



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Evaluación de daños en muros no estructurales
a causa del sismo del 19 de septiembre de
2017, en las edificaciones de la Ciudad de
México**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

José Armando López Palacios

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Eduardo Reinoso Angulo



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México que, a través de la Facultad de Ingeniería, me ha brindado una formación profesional con un enfoque ético, técnico para mi trayectoria profesional.

Agradezco al Instituto de Ingeniería de la UNAM por permitirme ser parte de investigadores profesionales con el fin por contribuir con mi desarrollo profesional desde que realicé mi servicio social y por el apoyo que me brindó con los recursos económicos y materiales que han hecho posible esta tesis y el termino de mi carrera en Ingeniería Civil.

Agradezco al Dr. Eduardo Reinoso Angulo por su apoyo académico y la confianza de brindarme la oportunidad en sus investigaciones, las cuales me han enriquecido en conocimiento para mi formación académica.

Agradezco al Dr. Eric Fernando Espinosa Cazarín por el tiempo, por la paciencia, por su entusiasmo, compromiso en la revisión detallada y proporcionadas durante el desarrollo de esta tesis.

También, agradezco la amistad y la motivación profesional que me transmiten mis sinodales de examen profesional. M.I. Miguel Ángel Rodríguez Vega, el M.I. Sergio Macuil Robles, el M.I. Rodrigo Takashi Sepulveda Hirose y el M.I. Alberto Alfredo Teranishi Castillo.

Finalmente, quiero agradecer a mi familia por el apoyo, tiempo y confianza de años de inversión, para poder culminar la licenciatura de Ingeniería Civil.

DEDICATORIA

Para Armando,
Cristina, Katia, Juan.

Índice

Introducción -----	2
1. Elementos estructurales y no estructurales -----	4
1.1 Elementos estructurales -----	4
1.2 Elementos no estructurales -----	5
1.3 Tipo de muros -----	6
1.3.1 Muros estructurales -----	6
1.3.2 Muros no estructurales -----	9
2. Comportamiento de los edificios durante los sismos -----	13
2.1 Comportamiento de elementos no estructurales durante los sismos -----	16
2.1.1 Espectros de piso -----	16
2.1.2 Contenidos anclados y no anclados -----	17
2.2 Evolución de las Normas Técnicas Complementarias a través de los sismos de la CDMX -----	19
2.2.1 Reglamento de construcción del Distrito Federal 1987 -----	19
2.2.2 Reglamento de construcción del Distrito Federal 2004 -----	20
2.2.3 Normas Técnicas Complementarias 2017/2020 -----	20
2.2.4 Normas Técnicas Complementarias 2023 -----	25
3. Casos de daños no estructurales en sismos recientes en el mundo -----	30
3.1 Sismo Canterbury 04/09/2010 -----	30
3.2 Sismo Italia 24/08/2016 -----	31
4. Estudio de base de datos de los daños en CDMX debidos al sismo del 19 de septiembre de 2017 y selección de zona de estudio -----	35
4.1 Estadísticas de la BD de edificios con daños en muros no estructurales -----	38
4.1.2 Número de pisos -----	38
4.1.3 Tipo de sistema estructural -----	38
4.1.4 Año de construcción y Normas Técnicas Complementarias utilizadas en el diseño -----	39
4.1.5 Patologías estructurales de los edificios -----	40
4.1.6 Subcategorización de Patologías -----	41
4.1.7. Correlación entre número de pisos, patologías y subcategorización de las patologías. -----	43
4.2 Tipos de fallas en muros no estructurales -----	49
4.2.1 Falla por tensión diagonal -----	50
4.2.2 Falla fuera del plano -----	53
5. Conclusión -----	56
Referencias -----	58

Índice de tablas -----	61
Índice de figuras -----	62

Introducción

Introducción

El 19 de septiembre de 2017, “el Servicio Sismológico Nacional (SSN), (SSN,2017). Reportó un sismo con magnitud 7.1 localizado en el límite estatal entre los estados Puebla y Morelos, a 12 km al sureste de Axochiapan, Morelos y a 120 km de la Ciudad de México”. Varios edificios colapsaron y muchos otros tuvieron que ser desalojados (Reinoso y Miranda, 2005). A pesar de que muchos edificios desalojados no tenían daño estructural aparente, el motivo principal de su desalojo estuvo fundamentado en otro aspecto; el daño en elementos no estructurales, siendo más precisos, el caso de muros no estructurales.

A la fecha existen varias investigaciones (Reinoso, ,2018) que han enfocado su atención en los edificios que tuvieron daños estructurales graves o inclusive en aquellos edificios que colapsaron. Sin embargo, muy poca atención se ha prestado a los daños en muros no estructurales. Debido a lo anterior, el objetivo principal de este trabajo es determinar qué aspectos tuvieron mayor influencia en los edificios que presentaron daños en muros no estructurales durante el sismo del 19 de septiembre de 2017. Los objetivos secundarios son conocer la importancia de los elementos no estructurales, así como la comparación de daños con respecto a otros países del mundo, el comportamiento de estos elementos durante los sismos y el estudio de estos elementos durante la delegación Benito Juárez, en el sismo del 19 de septiembre de 2017 de la CDMX.

Para lograr los objetivos se llevará a cabo una investigación en la base de datos de la Ciudad de México sobre daños del sismo de 2017, que inicialmente incluyó 13,844 edificaciones. El estudio se enfocó en los daños en muros no estructurales. La investigación se focalizó en la Delegación Benito y la zona de la Condesa. A partir de esta zona, se observa la importancia a tomar en cuenta de las afectaciones que pueden tener estos daños y se comparará con otros daños de distintos países, gracias a una investigación de artículos con respecto a las fallas que se presentaron en 2017 de la CDMX.

La organización y contenido de los capítulos subsecuentes de esta tesis es la siguiente:

En el primer capítulo se presenta un análisis de los elementos estructurales y no estructurales. Los tipos de muros, en este capítulo se explicará la diferencia entre muros estructurales y no estructurales. En el segundo capítulo se estudiará el comportamiento de los edificios y elementos no estructurales durante los sismos. Así mismo se verá la evolución de las Normas técnicas complementarias y los Reglamentos e construcción del Distrito Federal.

En el tercer capítulo se verán los daños no estructurales en sismos recientes en el mundo, donde se hablarán de algunos sismos y las fallas que han ocurrido en los elementos no estructurales.

En el cuarto capítulo se realizará el estudio de la delegación Benito Juárez y zona Condesa sobre daños en muros no estructurales causados por el sismo de 19 de septiembre de 2017, en este capítulo se realizará un estudio de número de niveles, tipo de sistema estructural, año de construcción y normas, patologías estructurales en los edificios y subcategorización de las patologías. También se realizará una correlación entre número de pisos, patologías y subcategorización de las patologías. Finalmente, obteniendo estos datos se realizará un estudio de los tipos de fallas en muros no estructurales y se estudiará los tipos de falla que existen en estos muros.

1. Elementos estructurales y no estructurales

1. Elementos estructurales y no estructurales

En la ingeniería civil, la seguridad y estabilidad de las edificaciones frente a eventos sísmicos constituyen una preocupación primordial. La capacidad de una edificación para resistir las fuerzas dinámicas generadas por un sismo y mantener su integridad funcional y estructural es esencial para salvaguardar la vida de los civiles y mantener en funcionamiento las edificaciones. En este contexto, emerge un concepto fundamental que guía la evaluación de riesgos y el diseño de edificaciones: los elementos estructurales y no estructurales.

1.1 Elementos estructurales

Los elementos estructurales componen un sistema estructural, estos constituyen las partes fundamentales de una construcción, desempeñando un papel esencial al proporcionar resistencia y rigidez al conjunto edificado. Su función primordial consiste en sostener el peso propio de la estructura, así como resistir a diversas fuerzas externas, tales como sismos, vientos y otras cargas ambientales. Dentro de los principales tipos de elementos estructurales, se encuentran los muros de carga, zapatas, columnas, como se presenta en la *Figura 1*.

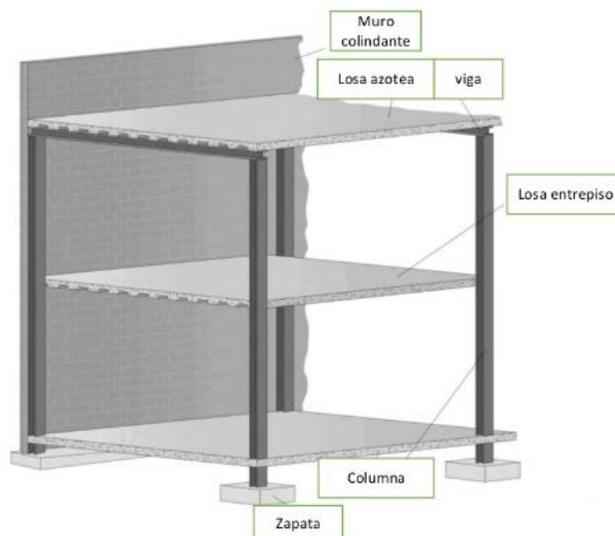


Figura 1. Ejemplos de elementos estructurales. Obtenido de: Earthquakes reducing the risk of nonstructural earthquake damage

El daño estructural se refiere a aquellas deformaciones, fracturas o colapsos que afectan directamente a los componentes esenciales que conforman el esqueleto resistente de una edificación. En el contexto de eventos sísmicos, los elementos estructurales están sujetos a diversos grados de daño, que van desde insignificantes hasta colapsos significativos. Los factores que contribuyen a estos daños pueden ser variados, abarcando desde un diseño deficiente y ejecución inadecuada en obra, hasta la exposición a sismos para los cuales el elemento estructural no fue debidamente dimensionado.

Los daños en elementos estructurales pueden tener consecuencias catastróficas, dando lugar a derrumbes parciales o totales de edificios, lo que pone en peligro la seguridad de las personas y la integridad de la propiedad.

Por tanto, es imperativo realizar un predimensionamiento y diseño preciso en los elementos estructurales, considerando las condiciones específicas del entorno y la carga sísmica prevista. La correcta planificación y ejecución en la fase de diseño son esenciales para garantizar la integridad y seguridad de las construcciones, mitigando así los riesgos asociados con los eventos sísmicos y otros factores adversos.

1.2 Elementos no estructurales

Los elementos no estructurales representan una categoría importante que engloba una diversidad de componentes, equipos y elementos presentes en un edificio, los cuales, aunque no constituyen partes de la estructura resistente, desempeñan un papel esencial en su funcionalidad.

Esta categoría abarca una amplia gama de componentes, que se pueden clasificar, de manera general en: arquitectónicos, sistemas mecánicos, instalaciones eléctricas, sistemas hidráulicos y sanitarios, así como mobiliario, equipos y contenido presentes en el interior de los edificios.

De manera específica algunos ejemplos de componentes no estructurales susceptibles a daño durante sismos destacan particiones internas, fachadas, techos falsos, pisos elevados, artefactos de iluminación, sistemas de ductos, equipos de aire acondicionado, elevadores, centros de cómputo y algunos muros no estructurales, como se presenta en la *Figura 2*.

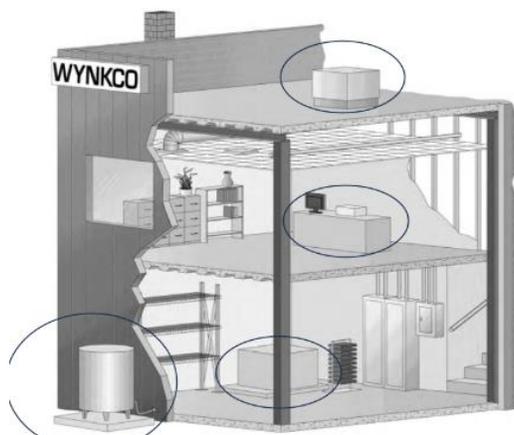


Figura 2. Ejemplo de elementos no estructurales. obtenido de: Earthquakes reducing the risk of nonstructural earthquake damage

Estos elementos, cuando no se integran correctamente al diseño sísmico, pueden experimentar desplazamientos, vibraciones y fuerzas inesperadas durante un evento sísmico, lo que resulta en daños que afectan la funcionalidad del edificio y pueden poner en riesgo la seguridad de los ocupantes. La vulnerabilidad de los elementos no estructurales se manifiesta cuando no se encuentran adecuadamente anclados o diseñados para resistir las fuerzas sísmicas.

A pesar de la creciente comprensión de la importancia de los daños no estructurales en la evaluación global de la resiliencia sísmica, existe una tendencia a centrarse predominantemente en los aspectos estructurales al abordar la seguridad sísmica de las edificaciones. Los daños no estructurales a menudo no reciben la misma atención detallada ni se someten a un análisis exhaustivo, lo que puede

llevar a subestimar su potencial para comprometer la seguridad y la funcionalidad de una edificación después de un sismo.

La consideración de daños no estructurales, a menudo subestimados o pasados por alto, abarca diversas situaciones en las cuales elementos no esenciales de una edificación resultan afectados durante un sismo. Estos suelen manifestarse en muros divisorios, revestimientos, acabados, instalaciones y fachadas.

Es de suma importancia abordar específicamente los daños no estructurales en los muros, ya que estos elementos desempeñan un papel significativo en la funcionalidad y estabilidad general de una construcción. Algunos ejemplos de eventos sísmicos que han destacado la relevancia de este fenómeno incluyen los sismos del 19 de septiembre de 1985 y 2017 en la Ciudad de México, así como el huracán Otis en Acapulco el 25 de octubre de 2023, donde se evidenciaron daños no estructurales que llevaron a la interrupción de las operaciones en diversas edificaciones, generando desempleos y pérdidas económicas.

Es por ello la necesidad de dedicar un estudio detenido al comportamiento de los muros no estructurales. Entender cómo estos elementos responden y se ven afectados por eventos sísmicos, es crucial para el diseño, construcción y mantenimiento de edificaciones resilientes.

1.3 Tipo de muros

Un muro es un elemento vertical cuya forma geométrica suele ser prismática y sus dimensiones horizontal y vertical son sensiblemente mayores que su espesor. Dentro de la ingeniería estructural, los muros se pueden clasificar como muros de carga, muros tipo diafragma, muros de contención y muros no estructurales. Además, los muros se pueden construir de diversos materiales como la mampostería, el concreto reforzado, etc.

1.3.1 Muros estructurales

Los muros estructurales constituyen elementos fundamentales en una edificación, diseñados en el análisis estructural para resistir diversas cargas, entre las que se incluyen cargas muertas (provenientes del peso propio de la construcción), cargas vivas (como las provocadas por ocupantes o mobiliario) y cargas accidentales (sismo y viento). En esta categoría, dentro de una edificación, se incluyen dos tipos: los muros tipo diafragma y los muros de carga.

Los muros diafragma desempeñan un papel crucial en la distribución de fuerzas horizontales, especialmente en la resistencia a las cargas sísmicas y de viento. Su función principal radica en actuar como elementos de rigidez que contribuyen a la estabilidad lateral de la estructura. Los muros diafragma están conformados por un marco -de concreto reforzado o acero estructural- y un muro de mampostería (o concreto) de relleno, como se aprecia en la *Figura 3*. Estos muros, estratégicamente ubicados en el plano horizontal, transfieren las fuerzas laterales a los elementos resistentes verticales, como columnas y muros de carga, proporcionando así un sistema estructural eficiente.

Por otro lado, los muros de carga están diseñados para soportar cargas tanto horizontales como verticales. Estos muros son esenciales en la distribución y transferencia de las cargas hacia los cimientos, contribuyendo así a la estabilidad de la estructura. Estos muros suelen estar en el perímetro de la edificación, como se observa en la *Figura 4*. Su capacidad para resistir cargas compresivas y de

corte es crucial para el correcto funcionamiento y durabilidad de la construcción



Figura 3. Ejemplo de muro diafragma. Obtenido de: <https://photos.app.goo.gl/7Tkwt0aTL6HQBkU43>

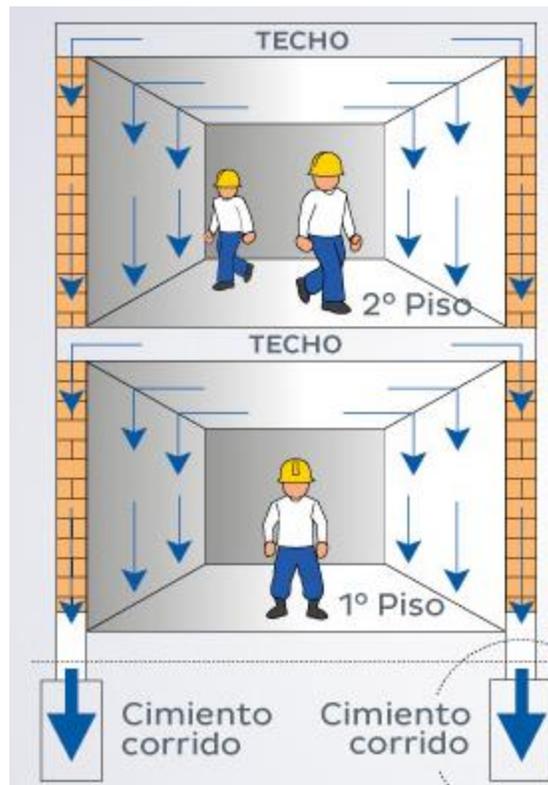


Figura 4. Ejemplo de muro de carga. Obtenido de: <https://www.construyendoseguro.com/que-son-los-muros-portantes-y-cual-es-su-importancia/>

Los muros de carga y muros diafragma son conformados por materiales como bloque, tabicón, tabique y ladrillo. En el contexto de la construcción en México, los muros estructurales más utilizados son:

- Muros de Mampostería Confinada: Estos muros se caracterizan por estar rodeados de elementos de concreto reforzado, como castillos (verticales), dalas o cadenas (horizontales). Como se presenta en la *Figura 5*. Estos castillos desempeñan una función crucial al unir y mantener unidos los muros, previniendo su colapso y fortaleciendo la estructura ante cargas verticales y laterales. Esta configuración mejora significativamente la resistencia y la capacidad de carga de los muros, proporcionando mayor estabilidad estructural.



Figura 5. Ejemplo de muro de mampostería confinada. Obtenido de: <https://www.udocz.com/apuntes/47664/disenio-de-muros-de-mamposteria-la-parte>

- Muros de Mampostería Reforzada: Presentan huecos que son reforzados internamente con acero y concreto, como se observa en la *Figura 6*. Logrando un refuerzo oculto y, en ocasiones, se utilizan en aplicaciones de "muros de acabado aparente".

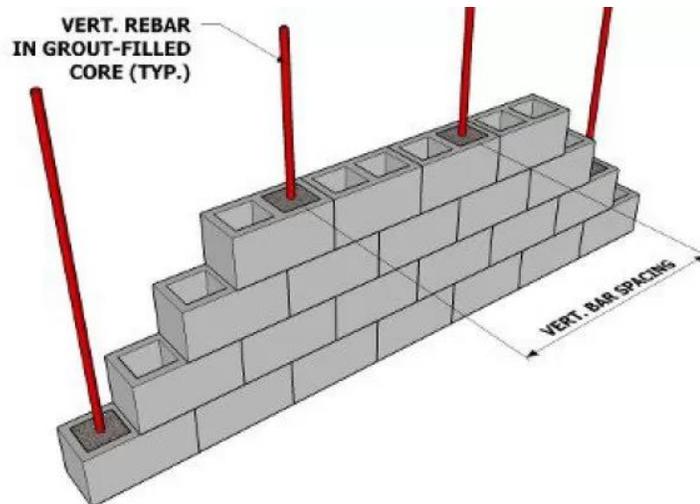


Figura 6. Ejemplo de mampostería reforzada. Obtenido de: <https://www.ingecivil.net/2018/08/10/la-mamposteria-reforzada/mamposteria-reforzada-1/>

1.3.2 Muros no estructurales

Los muros no estructurales son muros construidos de materiales como la mampostería o el drywall (tablaroca) que no contribuyen a la resistencia ni a la rigidez lateral de la estructura, pero que deben ser estables ante acciones laterales de viento o sismo. Pueden tener la función de ser muros divisorios, pretilas, o bardas etc., de los cuales no depende la seguridad de la estructura.

Los muros no estructurales, desde la perspectiva del análisis y diseño estructural, no están contemplados para resistir cargas significativas.; sin embargo, deberán de tener un diseño en el que resistan su propio peso, el peso de algunos contenidos que se apoyen sobre estos, así como las cargas accidentales que se presenten durante su funcionamiento. Aunque pueden desempeñar funciones importantes en términos de partición de espacios, división de áreas o proporcionar características estéticas, su contribución al comportamiento estructural global es nulo, si se construyen adecuadamente.

Es fundamental comprender la distinción entre muros estructurales y no estructurales en el diseño y la planificación de edificaciones, ya que esta diferenciación impacta directamente en la capacidad de la estructura para resistir fuerzas externas. La correcta identificación y consideración de estos elementos durante el proceso de diseño y construcción resulta crucial para garantizar la seguridad, estabilidad y eficiencia estructural del edificio en su conjunto.

De acuerdo con su ubicación dentro del sistema estructural de la edificación, los muros no estructurales se pueden clasificar de la siguiente manera.

Adentro del marco

Los muros no estructurales en el plano se definen como elementos que se sitúan entre las vigas y columnas de un sistema de marco estructural (concreto reforzado o acero estructural), como se presenta en la *Figura 7*. Específicamente, estos muros deberán estar desligados del marco a una distancia estratégica que permite el comportamiento de diseño previsto para el marco.

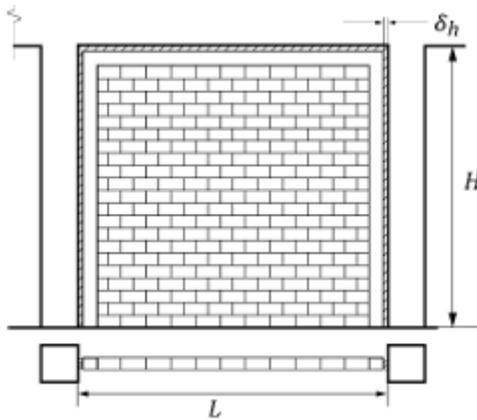


Figura 7. Ejemplo de muro no estructural dentro del marco. Obtenido de: Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería

La función primordial de estos muros no estructurales radica en otorgarle una estética a la edificación y sobre todo proteger el interiorismo de la edificación por cambios climatológicos. Contrariamente a los muros estructurales.

Sin embargo, a pesar de ser muros no estructurales, es crucial considerar el desligamiento de estos muros para evitar interferencias negativas con el sistema de marco. El desligamiento implica establecer una separación cuidadosa entre el muro no estructural y el marco, garantizando que el comportamiento del marco no se vea modificado por la presencia de estos elementos. Esta medida es esencial para prevenir posibles daños y asegurar que el muro cumpla con su función estética sin afectar adversamente la integridad de la edificación.

Las Normas Técnicas Complementarias-2023 (NTC-2023) proponen cual deberá ser la separación adecuada entre el muro no estructural y el marco circundante para poder realizar un desligamiento adecuado que asegure que la carga y las tensiones generadas por el marco no se transmitan de manera perjudicial al muro no estructural, evitando así deterioros innecesarios y posibles riesgos para la estructura en su conjunto.

Muros Cortina (Curtain walls)

En el contexto del diseño de muros no estructurales, una alternativa que surge es la consideración de muros fuera del marco (Curtain walls). Esta solución implica la posibilidad de implementar un desligamiento del marco, un enfoque que se distingue por la disposición estratégica de los muros como fachada con respecto al marco estructural o las columnas en relación con el paño de la losa, así como se muestra en la Figura 8. Este proceso ofrece ventajas significativas al asegurar que los elementos estructurales, como marcos y columnas, operen sin interferencias que puedan comprometer su desempeño.

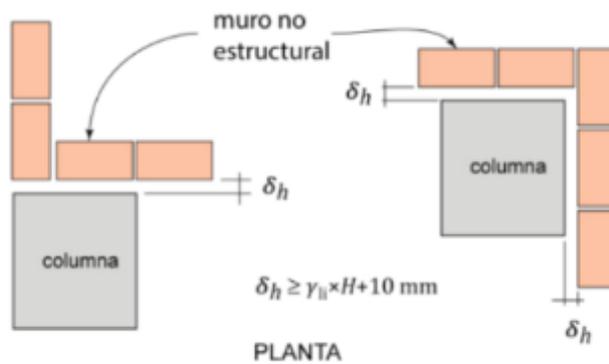


Figura 8. Ejemplo de vista en planta de curtain walls. Recuperado de: Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería

El desligamiento del marco implica la colocación del muro de manera que actúe como un componente separado, permitiendo que los elementos estructurales trabajen de manera coherente según su diseño original. Al situar el muro en una posición correcta en relación del marco o las columnas, se busca evitar cualquier interferencia con otros elementos que pudieran afectar su comportamiento estructural. Esta disposición estratégica en la fachada del marco contribuye a la eficiencia y la estabilidad global de la estructura.

2. Comportamiento de los edificios durante los sismos

2. Comportamiento de los edificios durante los sismos

Introducción.

En este capítulo, abordaremos tres temas fundamentales relacionados con la respuesta de las edificaciones ante eventos sísmicos. En primer lugar, nos centraremos en el comportamiento tanto de los elementos estructurales como de los no estructurales durante sismos, considerando la ecuación dinámica de movimiento, distorsiones de entre piso, fuerzas laterales, entre otras.

En segundo lugar, nos adentraremos en el análisis de las normativas técnicas y regulaciones de construcción que abordan específicamente los elementos no estructurales. Se Identificará desde qué normativa (NTC) o Reglamento de Construcción para el Distrito Federal (RCDF) comenzó a considerarse la importancia de los elementos no estructurales en la seguridad sísmica de las edificaciones. Luego, realizaremos una comparación del avance y las modificaciones que se han implementado a lo largo del tiempo, centrándonos especialmente en la evolución de las disposiciones relacionadas con los elementos no estructurales hasta la NTC más reciente, en este caso, la de 2023.

Por último, exploraremos los tipos de daños y fallas que han ocurrido en muros no estructurales durante sismos registrados en distintos países alrededor del mundo. Examinaremos casos de estudio para comprender mejor las vulnerabilidades y los patrones de daño observados en estos elementos. Esta revisión nos permitirá identificar lecciones aprendidas y áreas de mejora en el diseño y construcción de edificaciones para mitigar los riesgos asociados con los elementos no estructurales durante eventos sísmicos.

Durante un evento sísmico, el suelo experimenta movimientos que se propagan en el edificio desencadenando movimientos en la estructura. Es esencial comprender cómo estos movimientos afectan de manera tanto global como local al sistema estructural. Ya que se requiere establecer la magnitud de las fuerzas de inercia que se producen durante el sismo y compararlo con la resistencia de los elementos estructurales para determinar si la estructura es capaz de resistir dichas fuerzas.

El comportamiento dinámico de un edificio durante un sismo se ve influenciado por su interacción con el suelo. La base del edificio, en principio, tiende a replicar el movimiento del suelo circundante; sin embargo, debido a la inercia inherente a la masa del edificio, este se resiste a ser desplazado completamente y sigue un patrón de movimiento donde, de manera simplificada se puede decir que, los desplazamientos laterales y aceleraciones se incrementan con la altura del edificio, siempre y cuando el edificio tenga una forma regular. Esta discrepancia en los movimientos entre la base y la masa del edificio genera tensiones y fuerzas internas que pueden comprometer la estabilidad de la edificación.

Para entender el comportamiento de un edificio ante cargas sísmicas, podemos idealizar a este mediante el concepto de oscilador de un grado de libertad. El modelo de un oscilador de un grado de libertad se compone de lo siguiente: una columna, que representa la rigidez lateral del edificio; una masa concentrada en la parte superior de la columna, que representa el peso total del edificio y un amortiguador, que representa el amortiguamiento del edificio. Una vez definido el modelo que caracteriza el comportamiento del edificio, es posible utilizar la ecuación dinámica de movimiento para calcular la respuesta sísmica del edificio.

La ecuación dinámica de movimiento (ecuación 2.1), incorpora variables como los desplazamientos (U), las masas (M), constante de amortiguamiento (C) y las rigideces (K) presentes en la estructura.

Esta ecuación dinámica de movimiento 2.1 constituye la base sobre la cual se derivan los métodos más utilizados en el diseño sísmico de edificaciones como lo son: el método de las fuerzas laterales equivalentes, también conocido como método estático; el método dinámico modal espectral y finalmente el método dinámico de tiempo-historia, estos se verán más adelante a detalle.

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = f(t) \quad \text{ecuación 2.1}$$

Donde \ddot{U} es la aceleración; \dot{U} , es la velocidad; U , es el desplazamiento; $f(t)$, es la función respecto al tiempo, el resto de las variables que componen la ecuación 3.1 ya fueron descritas en los párrafos anteriores.

Al resolver la ecuación dinámica de movimiento, es posible encontrar para cada instante de tiempo las fuerzas de inercia que se producen en la estructura. Sin embargo, la fuerza de más interés resulta ser la fuerza máxima ocurrida durante todo el intervalo de tiempo que dura el sismo. Ya que el edificio deberá poseer la suficiente resistencia para soportar dicha fuerza lateral.

La rigidez de la estructura frente a las fuerzas inerciales juega un papel crucial en cómo responde el edificio ante un sismo. Esta rigidez permite que la estructura vibre de manera diferente al suelo. Es importante destacar que las fuerzas inducidas en la estructura no están exclusivamente relacionadas con la intensidad del movimiento del suelo, sino que se debe a las propiedades físicas y forma del edificio. A la propiedad del edificio que está relacionada con la forma de vibrar de éste, se le conoce como periodo fundamental de vibrar de la estructura, T , y no es otra cosa que el tiempo, en segundos, que le toma al edificio realizar una oscilación completa.

Debido a que las propiedades como la rigidez y la masa definen el comportamiento dinámico de una estructura, un concepto fundamental en el diseño sísmico consiste la construcción del espectro de respuesta.

Espectros de respuesta: Un espectro de respuesta se representa de la siguiente forma. En un sismo, si se tienen dos edificaciones de estudio. En la primera edificación se tiene un periodo de 0.1 [s], La segunda edificación tiene un periodo de 1 [s]. Ambas edificaciones están sometidas al mismo sismo; sin embargo, al estar en distintos periodos, tendrán fuerzas máximas distintas entre sí. Aun sabiendo que están siendo afectadas por el mismo sismo.

Espectro de Diseño: Un espectro de diseño es una representación gráfica que muestra cómo las fuerzas y las deformaciones en una estructura pueden variar en función de la frecuencia y la amplitud del sismo. Estos espectros toman en cuenta varios aspectos de la respuesta sísmica de los edificios, entre ellos, incertidumbre en los periodos, efectos de sismos en distintos orígenes, amortiguamiento, distintos tipos de suelo y comportamiento inelástico.

Método estático: Este método considera la influencia de las fuerzas sísmicas mediante la implementación de un sistema de fuerzas laterales distribuidas a lo largo de la altura del edificio, como se presenta en la (ecuación 2.2). Dichas fuerzas son aplicadas en los centros de masa de cada nivel. El modelo de fuerzas adopta la forma de un triángulo invertido para representar adecuadamente la distribución de cargas en la estructura. A medida que se añaden más niveles a la edificación, se aumenta la masa y la altura, lo anterior genera que, a mayor altura, las aceleraciones son mayores en cada nivel como se presenta en la figura 9.

$$F_i = \frac{c}{Q'R} W_i h_i \frac{\sum W_i}{\sum W_i h_i} \quad \text{ecuación 2.2}$$

Donde F_i es la fuerza lateral al i -ésimo nivel; Q' , es el factor de reducción por comportamiento sísmico; R , es el factor sobre resistencia; W_i , es el peso de la i -ésima masa; h_i , es la altura de la i -ésima masa sobre el desplante.

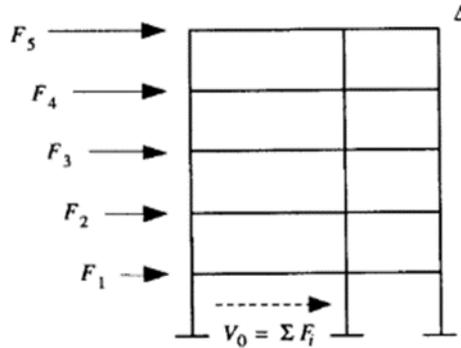


Figura 9. Incremento de aceleraciones vs alturas de nivel. Obtenido de: Diseño sísmico de edificios.

Método Dinámico Modal Espectral: Este método implica la combinación de espectros de diseño con los modos de vibración de la estructura, que se determinan a partir de la solución de las ecuaciones modales del sistema. Esta ecuación (ecuación 2.3), representa las interacciones dinámicas entre las diferentes partes de la estructura y permiten calcular las respuestas estructurales.

$$S = \sqrt{\sum S_i^2} \quad \text{ecuación 2.3}$$

Donde S , es la respuesta de la estructural expresada en términos de desplazamientos, reacciones en la base o elementos mecánicos y S_i es la respuesta modal correspondiente al i -ésimo modo natural de vibrar de la estructura.

Método dinámico de tiempo-historia: Este método representa un enfoque avanzado y detallado para capturar con mayor precisión el comportamiento no lineal de las estructuras frente a fuerzas sísmicas. En este método, la estructura es sometida a un sismo, ya sea real o sintético, que puede o no estar escalado según la magnitud y características del evento sísmico que se pretende simular.

La esencia del método radica en la resolución de la ecuación dinámica de movimiento para la estructura, la cual se lleva a cabo paso a paso a lo largo del tiempo. Para ello, se utiliza un registro acelerográfico que describe la aceleración del suelo en función del tiempo. Este registro proporciona la dinámica para simular la respuesta de la estructura en cada intervalo de tiempo durante el evento sísmico.

Una vez definido, de manera breve, como es que los sismos afectar al sistema estructural principal en una edificación; se procede a revisar como los sismos afectar a los elementos no estructurales.

2.1 Comportamiento de elementos no estructurales durante los sismos

Como se comentó en la sección pasada, el evento sísmico produce fuerzas de inercia en el edificio debido a la resistencia de este a moverse como el movimiento del suelo debido a las ondas sísmicas. Este mismo fenómeno se replica en el caso de los elementos no estructurales. Es decir, los movimientos producidos en el edificio -a su vez producidos por el sismo- inducen movimientos en los elementos no estructurales, éstos tratan de oponerse a dicho movimiento generándose así fuerzas inerciales en los elementos no estructurales. Entonces, las fuerzas inerciales en los elementos no estructurales dependerán de tres factores: La ubicación del elemento dentro del edificio, el peso y la forma del elemento no estructural (ENE).

El sistema estructural y la altura de un edificio determinan críticamente la respuesta de aceleración del piso durante un sismo. La respuesta de aceleración del piso cambia con la configuración del edificio y el sistema estructural (por ejemplo, marcos momentáneos, marcos arriostrados o marcos con paredes estructurales).

La altura juega un papel importante en el control del período natural fundamental y la forma del modo natural fundamental de los edificios. Los edificios se vuelven flexibles lateralmente a medida que aumenta su altura. Como resultado, los períodos naturales de los edificios aumentan con la altura. La participación de los modos superiores de oscilación cambia las respuestas de aceleración del piso a lo largo de la altura; esto se evidencia por una menor amplitud de la respuesta de aceleración del piso en niveles de piso intermedios en comparación con los pisos debajo y encima de ellos.

Los edificios de baja altura con períodos naturales fundamentales pequeños oscilan principalmente en su modo fundamental durante un sismo; sus modos superiores son más rígidos y participan menos en la respuesta dinámica general. Esto lleva a una amplitud cada vez mayor de la respuesta de aceleración del piso a lo largo de la altura del edificio. Aunque, estos pueden excitar modos superiores de oscilación en los edificios y causar una respuesta de aceleración del piso distintamente diferente en diferentes pisos.

2.1.1 Espectros de piso

Un concepto fundamental para el estudio del comportamiento sísmico de elementos no estructurales es el de espectro de piso. El espectro de piso se define como un gráfico que representa la máxima aceleración experimentada por los elementos no estructurales en función de su periodo natural. Este espectro se genera a partir de un historial de tiempo de aceleración específico de un piso, considerando un valor determinado de amortiguamiento.

Es posible obtener el espectro de piso para una variedad de elementos no estructurales con diferentes periodos naturales, siempre y cuando estén sujetos al mismo amortiguamiento y estén adecuadamente anclados al piso en cuestión. Esto implica someter los elementos no estructurales al mismo historial de aceleración asociado con ese piso. Esta metodología elimina la necesidad de realizar análisis dinámicos individuales para cada ENE, lo que simplifica el proceso de evaluación de la respuesta sísmica de la estructura.

Existen dos casos.

1. Si el contenido es rígido, la aceleración será igual a la aceleración del piso. Este comportamiento se debe, a que trabaja de forma muy similar al elemento estructural.
2. Si el contenido es flexible, la aceleración es diferente a la del piso. Esto provocará una amplificación y se tiende al daño del contenido.

Adicional a esto, estas aceleraciones varían por el periodo del sismo, la altura del contenido, el peso del contenido forma y tendrán fuerzas distintas, dependiendo de la rigidez del contenido.

2.1.2 Contenidos anclados y no anclados

1. Los elementos anclados: Estos elementos no estructurales están ligados por remaches o soldaduras (verticales y/o horizontales), las cuales se encargan de unificar este elemento no estructural a un elemento estructural como uno mismo. Como se presenta en la figura 10 y 11.
2. Los elementos no anclados: Estos elementos no estructurales están simplemente apoyados en un elemento estructural. Como se presenta en la figura 11.

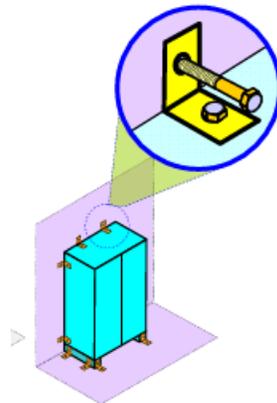


Figura 10. Elementos no estructurales anclados. Obtenido de: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpajpcglclefindmkaj/https://www.iitk.ac.in/nicee/IITK-GSDMA/NSE_002_31May2013.pdf](https://www.iitk.ac.in/nicee/IITK-GSDMA/NSE_002_31May2013.pdf)

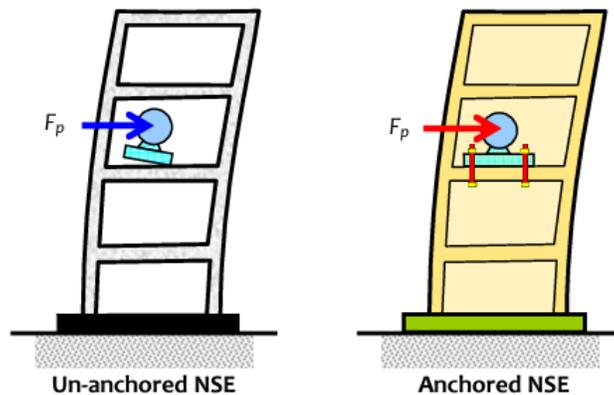


Figura 11. Diferencia entre elementos no estructurales anclados y no anclados. Obtenido de: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpajpcglclefindmkaj/https://www.iitk.ac.in/nicee/IITK-GSDMA/NSE_002_31May2013.pdf](https://www.iitk.ac.in/nicee/IITK-GSDMA/NSE_002_31May2013.pdf)

La decisión de anclar o no anclar elementos no estructurales depende de cada contenido específico y del análisis del espectro de piso correspondiente. Este análisis se basa en la respuesta dinámica de los elementos y su factor de amplificación asociado.

Para elementos esbeltos y altos, se recomienda el anclaje debido a su susceptibilidad al volteo, causado por su centro de masas distante del suelo y su alto momento. Sin embargo, el anclaje puede perjudicar al elemento si altera su período, llevándolo a una resonancia con el período del piso, lo cual sería perjudicial y se recomendaría no anclarlo en este caso, o realizar un estudio más detallado de este contenido.

La decisión entre anclar o no anclar elementos no estructurales depende, por lo tanto, de un análisis detallado de cada elemento y del período del tipo de suelo para evitar la resonancia y el posible colapso del contenido. Es esencial realizar este análisis individualizado y se recomienda para edificaciones donde se necesite operabilidad de 24h, para garantizar la seguridad de los elementos no estructurales.

2.2 Evolución de las Normas Técnicas Complementarias a través de los sismos de la CDMX

Los Reglamentos de Construcción del Distrito Federal (RCDF) y las Normas Técnicas Complementarias (NTC) abordan aspectos específicos relacionados con la ingeniería estructural, como cargas, resistencia de materiales, análisis sísmico, consideraciones urbanísticas, de seguridad contra incendios, entre otros aspectos vinculados al desarrollo de edificaciones.

La importancia de estos documentos radica en su capacidad para establecer un marco normativo que salvaguarde la vida y bienestar de los ocupantes, así como la preservación de la infraestructura construida en la Ciudad de México. Al establecer requisitos claros y exigentes, se fomenta la creación de entornos construidos más seguros y resilientes ante situaciones adversas.

A lo largo del tiempo, los RCDF y las (NTC) de la Ciudad de México han experimentado cambios significativos en respuesta a avances en la ingeniería, conocimientos sísmicos, en este caso observaremos la evolución con respecto a los elementos no estructurales. En particular, el RCDF de 1987, es una pieza fundamental en el desarrollo urbano de la Ciudad de México que ha sido objeto de diversas actualizaciones y que han marcado la evolución de las prácticas constructivas.

Conforme a la investigación llevada a cabo por RCDF y NTC a lo largo del tiempo, se han identificado una serie de reglamentos anteriores al año 1987 que han influido en la normativa actual. Entre estos, destacan los reglamentos correspondientes a los años 1921, 1942, 1957, 1966 y 1976. Sin embargo, es a partir del RCDF de 2004 que se observa un cambio significativo en el tratamiento de los elementos no estructurales dentro de la normativa. Antes de esta fecha, en ninguno de los apartados de los reglamentos existentes se hace mención específica a los elementos no estructurales, es por ello por lo que partimos del RCDF de 1987, haciendo la diferencia entre este reglamento que no se habla sobre elementos estructurales con respecto a los siguientes.

Por consiguiente, este capítulo se centra en el estudio de la evolución de los reglamentos RCDF y las NTC en lo que respecta a los elementos no estructurales, comenzando a partir del RCDF de 1987 como punto de partida para dicho estudio comparativo.

2.2.1 Reglamento de construcción del Distrito Federal 1987

Este reglamento de 1987 aborda diversas disciplinas del diseño estructural, incluyendo aspectos sísmicos, resistencia al viento, cimentaciones, estructuras de concreto, estructuras de madera, resistencia al fuego, estructuras metálicas y prevención contra incendios. Específicamente, nos enfocaremos en el capítulo dedicado al diseño y construcción de estructuras de mampostería y sismo, ya que nuestro interés se centra en comprender la evolución de los daños en los muros no estructurales.

Es notable señalar que, en el RCDF de 1987 y la NTC de 1987, no se encontraba ningún encabezado que abordara el comportamiento ni el diseño de elementos no estructurales. Este hecho refleja una limitación en la atención a aspectos cruciales relacionados con la integridad y funcionalidad de las edificaciones que van más allá de la estructura principal.

2.2.2 Reglamento de construcción del Distrito Federal 2004

En el marco del desarrollo normativo y la evolución de los reglamentos de construcción del Distrito Federal (RCDF), se observa un progreso en la consideración y tratamiento de los elementos no estructurales (ENE) de las edificaciones. Específicamente, en el RCDF del año 2004 se introduce una importante incorporación en las (NTC) relacionadas con el diseño sísmico, tomando en cuenta en un capítulo sobre los muros divisorios, fachadas y colindancias, que son elementos característicos de los ENE.

El RCDF del 2004 en las NTC por sismo de 2004, en el capítulo “2.2.2 Muros que contribuyan a resistir fuerzas laterales” establece directrices específicas para la sujeción y diseño de estos muros divisorios, fachadas y elementos de colindancia en relación con la estructura principal de la edificación. Se señala que, cuando estos muros no contribuyan a la resistencia ante fuerzas laterales, deben estar conectados a la estructura de tal manera que no restrinjan su deformación en el plano del muro, pero al mismo tiempo se prevenga su volteo en dirección normal a su plano. Además, se recomienda que estos muros sean preferentemente construidos con materiales flexibles.

Este enfoque refleja una comprensión más completa de la interacción entre elementos estructurales y no estructurales en el comportamiento sísmico de las edificaciones. Al evitar la conexión rígida de los muros divisorios con las dalas y castillos, se busca preservar el comportamiento diseñado de la estructura principal haciéndola flexible en estos ENE y reducir posibles conflictos que podrían surgir al alterar su respuesta ante cargas sísmicas.

La inclusión de estas disposiciones en el RCDF del 2004 marca un hito en la consideración de los ENE en la normativa de construcción del Distrito Federal. Comparativamente, con el RCDF de 1987, donde no se hacía mención alguna sobre elementos no estructurales, se evidencia un avance hacia una regulación más completa y precisa en las edificaciones.

2.2.3 Normas Técnicas Complementarias 2017/2020

La NTC de 2017 aborda a los elementos no estructurales en el contexto del diseño y construcción, específicamente esto se encuentra en las NTC de mampostería y sismo. A diferencia de normativas anteriores, esta versión no solo aborda la presencia de elementos no estructurales, sino que profundiza en los requisitos de diseño y especificaciones de construcción que deben seguirse para garantizar que estos elementos no interfieran con las rigideces laterales del comportamiento de los elementos estructurales, en este caso los marcos.

La NTC de 2017 define a los elementos no estructurales de la siguiente forma. “Los elementos no estructurales, son aquellos que se construyen entre vigas y columnas de un marco estructural y no proporcionan rigidez ni resistencia ante cargas laterales”. Estos elementos pueden incluir muros divisorios, pretilas, bardas, entre otros, cuya contribución a la resistencia y rigidez lateral es insignificante. En este sentido, se establecen una serie de requisitos para garantizar su adecuado desempeño:

- a) Deben diseñarse y construirse de manera que no entren en contacto con el marco para las máximas distorsiones de entrepiso calculadas.
- b) El espesor de la mampostería no debe ser menor a 100 mm.
- c) Se debe verificar su capacidad para resistir fuerzas laterales en dirección perpendicular a su plano.

A continuación, se representa de forma simplificada los puntos anteriores en la figura 12 se habla sobre el desligamiento horizontal y en la figura 13 se observa el espacio entre muro no estructural y un elemento estructural.

$$\delta_h = \gamma_{li} * H \quad \text{ecuación 2.4}$$

Donde δ_h , es la holgura horizontal de los muros no estructurales; γ_{li} , es la distorsión lateral inelástica; H , es la altura del muro.

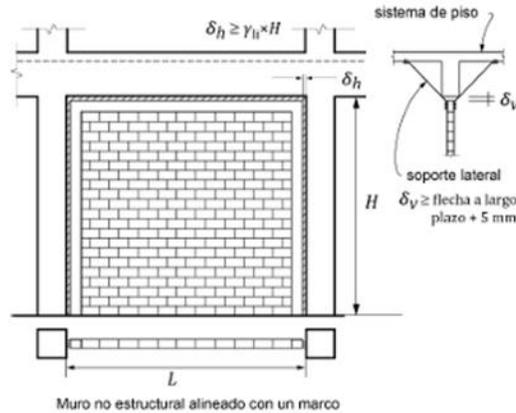


Figura 12. Desligamiento entre muro no estructural y marco. Obtenido de: NTC mampostería. Capítulo 7. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefndmkaj/https://smie.com.mx/smie-2022/archivos/informacion-tecnica/normas-tecnicas-complementarias/normas-tecnicas-co

Donde δ_v , es la flecha a largo plazo + 5mm; δ_v , es la holgura vertical de muros no estructurales.

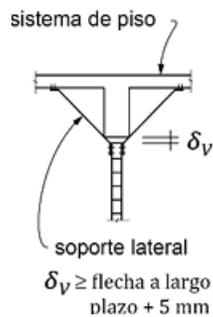


Figura 13. Holgura vertical entre muro no estructural y losa. Obtenido de NTC mampostería de 2017.

Asimismo, se establecen requisitos específicos para la holgura lateral y vertical entre los muros no estructurales y los elementos estructurales adyacentes, con el fin de evitar interferencias y permitir sus respectivos movimientos de cada elemento durante un evento sísmico. Se recomienda el uso de materiales ligeros que minimicen su rigidez y resistencia en el plano.

El capítulo 2 de la Norma Técnica de Construcción (NTC) de sismo de 2017 de la Ciudad de México (CDMX) nos enfocaremos en las fórmulas y se explicará cada una de ellas sobre los diafragmas de piso, como parte integral de las edificaciones, ya que; desempeñan un papel fundamental en la distribución y transmisión de las fuerzas sísmicas a lo largo de la estructura, garantizando su estabilidad y resistencia ante sismos.

- 1) Se debe de calcular una aceleración absoluta, a_n , (ecuación 2.5) en el centro de la masa de la edificación. Este se encuentra en el último nivel de la edificación.

$$a_n = \sqrt{\left(\frac{1.6a_1}{Q'}\right)^2 + n_a a_0^2} \quad \text{ecuación 2.5}$$

Donde a_n es la máxima aceleración absoluta como fracción de la aceleración de la gravedad del centro de masa del nivel n , correspondiente al extremo superior del edificio; a_1 , es la aceleración como fracción de la aceleración de la gravedad del centro de masa del nivel 1; Q' , es el factor de reducción por comportamiento sísmico; a_0^2 la aceleración máxima del terreno.

- 2) Para obtener n_a se utiliza la siguiente expresión (ecuación 2.6).

$$n_a = 1.4\sqrt{n-1} \leq 5 \quad \text{ecuación 2.6}$$

Donde n_a es el parámetro para estimar a_n ; n es el número de pisos.

El factor de amplificación ajusta la aceleración en los pisos por debajo del último piso, de tal manera que se obtiene una distribución de aceleraciones que se incrementa en la misma proporción que el número de niveles.

Para calcular el factor de amplificación en una edificación a través de la (ecuación 2.7), es necesario establecer una relación entre las aceleraciones registradas en dos niveles diferentes de la estructura. Esta relación nos permite entender cómo varía la amplitud de las ondas sísmicas a medida que se propagan a través del edificio.

- 3) Para obtener el factor de amplificación Ω_i .

$$\Omega_i = \left(\frac{h_i}{h_n}\right) \left(\frac{a_n}{a_0} - 1\right) + 1 \quad \text{ecuación 2.7}$$

Donde Ω_i , es un factor de amplificación; h_i y h_n , son las alturas del i -ésimo nivel y del nivel n sobre el desplante; a_n , es la máxima aceleración absoluta como fracción de la aceleración de la gravedad del centro de masa del nivel n , correspondiente al extremo superior del edificio; a_0 , es la ordenada en el origen del espectro de diseño.

La aceleración de piso no es constante en todo el edificio, sino que varía con la altura. En general, la aceleración tiende a aumentar a medida que se asciende en la altura del edificio, tal como lo propone la ecuación 2.8. Sin embargo, en la realidad, este incremento puede no ser lineal y puede variar dependiendo de las características específicas del edificio y del suelo, llegando inclusive a presentarse aceleraciones menores en los pisos superiores con respecto a los primeros niveles de la edificación. Lo anterior ha sido corroborado mediante la instrumentación de edificios construidos, así como en pruebas de especímenes experimentales.

- 4) Aceleración de piso a_i . (Ecuación 2.8).

$$a_i = \sqrt{a_{ix}^2 + a_{iy}^2} \quad \text{ecuación 2.8}$$

Donde a_i , es la aceleración absoluta como fracción de la aceleración de la gravedad para un punto de interés ubicado en el i -ésimo piso; a_{ix}^2 y a_{iy}^2 , (ecuación 2.9 y 2.10) son, respectivamente, las aceleraciones absolutas como fracción de la aceleración de la gravedad en el punto de interés en las direcciones ortogonales X y Y.

$$a_{ix} = \sqrt{\sum_k \left(\frac{a_{ikx}}{Q'}\right)^2 + \sum_j a_{ijx}^2} \quad \text{ecuación 2.9}$$

$$a_{iy} = \sqrt{\sum_k \left(\frac{a_{iky}}{Q'}\right)^2 + \sum_j a_{ijy}^2} \quad \text{ecuación 2.10}$$

Donde a_{ix}^2 y a_{iy}^2 , son, respectivamente, las aceleraciones absolutas como fracción de la aceleración de la gravedad en el punto de interés en las direcciones ortogonales X y Y; a_{ix} y a_{iy} , son, respectivamente, las aceleraciones absolutas como fracción de la aceleración de la gravedad del punto de interés ubicado en el i -ésimo piso en las direcciones ortogonales X y Y, producidas por el j -ésimo modo de vibrar; Q' , es el factor de reducción por comportamiento sísmico.

En las ecuaciones 2.9 y 2.10, el primer sumando dentro del signo de raíz cuadrada incluye las aceleraciones máximas correspondientes a los tres modos fundamentales de vibrar del modelo tridimensional de análisis, y el segundo incluye todos los demás modos requeridos para que el análisis dinámico modal incluya el efecto de los modos naturales que, ordenados según valores decrecientes de sus periodos, sean necesarios para que la suma de los pesos efectivos en cada dirección de análisis sea mayor o igual a 90 por ciento del peso total de la estructura.

Una vez que se han considerado todos los factores pertinentes para el análisis sísmico de un edificio, es posible calcular la fuerza sísmica en el nivel deseado o determinar la fuerza sísmica máxima que actúa sobre la estructura. Este cálculo es esencial para dimensionar adecuadamente los elementos estructurales y diseñar sistemas de refuerzo que garanticen la seguridad y la estabilidad del edificio durante un sismo.

Para calcular la fuerza en contenidos y elementos no estructurales, (ecuación 2.11), se utiliza el método de la fuerza en el plano. Este método considera la distribución de la masa y la rigidez en la estructura y utiliza la aceleración sísmica del suelo y la respuesta dinámica del edificio para determinar la fuerza sísmica que actúa en cada nivel.

$$F_{di} = \frac{a_i}{R_s} W_{di} \geq 0.5 a_o W_{di} \quad \text{ecuación 2.11}$$

Donde F_{di} , es la fuerza de diseño en el plano para el diafragma rígido del i -ésimo piso; W_{di} , es el peso tributario correspondiente al diafragma del i -ésimo piso, incluyendo el peso de los diafragmas, y las cargas muertas y vivas que actúen sobre ellos de acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones; a_i , es la aceleración absoluta como fracción de la aceleración de la gravedad para un punto de interés ubicado en el i -ésimo piso; R_s , es un factor de reducción por sobre-resistencia para las fuerzas de diseño de los diafragmas, el cual varía por la siguiente tabla 1.

Tabla 1. Factor de reducción de las fuerzas de diseño de diafragmas, R_s . Obtenido de NTC Sismo, 2017.

Tipo de diafragma	Controlado por corte (a)	Controlado por corte (b)
Losas macizas de concreto coladas en sitio	1.5	2.0
Sistemas de piso con capa de compresión, diafragmas compuestos	1.0	1.0

El factor de amplificación puede obtenerse con la ecuación 2.12.

$$\gamma_a = \frac{1 + 4r_I\beta_c}{(1 + 0.5r_I^{3.5})Q_c} \quad \text{ecuación 2.12}$$

Donde; γ_a , es un factor de amplificación dinámica que toma en cuenta la relación entre el periodo natural del elemento en cuestión y el periodo dominante de la respuesta dinámica del piso en que se apoya; Q_c , es un factor que toma en cuenta su capacidad de comportamiento dúctil; r_I , es el cociente del periodo natural del contenido entre el periodo dominante de la respuesta dinámica del piso; β_c , es un factor por amortiguamiento para el contenido de la ecuación 2.13.

$$\beta_c = \left(\frac{0.05}{\zeta_c}\right)^{0.45} \quad \text{ecuación 2.13}$$

Donde β_c , es un factor de amortiguamiento para el contenido; ζ_c , es la fracción de amortiguamiento crítico del contenido, cuyo valor debe ser menor o igual que 0.05.

El factor Q_c se obtendrá de la tabla 2.

Tabla 2. Factor Q_c de modificación de la respuesta de contenidos. Obtenido de NTC Sismo 2017.

Componente	Q_c
-Rígido sin anclaje	1.0
-Rígido o flexible, anclado, de acuerdo al nivel de ductilidad de elementos y anclajes	
a) Baja	1.5
b) Limitada a alta	2.5

Seguridad contra deslizamiento y contra volteo.

Para garantizar la seguridad contra el deslizamiento y el volteo de contenidos rígidos simplemente apoyados, es fundamental realizar evaluaciones independientes. Estas evaluaciones deben llevarse a cabo en al menos dos direcciones horizontales ortogonales, sin considerar los efectos bidireccionales.

Para verificar la seguridad de los contenidos rígidos, se deben cumplir las siguientes condiciones:

1. Deslizamiento.

$$\mu_s > a_i \quad \text{ecuación 2.14}$$

Donde μ_s , es el coeficiente de fricción estático entre los materiales de la base del contenido y la superficie de apoyo; a_i , es la aceleración absoluta como fracción de la aceleración de la gravedad para un punto de interés ubicado en el i-ésimo piso,

2. Volteo.

$$b_{me} > h_{cm}a_i \quad \text{ecuación 2.15}$$

Donde b_{me} , es la menor distancia, en la dirección horizontal considerada, entre la vertical que pasa por el centro de masa del contenido hasta el borde de su zona de apoyo; a_i , es la aceleración absoluta como fracción de la aceleración de la gravedad para un punto de interés ubicado en el i-ésimo piso; h_{cm} , es la altura del centro de masa del contenido, medida desde la superficie de apoyo.

2.2.4 Normas Técnicas Complementarias 2023

En la NTC de 2023, se han realizado algunas modificaciones significativas con respecto a la edición previa de 2017.

Una de las actualizaciones notables en las NTC Sismo de 2023 es la inclusión de una nueva fila en la tabla de Factor de Modificación de las Fuerzas de Diseño de Diafragmas de Piso, representada por el símbolo "Rs". Esta adición refleja un refinamiento en el cálculo y diseño de los diafragmas de piso, lo que contribuye a una mayor precisión en la evaluación de la respuesta sísmica de las estructuras.

Además, como parte de las modificaciones, se han incorporado dos nuevos apartados en las NTC Sismo de 2023. Estos apartados están diseñados para abordar de manera específica las consideraciones relacionadas con los contenidos y elementos presentes en las estructuras, clasificados en dos categorías: rígidos y flexibles.

Nos enfocaremos en el capítulo 8, de La NTC de sismo de 2023 de la Ciudad de México (CDMX). Sobre todo, veremos las actualizaciones en las fórmulas y se explicará cada una de ellas sobre los diafragmas de piso, como parte integral de las edificaciones, ya que; desempeñan un papel fundamental en la distribución y transmisión de las fuerzas sísmicas a lo largo de la estructura, garantizando su estabilidad y resistencia ante sismos.

Tabla 3. Factor de modificación de las fuerzas de diseño de diafragmas de piso Rs'. Obtenido de NTC Sismo 2023.

Tipo de diafragma	Controlado por corte (1)	Controlado por corte (2)
Losas macizas de concreto coladas en sitio	1.5	2.0
Sistemas de piso con capa de compresión, diafragmas compuestos	1.0	1.0
Sistema de piso prefabricados sin capa de compresión	0.5	0.5

Contenidos y elementos rígidos simplemente apoyados.

Para garantizar la seguridad contra el deslizamiento y el volteo de contenidos rígidos simplemente apoyados, es fundamental realizar evaluaciones independientes. Estas evaluaciones deben llevarse a cabo en al menos dos direcciones horizontales ortogonales, sin considerar los efectos bidireccionales.

Para verificar la seguridad de los contenidos rígidos, se deben cumplir las siguientes condiciones:

3. Deslizamiento.

$$\mu_s > a_i \quad \text{ecuación 2.16}$$

Donde μ_s , es el coeficiente de fricción estático entre los materiales de la base del contenido y la superficie de apoyo; a_i , es la aceleración absoluta como fracción de la aceleración de la gravedad para un punto de interés ubicado en el i-ésimo piso,

4. Volteo.

$$b_{me} > h_{cm} a_i \quad \text{ecuación 2.17}$$

Donde b_{me} , es la menor distancia, en la dirección horizontal considerada, entre la vertical que pasa por el centro de masa del contenido hasta el borde de su zona de apoyo; a_i , es la aceleración absoluta como fracción de la aceleración de la gravedad para un punto de interés ubicado en el i-ésimo piso; h_{cm} , es la altura del centro de masa del contenido, medida desde la superficie de apoyo.

Contenidos y elementos flexibles.

Para garantizar y revisar la seguridad de contenidos o elementos no estructurales flexibles. Estas evaluaciones deben llevarse a cabo; ya que se estimará la fuerza sísmica que actúa en los contenidos.

$$F_c = a_i \Omega_a W_c \quad \text{ecuación 2.18}$$

Donde F_c , es la fuerza sísmica que actúa en los contenidos; Ω_a , es un factor de amplificación dinámica que toma en cuenta la relación entre el periodo natural del elemento en cuestión y el periodo dominante de la respuesta dinámica del piso en que se apoya; W_c , es el peso del contenido o elemento no estructural.

Nota: Ω_a es aplicable contenidos como Apéndices (parapetos, pretilas, anuncios, plafones) y elementos no estructurales (equipos, instalaciones, ornamentos, ventanales, muros desligados, revestimientos, plafones, fachadas).

$$\Omega_a = \left(\frac{1}{Q'_c} \right) \left(1 + \frac{5r_l \beta_c}{1 + 0.2r_l^6} \right) \quad \text{ecuación 2.19}$$

Donde; Ω_a , es un factor de amplificación dinámica que toma en cuenta la relación entre el periodo natural del elemento en cuestión y el periodo dominante de la respuesta dinámica del piso en que se apoya; Q'_c , es un factor que toma en cuenta su capacidad de comportamiento dúctil; r_l , es el cociente entre el periodo natural del contenido o elemento no estructural, que de ser necesario deberá obtenerse por métodos experimentales o solicitarse a los fabricantes; β_c , es un factor reductor por amortiguamiento para el contenido que debe estimarse.

$$\beta_c = \left(\frac{0.05}{\zeta_c}\right)^{0.45} \quad \text{ecuación 2.20}$$

Donde β_c , es un factor reductivo por amortiguamiento para el contenido; ζ_c , es la fracción de amortiguamiento crítico del contenido, cuyo valor debe ser menor o igual que 0.05.

$$Q'_c = 1 + \frac{3(Q_c - 1)r_I}{1 + 3r_I} + 2(Q_c - 1)e^{-4(r_I)^2} \quad \text{ecuación 2.21}$$

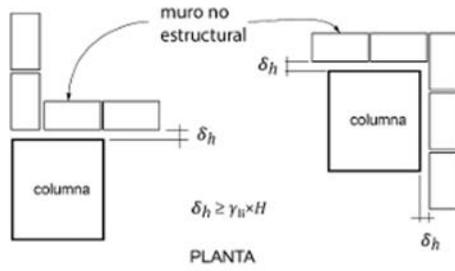
Donde; Q'_c , es un factor que toma en cuenta su capacidad de comportamiento dúctil; r_I , es el cociente entre el periodo natural del contenido o elemento no estructural, que de ser necesario deberá obtenerse por métodos experimentales o solicitarse a los fabricantes; Q_c , es un factor que modifica la respuesta de los contenidos y se obtiene de la tabla 4.

Tabla 4. Factor Q_c de modificación de la respuesta de contenidos. Obtenido de NTC Sismo 2023.

Componente	Q_c
-Rígido sin anclaje	1.0
-Rígido o flexible, anclado, de acuerdo al nivel de ductilidad de elementos y anclajes	
a) Baja	1.5
b) Limitada a alta	0.5

Por otro lado, esta versión de la NTC de mampostería de 2023 del capítulo 8 aborda de manera más detallada la práctica de utilizar muros no estructurales como fachada de los marcos, así como se presenta en la Figura 14. Este enfoque implica la instalación de muros que actúan como revestimiento o protección de las columnas estructurales, sin formar parte integral de la carga resistente del sistema. Este método se presenta como otra alternativa para que los elementos no estructurales no interfieran con el comportamiento de los elementos estructurales durante eventos sísmicos u otras cargas externas.

Cabe resaltar, que la construcción de muros fuera del plano es una alternativa que se viene aplicando con algunos años de antigüedad, como se menciona por Meli y Bazán (1985). Sin embargo, la inclusión de estas disposiciones más detalladas en la NTC de 2023 refleja una alternativa de diseño adicional en la consideración de la interacción entre elementos estructurales y no estructurales en el diseño y construcción de edificaciones. Al permitir que los muros no estructurales se ubiquen fuera del plano principal de la estructura, se reduce la posibilidad de interferencia con el desempeño de los elementos estructurales, así facilitando el diseño, construcción y estabilidad del sistema en su conjunto.



Muros no estructurales fuera del plano del marco

Figura 14. Ejemplo de muro fuera del plano de un marco. Obtenido de: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.smie.org.mx/uploads/1/2022-11/normas_tecnicas_complementarias_diseno_construccion_estructuras_mamposteria_19_octubre_2020.pdf](https://www.smie.org.mx/uploads/1/2022-11/normas_tecnicas_complementarias_diseno_construccion_estructuras_mamposteria_19_octubre_2020.pdf)

3. Casos de daños no estructurales en sismos recientes en el mundo

3. Casos de daños no estructurales en sismos recientes en el mundo

El conocimiento detallado de los Reglamentos de construcción para el Distrito Federal y las (NTC) proporciona una base sólida para entender los procesos constructivos necesarios para un desarrollo adecuado de los ENE. Estos procesos se fundamentan en garantizar la seguridad y estabilidad de las edificaciones.

Sin embargo, es crucial reconocer la importancia de analizar los comportamientos de los ENE en eventos sísmicos ocurridos en otras partes del mundo. Esta comparación permite evaluar si los problemas experimentados son similares o diferentes a los observados en la Ciudad de México, lo que brinda una perspectiva más amplia y enriquecedora para el análisis y la mejora continua de las prácticas constructivas.

A continuación, nos centraremos en el estudio de dos sismos ocurridos en diferentes regiones del mundo.

1. Sismo de Canterbury
2. Sismo de Italia

Donde se han reportado daños significativos en los ENE. Este análisis nos permitirá identificar patrones comunes, diferencias y posibles áreas de mejora en la construcción y el diseño de los ENE, incluyendo elementos como muros no estructurales en el plano o fuera del plano.

3.1 Sismo Canterbury 04/09/2010

Durante el sismo de Canterbury (4 de septiembre de 2010), se observaron significativos daños en muros no estructurales, revelando la vulnerabilidad de ciertos tipos de edificaciones ante eventos sísmicos. Uno de los casos más notables fue el impacto severo registrado en la calle St. Elmo. En la figura 15. Se aprecia una edificación de concreto reforzado con muros no estructurales de mampostería de la década de 1930. Esta edificación, tuvo fallas tensión diagonal, en los muros, entre las ventanas, con grietas extendiéndose a lo largo de su altura completa. Es crucial señalar que, en estructuras antiguas, los muros no estructurales, pueden ser considerado como un componente estructural significativo.

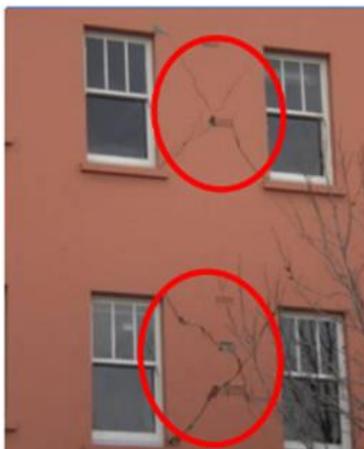


Figura 15. Edificación de concreto reforzado. Obtenido de: *DAMAGE TO NON-STRUCTURAL COMPONENTS AND CONTENTS IN 2010 DARFIELD EARTHQUAKE*

El daño en las fachadas también fue evidente, principalmente en edificios con revestimientos de mampostería que se desprendieron debido a conexiones deficientes con la estructura principal. En particular, se detectaron problemas en muros divisorios y revestimientos internos, donde era común observar grietas que se originaban en las esquinas de puertas y ventanas. Este fenómeno se atribuye a la ausencia de castillos y dadas en las áreas adyacentes a puertas y ventanas, destacando la importancia de una planificación estructural adecuada para mitigar los daños no estructurales.

En la madrugada del 8 de septiembre, una réplica sísmica de magnitud 5.1 sacudió la región de Lyttleton, situada a menos de 10 km de Christchurch, generando daños adicionales a los componentes no estructurales de las edificaciones afectadas. Esta réplica provocó la aparición de nuevas grietas en paredes y revestimientos internos, exacerbando la vulnerabilidad de estos elementos ante eventos sísmicos secundarios. Además, las grietas preexistentes se ampliaron y extendieron durante las réplicas, evidenciando la fragilidad persistente de los componentes no estructurales frente a la actividad sísmica recurrente. Este fenómeno subraya la importancia de implementar medidas de fortalecimiento y diseño adecuado para mitigar los efectos adversos de los sismos en las estructuras no primarias de los edificios.

Este análisis de los daños observados en el sismo de Canterbury resalta la necesidad de considerar detalladamente la resistencia y conexión de los muros no estructurales en el diseño y construcción de edificaciones.

3.2 Sismo Italia 24/08/2016

Durante el sismo de Italia (24 de agosto de 2016). Se observó daño no estructural en edificios industriales. Esto causó la interrupción de la producción y el cierre de actividades durante varios días, generando un impacto en la economía. Se observó que muchos hospitales que no tenían daño estructural presentaban daño en los muros no estructurales, lo que causó su inoperabilidad. Con esto, se señala la importancia que tienen los elementos no estructurales.

Se observaron diferentes tipos de daños no estructurales en los muros. Los muros no estructurales de Italia suelen estar hechos principalmente de mampostería. En las configuraciones de dos capas o doble cara, como se observa en la figura 16, generalmente las dos capas no estaban conectadas entre sí. A menudo se observó que la capa externa, en las configuraciones de dos capas, se coloca parcialmente fuera de los marcos. En la figura 17 se observaron fallas por tensión diagonal de los muros no estructurales, esto por la aceleración del piso, especialmente si se conectan sistemas secundarios pesados, como paneles de revestimiento aumentando las fuerzas de inercia.



Figura 16. Muro de dos capas o doble cara. Obtenido de:
<https://mail.google.com/mail/u/0/?tab=rm&ogbl#search/EEspinosaC%40ingen.unam.mx/KtbxLwGzcRHRzcfraqsgXBMSWVvglwXTnQB?projector=1&messagePartId=0.2>



Figura 17. Falla fuera del plano. Obtenido de: *Seismic performance of non-structural elements during the 2016. Central Italy earthquake*

La vulnerabilidad de los muros no estructurales se atribuyó principalmente al hecho de que la mayoría de los edificios en las zonas afectadas fueron concebidos y erigidos antes de la década de 1970, época en la que aún no se habían implementado plenamente las disposiciones de diseño modernas. Como resultado, numerosas edificaciones inspeccionadas mostraron signos de desplazamiento lateral excesivo, revelando una deficiencia en su rigidez lateral que comprometía su resistencia ante eventos sísmicos.

En algunos casos, se presentó la falla fuera del plano en los muros no estructurales. En la figura 18 se presenta esta falla y está relacionada con el desplazamiento de entre pisos y las aceleraciones fuera del plano que causaron la desconexión hacia afuera los muros no estructurales con respecto a los marcos.



Figura 18. Falla fuera del plano Obtenido de: Seismic performance of non-structural elements during the 2016. Central Italy earthquake

Las fallas fuera del plano presentaron desprendimiento de la fachada de los muros no estructurales. Esta falla, se debe a la combinación de aceleraciones en el plano y fuera del plano. Este es el resultado de malas conexiones de los muros no estructurales. El desprendimiento de estos muros es porque no están diseñados para uso estructural y no tiene refuerzo para proporcionar resistencia alguna. Este tipo de daño no estructural representa una amenaza para la vida debido a la posible caída o desprendimiento de acabados no estructurales sobre personas.

4. Estudio de base de datos de los daños en CDMX debidos al sismo del 19 de septiembre de 2017 y selección de zona de estudio

4. Estudio de base de datos de los daños en CDMX debidos al sismo del 19 de septiembre de 2017 y selección de zona de estudio

Introducción.

En el capítulo 3 se habló sobre que el daño de elementos estructurales se refiere a aquellas deformaciones, fracturas o colapsos que afectan directamente a los componentes esenciales que conforman el esqueleto resistente de una edificación. Por otro lado, en el capítulo 2 se habló sobre los elementos no estructurales, los cuales no aportan resistencia y rigidez a la edificación. En este capítulo se hablará sobre los daños en muros no estructurales causados por el sismo del 19 de septiembre a las edificaciones en la CDMX y como estos daños pueden influir en el desempeño sísmico.

De manera tradicional, el enfoque de la ingeniería estructural consideraba a los elementos no estructurales como elementos secundarios o de menor importancia en relación con los elementos estructurales. De acuerdo con lo presentado en el capítulo 3, en la CDMX no fue hasta las NTC publicadas en 2004 que la reglamentación presentó pautas para el diseño sísmico de elementos no estructurales y contenidos. La tendencia a mejorar las prácticas del diseño sísmico de elementos no estructurales ha continuado en las normas publicadas en 2017/2020 y 2023 como también se discutió en el capítulo 3.

A su vez, distintos autores como Rodríguez *et al* (2019) y Pérez Gavilán, J. (2023). mencionan que hubo muchos daños en muros no estructurales durante en el sismo del 19 de septiembre de 2017. A pesar de esto, de acuerdo con la revisión bibliográfica desarrollada en este trabajo, no existe hasta ahora un estudio detallado de los tipos de daños en muros no estructurales a causa del sismo de la CDMX del 19 de septiembre de 2017. Con este capítulo se plantea contribuir con dicho estudio para el caso de la delegación Benito Juárez.

En vista de lo acontecido en sismos reciente en diferentes partes de mundo, de acuerdo con lo discutido en el capítulo 3, surge la preocupación de que la operabilidad de las edificaciones que enfrenten futuros eventos sísmicos podría estar comprometida debido a la falta de atención y consideración de los daños en elementos no estructurales. La hipótesis planteada sugiere que, en el contexto de la seguridad sísmica, es esencial un enfoque integral que no solo tenga en cuenta los aspectos estructurales, sino que también valore y aborde de manera adecuada el control de los daños en elementos no estructurales.

El objetivo de este capítulo es llevar a cabo un análisis de la base de datos de daños derivados del sismo del 19 de septiembre de 2017. En específico, se pretende enfocar la atención en los daños sufridos por los muros no estructurales de diversas edificaciones afectadas por el sismo. Los objetivos de este capítulo se pueden dividir en dos:

1) Definir las características globales de los edificios cuyos muros no estructurales presentaron algún tipo de daño. Las características globales de las que aquí se hace referencia, son, por ejemplo: el número de niveles, el sistema estructural, el año de construcción y las patologías estructurales como la planta baja débil, el efecto de esquina, etc.

2) Definir los tipos de fallas observadas en los muros no estructurales, definidas en el capítulo 2. Es decir, falla por tensión diagonal y falla fuera del plano. Para lograr este objetivo, se llevará a cabo una revisión de la base de datos, así como inspecciones en gabinete utilizando las herramientas

de Google Earth y Street View.

El presente capítulo se centra en un análisis basado en datos reales provenientes de la base de datos de los daños observados durante el sismo del 19 de septiembre de 2017 en CDMX que se ha venido elaborando en el Instituto de Ingeniería de la UNAM desde 2018. Se llevó a cabo un análisis de la base de datos que contiene 13,844 edificaciones. Sin embargo, el estudio de daños en muros no estructurales se focalizó en la delegación Benito Juárez, donde se encontraban 609 con daño estructural y no estructural de las edificaciones. De estas, 270 presentaban daños no estructurales, mientras que 339 presentaban daños estructurales y algunos colapsos (Figura 19).

Mapa de daños en edificaciones
de la delegación Benito Juárez

SIMBOLOGÍA	
	DAÑO EN ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES
	TRAZO DE CALLES
	DAÑO EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES

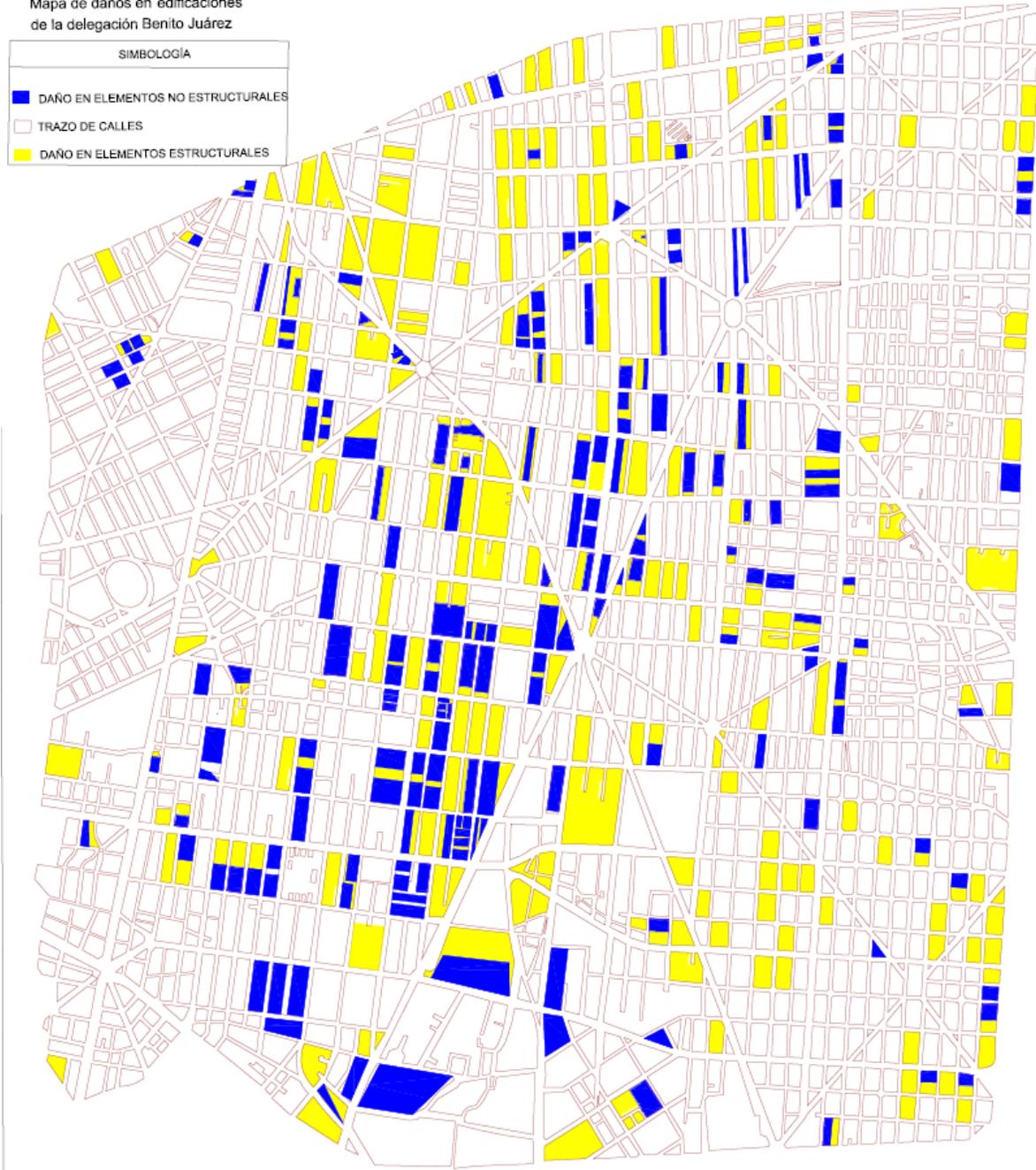


Figura 19. Zona de estudio de edificios con daños en muros no estructurales

4.1 Estadísticas de la BD de edificios con daños en muros no estructurales

En la búsqueda de un entendimiento de los factores que tuvieron una mayor influencia en los daños en elementos no estructurales en la Ciudad de México resultantes del sismo del 19 de septiembre de 2017, se requiere una exploración profunda de varias características de los edificios, el tipo de suelo, etc. A través de representaciones estadísticas, se puede lograr una visualización efectiva de las relaciones y tendencias que emergen de estas características, contribuyendo así a una comprensión más completa de los efectos del sismo y, en consecuencia, será posible formular estrategias de mitigación eficaces de los daños más repetitivos.

A continuación, se presentarán algunas características, acompañadas de estadísticas pertinentes, que permitirán una comprensión de los daños en elementos no estructurales y características similares de las 270 edificaciones por daños no estructurales del sismo de la CDMX de 2017.

4.1.2 Número de pisos

Al evaluar número de niveles de las edificaciones con los daños no estructurales (fig. 20), es posible visualizar que existe una tendencia entre la altura de la edificación y los daños en elementos no estructurales. Se observó que las edificaciones de cinco niveles fueron particularmente susceptibles a daños de elementos no estructurales. Esta vulnerabilidad varía de manera específica para cada edificio, dependiendo del tipo de patologías que se presenten. Por otro lado, los resultados son consistentes con la teoría de la dinámica estructural. Como se mencionó en el capítulo 3, se sabe que a medida que los edificios se vuelven más altos, su respuesta lateral queda regida por modos superiores, lo que puede reducir de forma importante las aceleraciones de piso a medida que el edificio se hace más alto.

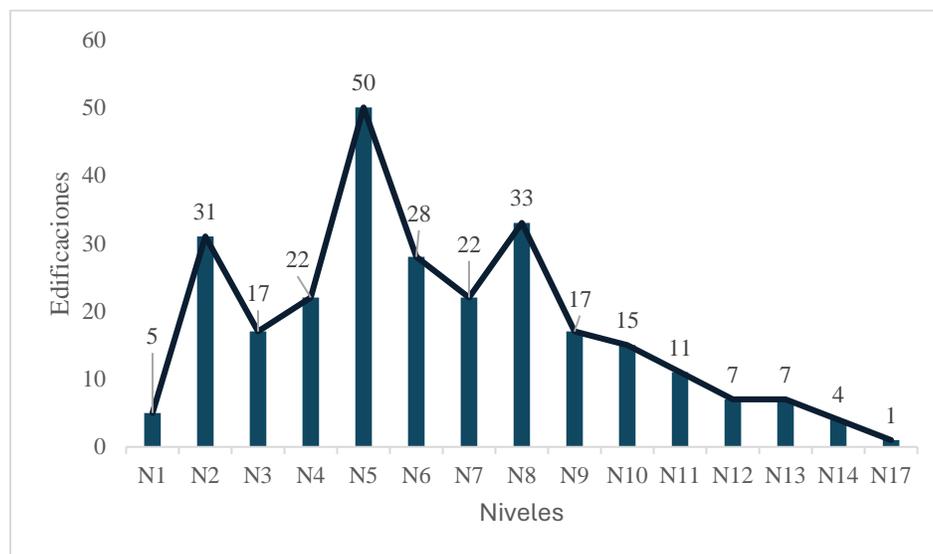


Figura 20. Relación entre daños en muros no estructurales y número de niveles del edificio

4.1.3 Tipo de sistema estructural

De los 270 edificios identificados con daños en muros no estructurales, el sistema estructural de

marcos de concreto con muros de mampostería representa más del 40% del total de la muestra (fig. 21). En este caso resulta complejo identificar si los muros de mampostería fueron diseñados como muros diafragma, (mencionado en el capítulo 1) o si estos en realidad eran muros no estructurales que no se desligaron correctamente; lo que ocasionó que los muros no estructurales terminaran funcionando como “fusibles” disipando energía del sismo por medio de daño.

Para el caso de los muros de mampostería confinada, la información observada en la base de datos no coadyuva a confirmar si efectivamente los muros registrados como no estructurales, realmente lo son. Una posibilidad consiste en que estos muros no estructurales fueron construidos con piezas y un control de calidad relativamente menor con relación a los muros estructural del sistema. Por lo que se dañaron a niveles de aceleración o distorsiones relativamente bajos.

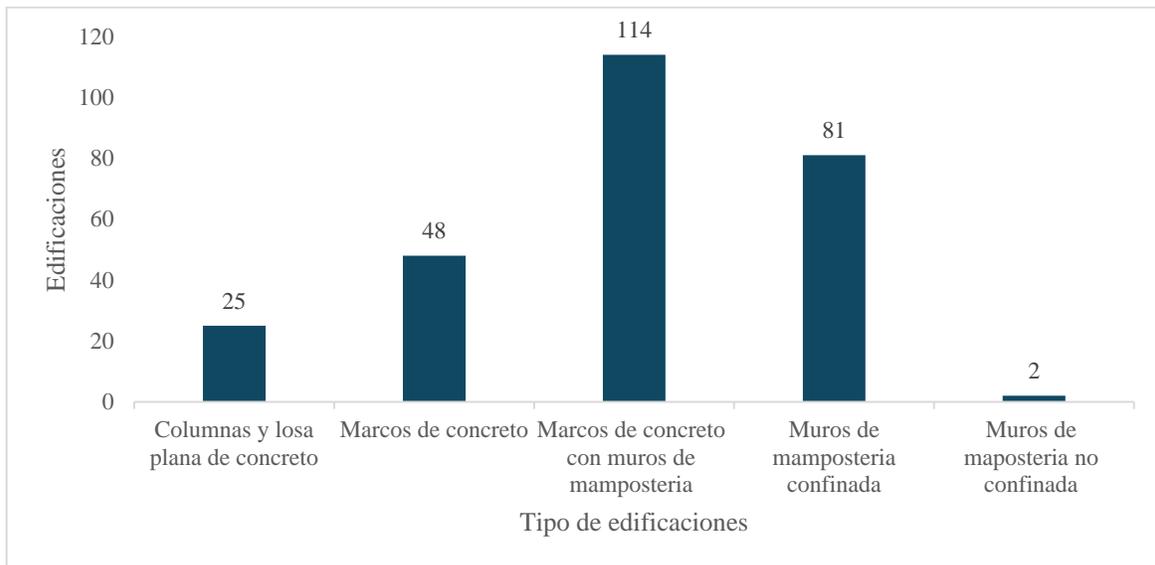


Figura 21. Identificación del tipo sistema estructural en edificios con daños en muros no estructurales

4.1.4 Año de construcción y Normas Técnicas Complementarias utilizadas en el diseño

En relación con el Reglamento de Construcción DF 1966, se observa en la figura 22 que este fue el marco normativo en el que registraron la mayor cantidad de edificaciones con daños en muros no estructurales. Este fenómeno se atribuye, en gran medida, a la existencia de edificaciones construidas con fechas anteriores a 1966. En consecuencia, las estructuras erigidas en años anteriores experimentaron un aumento significativo en los daños no estructurales. Como se había comentado al principio, esto se debe a que, en las NTC de 2004, se empezaron a tomar en cuenta a los elementos no estructurales. Sin embargo, a partir de 2017 se dieron recomendaciones para evitar el daño en los contenidos demostrado los avances en los elementos no estructurales.

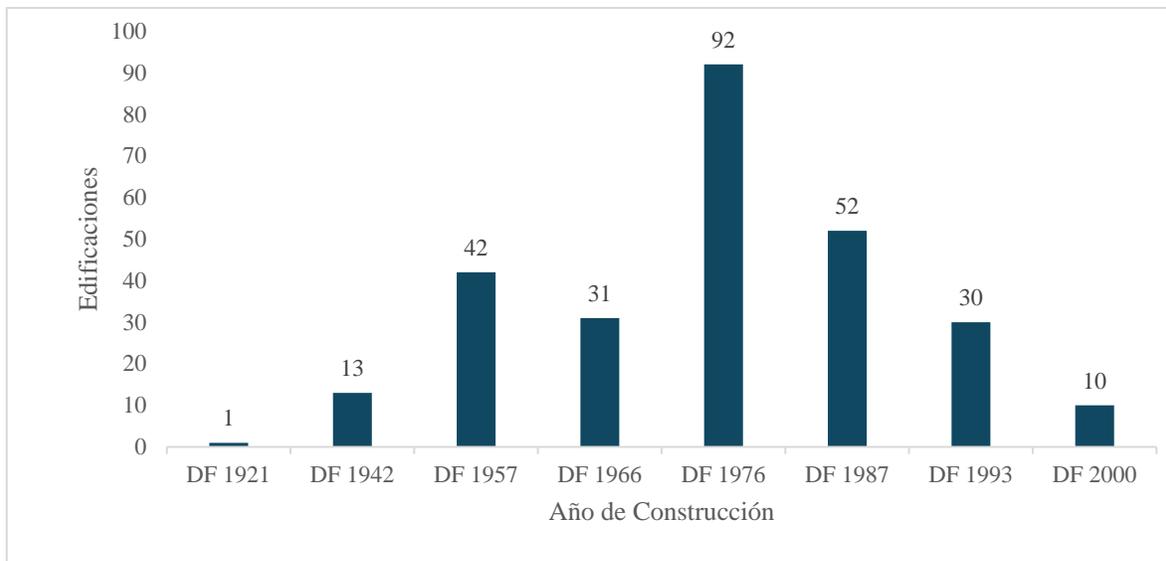


Figura 22. Año de construcción y NTC utilizadas en su diseño en edificios con daños en muros no estructurales

En contraste, se destaca una marcada reducción en los casos de daños no estructurales para los edificios que se rigen por reglamentos a partir de 1976. Este cambio sugiere una mejora en las prácticas constructivas y en la implementación de normativas más actualizadas, lo que contribuye a una mayor resistencia y seguridad de los muros no estructurales posteriores a dicho año. Se observa que no suma las 270 edificaciones, esto se debe a que algunas de estas no tenían registrado el año de construcción.

4.1.5 Patologías estructurales de los edificios

Todos los edificios identificados con daño en muros no estructurales tuvieron una o más de las siguientes patologías estructurales: Efecto de esquina, golpeteo, planta baja débil, irregularidad en planta e irregularidad vertical. En la figura 4.5 se muestran las diferentes patologías estructurales identificadas en la muestra obtenida de la BD. Las patologías de irregularidad en planta -la más frecuente en el muestreo- y la de efecto de esquina (24% de los edificios tenían esta patología) están asociadas con los efectos de torsión en planta.

El efecto de torsión produce que los muros no estructurales localizados en la periferia de la edificación (llámese fachada principal, posterior o colindancias) estén sometidos a niveles de aceleración mayores que los muros localizados en el centro de la edificación durante el evento sísmico, lo cual podría explicar que estos muros no estructurales presenten daño

La segunda patología más recurrente es la de Planta baja débil (PBD), se presume que en este caso los muros no estructurales dañados se localizan en el nivel de PB. En cuanto a los edificios con la patología de irregularidad vertical, los daños debieron presentarse en los muros no estructurales ubicados en el piso donde se presentan la irregularidad.

Desafortunadamente, la evidencia fotográfica contenida en la BD no permite confirmar que los muros no estructurales que presentaron daños se localicen en las posiciones donde, de acuerdo con las patologías identificadas, dichos muros deberían estar localizados.

En la figura 23 se tienen más de 270 que son las edificaciones de estudio, esto se debe a que cada

edificación puede contener más de una patología.

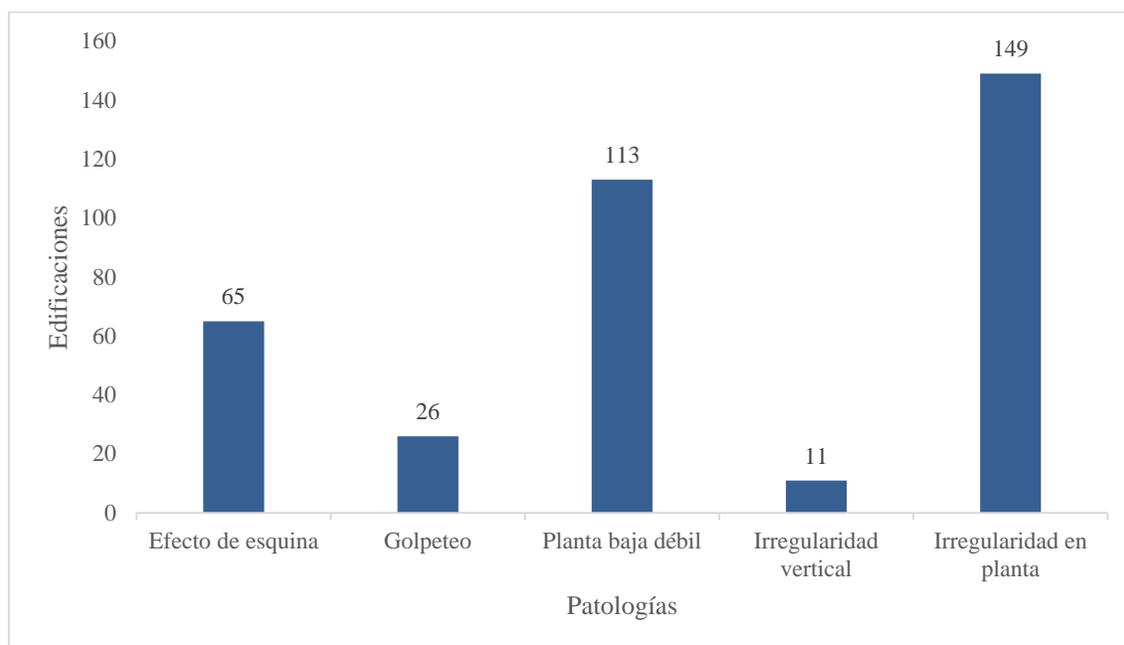


Figura 23. Patologías estructurales identificadas en edificios con daños en muros no estructurales durante el sismo del 19 de septiembre de 2017 en la zona de estudio de este reporte.

4.1.6 Subcategorización de Patologías

La subcategorización de patologías nos brinda un mayor alcance en comprender y diferenciar que tipo de edificaciones corren más riesgo que otras. En caso de las 270 edificaciones con daño no estructural se subcategorizaron las patologías de efecto de esquina y la de planta baja débil.

La subcategorización de efecto de esquina se divide en 3, como se observa en la fig. 24.

- 1) Intenso: Es la edificación localizada en una esquina con dos muros de colindancia contiguos y dos fachadas compuestas por marcos o columnas sin estar centradas en el centro de la edificación.
- 2) Moderado: Es la edificación localizada en una esquina con dos muros de colindancia contiguos y dos fachadas compuestas por muros con aberturas de puertas o marcos contraventeados.
- 3) Nulo: Es la edificación localizada en una esquina aislada de otra edificación.

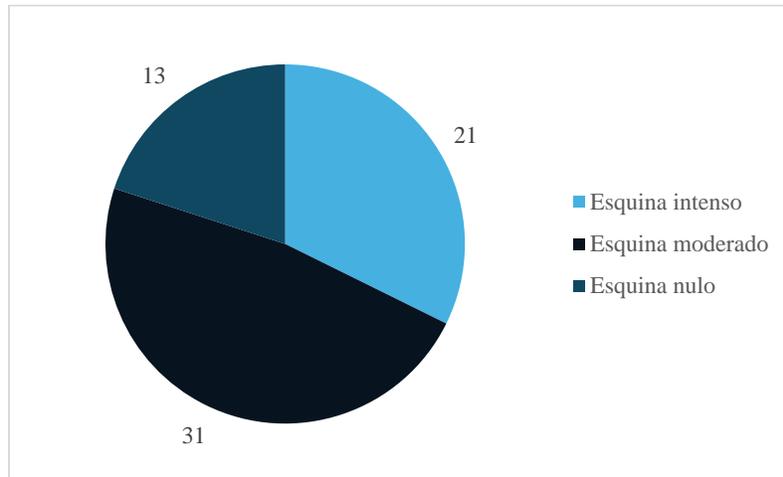


Figura 24. Subcategorización de patología efecto de esquina

En la figura 24. se indica que del universo de estudio se tenía 65 edificios localizados en esquina. La patología se subcategorizó como se mencionó en el párrafo anterior. Se observó que efecto de esquina moderado, fue el que más predominó con 31 edificaciones, esto es posible porque la mayor cantidad de edificaciones suelen ser construidas por muros pequeños y espacios para puertas y cancelería. Posteriormente, quedó efecto de esquina intenso, con 21 edificaciones, esto es posible a que en nuestra zona de estudio había muchas edificaciones con estilos más modernos donde están construidas por marcos, y claros significantes entre columnas donde suelen utilizarse ventanales. Adicional a esto, se debe de considerar el uso de la edificación. Finalmente 13 edificaciones no tienen efecto de esquina.

La subcategorización de efecto de planta baja se divide en 3, como se observa en la fig. 4.7.

- 1) Nulo: Es la edificación localizada que no sufre efecto de planta baja débil, es aquella cuyo sistema estructural es constante en toda la altura.
- 2) Moderado: Es la edificación con planta baja flexible (marcos, columnas) y los pisos superiores son rígidos (muros). *Ancho de columna* > b_{cM} .

$$b_{cM} = \alpha \left(\frac{N}{C} \right)^\beta$$

Donde b_{cM} , es el ancho mínimo para permanecer como planta baja débil moderada; α y β , son coeficientes que dan forma a la función, son 0.55 y 0.25; $\left(\frac{N}{C} \right)$ es la relación de N, número de niveles del edificio; C, es el número de crujías.

- 3) Intenso: Es la edificación con planta baja flexible (marcos, columnas) y los pisos superiores son rígidos (muros). Adicionalmente, debe cumplir la siguiente expresión. *Ancho de columna* < b_{cM} .

$$b_{cM} = \alpha \left(\frac{N}{C} \right)^\beta$$

Donde b_{cM} , es el ancho mínimo para permanecer como planta baja débil moderada; α y β , son coeficientes que dan forma a la función, son 0.55 y 0.25; $\left(\frac{N}{C} \right)$ es la relación de N, número de niveles del edificio; C, es el número de crujías.

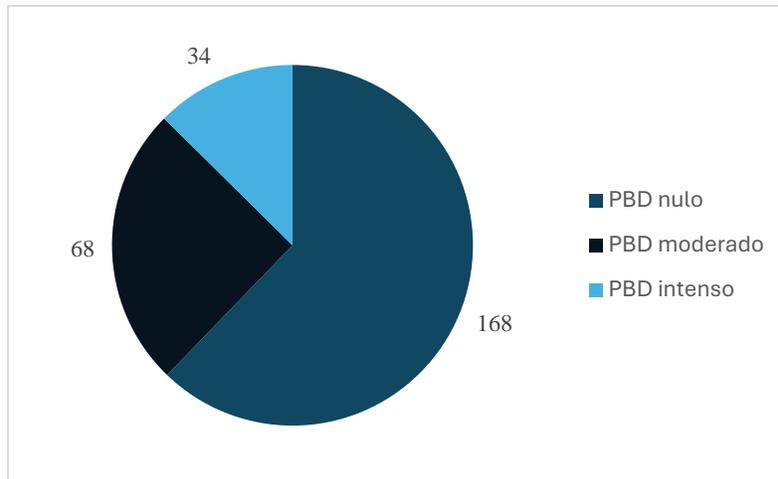


Figura 25. Subcategorización de patología planta baja débil

En la figura 25. se presenta la patología de efecto de planta baja débil con 102 edificaciones, la cual se subcategorizó como se mencionó anteriormente. Se observó que el efecto de planta baja débil (PBD) nulo, fue el que más predominó con 168 edificaciones, esto se puede deber a que en este estudio la mayor parte de las edificaciones eran antiguas, antes no era tan necesario el tener estacionamiento en la PB de la edificación. En segundo lugar, quedó el efecto de PBD moderado, con 68 edificaciones esto se debe a que estas edificaciones son más recientes y predomina mayor flexibilidad en la PB con respecto a los demás niveles al tener estacionamiento en estas edificaciones.

4.1.7. Correlación entre número de pisos, patologías y subcategorización de las patologías.

A continuación, se muestran las estadísticas de los edificios con N5 a N8 de las patologías que se encuentran en dichas edificaciones, a su vez; en cada nivel se realizará otra estadística de la patología que más predominó, con esto veremos si la patología o la combinación de patologías influyó en los daños que presentaron las edificaciones.

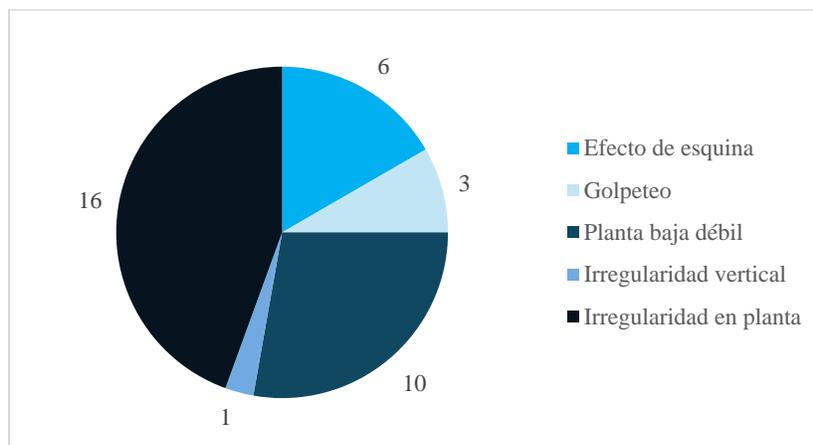


Figura 26. Patologías presentes en edificaciones de nivel 5.

En la figura 26. que corresponde a las patologías encontradas en los edificios de 5N, se observa que, de los 50 edificios que registraron algún tipo de daño en muros no estructurales (fig. 4.2), 36 tenían una patología y 14 no la tenía o tenían otras patologías que no se consideraron en el estudio. Esto quiere decir que el 72% de los edificios tenían al menos una patología estructural. La patología que más predominó fue la de irregularidad en planta, donde 16 de las 50 edificaciones presentaron esta patología. Esto quiere decir que el 32% de los edificios de 5 niveles que tuvieron daño estructural, tenían la patología de irregularidad en planta.

En la fig. 27. se observa que, de los 16 edificios que tenían irregularidad en planta, la siguiente patología con mayor presencia fue la de PBD, seguida muy de cerca con 6 edificaciones con efecto de esquina. Esto quiere decir que al menos seis edificaciones tuvieron una combinación de las patologías de irregularidad en planta, efecto de esquina y PBD. Esta cantidad representa el 12% de todos los edificios de cinco niveles.

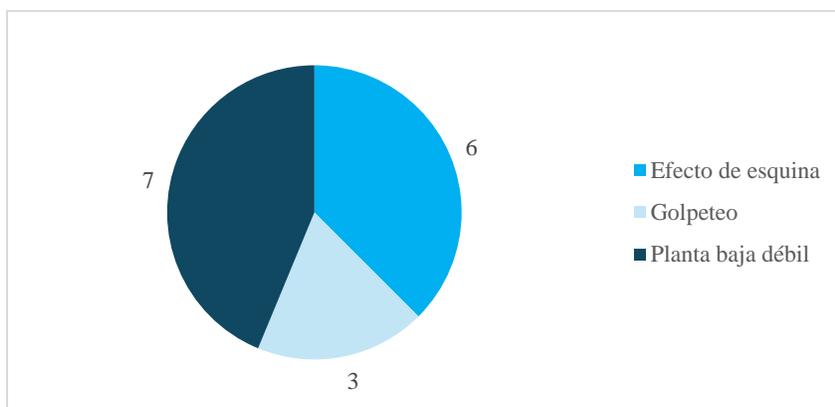


Figura 27. Patologías predominantes de las 16 edificaciones de nivel 5.

En la figura 28. que corresponde a las patologías encontradas en los edificios de 6N, se observa que, de los 28 edificios que registraron algún tipo de daño en muros no estructurales (fig. 20), 15 tenían una patología y 13 no la tenía o tenían otras patologías que no se consideraron en el estudio. Esto quiere decir que el 54% de los edificios tenían al menos una patología estructural. La patología que más predominó fue la de PBD, donde 5 de las 28 edificaciones presentaron esta patología. Esto quiere decir que más del 17% de los edificios de 6 niveles que tuvieron daño estructural, tenían la patología de PBD.

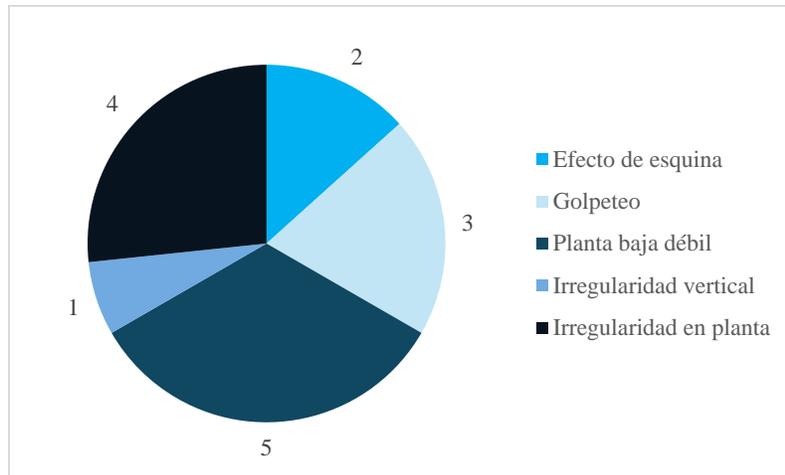


Figura 28. Patologías presentes en edificaciones de nivel 6.

En la fig. 29. se observa que, de los 5 edificios que tenían PBD, la siguiente patología con mayor presencia fue la de irregularidad en planta con 2 edificios, seguida de una edificación con efecto de esquina y una edificación con golpeteo. Esto quiere decir que al menos una edificación tuvo una combinación de las patologías de irregularidad en planta, efecto de esquina y golpeteo. Esta cantidad representa el 3% de todos los edificios de seis niveles.

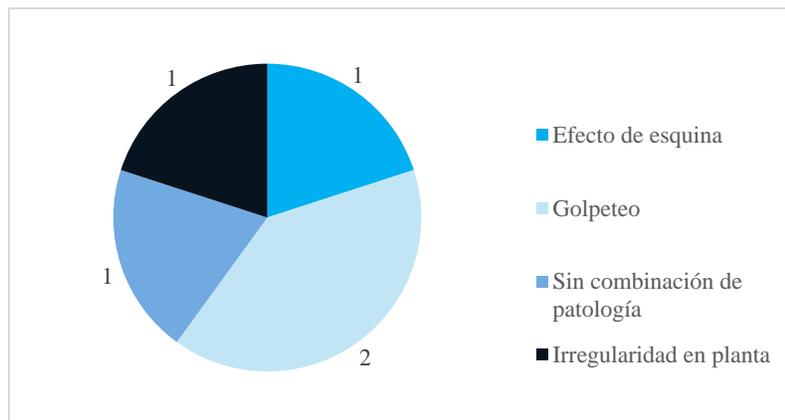


Figura 29. Patologías predominantes de las 5 edificaciones de nivel 6.

Las irregularidades en planta provocan torsiones respecto al eje vertical de una estructura. Por otro lado, si una estructura posee una planta geométrica, es posible que la distribución de los elementos estructurales se encuentre distribuidos de manera asimétrica, por lo que se le considere como estructura irregular. A continuación, se explicará la subcategorización de esta patología.

La subcategorización de patología de irregularidad en planta se divide en 3.

- 1) Regulares: Es cuando la planta de la edificación es cuadrada o rectangular; con un largo menor a 2.5 veces su ancho.
- 2) Irregulares: Es cuando la planta de la edificación es muy esbelta, con un largo entre 2.5 y 4 veces el ancho.

- 3) Muy irregulares: Es cuando la planta de la edificación presenta forma de “H”, L” o “Y”, cuando la dimensión saliente excede el 20% de la dimensión mayor en planta del edificio, o presenta una planta totalmente irregular.

De las 5 edificaciones de patologías predominantes, se realizó el estudio de la subcategorización de la patología de PBD, como se muestra en la fig. 30. En esta se muestra que 4 de las 5 edificaciones; es decir, el 80% de las edificaciones tuvieron una subcategorización de PBD Muy irregular. Por lo que, la edificación presenta forma de “H”, L” o “Y”, cuando la dimensión saliente excede el 20% de la dimensión mayor en planta del edificio. La base de datos no dice que tipo de subcategorización existe. Por ello, no se sabe exactamente el tipo de subcategorización, con el método de inspección y con las clasificaciones de irregularidad en planta se mostraron los tipos de irregularidad que existen.

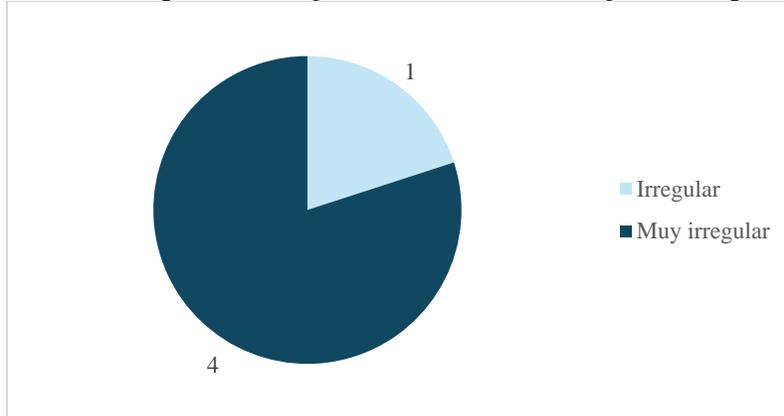


Figura 30. Subcategorización de patología de PBD de las 5 edificaciones de nivel 6.

En la figura 31. que corresponde a las patologías encontradas en los edificios de 7N, se observa todos los edificios (fig. 20), 22 tenían al menos una patología estructural. La patología que más predominó fue la de irregularidad en planta, donde 11 de las 22 edificaciones presentaron esta patología. Esto quiere decir que el 50% de los edificios de 7 niveles que tuvieron daño estructural, tenían la patología de irregularidad en planta.

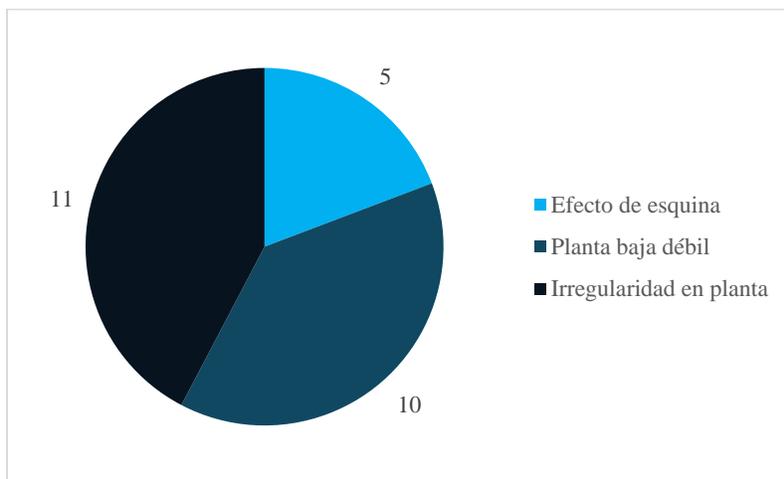


Figura 31. Patologías presentes en edificaciones de nivel 7.

En la fig. 32. se observa que, de los 11 edificios que tenían irregularidad en planta, la siguiente patología con mayor presencia fue la de PBD con 7, seguida por el efecto de esquina con 4 edificios. Esto quiere decir que al menos cuatro edificaciones tuvieron una combinación de las patologías de PBD y efecto de esquina. Esta cantidad representa el 18% de todos los edificios de siete niveles.

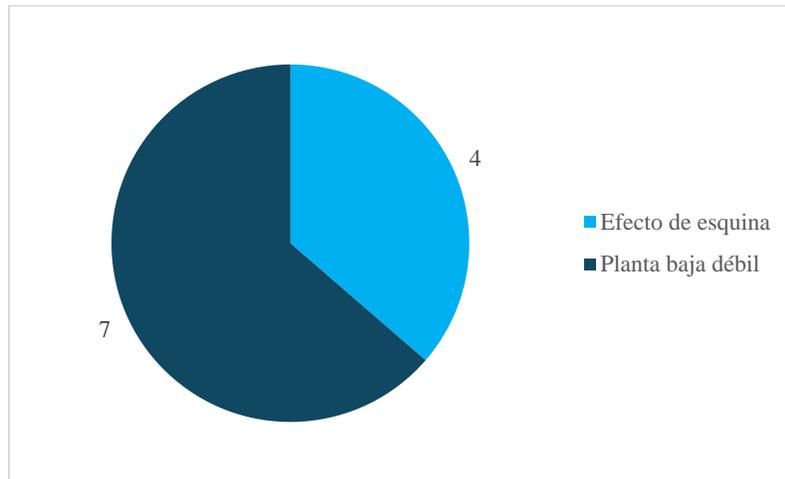


Figura 32. Patologías predominantes de las 7 edificaciones de nivel 7.

En la figura 33. que corresponde a las patologías encontradas en los edificios de 8N, se observa que, de los 33 edificios que registraron algún tipo de daño en muros no estructurales (fig. 20), 25 tenían una patología y ocho no la tenían o tenían otras patologías que no se consideraron en el estudio. Esto quiere decir que el 75% de los edificios tenían al menos una patología estructural. La patología que más predominó fue la de irregularidad en planta, donde 11 de las 33 edificaciones presentaron esta patología. Esto quiere decir que más del 33% de los edificios de 8 niveles que tuvieron daño estructural, tenían la patología de irregularidad en planta.

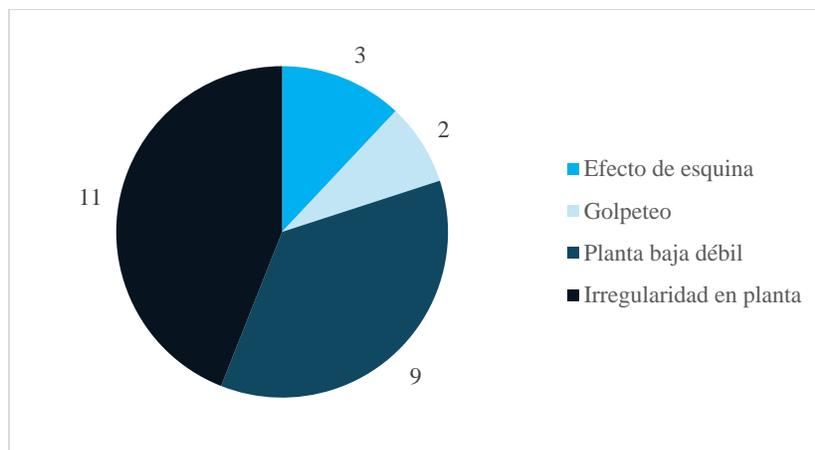


Figura 33. Patologías presentes en edificaciones de nivel 8.

En la fig. 34. se observa que, de los 11 edificios que tenían irregularidad en planta, la siguiente patología con mayor presencia fue la de PBD con 7, seguida por el efecto de esquina y efecto de golpeteo con dos edificaciones cada uno. Esto quiere decir que al menos cuatro edificaciones tuvieron una combinación de las patologías de golpeteo, PBD y efecto de esquina. Esta cantidad representa el 12% de todos los edificios de ocho niveles.

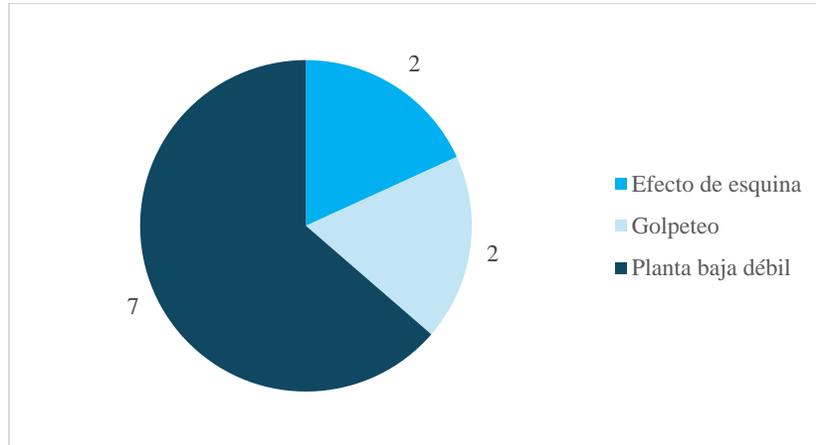


Figura 34. Patologías predominantes de las 7 edificaciones de nivel 8.

Finalmente, recapitulando todos los resultados de los 4 niveles de estudio. Se observa una relación de los niveles 5, 7 y 8. Presentando en primer lugar las patologías de irregularidad en planta. En segundo lugar, se presentó la patología de efecto de esquina, en tercer lugar, se presentó la patología de efecto de esquina en los tres niveles mencionados anteriormente.

En el caso de nivel 6 se invirtieron las patologías; es decir, en primer lugar, se presentó PBD. En segundo lugar, se presentó irregularidad en planta, en tercer lugar, se presentó la patología de golpeteo.

Para las patologías de irregularidad en planta y efecto de esquina, se pudo haber presentado a los efectos de torsión en los muros; ya que genera que los muros perimetrales, tengan más demanda que los muros centrales.

Para la patología de PBD se pudo haber presentado en los muros demandas adicionales de desplazamiento y resistencia por los claros entre las columnas, para las edificaciones con estacionamientos en planta baja.

4.2 Tipos de fallas en muros no estructurales

En la fig. 35. identificaron diversos tipos de daños asociados a los muros no estructurales, que se desglosan de la siguiente manera: 73 edificaciones sufrieron desprendimiento de acabados en sus muros (DES ACABADOS), 20 edificaciones mostraron fallas fuera del plano de los muros no estructurales (F/FUERA DEL PLANO), 150 edificaciones presentaron fallas por tensión diagonal en los muros no estructurales (F/TENSIÓN DIAGONAL), y no se pudo obtener información suficiente para clasificar a las 27 edificaciones restantes (NO-INFO). Vale la pena destacar que los 270 casos no tienen exclusivamente daño en elementos no estructural, sino que también pueden tener daño en elementos estructurales.

Se muestran los tipos de fallas que se pudieron apreciar en los casos de estudio de la base de datos en los muros no estructurales. En esta situación particular, se destaca que las fallas más frecuentes han sido aquellas relacionadas con tensiones diagonales. Este fenómeno se explica en gran medida por el hecho de que, en un elevado porcentaje de las edificaciones actuales, los muros no estructurales son concebidos y construidos en el mismo plano que las trabes y marcos.

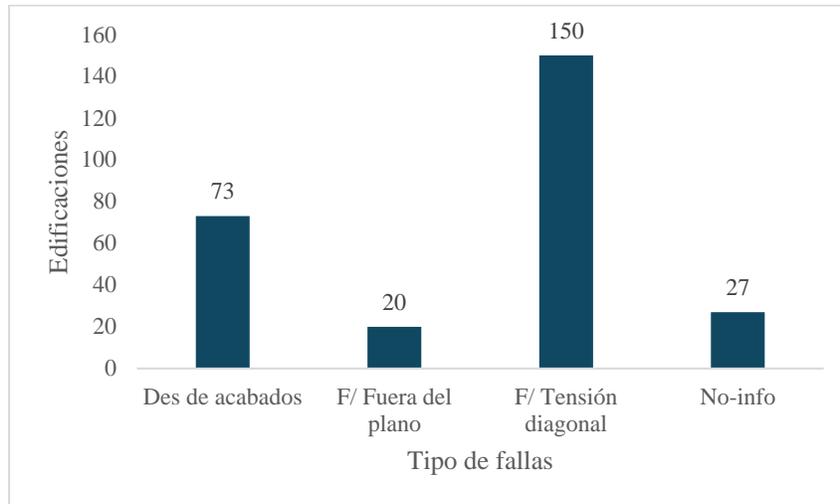


Figura 35. Fallas en muro no estructural, estudio de casos particulares

En esta sección se estudian los dos tipos de fallas encontradas en los muros no estructurales que sufrieron algún tipo de daño durante el sismo del 19 de septiembre de 2017. La falla por tensión diagonal y la falla fuera del plano.

4.2.1 Falla por tensión diagonal

Falla por tensión diagonal, se refiere a un modo de fallo común en elementos estructurales sometidos a cargas axiales y cortantes. Este tipo de fallo se manifiesta predominantemente en miembros de compresión o en sistemas estructurales sujetos a fuerzas que generan esfuerzos de cortante significativos. La característica distintiva de una falla por tensión diagonal es la formación de fisuras diagonales en el material, que se desarrollan desde las esquinas de las cargas concentradas y se propagan hacia arriba y hacia afuera.

Este mecanismo implica la combinación de esfuerzos cortantes y esfuerzos normales, generando tensiones en ángulo diagonal a la dirección principal de carga. En situaciones de carga extrema, estas tensiones pueden exceder la capacidad de resistencia del material, lo que resulta en la aparición de fisuras diagonales. La propagación de estas fisuras debilita progresivamente la integridad estructural, pudiendo conducir eventualmente al colapso del elemento.

En la tabla 5. se muestra el resumen de 3 de los edificios donde se identificaron fallas por tensión

diagonal (fig.36.) en sus muros no estructurales. Dos de los tres edificios tenían 7 niveles, el otro cuenta con 11 niveles; los tres edificios consisten en marcos de concreto y muros de mampostería, tenían planta rectangular y su patología estructural consiste en planta baja débil; finalmente dos de los tres edificios fueron construidos antes de 1985.

Resulta interesante observar que los tres edificios tienen patologías asociadas a fenómenos de torsión. Por lo que, como se describió previamente, el daño en estos muros no estructurales pudo estar relacionado al aumento de las demandas de aceleración debidas a los efectos de torsión.

Tabla 5. Resumen de edificios con fallas por tensión diagonal en muros considerados como no estructurales

Dirección	Número de niveles	Sistema estructural	Tipo de planta	Patologías	Año de construcción
Dr. Vértiz #1076, Colonia Vértiz Narvarte	7	Marcos de concreto y muros de mampostería	Rectangular	Planta baja débil	1987
Gabriel Mancera #741, Colonia del Valle Norte	7	Marcos de concreto y muros de mampostería	Rectangular	Planta baja débil	1971
Heriberto Frías #806, Colonia Narvarte Poniente	11	Marcos de concreto y muros de mampostería	Rectangular	Efecto de esquina	1948



Dr. Vértiz #1076



Gabriel Mancera #741



Heriberto Frías #806

Figura 36. Fallas por tensión diagonal en muros no estructurales en los edificios estudiados

4.2.2 Falla fuera del plano

Una falla fuera del plano se refiere al fallo de la capacidad de una estructura para resistir fuerzas o cargas aplicadas se ve comprometida debido a acciones que actúan perpendicularmente al plano principal de la estructura. Este tipo de falla es particularmente crítico en elementos estructurales como muros y elementos de pared delgada, donde las cargas aplicadas pueden inducir esfuerzos y deformaciones que actúan en direcciones distintas al plano principal del componente.

El análisis y diseño para prevenir fallas fuera del plano implican la consideración de factores como la rigidez torsional, la capacidad de resistencia al pandeo lateral y la capacidad de transferir cargas en direcciones perpendiculares al plano principal.

En el caso de la falla fuera del plano, la tabla 6. muestra el caso de tres edificios. Aunque vale la pena destacar que, de estos tres casos, el edificio localizado en Dr. Vertiz #1076 también tuvo muros no estructurales cuyo daño estuvo asociado a una falla por tensión diagonal. Se puede observar que el rango de alturas de los edificios oscila entre 5 y 8 niveles. En cuanto al sistema estructural, sigue dominando el sistema de marcos de concreto y muros de mampostería; sin embargo, uno del edificio consiste en columnas y losas planas. Esto no es razonable ya que dicho sistema estructural se considera flexible ante acciones laterales. En cuanto a las patologías destaca que uno de los edificios posea la patología de PBD, pero resulta más interesante observar que el edificio en Rébsamen #18 fue construido en 2020.

Tabla 6. Resumen de edificios con fallas fuera del plano en muros considerados como no estructurales

Dirección	Número de niveles	Sistema estructural	Tipo de planta	Patologías	Año de construcción
Balboa #1016, Colonia Portales Sur	5	Marcos de concreto y muros de mampostería	Rectangular	Planta baja débil	1971
Dr. Vértiz #1076, Colonia Vértiz Narvarte	7	Marcos de concreto y muros de mampostería	Rectangular	Irregularidad en planta	1987
Enrique Rébsamen #18	8	Columnas y losa plana de concreto	No rectangular	Irregularidad en planta	2002

En el caso del edificio Rébsamen #18, la evidencia fotográfica (fig. 37.) indica que los muros no estructurales estaban contruidos fuera del eje de las columnas y la losa. Lo anterior promovió la falla fuera del plano en el muro no estructural. Esta forma de construcción es buena porque, el desligamiento del marco implica la colocación del muro de manera que actúe como un componente separado, permitiendo que los elementos estructurales trabajen de manera coherente según su diseño original. Sin embargo, el proceso constructivo pudo no haber cumplido con las medidas constructivas mínimas permisibles establecidas por los RCDF y las NTC.



Balboa #1016



Dr. Vértiz #1076

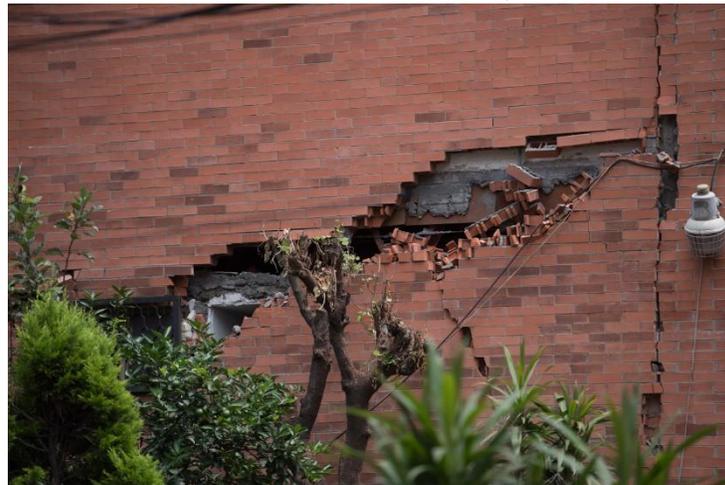


Figura 37. Resumen de edificios con fallas fuera del plano en muros considerados como no estructurales

Enrique Rébsamen #18

5. Conclusión

5. Conclusión

Se empezará con una síntesis de la tesis, partiendo del comportamiento de elementos estructurales y no estructurales. Se definió como se integran cada uno de estos en una edificación y la importancia que tienen para la repuesta de forma correcta durante los sismos. Se estudiaron los sistemas más comunes de elementos estructurales y no estructurales en los edificios de vivienda a los muros para uso estructural y no estructural. También se mostró la diferencia que existe entre ambos y el por qué se clasifican de ese modo.

Al conocer la clasificación de los muros estructurales y no estructurales en una edificación, el trabajo se centró en el comportamiento tanto de los elementos estructurales como de los no estructurales durante sismos., Adicionalmente, se estudió a los espectros de piso, contenidos anclados y no anclados. Al realizar este estudio se comprendió que cada uno de estos es de uso particular para una edificación en específico y no se puede realizar un prototipo global para un conjunto de edificaciones.

Por otro lado, se realizó el análisis de las normativas técnicas y regulaciones de construcción que abordaron a los elementos no estructurales. Se identificaron desde qué normativa (NTC) o Reglamento de Construcción para el Distrito Federal (RCDF) se comenzó a considerar la importancia de los elementos no estructurales en la seguridad sísmica de las edificaciones. Luego, se realizó una comparación del avance y las modificaciones que se implementaron a lo largo del tiempo. El trabajo se centró en la evolución de las disposiciones relacionadas con los elementos no estructurales hasta la NTC más reciente, en este caso, las publicadas en el año 2023.

La comparación de NTC y RCDF, fue de suma importancia para conocer la evolución de los reglamentos y normas en la CDMX a causa de los sismos que generaron un impacto. En este caso, con los resultados del estudio de los RCDF y las NTC, se observó cómo evolucionaron a favor estas normas; ya que antes no se tenía mucha importancia. En el pasado se tuvo la idea, que, al no colapsar las edificaciones, el diseño era admisible. Con los nuevos reglamentos se le ha brindado la importancia a los elementos no estructurales, para que las edificaciones puedan continuar en funcionamiento después de un sismo; por ejemplo: hospitales, estadios, edificios corporativos; entre otros.

Con la comprensión de los conceptos abordados en todos los capítulos y cómo se comportaban los elementos de una edificación durante un sismo, el trabajo se enfocó en la zona de estudio de la delegación Benito Juárez, donde se llevó a cabo una evaluación de los casos de estudio del sismo de la CDMX del 19 de septiembre de 2017.

En este estudio, se obtuvieron datos de la Base de Datos de Daños de la CDMX causados por el sismo de 2017. Estos datos permitieron comparar y relacionar similitudes entre las edificaciones, como el sistema estructural, año de construcción, patologías, la subcategorización de patologías, comparativa entre niveles y, para ver que niveles son los que predominaron más al tipo de fallas que se vieron. A su vez, se explicó la diferencia entre estos dos tipos de fallas y se representaron de manera ilustrativa con casos de la base de datos.

Con esta información, se extrajeron datos relevantes, como la observación de la patología que más predominó fue irregularidad en planta, en los daños de las edificaciones y en qué niveles de las edificaciones fueron los más afectados (nivel 5).

Con esta información se comprobó el mejoramiento de los reglamentos y las normas en la CDMX; ya que entre 1957 y 1976, las edificaciones mostraron una reducción de daños. Por otro lado, se investigó qué tipo de sistema estructural fue el más común en esas edificaciones y en este estudio se

encontró que fueron los marcos de concreto con muros de mampostería.

Para el caso de nuestro estudio, que consistió en elementos no estructurales, la información observada en la base de datos para la mampostería confinada no coadyuvó a confirmar si efectivamente los muros registrados como no estructurales realmente lo eran. Una posibilidad consistió en que estos muros no estructurales fueron construidos con piezas y un control de calidad relativamente menor en comparación con los muros estructurales del sistema, por lo que se dañaron a niveles de aceleración o distorsiones relativamente bajos.

Finalmente, se exploraron los tipos de daños y fallas que ocurrieron en muros no estructurales durante sismos registrados en distintos países alrededor del mundo. Se examinaron casos de estudio para comprender mejor las vulnerabilidades y los patrones de daño observados en estos elementos. Esta revisión permitió identificar lecciones aprendidas y áreas de mejora en el diseño y construcción que involucró a los elementos no estructurales; ya que no se tomaron en cuenta desde 2017 para mitigar los riesgos asociados durante eventos sísmicos. Sin embargo, al comparar estos reglamentos con los de países como Italia y Canterbury, a pesar de ser otros países, se observaron características muy similares con nuestros reglamentos y normas están actualizadas en comparación con otros países.

Se recomendaría en las inspecciones post-sismo hacer inspecciones de elementos estructurales y no estructurales; se recomendaría investigar los tipos de elementos no estructurales que hay, el tipo de estructura, la distancia entre claros de las columnas, el ancho de columnas, definir los tipos de muros que hay en la edificación. Con esto se facilitaría el estudio de las edificaciones dañadas para elementos no estructurales. Adicional, con esta información recabada, se podrían realizar modelos numéricos de las edificaciones de estudio. Esto con el fin de observar el comportamiento de los elementos no estructurales de las edificaciones y establecer una recomendación o solución para mitigar los daños no estructurales en las edificaciones.

Para cerrar, como última recomendación se recomendaría centrarse en como asegurar que se estén aplicando las NTC en los diseños y construcción de los elementos no estructurales. Ya que, las investigaciones sobre los elementos no estructurales se han estudiado de forma profunda, Sin embargo, esto no asegura que las edificaciones cumplan realmente con lo que dicen las NTC o los RCDF.

Referencias

- Servicio Sismológico Nacional. (2017). Sismo del día 19 de Septiembre de 2017, Puebla-Morelos (M 7.1) . *GEOFISICA*. Recuperado el 14 de agosto de 2024, de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reporte-s-especiales/2017/SSNMX_rep_esp_20170919_Puebla-Morelos_M71.pdf
- Singh, S. K., Reinoso, E., Arroyo, D., Ordaz, M., Cruz-Atienza, V., Pérez-Campos, X., . . . Hjörleifsdóttir, V. (2018). Deadly Intraslab Mexico Earthquake of 19 September 2017. Recuperado el 15 de agosto de 2024, de <https://pubs.geoscienceworld.org/ssa/srl/article-abstract/89/6/2193/562863/Deadly-Intraslab-Mexico-Earthquake-of-19-September?redirectedFrom=fulltext>
- Miranda, E. R. (2005). Estimation of floor acceleration demands in high-rise buildings during earthquakes. Recuperado el 22 de agosto de 2024, de https://www.researchgate.net/publication/229734943_Estimation_of_floor_acceleration_demands_in_high-rise_buildings_during_earthquakes
- Federal Emergency Management Agency. (2012). *Earthquakes reducing the risk of nonstructural earthquake damage*. Recuperado el 15 de enero de 2024, de https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-07/fema_earth
- Fierro, E. (7 de mayo de 2012). *Behavior of Nonstructural Components in Recent Earthquakes*. Recuperado el 11 de enero de 2024, de <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/41168%28399%2944>
- Gobierno de la CDMX. (2023). *NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS*. Recuperado el 18 de enero de 2024, de <http://www.contraloriadf.gob.mx/prontuario/vigente/745.htm>
- IngeCivil. (10 de octubre de 2018). *mampostería reforzada*. Recuperado el 28 de diciembre de 2023, de <https://www.ingecivil.net/2018/08/10/la-mamposteria-reforzada/mamposteria-reforzada-1/>
- J. L. Varela-Rivera, S. C.-E.-B.-H. (2 de junio de 2015). *Comportamiento de muros de mampostería confinada con aberturas sujetos a cargas fuera del plano*. Recuperado el 22 de diciembre de 2023, de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-30112015000200004
- Salazar, Y. (2022). *¿Cuáles son los elementos estructurales en una construcción?* Recuperado el 18 de enero de 2023, de <https://covertop.com.mx/elementos-estructurales-en-una-construccion/#:~:text=Los%20elementos%20estructurales%20son%20las,como%20sismos%2C%20vientos%2C%20etc>
- SEGURO, C. (2023). *¿Qué son los muros portantes y cuál es su importancia?* Recuperado el 10 de enero de 2024, de <https://www.construyendoseguero.com/que-son-los-muros-portantes-y-cual-es-su-importancia/>
- Silva, O. (2024). *RECOMENDACIONES DE CONSTRUCCIÓN PARA ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES EN PROYECTOS DE EDIFICACIÓN: MUROS DIVISORIOS*. Recuperado el 15 de enero de 2024, de <https://360enconcreto.com/blog/detalle/elementos-no-estructurales-muros-divisorios/>
- al, C. M. (2013). *Introduction to earthquake protection of non-structural elements in buildings*. Estados Unidos de América: Gujarat State Disaster Managment Authority. Recuperado el 20 de enero de 2024, de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.iitk.ac.in/nicee/IITK-GSDMA/NSE_002_31May2013.pdf
- al., D. P. (2019). Seismic performance of non-structural elements during the 2016 Central Italy earthquake. *CrossMark*, 23. Recuperado el 21 de diciembre de 2023, de

- <https://mail.google.com/mail/u/0/?tab=rm&ogbl#search/EEspinosaC%40iingen.unam.mx/KtbxLwGzcRHRzcfqsgXBMSWVvglwXTnQB?projector=1&messagePartId=0.1>
- Bazán, e., & Meli, R. (1985). *Diseño sísmico de edificios*. México: CGR Sac. Recuperado el 15 de febrero de 2024, de https://iingen-my.sharepoint.com/personal/eepinosac_iingen_unam_mx/_layouts/15/onedrive.aspx?ga=1&id=%2Fpersonal%2Feepinosac%5Fiingen%5Funam%5Fmx%2FDocuments%2FBibliografia%5Fing%5Fsismica%2Fdise%C3%B1o%20sismico%20de%20edificios%2Dbazan%20%26%20meli%2E
- Castillo, A. A. (2023). *Dinámica de estructuras*. Recuperado el 15 de febrero de 2024
- Dhakal, R. P. (s.f.). *DAMAGE TO NON-STRUCTURAL COMPONENTS AND CONTENTS IN 2010 DARFIELD EARTHQUAKE*. Estados Unidos de América. Recuperado el 20 de diciembre de 2023, de <https://mail.google.com/mail/u/0/?tab=rm&ogbl#search/EEspinosaC%40iingen.unam.mx/KtbxLwGzcRHRzcfqsgXBMSWVvglwXTnQB?projector=1&messagePartId=0.1>
- GOBIERNO DE LA CDMX. (15 de diciembre de 2017). *GACETA OFICIAL DE LA CIUDAD DE MÉXICO*. Recuperado el 3 de febrero de 2023, de <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://smie.com.mx/smie-2022/archivos/informacion-tecnica/normas-tecnicas-complementarias/normas-tecnicas-complementarias-ciudad-mexico-2017.pdf>
- GOBIERNO DE LA CDMX. (19 de octubre de 2020). *GACETA OFICIAL DE LA CIUDAD DE MÉXICO*. Recuperado el 8 de febrero de 2024, de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.smie.org.mx/uploads/1/2022-11/normas_tecnicas_complementarias_diseno_construccion_estructuras_mamposteria_19_octubre_2020.pdf
- GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL MÉXICO. (6 de octubre de 2004). *GACETA OFICIAL DEL DISTRITO FEDERAL*. Recuperado el 24 de enero de 2024, de <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://smie.com.mx/smie-2022/archivos/informacion-tecnica/normas-tecnicas-complementarias/gaceta-oficial-df-2004-tomo-2.pdf>
- MÉXICO, G. D. (1987). *NORMAS TECNICAS COMPLEMENTARIAS DEL REGLAMENTO DE CONSTRUCCIONES PARA EL D.F.* Recuperado el 15 de enero de 2023, de <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://smie.com.mx/smie-2022/archivos/informacion-tecnica/normas-tecnicas-complementarias/normas-tecnicas-complementarias-reglamento-construccion-df.pdf>
- Piralla, M. (1985). *Diseño estructural*. México: Limusa. Recuperado el 15 de febrero de 2024, de https://iingen-my.sharepoint.com/personal/eepinosac_iingen_unam_mx/_layouts/15/onedrive.aspx?ga=1&id=%2Fpersonal%2Feepinosac%5Fiingen%5Funam%5Fmx%2FDocuments%2FBibliografia%5Fing%5Fsismica%2FDiseno%5FEstructural%5FRoberto%5FMeli%5FPiralla%2Epdf&parent=%
- Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural. (7 de diciembre de 2023). *Ejemplos de Diseño de acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo 2017*. Recuperado el 4 de marzo de 2024, de https://iingen-my.sharepoint.com/:w:/r/personal/eepinosac_iingen_unam_mx/_layouts/15/Doc.aspx?sourcedoc=%7BCDF65D6E-0C3C-4E3F-8CA0-A8EEB093FE91%7D&file=FINAL%20-%20Ejemplos%20de%20dise%C3%B1o%20NTC-DS.docx&action=default&mobileredirect=true
- Instituto de Ingeniería. (2021). *BD 19S-17 IINGEN-RECONS (Actualización ENE-2021)*. Recuperado el 28 de octubre de 2023

- INSTITUTO DE INGENIERIA. (sf). *Metodología para la evaluación y mitigación de riesgo sísmico en edificios con riesgo alto en la Ciudad de México*. CDMX. Recuperado el 6 de junio de 2024
- J, P. (20 de marzo de 2023). *Diseño de muros de mampostería ante cargas fuera del plano*. Recuperado el 5 de mayo de 2024, de <https://www.youtube.com/watch?v=vTm7mlJA5yY>
- La latino Seguros*. (18 de junio de 2021). Recuperado el 23 de noviembre de 2023, de <https://latinoseguros.com.mx/sitio2021/que-es-un-dano-estructural-en-la-vivienda/#:~:text=Un%20da%C3%B1o%20estructural%20es%20aquel,causar%20derrumbes%20parciales%20o%20totales>
- R, M. T. (27 de septiembre de 2017). *Notimex*. Recuperado el 10 de noviembre de 2023, de <https://noticieros.televisa.com/ultimas-noticias/habitantes-edificio-osa-mayor-sacan-muebles/>
- Rodríguez, S. P. (2019). EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MUROS NO ESTRUCTURALES EN EDIFICIOS DE LA CIUDAD DE MÉXICO EN EL TERREMOTO DEL 19 DE SEPTIEMBRE 2017. *Revista de Ingeniería Sísmica No. 101*, 53-66.
- SMIE "Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural". (2022). *Reglamentos Municipales y NTC*. Recuperado el 7 de septiembre de 2023, de <https://smie.com.mx/smie-2022/informacion-tecnica/estados/reglamentos-construccion-ciudad-de-mexico.php>

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Factor de reducción de las fuerzas de diseño de diafragmas, R_s. Obtenido de NTC Sismo, 2017.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 2. Factor Q_c de modificación de la respuesta de contenidos. Obtenido de NTC Sismo 2017.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 3. Factor de modificación de las fuerzas de diseño de diafragmas de piso R_s'. Obtenido de NTC Sismo 2023.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 4. Factor Q_c de modificación de la respuesta de contenidos. Obtenido de NTC Sismo 2023.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 5. Resumen de edificios con fallas por tensión diagonal en muros considerados como no estructurales.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 6. Resumen de edificios con fallas fuera del plano en muros considerados como no estructurales.....</i>	<i>53</i>

Índice de figuras

Figura 1. Ejemplos de elementos estructurales. Obtenido de: Earthquakes reducing the risk of nonstructural earthquake damage	4
Figura 2. Ejemplo de elementos no estructurales. obtenido de: Earthquakes reducing the risk of nonstructural earthquake damage	5
Figura 3. Ejemplo de muro diafragma. Obtenido de: https://photos.app.goo.gl/7Tkwt0aTL6HQBkU43	7
Figura 4. Ejemplo de muro de carga. Obtenido de: https://www.construyendoseguro.com/que-son-los-muros-portantes-y-cual-es-su-importancia/	7
Figura 5. Ejemplo de muro de mampostería confinada. Obtenido de: https://www.udocz.com/apuntes/47664/disenio-de-muros-de-mamposteria-1a-parte	8
Figura 6. Ejemplo de mampostería reforzada. Obtenido de: https://www.ingecivil.net/2018/08/10/la-mamposteria-reforzada/mamposteria-reforzada-1/	9
Figura 7. Ejemplo de muro no estructural dentro del marco. Obtenido de: Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería.....	10
Figura 8. Ejemplo de vista en planta de curtain walls. Recuperado de: Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería.....	11
Figura 9. Incremento de aceleraciones vs alturas de nivel. Obtenido de: Diseño sísmico de edificios.	15
Figura 10. Elementos no estructurales anclados. Obtenido de: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/ https://www.iitk.ac.in/nicee/IITK-GSDMA/NSE_002_31May2013.pdf	17
Figura 11. Diferencia entre elementos no estructurales anclados y no anclados. Obtenido de: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/ https://www.iitk.ac.in/nicee/IITK-GSDMA/NSE_002_31May2013.pdf	17
Figura 12. Desligamiento entre muro no estructural y marco. Obtenido de: NTC mampostería. Capítulo 7. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/ https://smie.com.mx/smie-2022/archivos/informacion-tecnica/normas-tecnicas-complementarias/normas-tecnicas-co	21
Figura 13. Holgura vertical entre muro no estructural y losa. Obtenido de NTC mampostería de 2017.	21
Figura 14. Ejemplo de muro fuera del plano de un marco. Obtenido de: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/ https://www.smie.org.mx/uploads/1/2022-11/normas_tecnicas_complementarias_diseno_construccion_estructuras_mamposteria_19_octubre_2020.pdf	28
Figura 15. Edificación de concreto reforzado. Obtenido de: DAMAGE TO NON-STRUCTURAL COMPONENTS AND CONTENTS IN 2010 DARFIELD EARTHQUAKE.....	30
Figura 16. Muro de dos capas o doble cara. Obtenido de: https://mail.google.com/mail/u/0/?tab=rm&ogbl#search/EEspinosaC%40ingen.unam.mx/KtbxLwGzcRHRzcf_rqsgXBMSWVvglwXTnQB?projector=1&messagePartId=0.2	32
Figura 17. Falla fuera del plano. Obtenido de: Seismic performance of non-structural elements during the 2016. Central Italy earthquake.....	32
Figura 18. Falla fuera del plano Obtenido de: Seismic performance of non-structural elements during the 2016. Central Italy earthquake.....	33
Figura 19. Zona de estudio de edificios con daños en muros no estructurales.....	37
Figura 20. Relación entre daños en muros no estructurales y número de niveles del edificio.....	38
Figura 21. Identificación del tipo sistema estructural en edificios con daños en muros no estructurales.....	39
Figura 22. Año de construcción y NTC utilizadas en su diseño en edificios con daños en muros no estructurales.....	40
Figura 23. Patologías estructurales identificadas en edificios con daños en muros no estructurales durante el sismo del 19 de septiembre de 2017 en la zona de estudio de este reporte.	41
Figura 24. Subcategorización de patología efecto de esquina.....	42
Figura 25. Subcategorización de patología planta baja débil.....	43
Figura 26. Patologías presentes en edificaciones de nivel 5.....	43
Figura 27. Patologías predominantes de las 16 edificaciones de nivel 5.....	44
Figura 28. Patologías presentes en edificaciones de nivel 6.....	45

<i>Figura 29. Patologías predominantes de las 5 edificaciones de nivel 6.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 30. Subcategorización de patología de PBD de las 5 edificaciones de nivel 6.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 31. Patologías presentes en edificaciones de nivel 7.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 32. Patologías predominantes de las 7 edificaciones de nivel 7.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 33. Patologías presentes en edificaciones de nivel 8.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 34. Patologías predominantes de las 7 edificaciones de nivel 8.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 35. Fallas en muro no estructural, estudio de casos particulares</i>	<i>50</i>
<i>Figura 36. Fallas por tensión diagonal en muros no estructurales en los edificios estudiados.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 37. Resumen de edificios con fallas fuera del plano en muros considerados como no estructurales... </i>	<i>54</i>