieta por flexión en toda la altura de la viga, con degradación del concreto a lo largo de la grieta (indicativa de deslizamiento). Posible desfase lateral de la grieta.</li> </ul>	0.2	0.3	0.7

## 7.4 ESTRUCTURAS A BASE DE COLUMNAS UNIDAS POR LOSAS PLANAS

### 7.4.1 Componentes de estructuras a base de columnas unidas por losas planas y sus modos de comportamiento

Los edificios de concreto a base de losas planas, ya sean macizas o reticulares, resisten las cargas gravitacionales mediante la transmisión de las fuerzas cortantes y los momentos flexionantes generados en las losas a través de la conexión losa-columna. Si bien su comportamiento ante cargas gravitacionales es eficiente, su respuesta ante fuerzas laterales cíclicas como las inducidas por los sismos ha mostrado lo contrario. Al no contar con elementos rígidos ante cargas laterales (como contraventeos de acero o muros de concreto), los

edificios a base de columnas y losas planas resisten las cargas laterales mediante un trabajo de marco equivalente, en el cual la losa actúa como una viga entre las columnas. Sin embargo, dada su elevada flexibilidad lateral, los desplazamientos laterales causados por los sismos obligan a rotaciones muy elevadas en la conexión. Estas rotaciones causan agrietamiento en la losa alrededor de las columnas; más aún, si son excesivas, o bien, se presentan en combinación de cargas gravitacionales elevadas, producen fallas de entrepiso (similares a cuando se articulan los extremos de columnas) o de cortante por punzonamiento.

El componente de estructuras a base de columnas unidas por losas planas de concreto (LPCR) se presenta en la figura 7.8. Las dimensiones de la zona de la losa que interactúa con la columna son aproximadas. El componente se describe en la tabla 7.5.

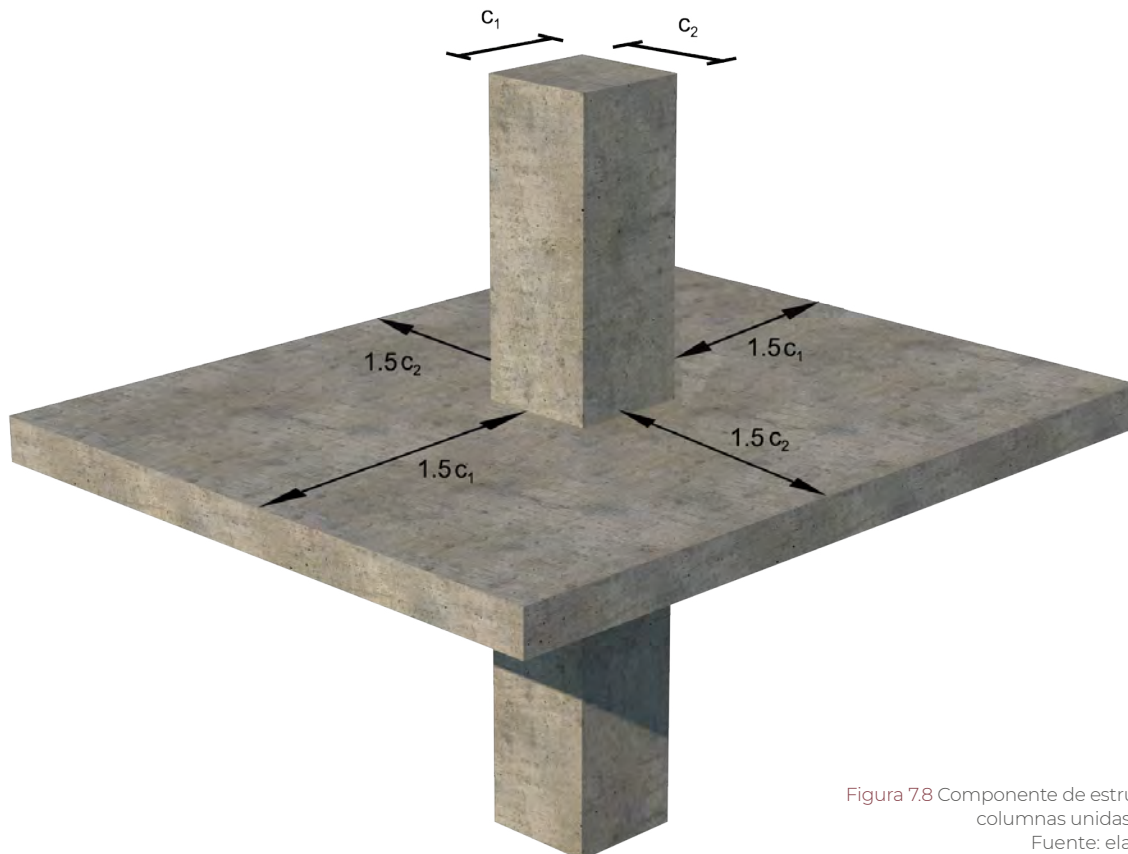


Figura 7.8 Componente de estructuras a base de columnas unidas por losas planas.  
 Fuente: elaboración propia.

Tabla 7.5 Componente de estructuras a base de columnas unidas por losas planas

Tipo de componente		Descripción
LPCR	Conexión losa-columna	Es el componente más crítico en estructuras a base de losas planas. Su daño se caracteriza por agrietamiento por cortante en la losa, alrededor de la columna.

En el cuadro 7.3 se describen los modos de comportamiento de estructuras a base de columnas unidas por losas planas. Junto a cada explicación se muestran fotografías de los modos de

comportamiento observados en el campo. En la figura 7.9 se presenta el agrietamiento característico a la falla de una conexión losa plana-columna.

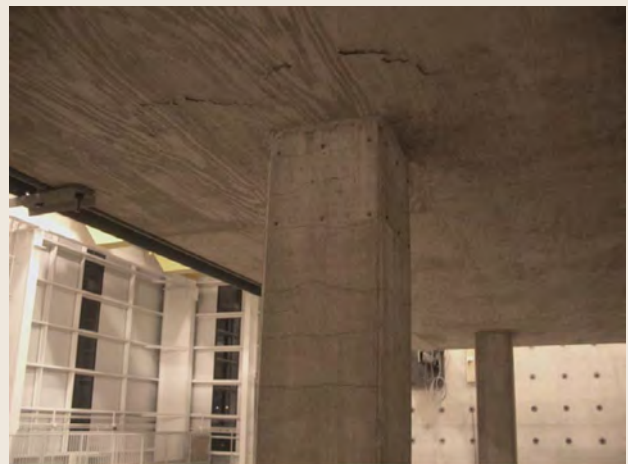
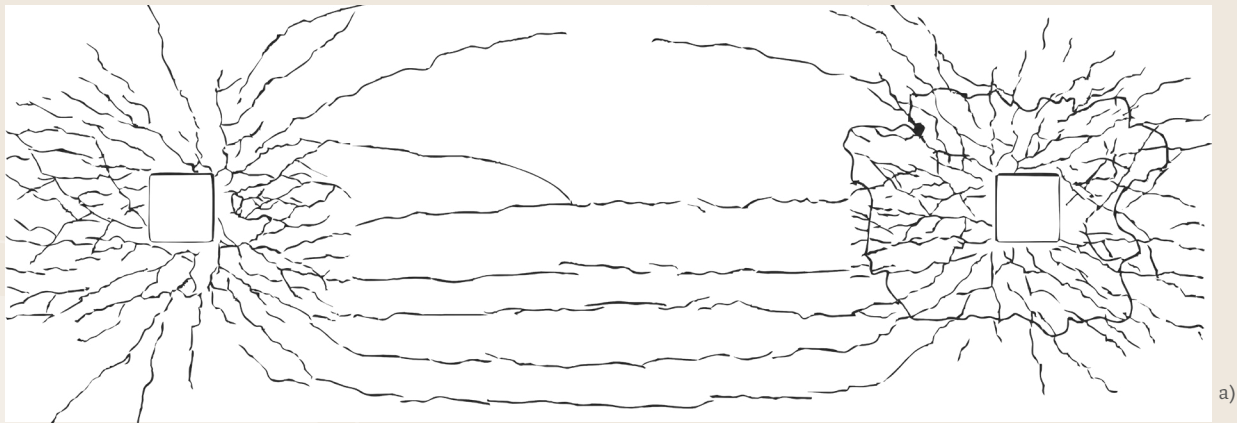


Figura 7.9 a) Agrietamiento característico de una losa plana apoyada en columnas, cerca de la falla. Vista de la cara superior de la losa. b) Falla de la conexión losa-columna - vista de la cara superior de la losa. c) Agrietamiento a la falla de la conexión - vista de la cara inferior de la losa. Fuente: Fick (2008).

### Cuadro 7.3 Descripción de los modos de comportamiento de estructuras a base de columnas unidas por losas planas

- a. Cortante. Es un modo de falla frágil e indeseable. Se presenta al agotarse la capacidad de rotación de la conexión losa-columna debido a desplazamientos laterales. También ocurre cuando la carga vertical por ser transmitida en la conexión es elevada. Se caracteriza por agrietamiento en la cara superior de la losa, paralelo a las caras de la columna y separado de la columna (o de la zona maciza de la losa, si existe) entre una y 1.5 veces el peralte de la losa (incluido el ábaco) o de la zona maciza (si existe). Si todas las conexiones de un entrepiso exhiben esta falla, se puede generar el colapso del entrepiso.



Losas planas sobre columnas

Fuente: cortesía del CENAPRED (2020b) y elaboración propia con base en Meli (2001).

- b. Punzonamiento. Es un tipo de falla por cortante en la cual se forma un agrietamiento alrededor de la columna en forma de pirámide invertida. Si la losa carece de refuerzo en el lecho inferior y que sea continuo (sin traslapes) sobre la columna, se puede producir la penetración de la columna en la losa, lo que conlleva generalmente el colapso del entrepiso o de todo el edificio.



Fuente: cortesía de Francisco García (2020) y archivo personal de Sergio Alcocer (1985).

En la tabla 7.6 se describen los modos de comportamiento más usuales y los daños asociados por componente estructural de estructuras a base de columnas unidas por losas planas. El daño observable se presenta para tres intensidades de daño (ligero, moderado y severo). Para cada intensidad, se incluyen los factores  $\lambda$  que se recomienda aplicar al cálculo de la rigidez, resistencia y capacidad

de deformación para considerar el efecto del daño. Para nivel de daño nulo, el valor de los factores  $\lambda$  es igual a 1.

En la tabla, el significado de las letras es:

- Al final del nombre del componente (a, b, f...), se refiere al modo de comportamiento descrito en el cuadro 7.3.

- **G**: grieta perpendicular al eje, usualmente por flexión, mm.
- **GI**: grieta inclinada, mm.
- **DR**: desplazamiento horizontal residual de la estructura o del entrepiso más deformado, mm.
- **ND**: no disponible (para este nivel de daño, los valores de  $\lambda$  son cercanos a cero).
- $\lambda_D$ : factor reductor de la capacidad de desplazamiento en función del nivel de daño en el elemento estructural.
- $\lambda_K$ : factor reductor de la rigidez lateral que depende del nivel de daño en el elemento estructural.
- $\lambda_R$ : factor reductor de la resistencia lateral en función del nivel de daño del elemento estructural.

**Tabla 7.6 Modos de comportamiento, daños asociados y factores reductivos  $\lambda$  para daños ligeros, moderados y severos en estructuras a base de columnas unidas por losas planas de concreto**

Componente	Modo de comportamiento	Descripción (a partir de observación)	Intensidad de daño	Descripción de daño (uno o más elementos)	Valores de $\lambda$		
					$\lambda_K$	$\lambda_R$	$\lambda_D$
LPCRa	Cortante	Es un modo de comportamiento frágil que puede desencadenar la formación de un mecanismo de entrepiso. Su falla es indeseable. Se caracteriza por agrietamiento en la cara superior de la losa, paralelo a las caras de la columna y separado de la columna (o de la zona maciza de la losa, si existe) entre 0.5 y 1.0 veces el peralte de la losa (incluido el ábaco) o de la zona maciza (si existe).	Ligero	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>G &lt; 0.5</math> mm radiales desde la columna en la cara superior de la losa y</li> <li>• <math>G &lt; 0.2</math> mm en la cara inferior y</li> <li>• Sin desconchamiento</li> </ul>	0.6	1.0	1.0
			Moderado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>G &lt; 1.25</math> mm radiales desde la columna y a lo ancho de la losa, en la cara superior de la losa y</li> <li>• <math>G &lt; 0.5</math> mm en la cara inferior de la losa, en la cara de la columna y</li> <li>• Desconchamiento incipiente del concreto en la cara inferior de la losa cerca de la cara de la columna o capitel, si existe, y</li> <li>• Sin pandeo ni fractura del refuerzo de la losa (lechos superior e inferior) y</li> <li>• Sin <b>DR</b> significativo</li> </ul>	0.4	0.7	0.8
			Severo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>G &gt; 3</math> mm concentradas en pocas grietas en la cara superior y</li> <li>• Agrietamiento a una distancia entre 0.5 y una vez el peralte de la losa (incluyendo ábaco, si existe), siguiendo la forma de la sección transversal de la columna (grietas concéntricas)</li> <li>• Desconchamiento y/o aplastamiento extendido del concreto en la cara superior de la losa, frecuentemente en forma de mariposa y</li> <li>• Desconchamiento y/o aplastamiento localizado del concreto en la cara inferior de la losa junto a la columna (o capitel de columna, si existe) y</li> <li>• Refuerzo del lecho superior de la losa doblado</li> </ul>	ND	ND	ND
LPCRb	Punzonamiento	Se identifica por agrietamiento en la cara superior de la losa alrededor de la columna y separado de la columna (o de la zona maciza, si existe) entre 0.5 y 1.0 veces el peralte de la losa (incluido el ábaco) o de la zona maciza (si existe).	Ligero	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>G &lt; 0.5</math> mm radiales desde la columna en la cara superior de la losa y</li> <li>• <math>G &lt; 0.2</math> mm en la cara inferior y</li> <li>• Sin desconchamiento</li> </ul>	0.6	1.0	1.0

Componente	Modo de comportamiento	Descripción (a partir de observación)	Intensidad de daño	Descripción de daño (uno o más elementos)	Valores de $\lambda$		
					$\lambda_K$	$\lambda_R$	$\lambda_D$
		Este patrón de agrietamiento sugiere la formación de una superficie de falla en forma de pirámide invertida. La base superior de la pirámide invertida está delimitada por el agrietamiento alrededor y alejado de la columna (o de la zona maciza, si existe); la base inferior de la pirámide coincide con la columna o capitel, por debajo de la losa.	Moderado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>G &lt; 1.25</math> mm radiales desde la columna y a lo ancho de la losa, en la cara superior de la losa y</li> <li>• <math>G &lt; 0.5</math> mm en la cara inferior de la losa, en la cara de la columna y</li> <li>• Desconchamiento incipiente del concreto en la cara inferior de la losa cerca de la cara de la columna o capitel, si existe, y</li> <li>• Sin pandeo ni fractura del refuerzo de la losa (lechos superior e inferior) y</li> <li>• Sin <b>DR</b> significativo</li> </ul>	0.4	0.7	0.8
		Es un caso particular de una falla por cortante que puede ocurrir bajo carga gravitacional muy elevada, o con la combinación de carga gravitacional alta y fuerzas laterales inducidas por sismo. Ocurre en conexiones con bajas cuantías de refuerzo en la losa, usualmente menores que las requeridas en los reglamentos modernos.  Es un modo de falla frágil y de consecuencias catastróficas.	Severo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>G &gt; 3</math> mm concentradas en pocas grietas en la cara superior y</li> <li>• Agrietamiento y desconchamiento del concreto a una distancia entre 0.5 y una vez el peralte de la losa (incluyendo ábaco, si existe), siguiendo la forma de la sección transversal de la columna (grietas concéntricas)</li> <li>• Desconchamiento y/o aplastamiento localizado del concreto en la cara inferior de la losa junto a la columna (o capitel de columna, si existe) y</li> <li>• Refuerzo del lecho superior de la losa doblado</li> </ul>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>





# Comportamiento de estructuras de acero

## 8.1 INTRODUCCIÓN

---

En México, las estructuras de acero generalmente están hechas a base de marcos resistentes a momento, con vigas y columnas diseñadas para resistir la totalidad de la carga gravitacional. Las fuerzas laterales son resistidas por el marco, o bien, mediante la participación de contraventeos metálicos o muros de concreto o de mampostería. Las cargas laterales inducidas por sismo son distribuidas a los elementos verticales por medio de diafragmas horizontales o contraventeos horizontales. Las cuerdas y colectores de los diafragmas son normalmente de concreto reforzado.

Para facilitar la inspección y evaluación de edificios de acero estructural, se propone clasificarlos, según el tipo de sistema resistente a fuerzas laterales, como:

- a. Marco resistente a momento.
- b. Marco contraventeado.
- c. Edificios de marcos de acero con elementos hechos con perfiles de lámina doblados en frío.
- d. Marcos de acero con muros diafragma de mampostería.
- e. Marcos con muros de concreto o de mampostería reforzada.

### 8.1.1 Marcos de acero resistentes a momento

Los marcos de acero resistentes a momento soportan las fuerzas laterales mediante trabajo de marco, es decir, por la flexión de vigas y columnas interconectadas en uniones. Las uniones pueden ser soldadas o atornilladas. Es usual que los perfiles laminados en caliente se conecten por medio de soldadura de penetración completa. En edificios más antiguos, las conexiones pueden ser a base de pernos o tornillos fijados mediante placas y ángulos. Estas juntas son más flexibles que las fabricadas con soldaduras de penetración completa debido a la flexibilidad de los componentes (placas y ángulos) que permiten una mayor rotación en comparación con las juntas soldadas (Duggal, 2014).

La *Guía de Diseño 15* (Brockenbrough y Schuster, 2002) clasifica a las uniones en tres tipos: tipo 1, para marcos rígidos o continuos, en los cuales los miembros tienen suficiente rigidez para mantener el ángulo original entre los elementos del marco; tipo 2, para marcos simples y que es empleada para resistir fuerzas cortantes únicamente; tipo 3, llamada semi-rígida o parcialmente rígida que tiene una mayor capacidad de rotación inelástica para evitar sobreesfuerzos en tornillos y soldaduras.

En la *Guía de Diseño 15* se indica que las soldaduras en estructuras de acero antiguas tienen un mayor índice de confiabilidad que

las conexiones atornilladas (pernos). Por ello, se requiere que la evaluación de pernos y tornillos sea más rigurosa. Su identificación en la estructura no es fácil, ni tampoco su retiro si requiriesen ser ensayados. De manera conservadora, se sugiere suponer los valores de menor resistencia de los pernos o tornillos para la evaluación de la resistencia de la junta.

También se han empleado en el pasado vigas de alma abierta, casi siempre soldadas en sus patines a las columnas. Su comportamiento ante cargas cíclicas reversibles ha sido muy deficiente debido al pandeo de las cuerdas de las vigas ante cargas cíclicas reversibles.

Los diafragmas horizontales son frecuentemente losas de concreto coladas en sitio o de sección compuesta, tipo *losacero*. Las losas tipo *losacero* se conectan a las vigas metálicas mediante conectores de cortante. Si bien los edificios más modernos poseen fachadas prefabricadas de concreto o de vidrio que no contribuyen a la capacidad sísmica, los más antiguos poseen muros de concreto o de mampostería que están en contacto con el marco y le añaden rigidez y resistencia laterales.

### 8.1.2 Marcos contraventeados

Los contraventeos se utilizan para resistir las fuerzas laterales, como las producidas por el viento y las inducidas por el sismo. De acuerdo con su configuración geométrica, los contraventeos pueden ser en forma de letra X, V o V invertida. La configuración en forma de letra K en un entrepiso no es permitida. En el caso de edificios más modernos, los contraventeos pueden ser excéntricos, es decir, en los que sus ejes no coinciden en un punto en el eje de la viga. Los contraventeos se conectan a la estructura mediante tornillos o soldadura a placas de conexión, las cuales a su vez

se atornillan o sueldan a vigas, columnas o placas base de columnas. La distribución de las fuerzas sísmicas entre los componentes verticales se logra mediante diafragmas. Éstos pueden consistir en losas de concreto coladas en sitio o losas tipo losacero. En el caso de edificios de tipo industrial, el sistema de cubierta se rigidiza con contraventeos horizontales.

### **8.1.3 Edificios de marcos de acero con elementos hechos con perfiles de lámina doblados en frío**

En estos edificios las vigas pueden ser montes o vigas de alma abierta. Por lo regular, son edificios de uno o dos pisos. Resisten las fuerzas laterales mediante acción de marco; en ocasiones, cuentan con contraventeos ligeros en forma de redondos de acero de diámetro pequeño. El sistema de piso y techo es base de losa de sección compuesta (losacero). Es frecuente que los techos estén contraventeados horizontalmente por medio de redondos de acero de diámetro pequeño. Su comportamiento antesismos ha sido aceptable; sin embargo, en eventos recientes, se han observado fracturas de soldaduras y pandeos locales producto de aceleraciones verticales significativas. Las columnas se han dañado también por la interacción de muros de altura intermedia que provocan el fenómeno de “columna corta”.

### **8.1.4 Marcos de acero con muros diafragma**

Éste es el caso equivalente de marcos de concreto con muros diafragma. Las cargas gravitacionales son resistidas por el marco, de modo que los muros sólo resisten su propio peso. Los muros, si bien no son considerados en el diseño para contribuir a la capacidad sísmica, si están

en contacto con el marco, pueden contribuir de manera decisiva a incrementar la resistencia y rigidez laterales. En los primeros ciclos de un sismo, el sistema marco de acero-muro diafragma responde como una estructura con muros de cortante. Conforme se dañan los muros, la estructura responde como marco.

Los componentes y modos de comportamiento de marcos de acero con muros diafragma se tratan en el capítulo 9.

### **8.1.5 Marcos de acero con muros de concreto colados en sitio o de mampostería reforzada interiormente**

Este tipo de edificios se caracteriza por tener un marco de acero recubierto de muros de concreto o de mampostería reforzada interiormente. En su diseño, se supone que las fuerzas laterales inducidas por sismo serán resistidas por los muros. Los edificios más antiguos tienen muros de fachada, de concreto o de mampostería que se puede considerar que resisten las acciones laterales, y muros divisorios, unidos o no a las columnas y vigas de acero.

## **8.2 COMPONENTES DE MARCOS DE ACERO, CON Y SIN CONTRAVENTEADO, Y SUS MODOS DE COMPORTAMIENTO**

---

Los componentes de marcos de acero, con y sin contraventeo, se pueden clasificar en seis tipos posibles (figura 8.1). La designación MA se refiere a Marcos de Acero. Los tipos de componentes de enlistan y describen en la tabla 8.1.

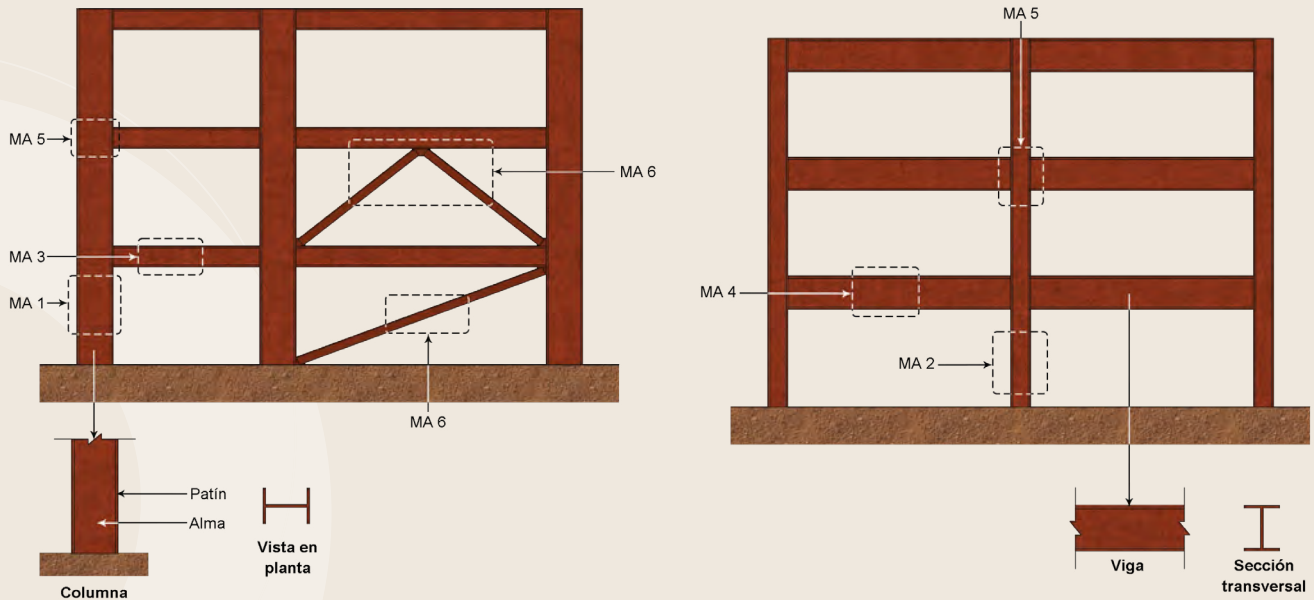


Figura 8.1 Componentes y modos de comportamiento de marcos de acero, con y sin contraventeo.  
Fuente: elaboración propia.

Tabla 8.1 Tipos de componentes en marcos de acero, con y sin contraventeo (MA)

Tipo de componente		Descripción
MA1	Columna fuerte	Este componente es más resistente que las vigas que se unen a él, de modo que el comportamiento inelástico y daño se concentran en la base de la columna con la formación de una articulación plástica, o se pueden deber a cortante, por combinación flexión-cortante o por falla de anclaje de la columna.
MA2	Columna débil	Este componente es más débil que las vigas que se conectan a él. El daño se caracteriza por articulaciones plásticas en los extremos superior e inferior de la columna o por falla por cortante.
MA3	Viga débil	Este componente es más débil que la columna a la que está unido. El daño está generalmente controlado por flexión (articulaciones plásticas en los extremos) o por fuerza cortante.
MA4	Viga fuerte	Este componente usualmente no se daña, ya que es más resistente que la columna a la que está conectado.
MA5	Unión viga-columna	Este componente puede dañarse e, incluso, fallar por cortante (pandeo y rotura del panel).
MA6	Contraventeo	En marcos contraventeados, los contraventeos pueden fallar por pandeo, rotura del elemento de contraventeo o en las conexiones, ya sea entre el contraventeo y la placa de conexión o entre ésta y la viga, columna o placa base a la que está conectada.

En la tabla anterior, un componente es más resistente que otro al que está unido si sus resistencias, a flexión y/o a fuerza cortante, por ejemplo, son superiores. Es factible que un componente sea más resistente a flexión, por ejemplo, pero menos a fuerza cortante, de forma que su comportamiento quede controlado por ésta.

En los incisos 8.2.1 a 8.2.4 se describen brevemente los modos de comportamiento de elementos de marcos de acero (columnas y vigas) y de

contraventeos metálicos (FEMA 352, 2000). En la figura 8.2 se presentan los modos de comportamiento en una construcción idealizada de marcos de acero. Esta figura no debe interpretarse como que todos los modos de comportamiento pueden ocurrir simultáneamente. Existe una jerarquía de modos de comportamiento que depende de la estructuración, las dimensiones de vigas, columnas y contraventeos, las propiedades mecánicas de los materiales, la calidad de la construcción y mantenimiento, entre otros factores.

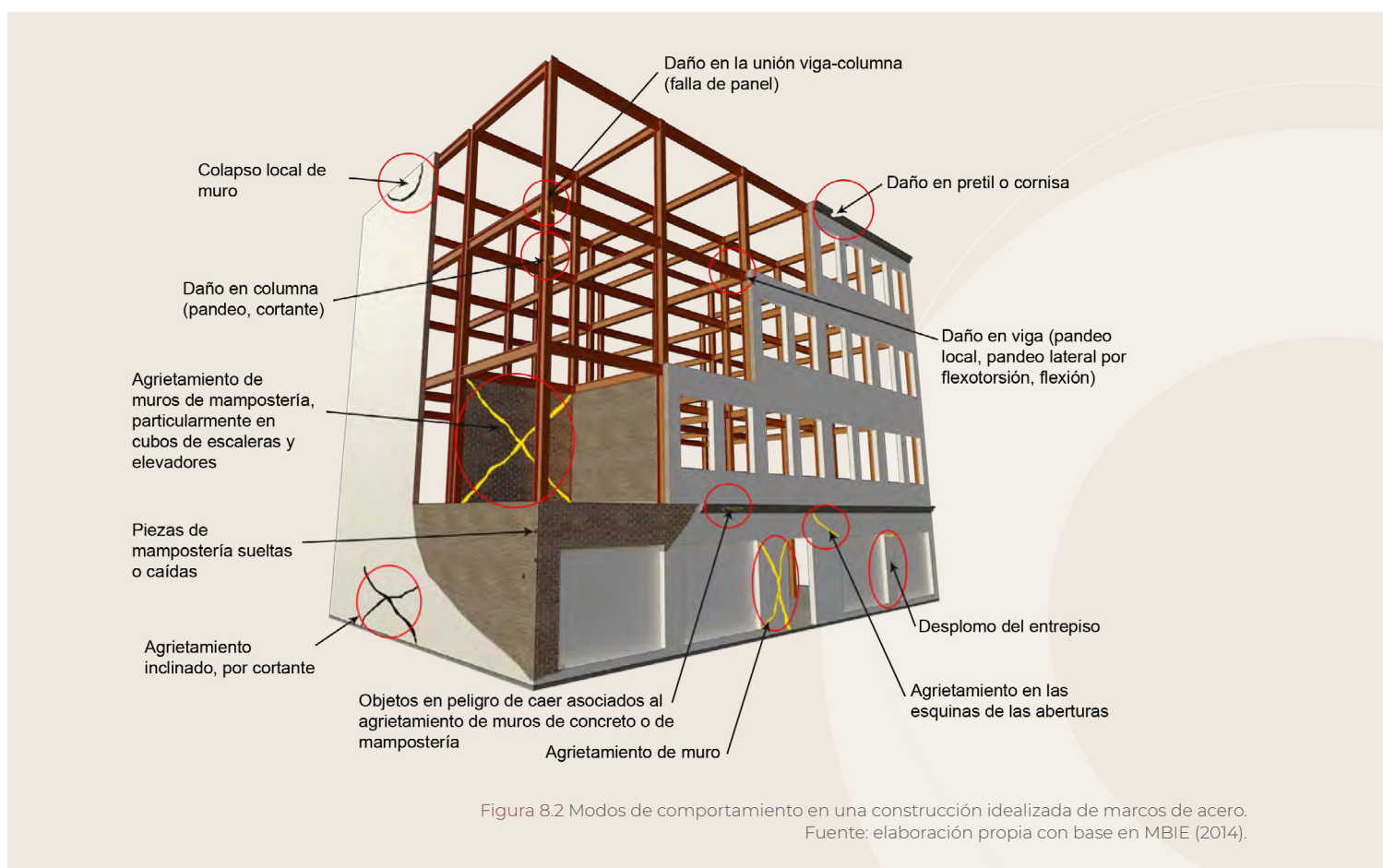


Figura 8.2 Modos de comportamiento en una construcción idealizada de marcos de acero. Fuente: elaboración propia con base en MBIE (2014).

### 8.2.1 Fallas por tensión

Ocurre en elementos que han sido sometidos a esfuerzos axiales de tensión cuando estos esfuerzos superan la resistencia a la fluencia del material hasta llegar a la rotura. En general, se presentan

en elementos estructurales como contraventeos de marcos y de cubierta, barras de contraventeo horizontal en cubiertas, placas de conexiones metálicas, armaduras de cubiertas sometidas a carga axial, por ejemplo. Se caracteriza por exhibir tres modos de comportamiento:



Figura 8.2.1.a Falla en placa de contraventeo por flujo plástico en la sección total.  
 Fuente: [http://learningfromearthquakes.org/2011-03-11-tohoku-japan/images/2011\\_03\\_11\\_tohoku\\_japan/photos/PGarage-Gusset-Fracture.jpg](http://learningfromearthquakes.org/2011-03-11-tohoku-japan/images/2011_03_11_tohoku_japan/photos/PGarage-Gusset-Fracture.jpg)



Figura 8.2.1.b Falla en placa de contraventeo por flujo plástico en la sección neta.  
 Fuente: [http://learningfromearthquakes.org/2011-03-11-tohoku-japan/images/2011\\_03\\_11\\_tohoku\\_japan/photos/DSC\\_0010.jpg](http://learningfromearthquakes.org/2011-03-11-tohoku-japan/images/2011_03_11_tohoku_japan/photos/DSC_0010.jpg)



Figura 8.2.1.c Falla por tensión y cortante combinados en placa de conexión.  
 Fuente: <https://m2ukblog.wordpress.com/2016/05/28/block-shear-failure-in-tension-members/>

- a. Flujo plástico en la sección total. Es un modo de falla dúctil. Se presenta en un elemento que ha sido alargado axialmente hasta el punto de fluencia del material, produciendo una deformación permanente (deformación plástica) y una reducción del área transversal total hasta la rotura del elemento. Las grietas del elemento se presentan perpendiculares a la dirección de la carga actuante en donde se presenta la reducción del área transversal. Pueden desencadenar fallas en los elementos adyacentes e, incluso, la falla del sistema estructural.
- b. Fractura de la sección neta. Es un modo de falla frágil. La fractura se presenta en el área neta transversal que se obtiene al descontar los agujeros de una conexión. Debido que el área neta es menor que el área gruesa de la placa, el material fluye bajo una fuerza de magnitud más baja. Las fallas se presentan de manera perpendicular a la dirección de la carga en una sección a través de los agujeros.
- c. Fractura en bloque de cortante y tensión combinados. Este modo de falla se caracteriza por el corte y desprendimiento de un bloque de material. Se asocia directamente con las conexiones atornilladas, pero también se puede presentar en las juntas soldadas. La falla se presenta a través de un grupo de tornillos en línea, produciendo un desgarramiento del elemento a lo largo de la línea de agujeros. En juntas soldadas, se presenta a lo largo de la línea de soldadura. Su ocurrencia depende de la resistencia y geometría de las juntas de conexión donde se presentan las concentraciones de esfuerzos.

### 8.2.2 Fallas por compresión

Estas fallas ocurren en columnas y contraventeos y dependen del tipo de material, condición de apoyo del elemento (como placas de contraventeos y placas de rigidez) y la longitud efectiva del elemento. Los modos de comportamiento son:

- a. Falla por aplastamiento. Ocurre en columnas cortas y en placas base de poco espesor. Las deformaciones se presentan únicamente en

el eje longitudinal, no se presentan deformaciones laterales. Se alcanzan cuando la carga actuante es mayor a la carga de fluencia del elemento, produciendo un desplazamiento uniforme hasta alcanzar un ligero endurecimiento por fluencia. Si la columna está hecha a base de perfiles soldados entre sí, es posible que la falla se manifieste por la fractura de la soldadura y el pandeo local de placas.

- b. Pandeo general por flexión. Es una deformación lateral súbita de todo el elemento. Se presenta siempre en el plano de menor resistencia a la flexión, si no hay restricciones laterales que lo impidan (De Buen, 2020). Se caracteriza porque no hay deformación de la sección transversal del elemento.
- c. Pandeo local. Tiende a presentarse primero en la placa de menor rigidez, pero su iniciación se retrasa por las restricciones que imponen las

demás sobre las rotaciones de sus bordes, por lo que en general no se pandea una sola placa, sino es todo el conjunto el que entra eventualmente en un estado de inestabilidad (De Buen, 2020). Este estado se caracteriza por una distorsión de la sección transversal completa, excepto cuando las placas que la componen tienen rigideces muy diferentes unas de otras.

- d. Pandeo por flexotorsión. Ocurre en perfiles que tienen propiedades geométricas muy diferentes con respecto a sus ejes centroidales y principales, los momentos están aplicados alrededor del eje de mayor momento de inercia y no hay ningún soporte lateral entre los extremos (De Buen, 2020). Las deformaciones laterales consisten en la combinación de la torsión sobre el eje de la columna y la flexión alrededor de uno o de los dos ejes de flexión del miembro.

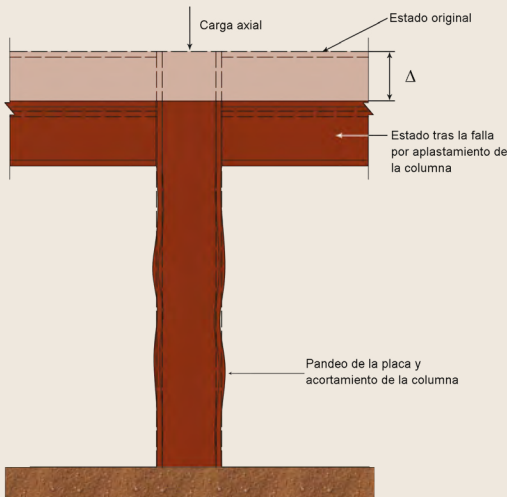


Figura 8.2.2.a Falla por aplastamiento de una columna de acero.  
Fuente: elaboración propia.

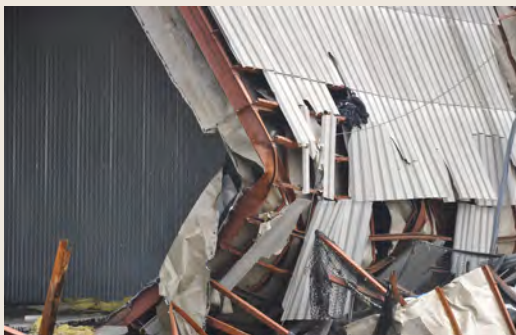


Figura 8.2.2.b Pandeo general por flexión en elementos de contraventeo.  
Fuente: [http://learningfromearthquakes.org/2011-03-11-tohoku-japan/images/2011\\_03\\_11\\_tohoku\\_japan/photos/DSC\\_1257.jpg](http://learningfromearthquakes.org/2011-03-11-tohoku-japan/images/2011_03_11_tohoku_japan/photos/DSC_1257.jpg)

Figura 8.2.2.c Pandeo local de la sección (patines).  
Fuente: Wang et al. (2014).

Figura 8.2.2.d Pandeo por flexotorsión.  
Fuente: [http://learningfromearthquakes.org/2011-03-11-tohoku-japan/images/2011\\_03\\_11\\_tohoku\\_japan/photos/DSC\\_0399.jpg](http://learningfromearthquakes.org/2011-03-11-tohoku-japan/images/2011_03_11_tohoku_japan/photos/DSC_0399.jpg)



Figura 8.2.3.a Rotura del patín y alma tras la fluencia de la viga.  
Fuente: Gioncu y Anastasiadis (2014).

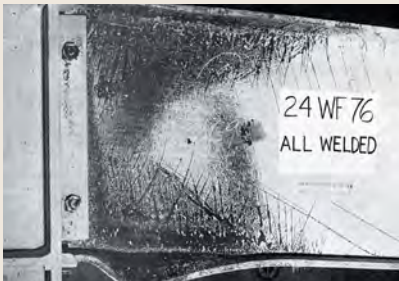


Figura 8.2.3.b Fallas por pandeo local de los patines y el alma tras la formación de las articulaciones plásticas de las vigas.  
Fuente: cortesía de Michael Engelhardt (2020).



Figura 8.2.3.c Falla por pandeo lateral y torsión tras la formación plástica de una viga.  
Fuente: cortesía de Michael Engelhardt (2020).

### 8.2.3 Fallas por flexión

Se pueden presentar en vigas (De Buen, 2020):

- Por exceso de flexión en el plano de las cargas y formación eventual de un mecanismo de articulaciones plásticas.
- Por cortante.
- Por inestabilidad (pandeo local o pandeo lateral por flexotorsión).

La resistencia a flexión depende de:

- La geometría del perfil (ejemplo: perfiles en forma de I, canal, rectangular, T, etc.).
- Las relaciones ancho/grueso de las placas que conforman al perfil.
- La resistencia del acero con el que está fabricado el perfil.
- La longitud libre de arriostramiento.

Las fallas por flexión son:

- Falla por exceso de flexión. Es un modo de falla dúctil, ideal para el comportamiento inelástico de la estructura. Se produce en una sección del elemento cuando se alcanza el límite de fluencia del material. Para evitar el pandeo lateral, se deben proveer elementos de arriostramiento lateral. En ocasiones, la falla se presenta por fractura de la placa del patín, la cual se extiende hacia el alma.
- Falla por pandeo local de los patines o alma. Tiende a presentarse primero en la placa de menor rigidez, pero su iniciación se retrasa por las restricciones que imponen las demás sobre las rotaciones de sus bordes, por lo que, en general, no se pandea una sola placa, sino es todo el conjunto el que entra eventualmente en un estado de inestabilidad (De Buen, 2020). Este estado se caracteriza por una distorsión de la sección transversal completa, excepto cuando las placas que la componen tienen rigideces muy diferentes unas de otras.
- Falla por pandeo lateral y torsión. Es un modo de falla general del elemento en el cual, a la deformación por flexión en el plano de la carga gravitacional, se le añaden las debidas al pandeo lateral y la torsión de la sección transversal



(De Buen, 2020). Depende de la geometría del perfil (momento de inercia de la sección transversal del perfil con respecto al eje centroidal Y, constante de torsión de Saint Venant, constante de torsión por alabeo), la variación de las cargas a lo largo de la viga, las condiciones de apoyo y los arriostramientos laterales, entre otros. En la figura, nótese las deformaciones de torsión y laterales de la viga.

### 8.2.4 Falla por cortante

Las fallas por cortante ocurren, por lo general, en las conexiones entre elementos (conexión de la columna a la placa base, viga-columna, viga-viga, por ejemplo), en elementos que aportan rigidez a una sección, como los atiesadores de vigas y columnas, o en elementos sometidos a cargas súbitas, como explosiones o impacto. Por lo general, se presentan en zonas con concentraciones de esfuerzos de corte en el elemento. Los esfuerzos cortantes no son condiciones críticas para el diseño, sin embargo, la magnitud y cercanía a los apoyos de cargas concentradas pueden generar una condición de falla.



Figura 8.2.4.a Falla por cortante en la placa base de una columna. Fuente: Marshall, Gilvary y Kestner (2012).

En elementos de acero a flexión, la fuerza cortante se resiste mediante la formación de un campo de tensión diagonal en el alma del perfil. Es frecuente que la placa del alma, y en ocasiones la del patín, experimenten pandeo.

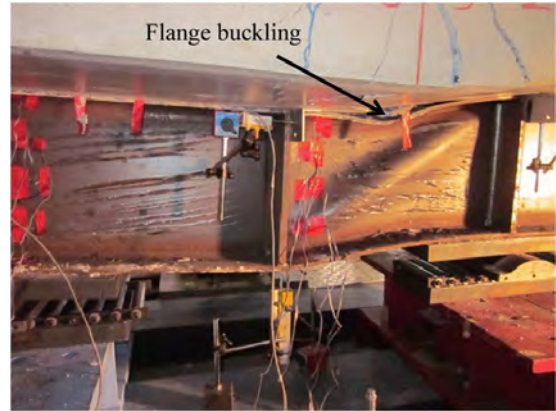
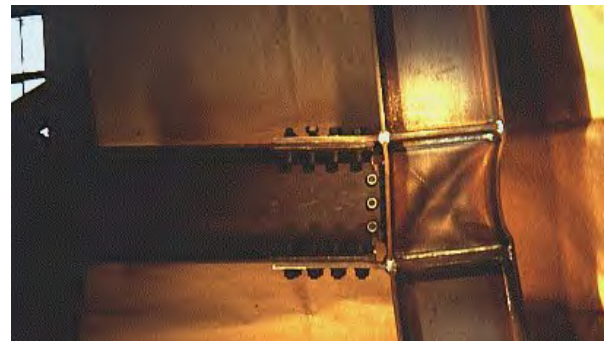


Figura 8.2.4.b Falla por cortante con pandeo del alma y del patín. Fuente: Vasdravellis y Uy (2014).

### 8.2.5 Fallas en conexiones

Las juntas de miembros estructurales tienen la función de transmitir las cargas entre los miembros. Según el diseño, las conexiones pueden transmitir fuerzas axiales, momentos flexionantes, momentos torsionantes y fuerzas cortantes con sus distintas combinaciones. Los modos de comportamiento son condicionados por el tipo de las cargas actuantes.

Un modo de falla muy frecuente es por pandeo en la zona de panel. Es un modo de falla dúctil. Ocurre en el alma de una columna o viga con atiesadores empleados para evitar o retrasar el pandeo local de los patines. Este modo de falla se presenta al interior de la zona de panel como una serie de arrugas diagonales que evidencian la formación de un campo de esfuerzos de tensión (figura 8.2.5.a.i).



8.2.5.a.i Pandeo en zona de panel. Fuente: Ballio et al. (1987).

Rotura de zona de panel. Es un modo de falla dúctil. La falla inicia con el pandeo local y la posterior fractura de la placa de la zona de panel (figura 8.2.5.a.ii).



8.2.5.a.ii Rotura en zona de panel.  
Fuente: <https://www.structuremag.org/wp-content/uploads/2014/08/0814-sp-2.jpg>

De acuerdo con Somers y Pense (1994), las fallas de las soldaduras dependen de cinco factores:

- Diseño geométrico inapropiado que dificulta la ejecución de la soldadura de diseño, lo que produce una soldadura deficiente y débil.
- Proceso de soldadura no especificado o inadecuado para los materiales a unir.
- Incompatibilidad de materiales con los procesos especificados, lo que ocurre cuando se emplean materiales distintos a los previstos en el diseño.
- Ejecución deficiente de las soldaduras debido a falta de destreza y conocimiento del soldador y falta de supervisión.
- Cambios o alteraciones estructurales mal diseñadas y/o ejecutadas, así como del medio ambiente (humedad, por ejemplo).

Los tipos de defectos en soldaduras incluyen falta de porosidad, inclusiones (usualmente de escoria), falta de fusión, porosidad (interna o superficial) debido a gases atrapados, socavación y reducción de la sección del metal base, relleno incompleto del material de aporte, agrietamiento (longitudinal o transversal) y exceso de material de aporte de penetración (véase las figuras 8.2.5.b a 8.2.5.h).



Figura 8.2.5.b Inclusión de escoria.  
Fuente: <https://technoweld.com.au/2019/11/13/the-most-common-welding-defects-causes-and-remedies/>



Figura 8.2.5.c Falta de fusión en la raíz en junta de doble bisel.  
Fuente: <https://technoweld.com.au/2019/11/13/the-most-common-welding-defects-causes-and-remedies/>



Figura 8.2.5.d Porosidad superficial en la soldadura.  
Fuente: <https://technoweld.com.au/2019/11/13/the-most-common-welding-defects-causes-and-remedies/>



Figura 8.2.5.e Socavación del material base.  
Fuente: <https://technoweld.com.au/2019/11/13/the-most-common-welding-defects-causes-and-remedies/>



Figura 8.2.f Con relleno incompleto.  
 Fuente: <https://technoweld.com.au/2019/11/13/the-most-common-welding-defects-causes-and-remedies/>



Figura 8.2.5.h Exceso de refuerzo en junta a tope.  
 Fuente: <https://technoweld.com.au/2019/11/13/the-most-common-welding-defects-causes-and-remedies/>

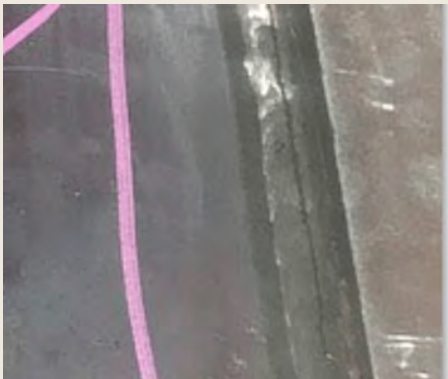


Figura 8.2.5.g Soldadura agrietada longitudinalmente.  
 Fuente: <https://technoweld.com.au/2019/11/13/the-most-common-welding-defects-causes-and-remedies/>

Algunos ejemplos de fallas de conexiones viga-columna soldadas se muestran en las figuras 8.2.5.i a 8.2.5.m.

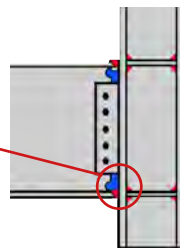


Figura 8.2.5.i Fractura de conexiones viga-columna soldadas a raíz del sismo de Northridge de 1994.  
 Fuente: cortesía de Michael Engelhardt (2020).



Figura 8.2.5.j Fractura de una conexión viga-columna en cajón soldada producida por el sismo de Northridge de 1994. Nótese la tarjeta personal a través de la soldadura fracturada.  
Fuente: cortesía de Michael Engelhardt (2020).



Figura 8.2.5.k Conexión viga-columna soldada que falló tras el sismo de Northridge de 1994. La grieta inició cerca de la raíz de la soldadura y se propagó dentro del patín de la columna. La fractura emergió del patín de la columna por arriba de la soldadura. Nótese la extracción de parte del patín de la columna.  
Fuente: cortesía de Michael Engelhardt (2020).



Figura 8.2.5.l Fractura de una unión viga-columna soldada durante el sismo de Northridge de 1994. La fractura se propagó desde la soldadura hacia la columna.  
Fuente: cortesía de Michael Engelhardt (2020).



Figura 8.2.5.m Fractura en la soldadura en una conexión viga-columna.  
Fuente: cortesía de Michael Engelhardt (2020).

Un modo de falla que se observa con frecuencia en conexiones soldadas es por desgarramiento laminar. Este modo de falla está asociado con las deformaciones en la dirección del espesor de las capas, provocadas por la retracción del metal de aporte, ocasionando una falla frágil. Se caracteriza por la formación de microláminas de soldadura y metal base debido a concentración de esfuerzos

en la junta. Por lo general, se producen en juntas que permiten movimientos perpendiculares al plano de laminación, por ejemplo, en uniones en forma de letra T, en esquina y cruz, así como los esfuerzos de corte en las juntas de las placas base de las columnas. En la figura 8.2.5.n se muestran fotos de cortes realizados en fallas de este tipo.

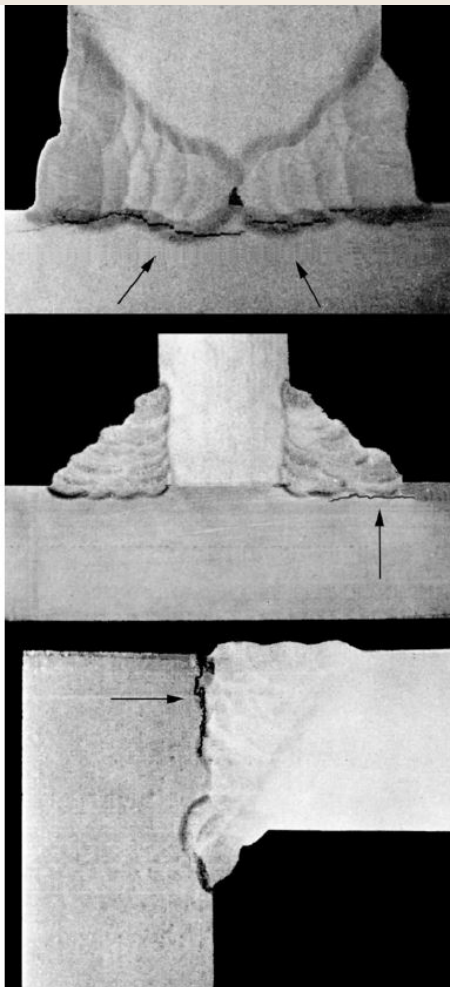


Figura 8.2.5.n Fallas por desgarramiento laminar.  
Fuente: American Welding Society (2015).

En la tabla 8.2 se describen los modos de comportamiento más usuales y los daños asociados por componente en estructuras a base de marcos con elementos hechos con perfiles de lámina doblados en frío y con muros diafragma. El daño observado se presenta para tres intensidades de daño (ligero, moderado y severo). Para cada intensidad, se incluyen los factores  $\lambda$  que se recomienda aplicar al cálculo de la rigidez, resistencia y capacidad de deformación para considerar el efecto del daño. Para nivel de daño nulo, el valor de los factores  $\lambda$  es igual a 1.

En la tabla, el significado de las letras es:

- **ND**: no disponible (para este nivel de daño, los valores de  $\lambda$  son cercanos a cero).
- $\lambda_D$ : factor reductor de la capacidad de desplazamiento en función del nivel de daño en el elemento estructural.
- $\lambda_K$ : factor reductor de la rigidez lateral que depende del nivel de daño en el elemento estructural.
- $\lambda_R$ : factor reductor de la resistencia lateral en función del nivel de daño del elemento estructural.

Tabla 8.2 Modos de comportamiento, daños asociados y factores reductivos  $\lambda$  para daños ligeros, moderados y severos en estructuras a base de marcos con elementos hechos con perfiles de lámina doblados en frío y con muros diafragma

Estructuras a base de marcos con elementos hechos con perfiles de lámina doblados en frío y con muros diafragma							
Componente	Modo de comportamiento	Descripción (a partir de observación)	Intensidad de daño	Descripción de daño (uno o más elementos)	Valores de $\lambda$		
					$\lambda_K$	$\lambda_R$	$\lambda_D$
MAS	Daño en la conexión	Es un modo de comportamiento frágil que puede desencadenar la formación de un mecanismo de entrepiso. Su falla es indeseable. Se caracteriza por agrietamiento y falla de la soldadura entre vigas y columnas y/o pandeo del alma de la viga. En este modo de comportamiento, la estructura no posee capacidad de carga lateral significativa si se llega a la falla de las conexiones.	Ligero	• Fluencia de la conexión (búscuese escamas de pintura)	0.9	1.0	1.0
			Moderado	• Acción de palanca y deslizamiento de la conexión	0.9	0.8	0.8
			Severo	• Fractura de conexión y • Posible agrietamiento y aplastamiento en esquina del muro	ND	ND	ND





## CAPÍTULO 9

### Marcos de concreto o acero con muros diafragma

La construcción de muros de mampostería dentro de las crujías de marcos es una de las modalidades de construcción más antiguas. En este sistema, los marcos están diseñados para resistir las cargas gravitacionales mediante vigas y columnas, mientras que los muros conforman la envolvente del edificio y/o las divisiones internas. Es frecuente que los muros divisorios no hayan sido considerados en los cálculos de rigidez y resistencias laterales. Cuando se consideran como parte del sistema resistente a fuerzas laterales, la estructura se analiza modelando el muro diafragma como una o varias diagonales equivalentes dentro de la crujía del marco y en cada dirección de análisis.

Algunos problemas observados en el comportamiento de este sistema son causados por discontinuidades en la disposición vertical de muros diafragma, las que resultan en pisos suaves o patrones alternados de crujías con y sin muros (tipo tablero de ajedrez)

que conducen a concentraciones de fuerzas entre los componentes estructurales.

Existe una amplia variedad de materiales usados en muros diafragma: piezas de mampostería macizas o huecas de arcilla y concreto, concreto colado en sitio, paneles de concreto prefabricado y piezas de concreto aireado curado en autoclave. Los muros diafragma pueden ser de mampostería y concreto simples o reforzados con alguna modalidad (confiados o reforzados interiormente).

El comportamiento de marcos de concreto o acero con muros diafragma ha sido variable en México. En general, es especial en edificios anteriores a 1985, los muros han sido considerados como elementos divisorios, es decir, como no estructurales. Sin embargo, los daños causados por los sismos han hecho evidente la contribución de los muros a la rigidez, resistencia y disipación de energía del sistema. Gracias a esta participación, los marcos débiles y con detallado inapropiado para disipar energía han logrado sobrevivir sin colapso, aunque con daños considerables.

## 9.1 MATERIALES Y ESTRUCTURACIÓN

Las normas de construcción en México, como las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería de la Ciudad de México, NTC-M (GobCdMx, 2017), establecen requisitos para el análisis y diseño de muros diafragma de mampostería.

El material más comúnmente usado en México en muros diafragma es la mampostería de barro recocido. En edificios antiguos, estos muros son de mampostería simple; en estructuras más recientes es frecuente encontrar muros con castillos (sin dalas), muchas veces con dimensiones y cuantía de refuerzo escaso. También es usual hallar muros hechos a base de tabiques huecos de arcilla (tipo doble hueco o multiperforado). Los

muros con piezas macizas exhiben, por lo general, un comportamiento más dúctil que el de muros con piezas huecas, cuyo modo de falla, caracterizado por el desconchamiento de las paredes exteriores, es abrupto.

Los muros diafragma se han construido con bloques huecos de concreto. En la mayoría de los casos, estos muros carecen de refuerzo interno, lo que los hace comparativamente débiles con respecto a los reforzados interiormente. Cuando las fuerzas inducidas por el sismo son elevadas, las fuerzas de compresión en el muro producen el desprendimiento frágil de las paredes de las piezas y el consecuente aplastamiento de la mampostería. La mampostería con relleno, parcial o total, exhibe un mejor comportamiento porque tiene una mayor resistencia a la compresión diagonal y al deslizamiento por cortante a lo largo de las hiladas.

En la figura 9.1 se presentan dos curvas de histéresis de muros diafragma con piezas macizas y huecas, respectivamente. Las curvas del muro diafragma con piezas macizas tienen una capacidad de deformación mayor que las del muro con piezas huecas. Así, mientras que el muro con piezas huecas alcanza su resistencia para una distorsión ligeramente superior que 0.005, el muro con piezas macizas alcanzó su capacidad de carga para una distorsión del doble. Se entiende por distorsión al desplazamiento lateral aplicado dividido entre la altura del muro.

Los muros diafragma también pueden construirse con concreto colado en el sitio o con elementos prefabricados. En épocas más recientes, la adición de muros diafragma se ha utilizado como técnica de rehabilitación.

En cuanto a su geometría, los muros diafragma tienen relaciones de aspecto altura/longitud del muro que varían entre 1:1 y 1:3. No es raro encontrar muros diafragma excéntricos con respecto al eje del marco.



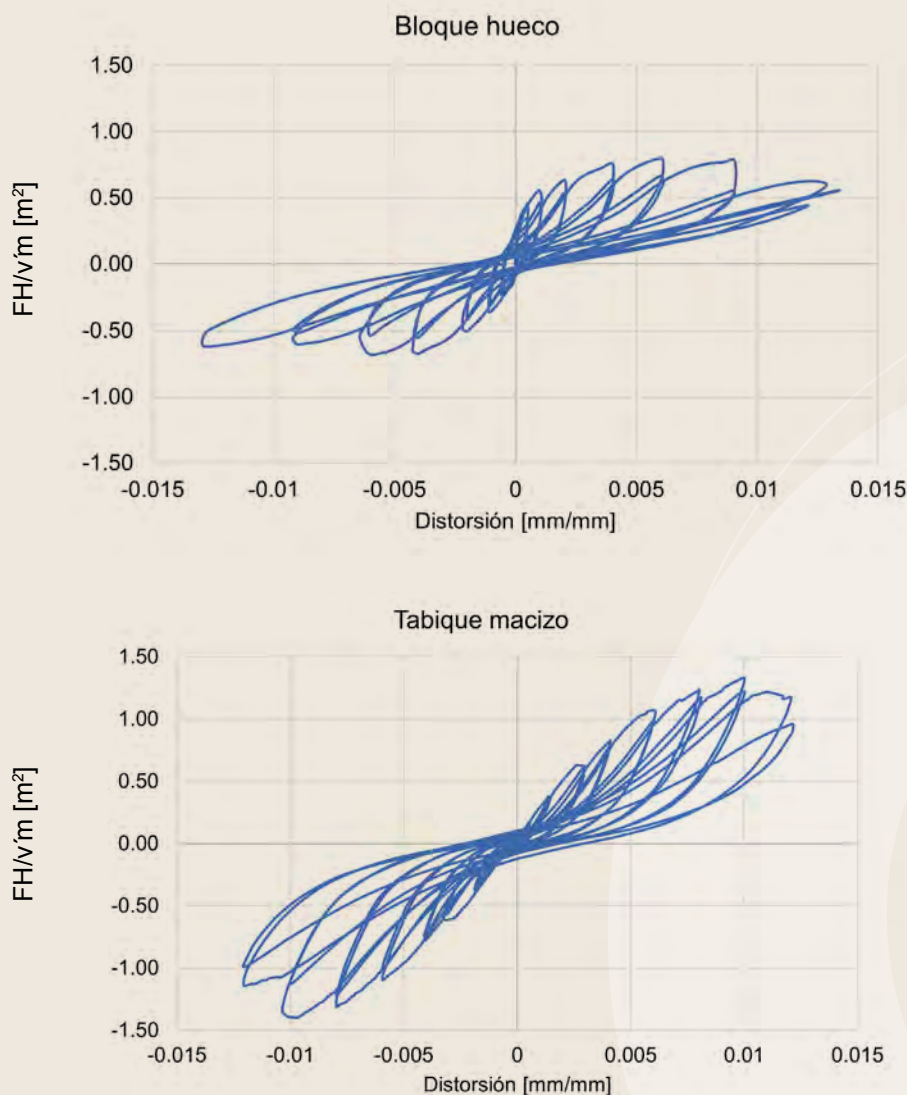


Figura 9.1 Comportamiento histerético de muros diafragma hechos con piezas macizas y huecas.  
 Fuente: cortesía de Leonardo Flores (2020).

El comportamiento de un muro diafragma está fuertemente condicionado por la presencia, o no, de aberturas. Muros con aberturas pueden exhibir comportamientos muy distintos, dependiendo de su ubicación y de su tamaño relativo a la superficie del muro. Entre las aberturas más convencionales están las puertas y ventanas. Cuando la altura del muro es parcial (es decir, no cubre la altura total del entrepiso), esto puede ocasionar un mecanismo de falla de entrepiso

controlado por “muros cortos” similar al de “columnas cortas”.

Los marcos pueden ser de acero o de concreto. Las características de los marcos de acero han evolucionado con el tiempo. En las edificaciones más antiguas, se encuentran columnas y vigas con secciones tipo I o hechas a base de varios perfiles, unidos en conexiones semi rígidas a base de pernos. En las edificaciones más recientes se usan

perfiles rolados en caliente unidos por medio de tornillos o soldadura. Es frecuente encontrar marcos encamisados con concreto, especialmente en edificios de las primeras décadas del siglo XX.

En México, los marcos de concreto con muros diafragma son los más frecuentes; según su detallado, pueden ser clasificados en marcos no dúctiles y dúctiles para desarrollar un comportamiento inelástico estable. En la sección 7.1 se pueden consultar las características más sobresalientes de estos dos tipos de detallado.

La mayor parte de los edificios expuestos a sismos con muros diafragma comprende marcos de concreto no dúctiles. Las deficiencias más usuales en ellos son: columnas más débiles a flexión que las vigas, refuerzo transversal escaso, con separaciones amplias y con dobleces a 90 grados, así como nudos viga-columna sin refuerzo transversal. Una cuantía baja de refuerzo transversal en

un elemento de concreto conduce a un deficiente confinamiento del concreto, baja resistencia a fuerza cortante cíclica y una menor resistencia a la adherencia del refuerzo longitudinal. En estas condiciones, los marcos no dúctiles son especialmente vulnerables a presentar fallas por cortante en columnas, vigas y en sus uniones, que pueden tener consecuencias catastróficas.

## 9.2 COMPONENTES DE MARCOS CON MUROS DIAFRAGMA Y MODOS DE COMPORTAMIENTO

Los componentes de marcos con muros diafragma se pueden dividir en cinco tipos (figura 9.2) (FEMA 306, 1998). La denominación MMD se refiere a Marcos con Muros Diafragma. En la tabla 9.1 se resumen las características de los tipos de componentes de marcos con muros diafragma.

Figura 9.2 Componentes de marcos con muros diafragma.

Fuente: elaboración propia.

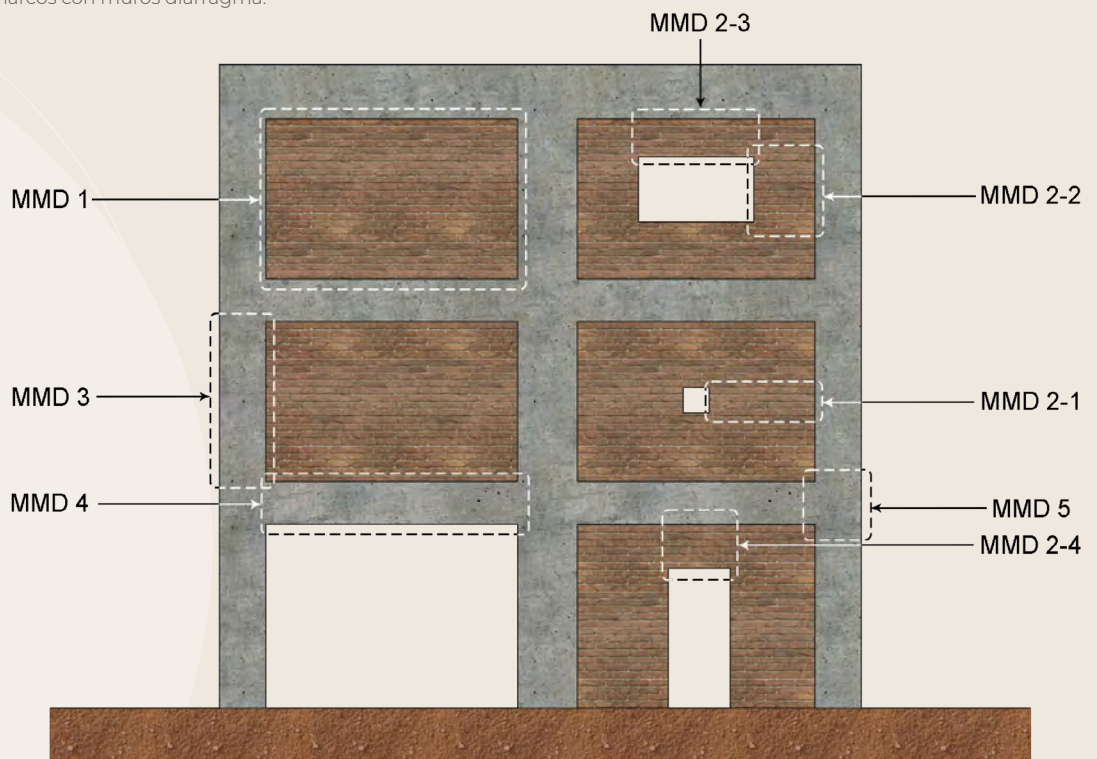


Tabla 9.1 Tipos de componentes en marcos con muros diafragma de mampostería (MMD)

Tipo de componente		Descripción
MMD1	Muro sin aberturas	La cruja del marco está totalmente rellena por el muro diafragma. Éste puede ser de concreto (simple o reforzado) o de mampostería (de arcilla o concreto, hueca o maciza), simple, confinada o reforzada interiormente.
MMD2	Muro con aberturas	<p>Las aberturas pueden ser puertas, ventanas, huecos horizontales o verticales, o muros de altura parcial. Se subdividen en:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• MMD2-1: segmento de muro fuerte.</li> <li>• MMD2-2: segmento de muro débil.</li> <li>• MMD2-3: viga de acoplamiento débil.</li> <li>• MMD2-4: viga de acoplamiento fuerte.</li> </ul> <p>Puede ser de concreto (simple o reforzado) o de mampostería (de arcilla o concreto, hueca o maciza), simple, confinada o reforzada interiormente.</p> <p>El comportamiento de los subcomponentes se discute en el capítulo 6 si son de mampostería, y en el 7 si son de concreto.</p> <p>Los subcomponentes interactúan con el marco y pueden modificar su comportamiento. Se deben revisar los modos de comportamiento de este componente.</p> <p>Un subcomponente es más resistente que otro al que está unido si sus resistencias, a flexión y/o a fuerza cortante, son superiores. Es factible que un subcomponente sea más resistente a flexión, por ejemplo, pero menos a fuerza cortante, de forma que su comportamiento quede controlado por ésta.</p>
MMD3	Columna del marco	Elemento vertical, de concreto o acero, que soporta la carga gravitacional.
MMD4	Viga del marco	Elemento horizontal, de concreto o acero, que soporta la carga gravitacional.
MMD5	Unión viga-columna del marco	Conexión entre columnas y vigas. Puede ser rígida, semi rígida o simple. Según el material, puede ser monolítica de concreto, de elementos prefabricados, o bien, de acero atornillada, soldada o con pernos.

Los modos de comportamiento de estructuras a base de muros diafragma se describen brevemente en el cuadro 9.1. Junto a cada explicación se muestran fotografías de los modos de comportamiento observados en el campo. En la figura 9.3 se presentan los modos de comportamiento en una construcción idealizada de marcos de concreto con muros diafragma. Asimismo, se marcan los modos de comportamiento descritos

en el cuadro 9.1. Esta figura no debe interpretarse como que todos los modos de comportamiento pueden ocurrir simultáneamente. Existe una jerarquía de modos de comportamiento que depende de la estructuración, las dimensiones de muros, segmentos de muro, columnas y vigas, las propiedades mecánicas de los materiales, la calidad de la construcción y mantenimiento, entre otros factores.

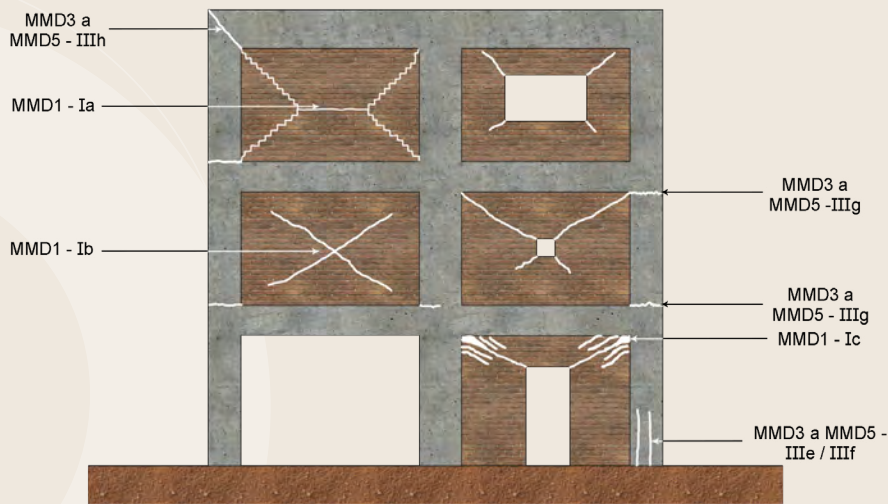


Figura 9.3 Modos de comportamiento en una construcción idealizada de marcos de concreto con muros diafragma. Fuente: elaboración propia.

## Cuadro 9.1 Descripción de los modos de comportamiento de los componentes de marcos con muros diafragma

### I. Componente MMD1 – Muros sin aberturas

- Deslizamiento por cortante a lo largo de juntas. Ocurre en mampostería, especialmente cuando la relación altura-longitud del muro es pequeña y la resistencia del mortero es baja. Este modo es más frecuente en marcos resistentes y flexibles, como los de acero. Por lo regular, ocurre a la mitad de la altura del muro. Es una falla asociada a grandes desplazamientos laterales de la estructura.



Fuente: cortesía del INIFED (2019).

- b. Tensión diagonal. Cuando la estructura se deforma lateralmente, se desarrollan esfuerzos de compresión diagonales de magnitud considerable. Perpendiculares a estos esfuerzos y deformaciones principales a compresión, ocurren deformaciones de tensión. Si la magnitud de éstas excede la deformación de agrietamiento del material del muro, se producen grietas inclinadas; éstas inician en el centro del muro y se extienden paralelas al puntal (de compresión) diagonal. Conforme aumentan los desplazamientos, las grietas se propagan hasta extenderse en la diagonal completa. Este modo de falla es el más frecuente. Las grietas pueden atravesar las piezas y el mortero, o bien, seguir las juntas en forma de escalera. En ocasiones, se combina con deslizamiento de juntas.

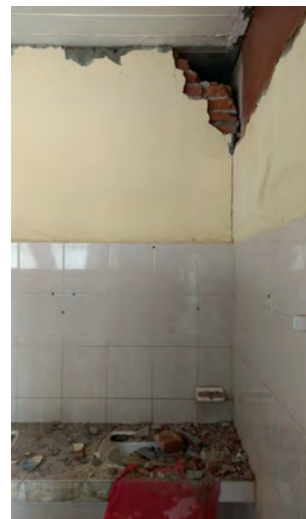


Fuente: cortesía del INIFED (2019).

- c. Aplastamiento en las esquinas. Este tipo de daño es inevitable y ocurre por una alta concentración de fuerzas en las esquinas extremas del puntal diagonal. En el caso de marcos resistentes y rígidos, el aplastamiento es muy localizado; en el caso de marcos más débiles y flexibles, el aplastamiento se extiende a lo largo de la mampostería siguiendo las caras de la columna y de la viga. Incluso, el marco de concreto puede aplastarse. A pesar de su apariencia, éste es un modo de falla que permite una capacidad moderada de deformación inelástica, especialmente si las piezas son macizas. Conforme aumenta el desplazamiento lateral, el daño se extiende hacia el centro del claro o hacia la mitad de la altura de la columna.



Fuente: cortesía del INIFED (2019).



- d. Falla fuera del plano. Se requieren grandes aceleraciones para que este tipo de falla ocurra. Es más frecuente en los pisos superiores de edificios de gran altura. Se ha observado que los muros tienden a desplazarse, poco a poco, fuera de plano. Es un modo de falla de tipo frágil.



Fuente: cortesía del CENAPRED (2020b).

## II. Componente MMD2 – Muros con aberturas

La mejor manera de analizar los modos de comportamiento de muros con aberturas es mediante el estudio de los modos de comportamiento de sus subcomponentes, el cual se puede consultar en los capítulos sobre estructuras de mampostería y concreto (capítulos 6 y 7, respectivamente). La interacción de estos subcomponentes con el marco circundante puede producir:

- Fallas por cortante en vigas, si las columnas y segmentos de muros son resistentes.
- Fallas en columnas por efecto de “columna corta”, en caso de subcomponentes de vigas de acoplamiento muy resistentes y pretiles en la parte inferior.
- Fallas por fluencia a tensión o de traslape en la columna por la interacción del muro diafragma.



Fuente: cortesía del INIFED (2019).

## III. Componentes MMD3 a MMD5 – Componentes de marcos

- a. Fluencia del acero por flexión. Este tipo de comportamiento ocurre en marcos de acero en las zonas adyacentes a conexiones rígidas. Normalmente, se observa en la base de las columnas de la planta baja. Se evidencia por el agrietamiento de la pintura (si existe) y pandeo de los patines. Dada la capacidad intrínseca de las estructuras metálicas a desarrollar articulaciones plásticas con gran capacidad de rotación, este modo de falla es comúnmente poco significativo desde el punto de vista de la estabilidad estructural.



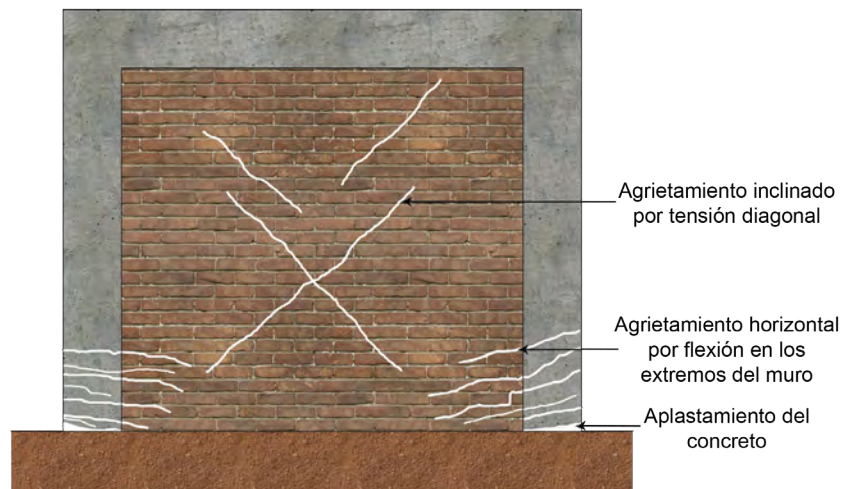
- b. Fluencia del acero por cortante. Cuando el aplastamiento en la esquina del muro se extiende paralelo a la columna, se desarrolla una fuerza cortante de magnitud elevada en el extremo de la columna. Si la columna tiene un espesor de placa del alma bajo (secciones no compactas), la fuerza cortante puede producir pandeo del alma y deformaciones de cortante de magnitud considerable. Este modo de falla es dúctil, tal que no es muy serio desde el punto de vista de la estabilidad de la estructura.



Fuente: cortesía del INIFED (2019).

- c. Falla de conexiones con pernos o tornillos. Si el marco se encuentra recubierto de concreto, ante grandes desplazamientos laterales, el concreto tiende a fallar y desprenderse. Si el marco no está cubierto de concreto, la conexión puede fluir. Si el muro es muy resistente, el puntal diagonal puede causar tensiones en el marco que produzcan deformaciones locales visibles. Si no hay fractura en los elementos metálicos o en sus conexiones, este modo de falla no es de preocupación por la elevada capacidad dúctil de estructuras de acero.

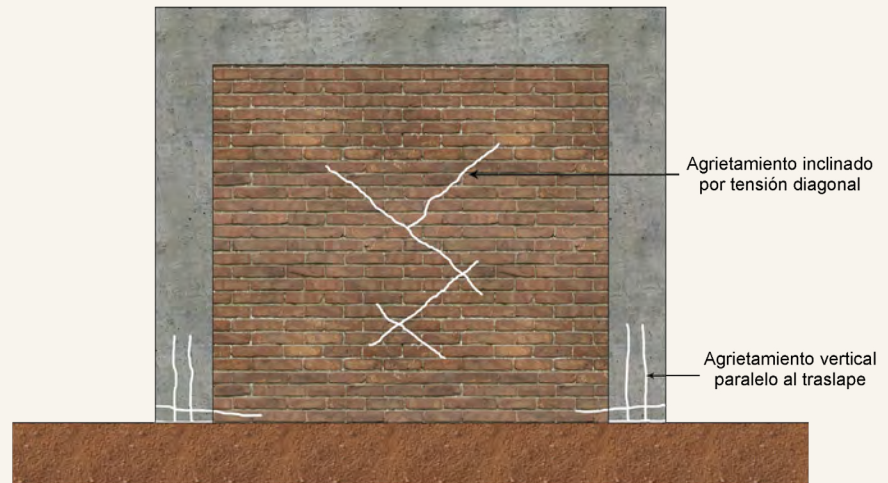
- d. Fluencia del acero por flexión en marcos de concreto. Este modo de falla ocurre en marcos de concreto cuando son desplazados lateralmente a distorsiones superiores a 0.5%. La fluencia ocurre en las zonas de máximos momentos flexionantes, es decir, en los extremos de las vigas y de las columnas. La fluencia por flexión se caracteriza por agrietamiento a tensión del concreto y aplastamiento del concreto a compresión. Momentos flexionantes grandes producen fuerzas cortantes de magnitud significativa que, a su vez, pueden causar mayor agrietamiento (inclinado) y aplastamiento del concreto. Para que ello ocurra, los desplazamientos deben ser considerables. En una estructura a base de muros diafragma, este tipo de comportamiento suele ocurrir en la planta baja, en donde las demandas de fuerza cortante y de distorsión son máximas.



Fuente: elaboración propia.

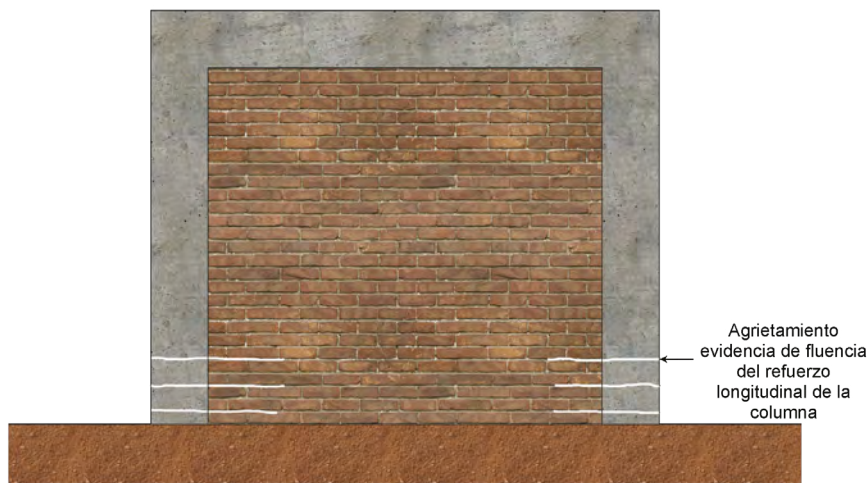


- e. Deslizamiento en traslapes de barras. En algunos casos, los edificios más antiguos de concreto tienen traslapes en las barras longitudinales en el extremo inferior de columnas. Ante desplazamientos laterales considerables, el concreto se agrieta a flexión (horizontalmente) y por falla de adherencia (verticalmente) en forma paralela a las barras de refuerzo. El agrietamiento vertical es un signo de la pérdida de adherencia y del consecuente inicio del deslizamiento de las barras en relación con el concreto. Conforme aumentan los ciclos de carga-desplazamiento lateral, se destruye la adherencia y la capacidad a resistir momento puede perderse totalmente. Si bien el daño puede resultar impactante, la estructura posee cierta capacidad para transmitir la carga axial y la fuerza cortante.



Fuente: elaboración propia.

- f. Fluencia por tensión en columnas. Ocurre cuando el muro diafragma contribuye significativamente al comportamiento del edificio, tal que el marco se comporta como uno arriostrado. De este modo, las columnas del marco deben resistir las fuerzas laterales y las fuerzas de compresión y tensión producto del momento de volteo. En edificios antiguos de concreto, las cuantías de refuerzo longitudinal son bajas, por lo que su resistencia a la compresión es superior a la de tensión. Ello facilita la fluencia por tensión en las columnas. Este modo de falla ocurre a desplazamientos importantes de la estructura y está controlado por la capacidad de deformación del muro diafragma.



Fuente: elaboración propia.





- g. Falla por cortante en elementos del marco de concreto. Si el muro diafragma es muy resistente, será capaz de generar fuerzas cortantes de magnitud considerable conforme se deforme lateralmente. Estas fuerzas se transmiten al marco. Si, además, el muro diafragma se aplasta en las esquinas, el puntal diagonal tiende a ampliar su anchura y a transmitir fuerzas cortantes altas en las vigas y/o columnas, comúnmente a un peralte de la esquina. Esta elevada demanda de cortante en los elementos del marco causa grietas inclinadas de gran ancho y una eventual pérdida del recubrimiento.

Si el marco es muy débil, es factible que pierda el recubrimiento dada la expansión del núcleo de concreto. Ésta es una condición muy peligrosa, ya que la columna ha perdido buena parte de su capacidad de resistir carga gravitacional.



Fuente: cortesía del INIFED (2019).

- h. Falla en la unión viga-columna de concreto. Éste es un modo de falla muy frecuente en marcos con muros diafragma. A las ya de por sí elevadas fuerzas cortantes que obran en un nudo debido a grandes desplazamientos laterales, se les suman las impuestas por el puntal diagonal del muro. En estructuras anteriores a 1985, el comportamiento de la unión es inadecuado dado que no posee refuerzo transversal alguno. Dicha deficiencia facilita la ocurrencia de grietas inclinadas, en forma de letra X. Ante ciclos de carga de intensidades elevadas, el recubrimiento del nudo se aplasta y se desprende, facilitando la expansión del núcleo de concreto y el consecuente pandeo del refuerzo vertical en el nudo. Este tipo de daño reduce la capacidad de la estructura para resistir mayores fuerzas laterales, así como para transmitir las cargas axiales en las columnas a través de nudos muy deteriorados. Es un modo de falla muy indeseable.



Fuente: cortesía del INIFED (2019).

En la tabla 9.2 se describen los modos de comportamiento más usuales y los daños asociados por componente estructural de estructuras a base de marcos con muros diafragma. El daño observable se presenta para tres intensidades de daño (ligero, moderado y severo). Para cada intensidad, se incluyen los factores  $\lambda$  que se recomienda aplicar al cálculo de la rigidez, resistencia y capacidad de deformación para considerar el efecto del daño. Para nivel de daño nulo, el valor de los factores  $\lambda$  es igual a 1.

En la tabla, el significado de las letras es:

- Al final del nombre del componente (Ia, IIIg...), se refiere al modo de comportamiento descrito en el cuadro 9.1.

- **G**: grieta perpendicular al eje, usualmente por flexión, mm.
- **GI**: grieta inclinada, mm.
- **DR**: desplazamiento horizontal residual de la estructura o del entrepiso más deformado, mm.
- $\lambda_D$ : factor reductor de la capacidad de desplazamiento en función del nivel de daño en el elemento estructural.
- $\lambda_K$ : factor reductor de la rigidez lateral que depende del nivel de daño en el elemento estructural.
- $\lambda_R$ : factor reductor de la resistencia lateral en función del nivel de daño del elemento estructural.

Tabla 9.2 Modos de comportamiento, daños asociados y factores reductivos  $\lambda$  para daños ligeros, moderados y severos en estructuras a base de marcos con muros diafragma

Componente	Modo de comportamiento	Descripción (a partir de observación)	Intensidad de daño	Descripción de daño (uno o más elementos)	Valores de $\lambda$		
					$\lambda_K$	$\lambda_R$	$\lambda_D$
MMDI-Ic Marco de concreto	Aplastamiento del muro en esquina	Ocurre en piezas más débiles que las columnas de concreto. Los movimientos laterales causan una concentración de deformaciones en las esquinas, lo que ocasiona una falla prematura en las piezas de las esquinas, sobre todo si son huecas o multiperforadas. Este aplastamiento se acompaña de grietas inclinadas y/o agrietamiento a lo largo de la junta.	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	• Separación del mortero alrededor del muro y • Algo de aplastamiento del mortero cerca de esquinas del muro	0.9	0.9	1.0
			Moderado	• Aplastamiento del mortero y • Agrietamiento de piezas; si son huecas, desprendimiento de paredes exteriores de las piezas	0.6	0.8	0.8
			Severo	• Desconchamiento de paredes externas de piezas huecas o multiperforadas • Agrietamiento inclinado y/o • Deslizamiento sobre juntas	0.5	0.7	0.7
MMDI-Ib Marco de concreto o de acero	Tensión diagonal	Agiertamiento a lo largo de las diagonales del muro. Para grandes desplazamientos laterales, se observa agrietamiento adicional con inclinaciones entre 45 y 65 grados. Se puede presentar aplastamiento de piezas en las esquinas.	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	• $GI < 1$ mm concentrado hacia el centro del muro	0.7	0.9	1.0
			Moderado	• $GI < 1$ mm a lo largo de las diagonales, ya sea siguiendo el mortero (en forma de escalera) o a través de piezas • Algo de aplastamiento y grietas verticales en mortero • Las grietas permanecen cerradas gracias al confinamiento del marco	0.4	0.8	0.9
			Severo	• $GI > 3$ mm con aplastamiento en esquinas • Más de una grieta diagonal • Aplastamiento y agrietamiento de piezas • Deslizamiento de piezas	0.2	0.5	0.8



Componente	Modo de comportamiento	Descripción (a partir de observación)	Intensidad de daño	Descripción de daño (uno o más elementos)	Valores de $\lambda$		
					$\lambda_K$	$\lambda_R$	$\lambda_D$
MMD1-Ia Marco de acero	Deslizamiento sobre juntas	Puede iniciar con el aplastamiento de piezas en las esquinas. A mayores desplazamientos, se forman grietas diagonales (en forma de escalera o a través de piezas) a partir de las esquinas que se conectan con una grieta horizontal a media altura del muro.	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	• Aplastamiento del mortero en el perímetro del marco, especialmente cerca de las esquinas	0.8	0.9	0.9
			Moderado	• Mayor aplastamiento y • Agrietamiento inclinado hacia el centro del muro y • Grieta horizontal a media altura	0.5	0.8	0.8
			Severo	• Agrietamiento y aplastamiento de la mampostería, especialmente a lo largo de las columnas	0.4	0.7	0.7
MMD1-Ib/Ic Marco de concreto	Aplastamiento en la esquina y agrietamiento por tensión diagonal	El daño ocurre en el muro y en el marco. Se presenta aplastamiento de mampostería (de concreto), agrietamiento por flexión en el muro y grietas inclinadas.	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	• Separación de mortero a lo largo del marco y • Posibles $G < 1$ mm en juntas	0.9	1.0	1.0
			Moderado	• Agrietamiento por fluencia en viga o columnas, dependiendo de cuál es más fuerte, y • Grietas de aplastamiento en esquina y • Posibles $GI$ en unión viga-columna	0.6	0.8	0.8
			Severo	• Agrietamiento extendido en zonas de articulación plástica de viga y columnas, incluso con desconchamiento del recubrimiento y • $GI$ a través de mampostería, con desprendimiento de paredes externas de piezas huecas en esquinas y hacia la altura media del muro	0.5	0.6	0.6
MMD1-Id Marco de acero o de concreto	Fuera de plano	Ocurre con movimientos fuertes fuera de plano. Se combina con daño en el plano. Es difícil distinguir cuál fue el movimiento precursor del daño.	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	• $G$ por flexión en mortero alrededor del perímetro con $G < 1$ mm hacia el centro del muro	0.9	1.0	1.0
			Moderado	• Aplastamiento y caída de mortero en el perímetro y hacia el centro del muro y • Posibles $GI$ en el centro del muro	0.9	0.8	1.0
			Severo	• $GI$ de esquina a esquina, con deslizamiento de piezas y • Aplastamiento del mortero en todo el perímetro del muro y • Deslizamiento fuera del plano de piezas y • Posible $GI$ extendido	0.5	0.6	0.9
MMD3 a MMD5 - IIIg Marco de concreto	Falla por cortante de columna del marco	Ocurre cuando el muro diafragma es rígido y/o resistente, ocasionando que el daño se concentre en el marco, el cual es el componente débil. El agrietamiento inclinado ocurre en las columnas a lo largo de dos veces el peralte de la columna, pudiendo alcanzar anchos considerables.	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	• $G$ por flexión en la parte superior de columnas, a la altura de la hilada superior del muro y • $GI < 1$ mm en columna y • Separación de mortero a lo largo del marco	0.9	0.9	1.0
			Moderado	• $GI$ en el extremo superior de la columna, a lo largo de dos peraltes $> 3$ mm y • Posible daño y desconchamiento del recubrimiento y • Posible aplastamiento del muro en la esquina	0.7	0.7	0.4



Componente	Modo de comportamiento	Descripción (a partir de observación)	Intensidad de daño	Descripción de daño (uno o más elementos)	Valores de $\lambda$		
					$\lambda_K$	$\lambda_R$	$\lambda_D$
			Severo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>GI</math> en columnas &gt; 5 mm y</li> <li>• Fractura de estribos hacia el centro de las grietas inclinadas o apertura si tienen ganchos de 90 grados y</li> <li>• Desconchamiento del recubrimiento del concreto</li> </ul>	0.4	0.2	0.4
MMD3 a MMD5 - IIIe Marco de concreto	Falla de traslape en columnas	Ocurre por una longitud de traslape insuficiente en la articulación plástica, lo que produce deslizamiento a lo largo del traslape. El recubrimiento se desprende ante cargas de compresión, exponiendo el núcleo de concreto y la zona del traslape.	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>G</math> de flexión en el extremo inferior de la columna y</li> <li>• Posibles <math>G &lt; 1</math> mm verticales</li> </ul>	0.9	1.0	1.0
			Moderado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>G &lt; 5</math> mm de flexión en el extremo inferior de la columna, con algo de aplastamiento y</li> <li>• Grietas verticales con recubrimiento suelto</li> </ul>	0.8	0.5	1.0
			Severo	• Desconchamiento significativo del recubrimiento a lo largo del traslape, exponiendo el núcleo y el acero de refuerzo	0.5	0.5	1.0
MMD3 a MMD5 - IIIh Marco de concreto	Daño en la conexión viga-columna	Agrietamiento en el nudo viga-columna.	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	• $GI < 1$ mm en el nudo, en forma de letra X	0.9	1.0	1.0
			Moderado	• $GI > 3$ mm, aproximadamente, en el nudo y más extendidas	0.8	0.5	0.9
			Severo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>GI &gt; 5</math> mm, aproximadamente, en el nudo</li> <li>• Nudos externos (sin viga en un lado) muestran desconchamiento del concreto y</li> <li>• Agrietamiento y posible aplastamiento local de mampostería</li> </ul>	0.5	0.5	0.5
MMD3 a MMD5 - IIIc Marco de acero	Daño en la conexión	Daño en conexiones semi-rígidas de marcos de acero	Nulo	• Sin daño	1.0	1.0	1.0
			Ligero	• Fluencia de la conexión, evidenciada por desprendimiento de escamas de pintura	0.9	1.0	1.0
			Moderado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se evidencia acción de palanca y deslizamiento en la conexión y</li> <li>• Los ángulos de la conexión se deforman dejando una abertura entre la viga y la columna</li> </ul>	0.9	1.0	1.0
			Severo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los ángulos pueden exhibir agrietamiento por fatiga y</li> <li>• Posible agrietamiento e incluso aplastamiento del muro en las esquinas superiores</li> </ul>	0.5	1.0	0.9



## CAPÍTULO 10

# Fallas y peligros de índole geotécnico más frecuentes

### 10.1 INTRODUCCIÓN

---

En este capítulo se describen las causas y mecanismos que provocan las fallas y peligros geotécnicos que con mayor frecuencia ocurren y comprometen la seguridad estructural de un edificio (MBIE, 2017). Éstos son:

- a. Hundimientos de cimentaciones provocados por el sismo.
- b. Desplazamiento lateral del suelo, causado por licuación.
- c. Agrietamiento de suelos.
- d. Inestabilidad de laderas.
- e. Movimientos del terreno adyacente a las fallas superficiales.

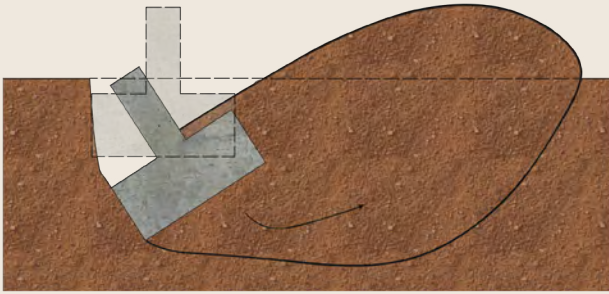


Figura 10.1 Falla rotacional generalizada bajo un cimiento.  
Fuente: elaboración propia con base en Ovando (2020).



Figura 10.2 Ejemplo de falla rotacional generalizada.  
Fuente: archivo personal de Sergio Alcocer (1999).

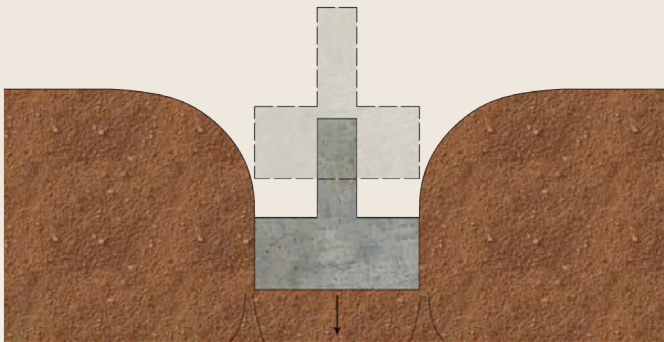


Figura 10.3 Falla por punzonamiento bajo un elemento de cimentación.  
Fuente: elaboración propia con base en Ovando (2020).



Figura 10.4 Ejemplo de falla por punzonamiento bajo la cimentación.  
Fuente: archivo personal de Sergio Alcocer (1985).

## 10.2 HUNDIMIENTOS DE CIMENTACIONES PROVOCADOS POR EL SISMO

Este fenómeno ocurre cuando, durante un sismo, se rebasa la capacidad de carga de los cimientos que soportan a cualquier edificio (Ovando, 2020). La capacidad de carga de la cimentación o la de algún elemento de ella (zapata, losa, pila o pilote) depende de la geometría del cimiento, de su nivel de desplante, de las condiciones hidráulicas del subsuelo y de la resistencia al esfuerzo cortante del suelo. La capacidad de carga de la cimentación no es sinónimo de la resistencia del subsuelo, si bien esta última determina en buena medida a la primera, pero no de manera única. Las fallas que dan lugar a hundimientos pueden tener varias modalidades:

- Falla rotacional generalizada. Ocurre cuando se rebasa la capacidad de carga del suelo. En este caso, el modo de falla se da cuando el edificio gira con respecto a su centro de masa, movilizándose una masa de suelo hacia alguna dirección preferencial, como se ve en la figura 10.1. Esta falla suele presentarse en estructuras esbeltas propensas al volteo. En la figura 10.2 se muestra un ejemplo de falla rotacional generalizada.
- Falla por punzonamiento. Se presenta cuando el edificio completo penetra dentro del terreno debido al rebase de la capacidad de carga del suelo (véase figura 10.3). Al ocurrir una falla por punzonamiento, hay desplazamiento de suelo alrededor de éste. Dicha falla no necesariamente implica la aparición de daños estructurales inducidos por el desplazamiento de la estructura. En la figura 10.4 se muestra un ejemplo de falla por punzonamiento bajo la cimentación.
- Falla local. Ocurre cuando localmente se rebasa la capacidad de carga de un elemento de la cimentación debido a concentraciones de carga durante el evento sísmico. Esta falla induce hundimientos diferenciales locales

que suelen producir daño estructural, dependiendo de las características de la estructura (resistencia y rigidez de los elementos estructurales). En la figura 10.5 se ilustra un caso de falla local. En la figura 10.6 se ejemplifica una falla local producida por un sismo.

d. Desplazamiento horizontal. Ocurre en cimentaciones superficiales o poco profundas cuando la capacidad global de la cimentación no es capaz de resistir el cortante basal inducido por las acciones sísmicas (figura 10.7).

### 10.3 DESPLAZAMIENTO LATERAL DEL SUELO CAUSADO POR LICUACIÓN

Los esfuerzos cortantes que se generan al paso de las ondas sísmicas a través de cualquier estrato de suelo inducen deformaciones en éste que, a su vez, hacen que la presión del agua intersticial, el agua que se encuentra dentro de sus poros, aumente (Ovando, 2020). Los incrementos de presión de poro reducen los esfuerzos efectivos dentro del suelo, es decir, los esfuerzos que efectivamente toma la parte sólida de éste y, por ende, reducen su resistencia al esfuerzo cortante.

En el caso de los suelos granulares sueltos y además saturados (aquellos cuyos poros están completamente llenos de agua, como es el caso de suelos arenosos saturados de agua), los esfuerzos cortantes sísmicos suelen inducir incrementos de presión de poro tan grandes que anulen los esfuerzos efectivos dentro de ellos y, por consiguiente, su capacidad para resistir esfuerzos cortantes. Un material incapaz de resistir esfuerzos cortantes es, por definición, un líquido, de ahí que, al darse estos incrementos de presión de poro, el suelo arenoso sufra licuación y se comporte como un líquido viscoso durante la vigencia del sismo y por algún tiempo después de su finalización. Los suelos donde suele ocurrir la licuación son suelos granulares (arenosos) generalmente finos o con

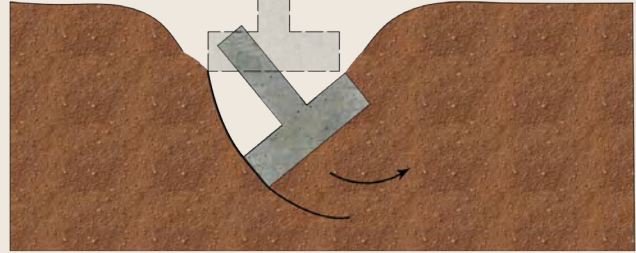


Figura 10.5 Falla local bajo un cimientado o elemento de cimentación. Fuente: elaboración propia con base en Ovando (2020).



Figura 10.6 Ejemplo de falla local. Fuente: archivo personal de Sergio Alcocer (1999).

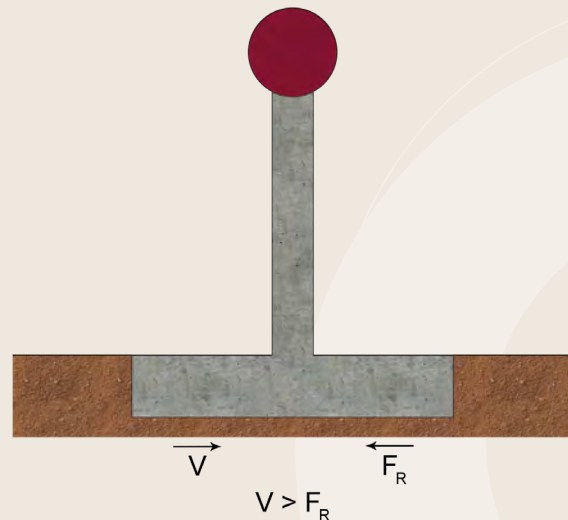


Figura 10.7 Desplazamientos inducidos cuando el cortante basal,  $V$ , excede a las fuerzas resistentes en la base de la cimentación,  $F_R$ . Fuente: elaboración propia con base en Ovando (2020).

pocos porcentajes de materia fina (limo o arcilla). Rara vez se ha presentado en gravas o suelos gravosos, pero también suele manifestarse en limos, particularmente en limos como residuos de explotaciones mineras.

Al darse la licuación de un estrato que subyazca a cimentaciones de estructuras podrán ocurrir fallas y modos de falla como los señalados en la sección 10.2.

La licuación de arenas puede afectar a otras estructuras, como terraplenes carreteros que se

desplazarán lateralmente al presentarse ésta, como se ilustra en la figura 10.8. Los desplazamientos laterales se pueden dar en estratos horizontales, pero si los estratos tienen una cierta inclinación, los desplazamientos pueden llegar a rebasar las decenas de metros, como se ejemplifica en la figura 10.9. En la figura 10.10 se puede apreciar el mar en una zona costera que se desplazó lateralmente producto de licuación. En las fotos de la figura 10.11 se muestran ejemplos de licuación en la zona costera (figuras 10.11.a y 10.11.b) y su efecto en edificaciones tierra adentro (figura 10.11.c).

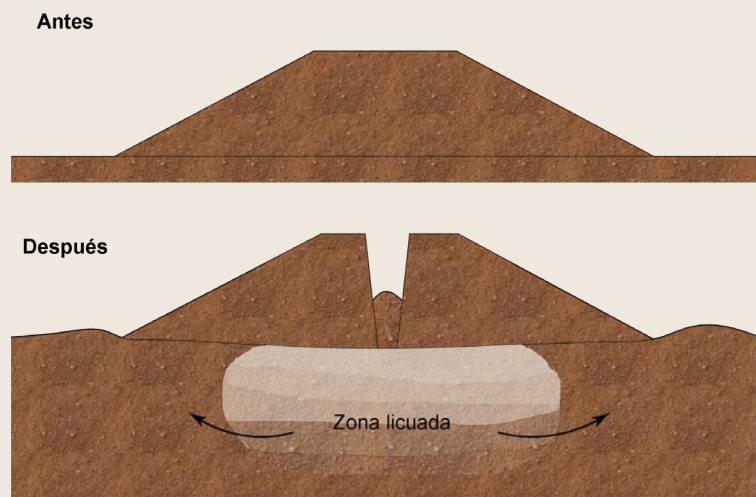


Figura 10.8 Desplazamientos laterales en terraplén provocados por la licuación de un estrato de arena subyacente. Fuente: elaboración propia con base en Ovando (2020).

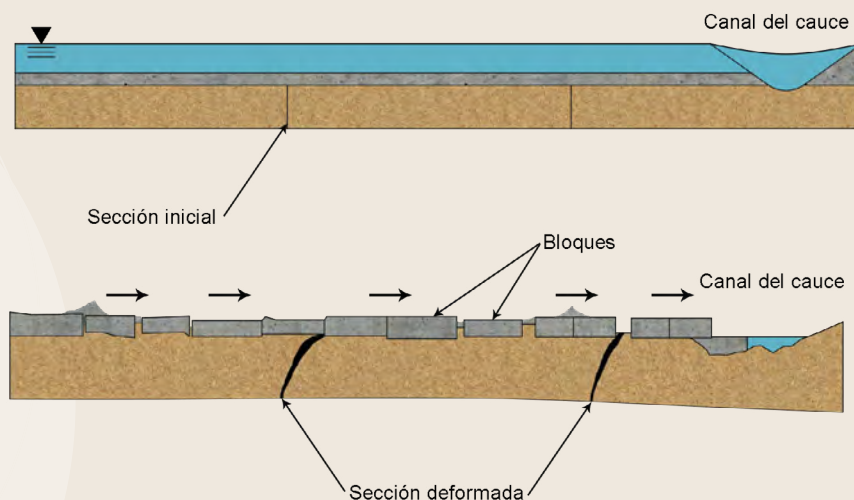


Figura 10.9 Desplazamientos laterales de gran magnitud provocados por la licuación del estrato arenoso subyacente. Fuente: elaboración propia con base en Ovando (2020).





Figura 10.10 Entrada del mar en zona costera que sufrió desplazamiento lateral por licuación.  
 Fuente: archivo personal de Sergio Alcocer (1999).



Figura 10.11.a Daño en patio de contenedores de un puerto producto de licuación.  
 Fuente: cortesía de José Luis Rangel (2020).



Figura 10.11.b Daño en patio de contenedores de un puerto producto de licuación.  
 Fuente: cortesía de José Luis Rangel (2020).



Figura 10.11.c Vivienda dañada en zona que experimentó licuación de arenas.  
 Fuente: cortesía de José Luis Rangel (2020).

## 10.4 AGRIETAMIENTO DE SUELOS

Los agrietamientos de suelos asociados a temblores se presentan en su mayoría en los hombros de taludes o laderas (Ovando, 2020). Para el caso de estratos de suelo ubicados bajo superficies planas o casi planas, los agrietamientos tienen otro origen.

En varias ciudades de nuestro país, la explotación de acuíferos para la extracción de agua potable o para fines agrícolas induce hundimientos regionales que casi siempre ocurren de manera no uniforme. El caso más notorio, incluso a nivel mundial, es el de la Ciudad de México, pero también ocurre en Querétaro, Celaya, Irapuato, Torreón, Morelia, entre otras. En el extranjero también se presenta en Tokio, algunas zonas de Bogotá, Long Beach (California) y Bangkok.

La extracción de agua del subsuelo disminuye la presión de poro dentro de la masa de suelo compresible. Este fenómeno equivale a aplicar una carga adicional sobre el suelo que, en el caso de suelos arcillosos compresibles, da lugar a los asentamientos regionales. En la figura 10.12 se esquematizan los mecanismos que dan lugar a diferenciales de hundimiento y a su vez las condiciones en las cuales tenderán a presentarse esfuerzos de tensión. Los materiales térreos tienen una muy baja o nula capacidad para resistir esfuerzos de tensión, por lo cual, en las zonas propensas a tensionarse, se agrietará el suelo.

En la Cuenca de México, las zonas mayormente agrietadas por el hundimiento regional se encuentran en las orillas del antiguo lago, en la parte NE de la ciudad, en la zona de Zacatenco, en los alrededores de la Sierra de Santa Catarina y el Cerro de la Estrella, al pie del Peñón Viejo (Peñón del

Marqués), en la porción sur del lago de Xochimilco, entre otras. En la figura 10.13 se presentan las

zonas de agrietamientos del antiguo lago, o bien, las zonas con potencial para agrietarse.

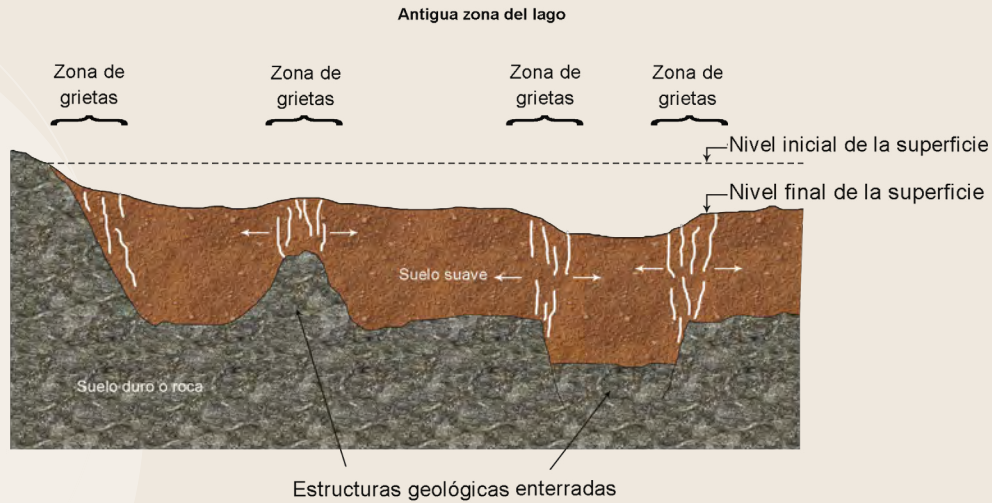


Figura 10.12 Mecanismos que generan grietas en una zona sometida a hundimiento regional. Fuente: elaboración propia con base en Ovando (2020).

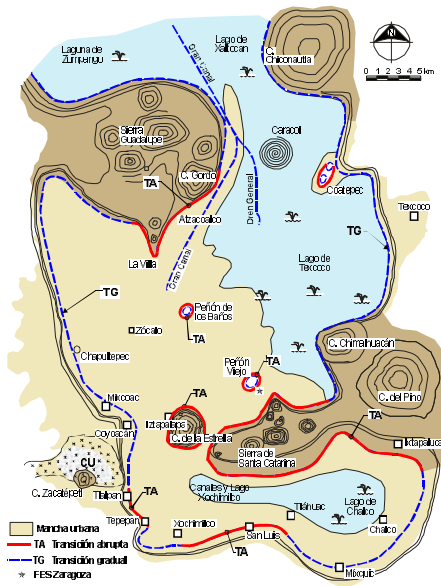


Figura 10.13 Zonas de agrietamiento y de agrietamiento potencial en la antigua zona lacustre de la Ciudad de México. Fuente: cortesía de Efraín Ovando (2020).

Durante los temblores, las grietas ya existentes en la Ciudad de México pueden abrirse o cerrarse, incluso desplazarse horizontal o verticalmente, dependiendo de la intensidad de cada temblor y de las características geotécnicas locales. Infortunadamente, no hay registros sistemáticos de las condiciones de agrietamientos conocidos antes y después de eventos sísmicos.

Estas grietas son producidas por el hundimiento regional y de ninguna manera son la proyección en superficie de grietas geológicas profundas de origen tectónico, como equivocadamente se ha hecho creer. Para el hundimiento regional existe un cúmulo de datos observacionales y de predicciones teóricas que explican la aparición de grietas, pero no hay evidencia científica que permita asociar esos agrietamientos a fallas geológicas profundas.

## 10.5 INESTABILIDAD DE LADERAS

Existen diferentes términos con los cuales se hace referencia a la inestabilidad de laderas (CENAPRED, 2008). Dichas expresiones se utilizan en las distintas disciplinas involucradas en su estudio. De tal manera que conceptos tales como procesos de remoción en masa, movimientos de ladera, procesos gravitacionales, movimientos del terreno, proceso de ladera, son empleados ampliamente para indicar que una ladera no es estable.

La inestabilidad de laderas está determinada, tanto en su origen como en su desarrollo, por diferentes mecanismos, los cuales sirven para clasificar los tipos de procesos de ladera existentes, de tal modo que se agrupan en cuatro categorías principales y una derivada de la combinación de éstas. Los mecanismos básicos de inestabilidad son los caídos o derrumbes, flujos, deslizamientos y las expansiones o desplazamientos laterales. Cuando el mecanismo inicial de un movimiento se transforma en otro(s), se dice que es un movimiento complejo.

Los caídos o derrumbes son movimientos abruptos de suelos y fragmentos aislados de rocas que se originan en pendientes pronunciadas y acantilados, por lo que el movimiento es de caída libre, rodando y rebotando (CENAPRED, 2020a) (véase figura 10.14).



Figura 10.14 Ejemplo de un caído.  
 Fuente: cortesía de José Luis Rangel (2020).

Los flujos son movimientos de suelos y/o fragmentos de rocas pendiente abajo de una ladera, en donde sus granos o fragmentos tienen movimientos dentro de la masa que se mueve o desliza (CENAPRED, 2020a). Casi siempre ocurren durante lluvias muy intensas, por lo que el material movilizado adquiere gran poder erosivo y velocidad, encauzándose por barrancas, cañadas y valles, destruyendo y sepultando lo que encuentra a su paso. Pueden ser de muy lentos a muy rápidos, así como secos o húmedos. Se pueden distinguir (CENAPRED, 2001, 2008), entre ellos:

- Flujos de lodo: masa de suelo y agua que fluye pendiente abajo con mucha rapidez, y que contiene por lo menos 50% de granos de arena y limo, y partículas arcillosas.
- Flujos o avalancha de detritos: movimiento rápido de una mezcla en donde se combinan partículas sueltas, fragmentos de rocas, y vegetación con aire y agua entrampados, formando una masa viscosa o francamente fluida que se mueve pendiente abajo. Estos movimientos también son conocidos como flujos de escombros.
- *Lahares*: flujo de suelos o detritos que se originan en el talud de un volcán, generalmente disparado por lluvias intensas que erosionan depósitos volcánicos, deshielo repentino por actividad volcánica, por rotura de represas o desbordamiento de agua represada y/o por la ocurrencia de sismos.

Los deslizamientos son movimientos de masas de suelo sobre una o varias superficies de falla. En ocasiones, presentan síntomas como grietas y asentamientos antes de su movilización. Tienen alto potencial de destrucción (CENAPRED, 2020a).

Suele decirse que la inestabilidad de laderas por efectos sísmicos ocurre cuando se rebasa la aceleración máxima que puede resistir un talud durante un temblor (la llamada aceleración crítica) (Ovando, 2020). Los desplazamientos pueden irse acumulando poco a poco, conforme se acumulan los picos de aceleración que rebasan

la aceleración crítica. También suelen ocurrir súbitamente, si el pico de aceleración conlleva suficiente intensidad.

El deslizamiento de laderas es un fenómeno que ocurre progresivamente. Comienza con la aparición de grietas en el hombro del talud (parte más elevada) y luego se propaga hacia abajo al ser

movilizada o rebasada la resistencia del suelo a lo largo de la llamada superficie de deslizamiento. Existen varios modos de falla cinemáticamente admisibles, pero los más comunes y también los más simples son los de falla plana y los de falla circular, los cuales se ilustran en la figura 10.15, así como otros mecanismos de fallas compuestas o de fallas no circulares.

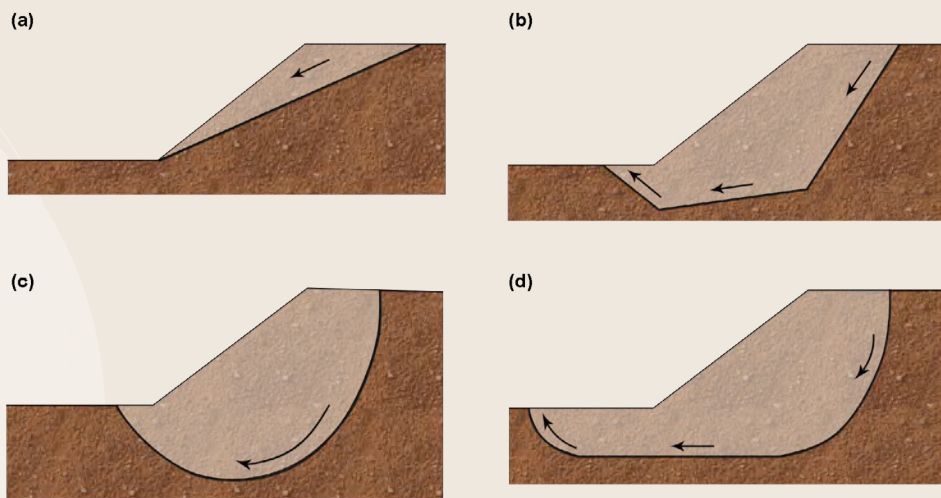


Figura 10.15 Mecanismo de falla en laderas deslizantes: a) falla plana; b) falla multiplanar; c) falla circular; d) falla compuesta no circular. Fuente: elaboración propia con base en Ovando (2020).

Desde luego, la aceleración crítica en cada caso dependerá de la inclinación del talud, de su altura, de las condiciones estratigráficas y del tipo y propiedades del suelo a lo largo de la superficie de falla. Un factor de gran importancia es el de las condiciones de humedad dentro de la masa de suelo potencialmente deslizante y, en específico, de la distribución de la presión del agua intersticial a lo largo de esta superficie.

En taludes naturales, los deslizamientos de laderas ocurren en zonas de topografía abrupta con pendientes muy inclinadas. También suelen presentarse deslizamientos de laderas en taludes modificados, cortados por obras de infraestructura, principalmente carreteras, ferrocarriles o en cortes para excavaciones.

En ocasiones, los taludes naturales o modificados pueden encontrarse en condiciones precarias de estabilidad. Por ejemplo, en zonas en donde la geología regional provoque el fenómeno de flujo plástico (*creep* o deformación lenta diferida), el sismo puede generar las condiciones necesarias para que la ladera se desplace, y si el talud ya manifiesta grietas y además ha llovido o ha sufrido el embate de ciclones o huracanes, las condiciones de precariedad en su estabilidad se agudizan. Entonces, incluso un temblor con intensidades relativamente pequeñas puede desencadenar su desplazamiento.

En las figuras 10.16 y 10.17 se muestran ejemplos de deslizamiento de taludes artificiales y naturales, respectivamente.

En la figura 10.18 se muestran ejemplos de evidencias superficiales de un deslizamiento de ladera. Un ejemplo de una vivienda con inclinación

evidente, ubicada en el hombro de un talud inestable, se muestra en la figura 10.19.



Figura 10.16 Ejemplos de deslizamientos de taludes artificiales.  
Fuente: cortesía de José Luis Rangel (2020).



Figura 10.17 Ejemplos de deslizamientos de taludes naturales.  
Fuente: cortesía de José Luis Rangel (2020).



a)



b)



c)

Figura 10.18 Ejemplos de manifestaciones superficiales de un deslizamiento de ladera: a) escarpes (escalones) en el hombro o parte alta del talud, b) inclinación de un poste, c) humedad inusual en el terreno.  
Fuente: cortesía de Irasema Alcántara (2020).

Figura 10.19 Vivienda ubicada en el hombro de un talud inestable.  
Fuente: cortesía de Irasema Alcántara (2020).



## 10.6 MOVIMIENTOS DEL TERRENO ADYACENTE A FALLAS SUPERFICIALES

En nuestro país, no se conocen datos fidedignos de movimientos adyacentes a fallas geológicas superficiales, lo cual no significa que no hayan existido o que no puedan existir, por ejemplo, a lo largo de la falla de Acambay, en el Estado de México. Esto se debe a la naturaleza de los mecanismos que dan lugar a los temblores más frecuentes en México: subducción, de intraplaca, de interplaca, por ejemplo.

En la Alta California se han documentado evidencias fehacientes de desplazamientos de este tipo a lo largo de la Falla de San Andrés, durante varios temblores en el pasado. En otros países también se han registrado y documentado

dichos desplazamientos, como es el caso de los que han ocurrido a lo largo de la Gran Falla de Anatolia, en Turquía, y también en Italia y Grecia. En la figura 10.20 se muestra el escalonamiento que se produjo en la falla que causó el sismo de Izmit, Turquía, M7.4 de 1999.

En el Lejano Oriente, en China y Japón, por ejemplo, también se han documentado movimientos y daños a lo largo de fallas superficiales, como se muestra en la figura 10.21 para las fallas Tawarayama y Futagawa, Nagato, en Japón (Lin, 2017).

Finalmente, es necesario reiterar que estas fallas geológicas superficiales no se deben confundir con los agrietamientos originados por los hundimientos producidos por la extracción de las aguas del subsuelo en la Ciudad de México, en Querétaro, Celaya, Torreón, Irapuato o Morelia.



Figura 10.20 Desplazamiento horizontal (desfase) de una barda a lo largo de la falla geológica superficial tras el sismo de Izmit, Turquía, del 17 de agosto de 1999. Fuente: archivo personal de Sergio Alcocer (1999).

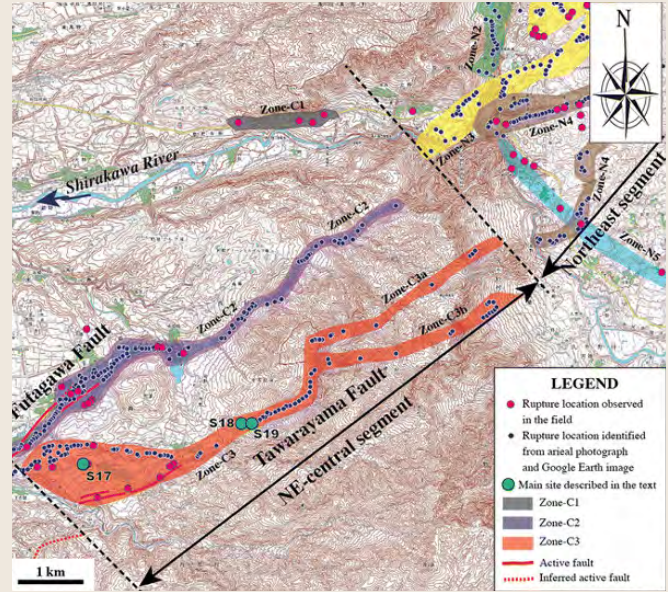


Figura 10.21 Movimientos y daños registrados a lo largo de las fallas Futagawa y Tawarayama durante el temblor de Kumamoto de 2016. Fuente: Lin (2017).



## Glosario

A continuación, se incluyen las definiciones de los términos más usados en la inspección, evaluación y rehabilitación de edificaciones.

### **Acciones**

Todos los fenómenos que inducen en una estructura fuerzas internas, esfuerzos y deformaciones. Generalmente denominadas cargas. El término acciones es más amplio, ya que incluye cambios de temperatura, hundimientos, viento, sismo, entre otros.

### **Alambre**

Hilo de metal obtenido por trefilado, con diámetro de 6.35 mm o menor.

### **Albergue**

Instalación que se establece para brindar resguardo a las personas que se han visto afectadas en sus viviendas por los efectos de fenómenos perturbadores y

en donde permanecen hasta que se da la recuperación o reconstrucción de sus viviendas.

**Amortiguamiento**

Propiedad de la estructura para disipar la energía introducida por el movimiento sísmico.

**Aplanado**

Recubrimiento de mortero sobre un elemento de mampostería. Sinónimos de revoque, enlucido y enjarre.

**Aplastamiento**

Desmoronamiento local de la piedra, mampostería o concreto debido a esfuerzos de compresión que exceden la resistencia del material a este efecto.

**Arcilla**

Material mineral de partículas muy finas compuesto principalmente por agregados de silicatos de aluminio hidratados, el cual posee propiedades plásticas.

**Asentamiento**

Deformación vertical que experimenta una estructura por deformaciones del terreno situado bajo ésta.

**Autoridad local educativa**

Término usado en este volumen en referencia a la entidad responsable de la infraestructura física educativa en un municipio o en una entidad federativa.

**Auxilio**

Respuesta de ayuda a las personas en riesgo o las víctimas de un siniestro, emergencia o desastre, por parte de grupos especializados públicos o privados, o por las unidades internas de protección civil, así como las acciones para salvaguardar los demás agentes afectables.

**Aviso de Seguridad Estructural y Uso del Edificio**

Cartel de papel que se coloca en los edificios evaluados por los inspectores. En esta Guía se usa Aviso como su equivalente. Pueden ser: verde o “Uso Permitido”, amarillo o “Acceso y Uso Restringidos”, o rojo o “Acceso Prohibido”.

**Barra de refuerzo**

Elemento de acero, con sección transversal nominal uniforme, utilizado para reforzar el concreto o la mampostería con diámetro mayor que 6.35 mm.

**Bloque**

Pieza de mampostería cuyo largo nominal es 400 mm o mayor, en módulos de 100 mm y cuya altura nominal es de 200 mm (incluyendo la junta de mortero). Generalmente, se fabrica de concreto y puede ser macizo, multiperforado o hueco.

**Bovedilla**

Elemento que se apoya entre viguetas, a modo de cimbra perdida, para aligerar el sistema de piso. Puede ser de concreto vibrocomprimido, arcilla, poliestireno u otros materiales.

**Brigadas (de Inspección)**

Para fines de este volumen, equipos conformados para evaluar la infraestructura física educativa.

**Cadena**

Véase “dala”.



### **Capacidad de deformación inelástica**

Propiedad de un elemento o de la estructura, en su conjunto, para disipar energía inelásticamente cuando ésta se deforma lateralmente más allá del límite elástico y sin una caída significativa de su capacidad resistente.

### **Capacidad de desplazamiento global**

Máximo desplazamiento que toda la estructura puede tolerar dentro de un nivel de desempeño específico. Este límite normalmente depende de la distorsión admisible de los elementos estructurales, de un grupo de ellos, o bien, de un subsistema estructural.

### **Capacidad estructural**

Habilidad de una estructura, en términos de resistencia, rigidez, capacidad de deformación y amortiguamiento para funcionar ante las acciones impuestas.

### **Carga muerta**

Es la carga que actúa en forma permanente sobre la estructura, y que se debe al peso de todos los componentes del edificio.

### **Carga viva**

Incluye las acciones derivadas del uso del edificio y que pueden variar en forma importante en el tiempo, distinguiéndose así de la carga muerta. Incluye mobiliario, equipo, personas y vehículos.

### **Castillo**

Elemento estructural vertical, de concreto reforzado, colocado en los bordes del muro y de sus huecos. En muros reforzados se ligan con las dalas para proporcionar confinamiento. Pueden ser internos o externos en relación al muro.

### **Castillo interno**

Castillo construido en el interior de piezas huecas de un muro.

### **Castillo externo**

Castillo que se construye por fuera de las piezas del muro. Se requiere de una cimbra para ser colado.

### **Celda**

Espacio vacío que atraviesa la pieza de mampostería por lo menos en 95% de su altura con el fin de aligerarla y eventualmente alojar los elementos de refuerzo, tuberías e instalaciones.

### **Cimentación**

Parte de la estructura que está en contacto con el suelo y sirve para transmitir a éste las cargas generadas por la edificación.

### **Claro**

Dimensión horizontal entre las caras internas de dos apoyos de una viga o losa.

### **Colado**

Proceso en el cual una mezcla fresca de concreto, o mortero, es colocada en un molde o cimbra, donde se le deja endurecer (fraguar).

### **Columna**

Elemento estructural vertical con sección transversal pequeña comparada con su altura. Es un elemento principal de soporte de las cargas de la cubierta y de los pisos intermedios de un edificio. Trabaja principalmente a esfuerzos de flexocompresión.

### **Componente (estructural)**

Miembro de una estructura, como viga, columna o muro que forma parte de un elemento estructural.

### **Comportamiento no lineal**

Cuando la relación entre las deformaciones y la carga aplicada deja de ser proporcional y que genera deformaciones permanentes, lo que equivale a una progresiva pérdida de rigidez y es indicio de algún tipo de daño.

### **Compresión**

Estado de esfuerzos que produce un acortamiento de las fibras de la sección transversal de un elemento estructural paralelas a su eje. Es el estado de esfuerzos opuesto al de tensión.

### **Concreto de baja contracción**

Producto químico en polvo a base de cemento, agregados finos y gruesos y aditivos que al mezclarse con agua produce un mortero sin contracciones, de alta resistencia a la compresión.

### **Continuidad**

Condición de conexión entre dos elementos estructurales en que se impiden los movimientos relativos entre ellos.

### **Contrafuertes**

Elemento estructural vertical o inclinado que tiene la función de proveer estabilidad lateral, absorbiendo los empujes laterales o el coceo de una cubierta. Generalmente, es un muro transversal exterior a la construcción principal.

### **Contratrabe**

Viga de concreto reforzado, construida para reforzar y rigidizar la cimentación.

### **Contraventeo**

Elemento metálico inclinado colocado para incrementar la rigidez lateral de las estructuras.

### **Corrosión**

Deterioro de un material provocado por reacción química o electroquímica. En el caso de un metal, se identifica como oxidación. La corrosión implica pérdida de la sección transversal del elemento metálico.

### **Corrugado**

Surcos o resaltos sobre una superficie, normalmente siguiendo un patrón determinado. Se usa en barras, alambres y láminas de acero para refuerzo de concreto.

### **Cortante**

Un tipo de esfuerzo o deformación que tiende a producir un corrimiento de fibras adyacentes y la consiguiente distorsión de la sección transversal del elemento.

### **Cuantía de refuerzo**

Relación del área del refuerzo entre el área del concreto o mampostería en cualquier sección de un elemento.

### **Cuatrapeado**

Aparejo en el que se colocan los elementos de manera alternada; *i. e.*, colocación de las piezas con sus extremos verticales alternados respecto a la hilada inferior.

### **Dala**

Elemento horizontal de concreto reforzado, colocada sobre el muro (dala de cerramiento), debajo de él (dala de desplante) o alrededor de huecos. En muros, se conecta a los castillos para proporcionar confinamiento.

**Daño**

Evidencia física de las deformaciones inelásticas de un componente estructural causadas por el sismo.

**Deformación**

Cambio en la forma o en las dimensiones debido a los esfuerzos a que está sometido el elemento estructural.

**Demanda**

Magnitud de la acción que obra sobre una estructura y que debe ser resistida para un nivel de desempeño específico.

**Dentado**

Corte en forma de diente o cuña en las piezas del borde vertical de un muro de mampostería para realizar la unión con el castillo. Como alternativa en piezas industrializadas, se deja sobresaliendo una de cada dos hiladas para formar un dentado rectangular en el borde que llevará el castillo.

**Desastre**

Resultado de la ocurrencia de uno o más agentes perturbadores severos y o extremos, concatenados o no, de origen natural, de la actividad humana o aquellos provenientes del espacio exterior, que cuando acontecen en un tiempo y en una zona determinada, causan daños y que por su magnitud exceden la capacidad de respuesta de la comunidad afectada. Sinónimo de calamidad.

**Desconchamiento**

Desprendimiento de partes de mampostería o concreto, usualmente debido al aplastamiento o deformación a compresión excesiva. Se manifiesta, inicialmente, por el desprendimiento del recubrimiento de estructuras de concreto.

**Desplomo**

Desviación con respecto a la vertical de un elemento, normalmente se refiere a un muro o a una columna. Sinónimo de inclinación.

**Diafragma**

Elemento estructural diseñado para soportar esfuerzos cortantes paralelos a su plano. Placa, muro u otra estructura rígida en su plano, que evita la distorsión de un piso o marco.

**Dintel**

Elemento de soporte horizontal ubicado sobre aberturas de muros, como puertas o ventanas.

**Distorsión de entrepiso**

Rotación del eje vertical del entrepiso. Se puede obtener dividiendo el desplazamiento lateral relativo a nivel de losas, entre la altura del entrepiso.

**Elemento estructural**

Unidad básica constitutiva de una estructura, capaz de soportar y transmitir las cargas a sus apoyos u otros elementos a los que está conectada (arco, viga, columna, bóveda, losa, entre otros).

**Emergencia**

Situación anormal que puede causar un daño a la sociedad y propiciar un riesgo excesivo para la seguridad e integridad de la población en general, generada o asociada con la inminencia, alta probabilidad o presencia de un agente perturbador.

### **Empotramiento**

Apoyo rígido de un elemento estructural de modo que impide la rotación y el desplazamiento en el extremo del elemento.

### **Entrepiso**

Espacio entre dos pisos.

### **Escalonamiento**

Mecanismo por medio del cual la superficie inclinada de un talud natural manifiesta diferencias de elevación, originando un perfil inclinado con discontinuidades verticales. También, el desplazamiento vertical relativo en una falla superficial.

### **Esfuerzo**

Fuerza por unidad de área. Los esfuerzos normales a la superficie son de compresión y de tensión y los paralelos a ella son esfuerzos cortantes.

### **Estable (estabilidad)**

Condición de equilibrio que no es alterada por pequeños cambios en el estado de esfuerzos y deformaciones.

### **Estado límite de falla**

Resultado de la combinación de fuerzas, desplazamientos, niveles de fatiga, o varios de ellos, que determina el inicio o la ocurrencia de modos de comportamiento que ponen en peligro la estabilidad de la construcción o de una parte de ella, o su capacidad para resistir nuevas aplicaciones de carga.

### **Estado límite de servicio**

Producto de la combinación de fuerzas, desplazamientos, niveles de fatiga, o varios de ellos, que determina el inicio o la ocurrencia de daños económicos o la presentación de condiciones que impiden el desarrollo adecuado de las funciones para las que se haya proyectado la construcción.

### **Estrategias de rehabilitación**

Conjunto de técnicas de rehabilitación seleccionadas para eliminar o mitigar las deficiencias o daño de la estructura.

### **Estribo**

Barras o alambres de refuerzo con forma cerrada colocadas perpendicularmente al sentido longitudinal de un elemento de concreto con el objetivo de resistir fuerza cortante y confinar el núcleo del elemento.

### **Estudio de mecánica de suelos**

Informe escrito que contiene las características geológicas y geotécnicas del sitio donde se encuentre el edificio por rehabilitar, campaña de exploración, ensayos, determinación de las características mecánicas del material que compone el subsuelo, investigaciones geofísicas en su caso, y toda la información necesaria a fin de que el ingeniero geotécnico proponga la forma de resistir las nuevas acciones y la solución de la cimentación de la estructura rehabilitada para las condiciones del terreno, incluyendo la recimentación, la excavación y las medidas de contención, estabilización del terreno y protección a colindancias.

### **Evaluación de la seguridad estructural**

Proceso de identificación de daños, jerarquización del nivel de vulnerabilidad de elementos estructurales y no estructurales, y de determinación del nivel de seguridad de la edificación completa.

### **Evaluación Intermedia**

Inspección con duración aproximada de una a cuatro horas por edificio para identificar el sistema estructural y el nivel de daño, así como para calcular, de manera aproximada, la capacidad de la estructura. Se aplica en edificios con dudas con respecto a su capacidad (aviso amarillo o “Acceso y Uso Restringidos” tras haberse practicado una Evaluación Rápida) o para identificar si se requiere una Evaluación Profunda.

### **Evaluación Profunda**

Investigación detallada de la estructura, conducida por ingenieros estructurales, la cual implica el uso e interpretación de planos de diseño y construcción, datos sobre el daño y nuevos cálculos estructurales. Se aplica para evaluar edificios en duda, determinar la extensión e impacto del daño, así como para determinar cómo estabilizar (apuntalar y/o arriostrar) y rehabilitar la estructura.

### **Evaluación Rápida**

Inspección con duración aproximada de 20 minutos por edificio para lograr una evaluación general del daño y de la seguridad, para identificar y clasificar el tipo de Aviso (verde, amarillo o rojo), así como para identificar aquellos edificios que requieren una Evaluación Intermedia o restricciones para su acceso y uso.

### **Falla (geológica)**

Superficie de rotura de una roca a lo largo de la cual ha habido movimiento diferencial.

### **Fenómeno natural perturbador**

Agente perturbador producido por la naturaleza.

### **Flexión**

Un tipo de deformación en la cual las secciones transversales de un elemento estructural que eran inicialmente paralelas se inclinan unas hacia las otras. También se denomina así a la acción estructural que produce dicho efecto.

### **Fluencia**

Estado de un material o elemento estructural en que éste pierde totalmente rigidez y se deforma plásticamente. Se llaman esfuerzos de fluencia y fuerza de fluencia a las condiciones para las que se produce este fenómeno, y que se consideran como límite para la resistencia de una estructura.

### **Fluido**

Material que ofrece poca o nula resistencia a las fuerzas que tienden a cambiarlo de forma.

### **Gestión Integral de Riesgos**

Conjunto de acciones encaminadas a la identificación, análisis, evaluación, control y reducción de los riesgos, considerándolos por su origen multifactorial y en un proceso permanente de construcción que involucra a los tres niveles de gobierno, así como a los sectores de la sociedad, lo que facilita la realización de acciones dirigidas a la creación e implementación de políticas públicas, estrategias y procedimientos integrados al logro de pautas de desarrollo sostenible, que combatan las causas estructurales de los desastres y fortalezcan las capacidades de resiliencia o resistencia de la sociedad. Involucra las etapas de: identificación de los riesgos y/o su proceso de formación, previsión, prevención, mitigación, preparación, auxilio, recuperación y reconstrucción.

### **Grieta**

Abertura o hendidura que se presenta en un elemento estructural cuando los esfuerzos de tensión exceden la resistencia a este efecto. El término fisura es equivalente, aunque suele emplearse para identificar una grieta de pequeña abertura.

### **Grupos voluntarios**

Las personas morales o las personas físicas que se han acreditado ante las autoridades competentes, y que cuentan con personal, conocimientos, experiencia y equipo necesarios para prestar de manera altruista y comprometida, sus servicios en acciones de protección civil.

### **Habitabilidad**

Habilidad del edificio para ser ocupado.

### **Hilada**

Serie de piezas de tabiques o bloques colocados horizontalmente.

### **Histéresis**

Curva esfuerzo-deformación que describe el comportamiento de un espécimen que es esforzado más allá de su intervalo elástico en ciclos alternados de tensión y compresión. También conocido como “curva histerética”.

### **Inestabilidad de laderas naturales**

Conocidas también como deslizamiento del terreno, o de tierra, implica movimiento de rocas y/o suelo por la acción de la gravedad. Los deslizamientos de tierra sucedidos en el pasado son responsables de las características topográficas del paisaje natural actual.

### **Inmueble**

Terreno y construcciones que en él se encuentran.

### **Intemperismo**

Proceso fisicoquímico de descomposición o desgaste como respuesta a la exposición a agentes de la intemperie, como son el agua, la humedad o las variaciones de temperatura.

### **Intensidad del daño**

Nivel relativo de la gravedad del daño en un elemento o componente estructural. Usualmente se clasifica como nulo, ligero, moderado y severo.

### **Junta**

En muros de mampostería es la separación, tanto vertical como horizontal, entre tabiques o bloques, que se rellena con mortero aglutinante o de pega.

### **Ladera**

Costado de un terraplén o de una montaña.

### **Ladera natural**

Costado de una montaña, representado por la falda del cerro.

### **Ladrillo**

Véase “Tabique”.

### **Licucción de suelos**

Consiste en la pérdida de resistencia de suelos arenosos, con partículas de tamaño uniforme y que se encuentran saturados. Ocurre como consecuencia de las vibraciones del terreno natural que origina el paso de ondas sísmicas durante la ocurrencia de un temblor.

**Lindero**

Límite de una propiedad.

**Losa**

Elemento estructural plano horizontal para cubrir un claro.

**Mampostería**

Construcción compuesta, integrada por piezas de origen pétreo, naturales o artificiales, que por lo general son lo suficientemente pequeñas como para ser manejadas por una persona y que son unidas entre sí con mortero aglutinante.

**Marco (resistente a momento)**

Un conjunto de elementos estructurales lineales, vigas y columnas, conectados en sus uniones.

**Marco con muros diafragma**

Marco de concreto o acero con muros de concreto o mampostería colocados entre vigas y columnas.

**Mecanismo lateral inelástico**

Mecanismo plástico desarrollado en un elemento o conjunto de ellos ante la acción combinada de cargas verticales y laterales. Es único para el patrón de cargas laterales especificado.

**Mitigación**

Es toda acción orientada a disminuir el impacto o daños ante la presencia de un agente perturbador sobre un agente afectable.

**Modo de comportamiento**

Tipo de daño predominante en un componente estructural en particular. Depende de las magnitudes relativas del cociente entre las cargas aplicadas y la resistencia a carga axial, momento flexionante y fuerza cortante.

**Momento flexionante**

Un momento o par de fuerzas que induce flexión en la sección transversal de un elemento.

**Monolítico**

Compuesto de un solo gran bloque de piedra, lo que se simula con el material en un colado de concreto. También estructura en que no hay discontinuidades entre sus elementos.

**Mortero**

Mezcla de cementante y agua con agregado fino.

**Mortero fluido sin contracción**

Producto químico en polvo a base de cemento, agregados minerales y aditivos que al mezclarse con agua produce un mortero sin contracciones, de alta resistencia a la compresión. Sinónimo de grout.

**Muro acoplado**

Muro en el cual los segmentos verticales están unidos, en uno o más pisos, mediante vigas de acoplamiento.

**Muro de carga**

Se denomina así a un muro estructural, de mampostería o concreto, con la función de soportar parte del peso del edificio, además de su propio peso.

**Muro de cortante**

Muro de concreto o mampostería conectado al piso adyacente y que resiste las fuerzas laterales en su plano.

### **Muro estructural**

Es el elemento del que depende parte de la estabilidad de la edificación, contribuyendo a la resistencia a cargas laterales y/o verticales.

### **Muro no estructural**

Es un muro del que no depende la estabilidad de la edificación, pero que debe soportar las acciones para la estabilidad propia (viento, sismo, empujes por carga viva, entre otros). Ejemplos son muros divisorios, pretil, bardas.

### **Nivel de desempeño**

Estado de daño hipotético usado para establecer objetivos de desempeño sísmico. Los niveles de desempeño más comunes son Prevención de colapso, Protección a la vida y Ocupación inmediata.

### **Objetivo de la Rehabilitación**

Selección del nivel de desempeño esperado para los sismos de diseño.

### **Ocupación inmediata**

Nivel de desempeño en el cual un edificio exhibe daño mínimo o nulo en sus elementos estructurales y daño menor en sus componentes no estructurales.

### **Pandeo**

Flexión súbita de un elemento que se despegas de su eje original, perdiendo drásticamente su rigidez y capacidad de resistir cargas.

### **Parapeto**

Véase "pretil".

### **Patín**

Proyección horizontal en un extremo de la sección de un elemento, con lo que se proporciona un notable incremento de momento de inercia y de capacidad para resistir momentos flexionantes.

### **Peligro**

Probabilidad de ocurrencia de un agente perturbador potencialmente dañino de cierta intensidad, durante un cierto periodo y en un sitio determinado.

### **Peralte**

Altura (peralto).

### **Peso propio**

Las cargas debidas al peso de los elementos estructurales.

### **Piso**

Cada una de las superficies horizontales de las que consta un edificio. Sinónimo de nivel.

### **Preparación**

Actividades y medidas tomadas anticipadamente para asegurar una respuesta eficaz ante el impacto de un fenómeno perturbador en el corto, mediano y largo plazos.

### **Pretil**

Muro no estructural de poca altura, usualmente no mayor que 1 m, el cual se forma por la continuación de las paredes exteriores sobre la azotea o bajo una ventana. Sinónimos: parapeto, antepecho de ventana.

### **Prevención**

Conjunto de acciones y mecanismos implantados con antelación a la ocurrencia de los agentes perturbadores con la finalidad de conocer los peligros o los



riesgos, identificarlos, eliminarlos o reducirlos; evitar o mitigar su impacto destructivo sobre las personas, bienes, infraestructura, así como anticiparse a los procesos sociales de construcción de éstos.

### **Prevención de colapso**

Nivel de desempeño en el cual el edificio, si bien está de pie, tiene un daño muy extendido y posee una rigidez y resistencia residuales pequeñas.

### **Previsión**

Tomar conciencia de los riesgos que pueden causarse y las necesidades para enfrentarlos a través de las etapas de identificación de riesgos, prevención, mitigación, preparación, atención de emergencias, recuperación y reconstrucción.

### **Propietario o poseedor**

Persona física o moral que tiene la propiedad o posesión jurídica de un bien inmueble, donde se pretende hacer la revisión de las construcciones existentes.

### **Protección a la vida**

Nivel de desempeño en el cual el edificio exhibe daño extendido a los componentes estructurales y no estructurales, permanece estable y tiene suficiente capacidad estructural de reserva.

### **Proyectista**

Persona física con cédula profesional encargada de realizar el proyecto estructural o de rehabilitación de acuerdo con el reglamento de construcciones local.

### **Proyecto ejecutivo de obra**

Conjunto de planos, memorias descriptivas y de cálculo, catálogo de conceptos, normas y especificaciones que contiene la información y define el proceso de la rehabilitación de un inmueble.

### **Puntal**

Elemento estructural de sección transversal pequeña que se introduce en una estructura para resistir cargas de compresión. A diferencia de una columna, puede ser inclinado y frecuentemente forma parte de una armadura.

### **Recimentación**

Modificación de la cimentación para resistir las nuevas acciones.

### **Reconocimiento preliminar**

Recorrido realizado en equipos, por tierra o por aire, inmediatamente después de la ocurrencia de un sismo para determinar el tipo y extensión del daño en la infraestructura física educativa de una zona con objeto de planear y jerarquizar la evaluación de edificios. Normalmente, este recorrido dura unas cuantas horas y no se espera que se evalúen edificios en particular.

### **Reconstrucción**

Acción transitoria orientada a alcanzar el entorno de normalidad social y económica que prevalecía entre la población antes de sufrir los efectos producidos por un agente perturbador en un determinado espacio o jurisdicción. Este proceso debe buscar, en la medida de lo posible, la reducción de los riesgos existentes, asegurando la no generación de nuevos riesgos y mejorando para ello las condiciones preexistentes.

### **Recuperación**

Proceso que inicia durante la emergencia, consistente en acciones encaminadas al retorno a la normalidad de la comunidad afectada.

### **Recursos**

Personal, equipos, brigadas, suministros e instalaciones disponibles o potencialmente disponibles para la coordinación de la evaluación de la infraestructura física educativa.

### **Reforzamiento**

Incremento de la capacidad para resistir cargas de una estructura, de un sistema, de un componente o de un elemento estructural.

### **Refuerzo**

Elementos como barras, alambres, hebras, fibras u otros que son embebidos o anclados con un elemento estructural para que juntos resistan las fuerzas del sistema.

### **Rehabilitación**

Proceso de intervención estructural para recuperar las condiciones originales (reparación) o para mejorar el comportamiento de elementos y sistemas estructurales para que la edificación cumpla con los requisitos de seguridad contra colapso y de limitación de daños establecidos en el Reglamento; incluye a la recimentación, reforzamiento, reparación y rigidización.

### **Reparación**

Reemplazo o corrección de materiales, componentes o elementos de una estructura que se encuentran dañados o deteriorados con el fin de recuperar su capacidad original.

### **Resiliencia**

Capacidad de un sistema, comunidad o sociedad potencialmente expuesta a un peligro para resistir, asimilar, adaptarse y recuperarse de sus efectos en un corto plazo y de manera eficiente, a través de la preservación y restauración de sus estructuras básicas y funcionales, logrando una mejor protección futura y mejorando las medidas de reducción de riesgos.

### **Resistencia**

Máxima carga que un elemento estructural puede soportar antes de llegar a un estado de falla.

### **Resistencia de diseño**

Producto de la resistencia nominal, calculada a partir de normas técnicas complementarias, y el factor de resistencia correspondiente.

### **Resistencia nominal**

Resistencia de un elemento o una sección transversal calculada con las disposiciones e hipótesis del método de diseño por resistencia de normas técnicas complementarias de un reglamento de construcciones, antes de aplicar cualquier factor de resistencia.

### **Resistencia requerida o última**

Producto de la acción interna debida a cargas permanentes, variables y accidentales, y de sus factores de carga correspondientes.

### **Resumen de Avisos**

Cartel que se coloca en cada una de las puertas de entrada al plantel escolar y que incluye un resumen de la calificación de cada edificio.

### **Revisión de la seguridad estructural**

Comprobación de los estados límite de falla y de servicio de la estructura.

**Riesgo**

Daños o pérdidas probables sobre un agente afectable, resultado de la interacción entre su vulnerabilidad y la presencia de un agente perturbador.

**Rigidez**

Oposición de un material o elemento estructural a ser deformado. Carga necesaria para producir una deformación unitaria.

**Rigidización**

Adición de elementos, componentes o sistemas para reducir los desplazamientos y las deformaciones.

**Segmento (de muro)**

Parte de un muro delimitado por aberturas. Puede ser vertical u horizontal. El segmento horizontal se suele llamar viga de acoplamiento.

**Seguridad estructural**

Nivel de cumplimiento de los estados límite de falla y de servicio de una estructura establecidos en el reglamento de construcciones local y sus normas técnicas complementarias.

**Simulacro**

Representación mediante una simulación de las acciones de respuesta previamente planeadas con el fin de observar, probar y corregir una respuesta eficaz ante posibles situaciones reales de emergencia o desastre. Implica el montaje de un escenario en terreno específico, diseñado a partir de la identificación y análisis de riesgos y la vulnerabilidad de los sistemas afectables.

**Sismo**

Fracturamiento repentino de una porción de la litósfera terrestre (cubierta rígida del planeta) como consecuencia de la acumulación de esfuerzos de deformación. La energía liberada por el rompimiento se propaga en forma de ondas sísmicas, hasta grandes distancias.

**Sistema estructural**

Conjunto de elementos o componentes estructurales de todo el edificio.

**Subsistema estructural**

Conjunto de elementos o componentes estructurales de parte de un edificio, con una función determinada (por ejemplo, muro acoplado, marco).

**Suelo**

Material que se forma en la superficie de la Tierra que proviene de la desintegración o alteración física y química de las rocas y de los residuos de las actividades de seres vivos que se asientan sobre él. El suelo varía según el clima, la vida animal y vegetal, el tiempo, la pendiente del terreno y el material rocoso del que se deriva.

**Tabicón**

Tabique macizo compuesto de concreto.

**Tabique**

Pieza para mampostería de forma prismática rectangular, de dimensiones menores que el bloque, fabricado con arcillas, comprimidas o extruidas, mediante un proceso de cocción o de concreto. Puede ser macizo, hueco o multiperforado. Al tabique macizo de arcilla se le conoce comúnmente como ladrillo.

**Talud**

Inclinación del paramento de un muro o de un terreno.

### **Talud artificial**

Superficie inclinada que une los desniveles del terreno, producto de actividades de construcción, ya sea por corte o relleno o construcción de un terraplén artificial.

### **Tensión**

Esfuerzo principal que produce el alargamiento de un elemento estructural o de las fibras de su sección transversal paralelas a su eje.

### **Tensor**

Barra o cable que, trabajando en tensión, se coloca para restringir el alargamiento entre dos puntos de una estructura.

### **Torsión**

Estado de esfuerzos que tiende a producir rotación de la sección transversal de un elemento. En relación a estructura completa, es la rotación de los sistemas de pisos y techo alrededor del eje vertical durante la vibración por el efecto de sismos.

### **Viga**

Elemento estructural de eje recto que cubre un claro horizontal y en que el peso propio y las cargas externas inducen principalmente momentos flexionantes y fuerzas cortantes. Sinónimo de trabe.

### **Viga de acoplamiento**

Elemento que une dos muros. También llamado segmento horizontal del muro.

### **Vigueta**

Viga de tamaño relativamente angosto apoyada sobre vigas o muros, con poca separación, para soportar bovedillas de losas de entrepiso o cubierta.

### **Voladizo**

Viga o losa empotrada en un extremo y libre en el otro.

### **Vulnerabilidad**

Susceptibilidad o propensión de un agente afectable a sufrir daños o pérdidas ante la presencia de un agente perturbador, determinado por factores físicos, sociales, económicos y ambientales.

### **Zapata**

Elemento estructural de la cimentación que transmite las cargas directamente al suelo, por lo general, tiene una forma ensanchada hacia la parte de contacto con el terreno para distribuir las cargas en una superficie más amplia. Puede ser aislada, corrida o de borde o lindero.

### **Zona de desastre**

Espacio territorial determinado en el tiempo por la declaración formal de la autoridad competente, en virtud del desajuste que sufre en su estructura social, impidiéndose el cumplimiento normal de las actividades de la comunidad. Puede involucrar el ejercicio de recursos públicos a través del Fondo de Desastres Naturales o del instrumento que, eventualmente, lo sustituya.



## Referencias

- Alcántara, I. (2020). Comunicación personal.
- Alcocer, S. M., Bautista, R. y Valencia, G. A. (2020). *Revisión de la literatura y del estado del arte de metodologías de evaluación postsísmica*. México: Instituto de Ingeniería, UNAM.
- American Concrete Institute (ACI 224R) (2001). *Control of cracking in concrete structures*. Farmington Hills, MI, EUA.
- American Welding Society (2015). *Welding Inspection Handbook*. 5a Edición. Estados Unidos de América: American Welding Society.
- Arnau, O. (2017). Comunicación personal.
- Arnold, C. y Reitherman, R. (1991). *Manual de configuración y diseño sísmico de edificios*. México: Limusa.
- Ballio, G., Calado, L., Martino, A., Faella, C., y Mazzolani, F. (1987). Cyclic behaviour of steel beam to column joints: experimental research. *Costruzioni Metalliche*, 1987, 2, 69-90.

- Brockenbrough, R. y Schuster, J. (2002). *Design Guide 15: Rehabilitation and Retrofit Guide. A reference for historic shapes and specifications (Second Edition)*. American Institute of Steel Construction. Recuperado de <https://www.aisc.org/Design-Guide-15-Rehabilitation-and-Retrofit-Second-Edition>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) (2001). *Cartilla de diagnóstico preliminar de inestabilidad de laderas. Fascículo*. México: Autor.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) (2008). *Inestabilidad de laderas. Fascículo*. México: Autor.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) (2019). Comunicación personal.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) (2020a). *Laderas inestabilidad. Infografía*. México: Autor.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) (2020b). Comunicación personal.
- De Buen, O. (2020). *Estructuras de acero - comportamiento y diseño*. México: Limusa.
- Duggal, S. K. (2014). *Limit state design of steel structures*. India: McGraw-Hill.
- Elwood, K. H. (2020). Comunicación personal.
- Engelhardt, M. (2020). Comunicación personal.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) (1992). *NEHRP Handbook of Techniques for the Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*, FEMA 172. Washington, D.C.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) (1998). Evaluation of Earthquake-Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings: Basic Procedures, FEMA 306, prepared by the Applied Technology Council for the Federal Emergency Management Agency. Washington, D.C.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2000). Recommended Postearthquake Evaluation and Repair Criteria for Welded Steel Moment-Frame Buildings, FEMA 352, prepared by the SAC Joint Venture, a partnership of the Structural Engineers Association of California, the Applied Technology Council, and California Universities for Research in Earthquake Engineering, for the Federal Emergency Management Agency. Washington, D.C.
- Fick, D. R. (2008). *Experimental investigation of a full-scale flat-plate reinforced concrete structure subjected to cyclic lateral loading in the inelastic range of response* [Tesis]. Purdue University, Indiana, EU.
- Flores, L. E. (2020). Comunicación personal.
- García F. (2020). Comunicación personal.
- Gioncu, V. y Anastasiadis, A. (2014). Plastic coupled instabilities of I-shaped steel beams. *Thin-Walled Structures*, 81, 67–77. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.08.013>
- Gobierno de la Ciudad de México (GobCdMx) (2017). Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería. *Gaceta Oficial de la Ciudad de México*, diciembre.
- Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa (INIFED) (2019). *Daños en la INFE en estados con alta vulnerabilidad sísmica*. México.

- Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa, en Liquidación (INIFED) (2020a). *Rehabilitación sísmica de la infraestructura física educativa de México. Guía técnica*. Ciudad de México, INIFED.
- Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa, en Liquidación (INIFED) (2020b). *Evaluación postsísmica de la infraestructura física educativa de México. Volumen 1: Metodología*. Ciudad de México, INIFED.
- Jirsa, J. O (1985). Comunicación personal.
- Lin, A. (2017). Structural features and seismotectonic implications of coseismic surface ruptures produced by the 2016  $M_w$ 7.1 Kumamoto earthquake. *Journal of Seismology*, 21, 1079-1100.
- Marshall, T., Gilvary, K. y Kestner, J. (2012). Hurricane Andrew 20 years later: What have we learned?, *30<sup>th</sup> Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology*, American Meteorological Society, 1B2, 1-6. Recuperado de <https://ams.confex.com/ams/30Hurricane/webprogram/30HURRICANE.html>.
- Meli, R. (2001). *Diseño estructural*. México: Limusa.
- Ministry of Business, Innovation and Employment (MBIE) (2014). *Field guide: Rapid post disaster building usability assessment – Earthquakes*. Wellington, Nueva Zelanda.
- Ministry of Business, Innovation and Employment (MBIE) (2017). *Field guide: Rapid post disaster building usability assessment – Geotechnical assessment*. Wellington, Nueva Zelanda.
- Otani, S. (2020). Comunicación personal.
- Ovando, E. (2020). Comunicación personal.
- Rangel, J. L. (2020). Comunicación personal.
- Sánchez, A. (2020). Comunicación personal.
- Sezen, H. (2020). Comunicación personal.
- Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural (SMIE) (2019). *Edificaciones de mampostería*. México: Limusa.
- Somers, BR y Pense, AW (1994). Welding failure analysis. *Materials Characterization*, 33, 3, 295-309. Recuperado de [https://doi.org/10.1016/1044-5803\(94\)90049-3](https://doi.org/10.1016/1044-5803(94)90049-3).
- Vasdravellis, G. y Uy, B. (2014). Shear strength and moment-shear interaction in steel-concrete composite beams. *Journal of Structural Engineering*, 140(11), 04014084. Recuperado de [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001008](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001008)
- Wang, W., Kodur, V., Yang, X. y Li, G. (2014). Experimental study on local buckling of axially compressed steel stub columns at elevated temperatures. *Thin-Walled Structures*, 82, 33-45. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.03.015>







## Apéndice

### A. INVESTIGACIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO Y MAMPOSTERÍA PARA FINES DE REHABILITACIÓN

---

#### A.1 General

En este apéndice se presentan consideraciones y recomendaciones para lograr una inspección en campo eficaz que permita entender los principales modos de comportamiento que rigen el desempeño de la estructura, así como los tipos e intensidad de daños causados por sismos u otras acciones.

La observación, medición y registro del daño hace posible aplicar las tablas de modos de comportamiento, daños asociados y factores reductivos  $\lambda$  para daños ligeros, moderados y severos de este documento (tablas 6.2, 6.4, 6.6, 7.2, 7.4, 7.6 y 9.2).

Como complemento a este apéndice, se recomienda revisar las recomendaciones documentadas en INIFED (2020a y 2020b).

## A.2 Grietas

La clasificación de la intensidad o magnitud de daño en componentes estructurales requiere que el inspector de daños y/o proyectista distingan entre grietas por flexión y por cortante, que puedan identificar grietas verticales en zonas a compresión en muros y columnas, y que sean capaces de diagnosticar grietas que puedan indicar algún deslizamiento a lo largo del traslape de barras de refuerzo.

Para fines de determinar el nivel de seguridad estructural (en los métodos de Evaluación Intermedia, MEI, y de Evaluación Profunda, MEP), se requiere medir el ancho de las grietas, el cual es un factor que permite clasificar la severidad del daño por sismo en una estructura de concreto o de mampostería. En este documento se usan, indistintamente, “ancho de grieta” y “espesor de grieta”.

### A.2.1 Grietas por flexión y por tensión diagonal

Las grietas por flexión son aquellas que se desarrollan perpendicularmente a los esfuerzos de tensión por flexión. En el caso de segmentos de muro o en columnas, las grietas por flexión son horizontales; en vigas, son verticales. Las grietas por flexión inician en la fibra extrema de la sección y se propagan hacia el interior, en dirección del eje neutro. En el caso de elementos sujetos a desplazamientos cíclicos, a menudo las grietas por flexión se encuentran formando una sola grieta que atraviesa el peralte de la sección.

Las grietas por cortante son resultado de los esfuerzos por tensión diagonal al aplicarse las fuerzas de cortante. Estas grietas son inclinadas, formando ángulos entre 35 y 70 grados con respecto a la horizontal. El ángulo de agrietamiento depende de los esfuerzos normales y de la geometría del elemento. En el caso de componentes sujetos a desplazamientos cíclicos, como los impuestos por el sismo, es frecuente que se crucen formando un patrón en forma de letra X.

En ocasiones, las grietas por flexión se conectan con las grietas inclinadas. Un caso característico se encuentra en muros, en los cuales las grietas horizontales, a cierta altura, se inclinan conforme se propagan hacia el centro del muro. En estos casos, se deben medir las grietas por flexión y por cortante de forma separada.

Se debe tener presente que, en un inicio, las grietas se pueden explicar mediante las relaciones de esfuerzos representadas en el círculo de Mohr. Conforme aumenta

el agrietamiento, los patrones y la orientación de los esfuerzos son afectados por el acero de refuerzo del elemento.

### A.2.2 Profundidad total o parcial de grietas

La clasificación del daño en edificios de concreto y mampostería en las tablas 6.2, 6.4, 6.6, 7.2, 7.4, 7.6 y 9.2 supone que las grietas por flexión y por cortante se extienden en todo el espesor (en el caso de muros) o ancho (en vigas y columnas). Además, se considera que el espesor de la grieta es similar en caras opuestas del elemento. Es probable que las cargas inducidas por sismo en el plano y fuera del plano del elemento ocasionen que las grietas estén abiertas en una cara y queden cerradas o con menor espesor en la cara opuesta. En esos casos, una opción aceptable es usar el promedio del ancho de las grietas medidas en caras opuestas. Otra opción, más conservadora, es usar la grieta con el mayor espesor (recomendable).

### A.2.3 Agrietamiento como precursor del desconchamiento

El agrietamiento en las zonas sujetas a compresión es precursor del desconchamiento del concreto o la mampostería. Las grietas son paralelas a los esfuerzos principales a compresión y se desarrollan cuando las deformaciones unitarias a compresión en el concreto o mampostería son superiores a valores entre 0.003 y 0.005. Dicho agrietamiento es indicativo de una intensidad mayor del daño por clasificarse en este documento; ocurre en los extremos de las zonas de articulación plástica en modos de comportamiento controlados por flexión y en fallas por aplastamiento diagonal (del alma del muro o en columnas o vigas) en comportamientos controlados por fuerza cortante.

En el caso de elementos que se comportan a flexión, estas grietas son verticales en muros y columnas, y horizontales en vigas. Las grietas ocurren cerca de las fibras extremas a tensión, y se encuentran con menor frecuencia en vigas, ya que su carga axial es baja.

El agrietamiento en zonas de compresión suele confundirse con grietas asociadas a deslizamiento de traslapes. Algunas diferencias entre ellas son:

Grietas precursoras de desconchamiento en zonas a compresión	Grietas por falla de adherencia o por deslizamiento de traslapes
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ocurren ante deformaciones de compresión elevadas.</li> <li>• Son usualmente cortas.</li> <li>• Aparecen en las fibras extremas de una sección, comúnmente dentro del recubrimiento de concreto.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aparecen en la ubicación de refuerzo longitudinal susceptible a fallas por adherencia o por deslizamiento de barras traslapadas. Es el caso de barras de grandes diámetros o traslapes con longitudes insuficientes.</li> <li>• Tienen a ser relativamente largas y rectas, siendo paralelas a las barras. Se originan junto al refuerzo y se propagan hacia la superficie de concreto.</li> </ul>

El agrietamiento inclinado en el alma de un muro o hacia el centro de la altura de una columna puede ser precursor de una falla por compresión diagonal. A diferencia de las grietas por tensión diagonal, éstas no se abren mucho. Conforme aumenta el daño, las grietas evolucionan en un desconchamiento del concreto o mampostería, producto de la reducción de la resistencia a la compresión del concreto o de la mampostería en presencia de deformaciones transversales a tensión.

#### A.2.4 Grietas de adherencia en zonas de traslapes

Si los traslapes tienen longitudes insuficientes para desarrollar las fuerzas de tensión en el acero de refuerzo, las barras traslapadas deslizan entre sí. La evidencia de este deslizamiento son grietas longitudinales, paralelas al traslape, que se forman adyacentes al refuerzo y migran hacia la superficie del concreto. Este agrietamiento coincide con la ubicación de los traslapes de refuerzo.

#### A.2.5 Anchos de grieta

En este documento y en INIFED (2020a y 2020b), la intensidad del daño en estructuras de concreto y mampostería se clasifica dependiendo del ancho de grieta. Es por ello que, para definir el nivel de daño y sus consecuencias en la capacidad de la estructura, se debe medir el máximo ancho de las grietas.

Cuando se tienen muchas grietas, se debe considerar la grieta con el mayor ancho del tipo considerado (es decir, por flexión o por cortante) para definir el nivel de daño.

El máximo ancho de una grieta puede ser considerablemente mayor que el promedio del ancho de grietas paralelas. Si bien el ancho promedio puede ser un mejor indicador de la deformación unitaria promedio en el refuerzo, el ancho máximo es considerado como una mejor referencia de la máxima deformación en el refuerzo y, en general, de la intensidad de daño. La concentración de deformación en una o dos grietas de gran ancho indica un modo de comportamiento indeseable y daño más serio que cuando la deformación tiene una distribución más uniforme y se observan varias grietas paralelas menos anchas, lo cual indica un mejor desempeño sísmico.

La clasificación del daño en función del ancho de grietas se basa en comparar el daño medido en experimentos de elementos de concreto y mampostería. Se reconoce que el ancho residual de la grieta, medido después de un sismo, puede ser menor que el máximo ancho que puede ocurrir durante el sismo.

### A.3 Planeación de la investigación

El éxito de la investigación en campo depende de una planeación cuidadosa de los aspectos por revisar. Es probable que la investigación requiera varias visitas, de modo de contar con la información completa necesaria.

El proceso de investigación debe desarrollarse revisando los aspectos más generales primero, y luego los particulares y detalles. Es decir, desde la ubicación y estructuración del edificio, hasta los materiales, dimensiones de los elementos y sus conexiones, así como los daños.

### A.3.1 Equipamiento y herramientas de los inspectores de daños

En la tabla A.3.1 se enlistan los equipos y herramientas que deben usar los inspectores de daños.

Tabla A.3.1 Equipo y herramientas del inspector de daños	
Objetos personales	
Esenciales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificación oficial personal (incluyendo visa y pasaporte, si es necesario) y/o de la entidad que representa.</li> <li>• Información sobre tipo de sangre y alergias a medicamentos y al medio ambiente.</li> <li>• Licencia de manejo.</li> <li>• Tarjetas de crédito, dinero.</li> <li>• Mochila.</li> <li>• Anteojos, anteojos de seguridad (incluyendo <i>googles</i>).</li> <li>• Casco de seguridad.</li> <li>• Botas o zapatos con casquillo de protección en la punta y, preferentemente, dieléctricos y con suela antiderrapante.</li> <li>• Chaleco de seguridad con cintas reflectantes y/o colores altamente visibles.</li> <li>• Ropa y equipo contra lluvia.</li> <li>• Tapabocas contra polvo.</li> <li>• Guantes de tela.</li> <li>• Guantes desechables.</li> <li>• Kit de primeros auxilios.</li> <li>• Medicamentos y objetos para higiene personal.</li> </ul>
Sugeridos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cantimplora, termo.</li> <li>• Pastillas purificadoras de agua.</li> <li>• Rodilleras.</li> <li>• Bolsa de dormir.</li> <li>• Crema con protector solar.</li> <li>• Repelente de moscos.</li> <li>• Antivenenos para mordedura de serpientes y picadura de alacranes.</li> </ul>
Equipo de campo	
Esenciales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Linterna con baterías de repuesto.</li> <li>• Localizador GPS.</li> <li>• Cámara electrónica con baterías extra.</li> <li>• Flexómetro (cinta métrica).</li> <li>• Nivel de mano (o inclinómetro), plomada o canica.</li> <li>• Binoculares.</li> <li>• Navaja multiusos.</li> <li>• Grietómetro (comparador manual de grietas).</li> <li>• Equipo para recarga del teléfono celular.</li> </ul>
Sugeridos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Portapapeles.</li> <li>• Papel, block de notas con protector contra agua.</li> <li>• Bolígrafos, lápices.</li> <li>• Radio portátil.</li> <li>• Laptop o tableta electrónica.</li> <li>• Brújula.</li> <li>• Arnés y accesorios (si se considera que se inspeccionarán instalaciones altas, como tanques o chimeneas).</li> </ul>

## **A.4 Procedimiento sugerido para la investigación**

A continuación, se presenta un procedimiento sugerido para ejecutar la inspección en campo con fines de rehabilitación. El alcance, detalle y orden sugerido se podrán modificar según las condiciones particulares del edificio por rehabilitar.

La inspección se realizará desde el piso inferior a los niveles superiores. Antes de ingresar a cada nivel deberá tomarse una fotografía general del nivel con una referencia que identifique el número de piso.

Se propone, como lista indicativa, lo siguiente:

1. Hacer fotografías de fachadas frontales, posteriores y laterales de ser posible.
2. Revisar las colindancias de la edificación.
  - 2.1. Medir la colindancia.
  - 2.2. Verificar si tiene tapajuntas.
  - 2.3. Revisar si la junta está limpia o existen obstrucciones.
  - 2.4. Evaluar si es propenso a golpeteo.
  - 2.5. Medir, a ojo, la altura de edificios vecinos.
  - 2.6. Verificar si las losas de edificios vecinos coinciden con las del edificio evaluado o con sus columnas.
3. Revisar problemas geotécnicos, con su documentación fotográfica.
  - 3.1. Hundimientos (falla rotacional generalizada, por punzonamiento, local, desplazamiento horizontal).
  - 3.2. Emersión.
  - 3.3. Inclinación.
  - 3.4. Agrietamiento en suelos.
  - 3.5. Cimentaciones con filtraciones de agua o inundadas.
  - 3.6. Desplazamiento lateral causado por licuación.
  - 3.7. Inestabilidad de laderas (caídos, flujos).
  - 3.8. Árboles inclinados o emergidos.
  - 3.9. Movimientos del terreno adyacente a fallas superficiales.
4. Confirmar información del proyecto original.
  - 4.1. Fecha de construcción.
  - 4.2. Diseñador.
  - 4.3. Planos estructurales, arquitectónicos, memorias (solicitar la información).
  - 4.4. Verificar el uso del edificio en nivel uno (PB), niveles intermedios y nivel superior.
  - 4.5. Sistema estructural (especificar si hay variaciones del sistema estructural en elevación).
5. Identificar vulnerabilidades.
  - 5.1. Identificar la posición en manzana (esquina, medio, aislado).

- 5.2. Identificar:
  - 5.2.1. Sistema estructural resistente a cargas gravitacionales (SERCG).
  - 5.2.2. Sistema estructural resistente a fuerzas laterales (SERFL).
  - 5.2.3. Tipo de cimentación y la profundidad.
  - 5.2.4. Tipo de sistema de piso. Prestar atención a la posible presencia de losas planas macizas o aligeradas.
- 5.3. Hacer un croquis de todas las plantas donde se identifique la ubicación de los elementos sismo-resistentes y su posición respecto a ejes ortogonales principales.
  - 5.3.1. Medir largo y ancho de todas las plantas.
  - 5.3.2. Medir altura total del edificio, altura del primer nivel y alturas de entrepisos.
  - 5.3.3. Contar el número de niveles sobre nivel de banquetta.
  - 5.3.4. Contar el número de sótanos y profundidad de sótanos.
  - 5.3.5. Medir dimensiones de los elementos estructurales en todos los niveles en forma aleatoria (columnas, vigas, castillos, dalas, losas, muros de carga, muros divisorios, muros diafragma).
  - 5.3.6. Identificar características y, en su caso, determinar las propiedades de los materiales de los elementos estructurales (columnas, vigas, castillos, dalas, losas, muros de carga, muros divisorios, muros diafragma) como se establece en el capítulo 3 de la *Guía técnica* (INIFED, 2020a).
- 5.4. Existencia de mecanismo de transmisión de cargas directo.
  - 5.4.1. Revisar que:
    - 5.4.1.1. Diafragmas horizontales puedan transmitir fuerzas a elementos verticales.
    - 5.4.1.2. Los elementos verticales del SERFL puedan transmitir las fuerzas a la cimentación.
    - 5.4.1.3. La cimentación transmite las fuerzas al suelo.
- 5.5. Irregularidades verticales.
  - 5.5.1. Identificar cambios de rigideces en entrepisos contiguos.
  - 5.5.2. Revisar la existencia de planta baja débil.
  - 5.5.3. Revisar si existen marcos o muros que no llegan a la cimentación.
  - 5.5.4. Revisar la distribución del peso en cada nivel e identificar concentraciones en un piso.
  - 5.5.5. Revisar si el edificio cuenta con cisternas o tanques elevados de agua (tinacos) o gas en la azotea.
  - 5.5.6. Identificar cambios de geometría en elevación (recesos, discontinuidades).
  - 5.5.7. Revisar la existencia de un mezanine.
  - 5.5.8. Identificar si hay columnas/muros con diferentes alturas en un mismo nivel o si no son continuos de un piso a otro.
  - 5.5.9. Revisar la ocurrencia posible de “columnas cortas”.
- 5.6. Irregularidades en planta.
  - 5.6.1. Revisar la distribución en planta de elementos verticales de SERFL.
  - 5.6.2. Medir el largo y ancho de entrantes y salientes (balcones, losas en voladizo).

- 5.6.3. Medir el largo y ancho de cubos de luz, elevadores y escaleras. Identificar el material constructivo.
- 5.6.4. Medir aberturas en niveles de piso y revisar si sus posiciones difieren entre un piso y otro.
- 5.6.5. Revisar cambios de geometría de plantas en elevación.
- 5.6.6. Levantar información para una posterior revisión del sistema de piso como diafragma rígido.
- 5.7. Falta de redundancia.
  - 5.7.1. Estructuración de péndulo invertido.
  - 5.7.2. Existencia de un elemento o subsistema claramente más resistente que el resto en la planta.
- 5.8. Falta de capacidad de deformación inelástica.
  - 5.8.1. Fenómeno de “columna corta”.
  - 5.8.2. Sistema de columnas débiles – vigas fuertes.

**6. Evaluar daños.**

- *Asignar clave a los elementos estructurales. Ejemplo: E3S-N1, donde:*
  - » *E3 es la posición respecto a los ejes ortogonales, considerando los números en dirección X (3, en este caso) y las letras en dirección Y (E, en este ejemplo).*
  - » *Siendo N el norte geográfico, se debe identificar las caras norte (N), sur (S), este (E) y oeste (O) para cada elemento y hacer las mediciones en cada cara.*
  - » *N1 es el número de nivel. El nivel 3, por ejemplo, corresponde al que tiene como techo a la tercera losa contada a partir del nivel de banquetta.*

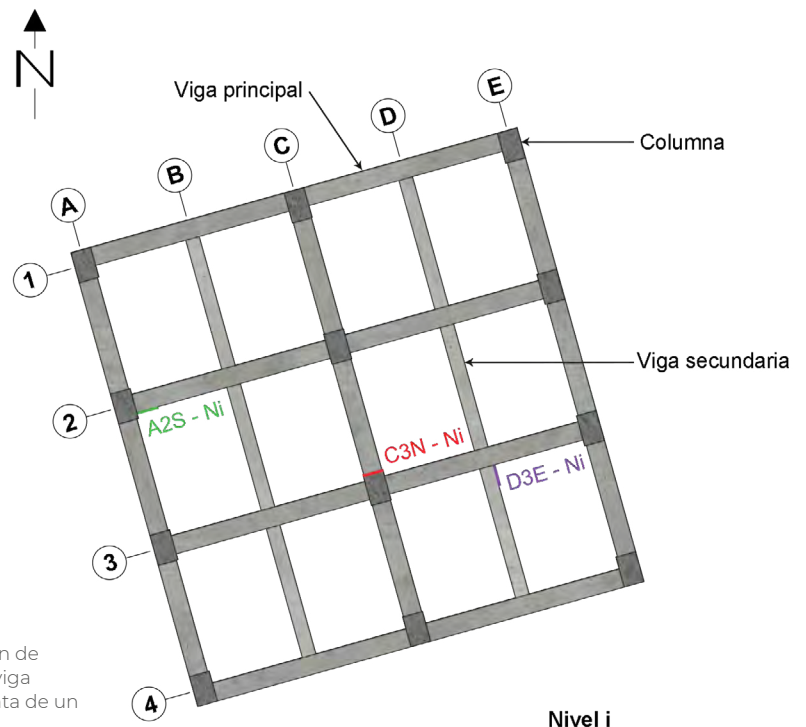


Figura A.1. Ejemplos de identificación de elementos estructurales (columna, viga principal, viga secundaria) en la planta de un edificio cualquiera en el nivel i.  
Fuente: elaboración propia.



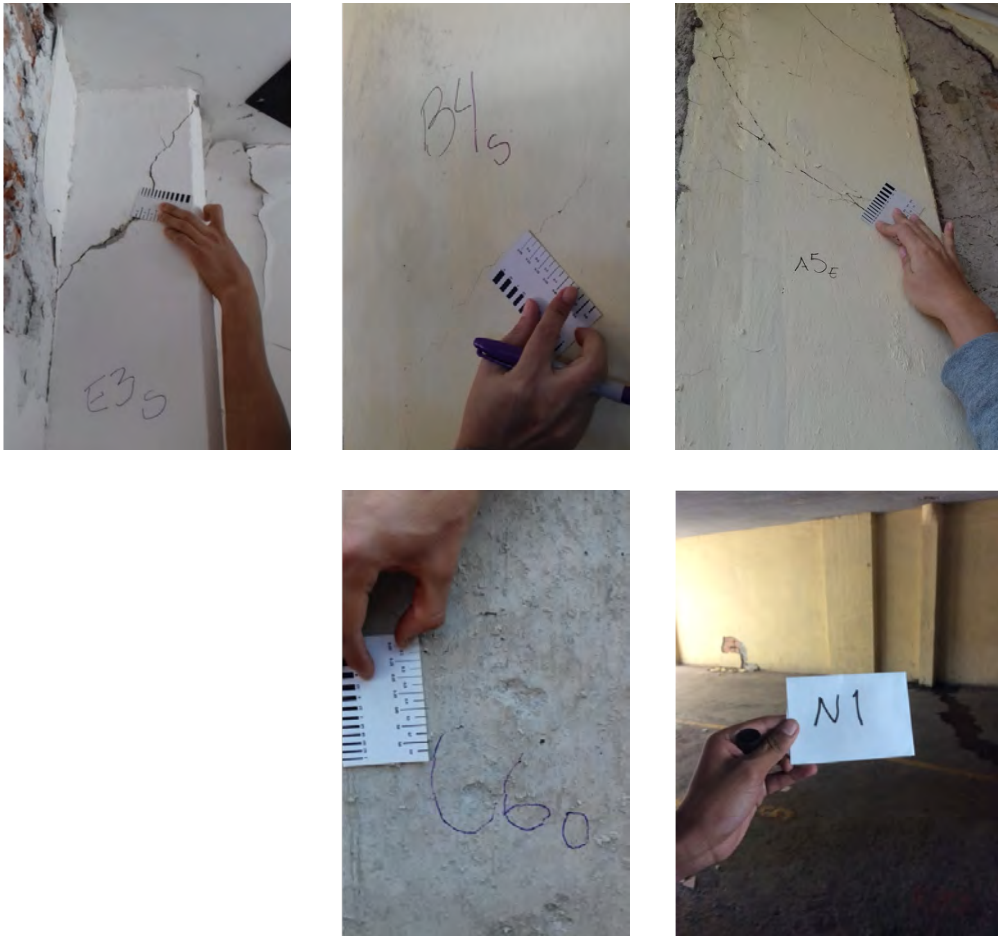


Figura A.2 Ejemplos de identificación de caras de elementos estructurales (columnas) y de medición del ancho de grietas usando comparadores manuales (grietómetros).  
 Fuente: archivo personal de Rubén Bautista (2018).

- *Observar, medir y registrar los atributos siguientes:*
  - 6.1. Fallas en cimentación.
  - 6.2. Golpeteo.
  - 6.3. Colapso parcial.
  - 6.4. Medir las deflexiones laterales de cada entrepiso, si son evidentes.
  - 6.5. Daños en elementos estructurales tipo columnas, vigas, vigas de acoplamiento, incluyendo elementos estructurales de la cimentación.
    - 6.5.1. Acero expuesto.
    - 6.5.2. Acero pandeado.
    - 6.5.3. Aplastamiento del concreto.
    - 6.5.4. Pandeo de la columna.
    - 6.5.5. Medir grietas.
  - 6.6. Daños en muros estructurales, de carga y diafragma de mampostería, incluyendo castillos y dalas, si existen.
    - 6.6.1. Acero expuesto.
    - 6.6.2. Acero pandeado.

- 6.6.3. Aplastamiento del concreto.
- 6.6.4. Pandeo del muro.
- 6.6.5. Volteo del muro.
- 6.6.6. Medir grietas.
- 6.7. Daños en conexiones.
  - 6.7.1. Acero expuesto.
  - 6.7.2. Acero pandeado.
  - 6.7.3. Aplastamiento del concreto.
  - 6.7.4. Medir grietas.
- 6.8. Daños en losas.
  - 6.8.1. Acero expuesto.
  - 6.8.2. Acero pandeado
  - 6.8.3. Medir grietas.
- 6.9. Daños en exteriores.
  - 6.9.1. Vidrios.
  - 6.9.2. Torres de anuncios.
  - 6.9.3. Antenas de telecomunicaciones.
  - 6.9.4. Acabados.
  - 6.9.5. Fachadas.
  - 6.9.6. Balcones.
  - 6.9.7. Pretilas.
  - 6.9.8. Tanques elevados.
  - 6.9.9. Bardas.
  - 6.9.10. Salidas de emergencia.
- 6.10. Daños en interiores.
  - 6.10.1. Muros divisorios.
  - 6.10.2. Plafones.
  - 6.10.3. Lámparas.
  - 6.10.4. Cubos de escaleras, elevadores, luz.
  - 6.10.5. Instalaciones.
  - 6.10.6. Fugas o derrames de materiales peligrosos.
- 6.11. Deterioro de los materiales.
  - 6.11.1. Por edad.
  - 6.11.2. Por falta de mantenimiento.
  - 6.11.3. Por corrosión.
- 7. Rehabilitación previa del edificio.**
  - 7.1. Año(s) de rehabilitación.
  - 7.2. Técnica(s) empleada(s).



*Evaluación postsísmica de la infraestructura física educativa de México.*  
*Volumen 2: Introducción al comportamiento sísmico de estructuras para fines de evaluación,*  
se terminó de editar en la Ciudad de México en enero de 2021,  
con un tiraje de 1,500 ejemplares.  
En su diseño se utilizaron las familias tipográficas Montserrat de 10pts  
y se imprimió en papel couché de 135 gramos.





**GOBIERNO DE  
MÉXICO**

**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



**INSTITUTO  
DE INGENIERÍA  
UNAM**