



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO ESTADÍSTICO DE PATOLOGÍAS EN
EDIFICACIONES Y SU INFLUENCIA EN LA
VULNERABILIDAD SÍSMICA DURANTE EL
SISMO 19S-2017**

TESIS

Que para obtener el título de

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A

JONY ZENÓN MARTÍNEZ MARTÍNEZ

DIRECTOR DE TESIS

DR. EDUARDO REINOSO ANGULO



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/093/18

Señor
JONY ZENÓN MARTÍNEZ MARTÍNEZ
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. EDUARDO REINOSO ANGULO, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

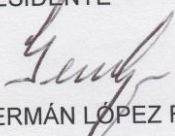
"ESTUDIO ESTADÍSTICO DE PATOLOGÍAS EN EDIFICACIONES Y SU INFLUENCIA EN LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DURANTE EL SISMO 19S-2017"

- INTRODUCCIÓN
- I. MARCO TEÓRICO
- II. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO
- III. ESTUDIO ESTADÍSTICO DE LOS DAÑOS PRESENTADOS
- IV. INFLUENCIA DE PATOLOGÍAS EN LA VULNERABILIDAD SÍSMICA
- V. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 22 de octubre del 2018.
EL PRESIDENTE


M.I. GERMÁN LÓPEZ RINCÓN

GLR/MTH*gar.

*Cree en ti mismo y todo lo que eres.
Reconoce que hay algo dentro de ti que es más
grande que cualquier obstáculo.
-Christian D. Larson*

Dedicada a:

*A mi madre, **Juana Martínez Reyes**, por todo el amor, comprensión, fuerza e inspiración que me brindas para seguir siempre adelante y afrontar los retos que me proponga.*

*A mi padre, **Darío Martínez Hernández**, por el apoyo y las enseñanzas que dejaste en mí, que para lograr algo hay que trabajar duro por ello y jamás darse por vencido.*

*A mis hermanos, **Maritza** que fuiste parte muy importante en mis estudios y sobre todo en mi evolución como adulto y como ser humano y, a **José Darío** y **Lucero**, por su apoyo.*

A todos mis amigos y aquellas personas que siempre confiaron que podría emprender este camino y lograrlo, porque de su confianza y de su fe puesta sobre mí recibo la motivación para esforzarme siempre un poco más.

A todos ustedes muchas gracias, ¡LOS AMO !

Agradecimientos

A **Dios**, por permitirme concluir esta etapa de mi vida, que a pesar de los obstáculos siempre estás conmigo.

Al **Dr. Eduardo Reinoso Angulo**, por sus comentarios y enseñanzas, por su confianza y todo el apoyo durante la realización de esta tesis y por haberme permitido colaborar con su equipo de trabajo.

A mis sinodales, **Ing. Jesús Gallegos Silva, M.I. Octavio García Domínguez, M.I. Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose y Dr. Mauro Niño** por sus comentarios que ayudaron a enriquecer el contenido de esta tesis.

Al **M.I. Luis Manuel Buendía Sánchez**, por las enseñanzas, la paciencia y la amistad que me brindaste durante todo el tiempo colaborando contigo.

Al **Instituto de Ingeniería UNAM**, por brindarme el espacio y las facilidades posibles para la realización de esta tesis.

A la **Universidad Nacional Autónoma de México** y a la **Facultad de Ingeniería** por formarme como profesionista y por las amistades y compañerismos hechos durante mi estancia en sus instalaciones.

RESUMEN

Se presenta un estudio estadístico del comportamiento mostrado durante el sismo del 19 de septiembre de 2017 en edificios de seis a ocho niveles de altura, ubicados en las colonias Hipódromo y Roma Norte, situadas en la zona de transición de la Ciudad de México. A través del estudio estadístico se propone una metodología para estimar la influencia que tienen las irregularidades en la configuración estructural, las cuales se pueden denominar como patologías estructurales, en la vulnerabilidad sísmica de los edificios. Esto se logra con una función que relaciona el daño esperado en una estructura sin la presencia de patologías (una estructura completamente regular con el daño esperado en una estructura con la presencia de una patología, según la patología que se analice. Posteriormente se obtiene una función de amplificación de daño asociada a la patología que se analiza, la cual describe el incremento en el daño esperado en una estructura con patologías respecto a una completamente regular. Por último, se discuten los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología propuesta para determinar las patologías con mayor repercusión en los daños.

ABSTRACT

A statistical study of structural behavior shown during the 19 September 2017 earthquake is presented. This study is focused on six to eight-storey high buildings located in the Hipódromo and Roma Norte neighborhoods, both located on the edge of the lakebed area of Mexico City. Through this study, a methodology to estimate the influence of irregularities in the structural configuration (structural pathologies) on the seismic vulnerability is proposed. This is achieved through a function that relates the expected damage of a structure without pathologies (completely regular) with the expected damage of a structure with one pathology, respect to the pathology analyzed. Later, a damage amplification function associated with the analyzed pathology is obtained; this function describes the expected damage increase of the structure with the pathology with respect to the vulnerability of a completely regular structure. Finally, the results are discussed in order to determine those pathologies with the grater influence in the damage.

ÍNDICE

RESUMEN.....	5
INTRODUCCIÓN	8
Antecedentes	10
Objetivos	11
Hipótesis y limitaciones	12
Organización de la tesis.....	12
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO	13
1.1 Objetivo.....	14
1.2 Daño sísmico.....	14
1.2.1 Representación del daño.....	14
1.3 Demanda sísmica	19
1.3.1 Registros sísmicos	19
1.3.2 Periodo de vibración.....	19
1.3.3 Espectros de respuesta.....	20
1.4 Vulnerabilidad sísmica.....	23
1.4.1 Generalidades	23
1.5 Patologías en las edificaciones	25
1.5.1 Irregularidad en planta	26
1.5.2 Irregularidad en elevación	27
1.5.3 Columnas cortas	27
1.5.4 Asimetría de Esquina	28
1.5.5 Cambio de rigidez	28
1.5.6 Planta baja débil	28
1.5.7 Golpeteo	29
CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	31
2.1 Objetivo.....	32
2.2 Daños observados durante el sismo 19S	32
2.3 Zona y edificios de estudio.....	33
2.4 Intensidades presentadas durante el sismo 19S	40
2.4.1 Intensidades en la zona de estudio	42
CAPÍTULO 3: ESTUDIO ESTADÍSTICO DE LOS DAÑOS EN LA ZONA DE ESTUDIO.....	45
3.1 Objetivo.....	46
3.2 Distribución de los daños	46
3.2.1 Tipo estructural	46

3.2.2 Patologías	47
3.2.3 Correlación de los daños con las demandas sísmicas.....	49
3.3 Correlación entre el daño y el nivel de las patologías.....	53
3.3.1 Planta baja débil	54
3.3.2 Irregularidad en planta	55
3.3.3 Columnas cortas	56
3.3.4 Golpeteo	57
3.4 Combinación de dos patologías.....	58
CAPÍTULO 4: INFLUENCIA DE PATOLOGÍAS EN LA VULNERABILIDAD SÍSMICA	61
4.1 Objetivo.....	62
4.2 Antecedentes	62
4.3 Metodología propuesta.....	63
4.4 Aplicación de la metodología propuesta	67
4.5 Análisis de resultados.....	77
CONCLUSIONES	82
REFERENCIAS	86

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

A 32 años del sismo de 1985, La Ciudad de México experimentó nuevamente uno de los episodios más trágicos de su historia. Un sismo con magnitud 7.1 grados en la escala de Richter tuvo lugar a solo 120 kilómetros de la Ciudad, entre los estados de Puebla y Morelos. A pesar que, después de los últimos sismos, la ingeniería mexicana pareciera estar preparada para el próximo gran terremoto gracias a los mejoramientos en las normas de diseño y construcción, el sismo del 19 de septiembre de 2017 (en esta tesis se referirá a él como el sismo 19S) evidenció que aún hay cosas que se pueden aprender.

En la Ciudad de México, después del sismo 19S, un gran número de estructuras resultaron gravemente dañadas; sin embargo, muchas otras permanecieron ilesas a pesar de, aparentemente, tener características semejantes. Entonces, ¿Qué es lo que hace que una estructura se dañe mientras que otra, con las mismas características, permanece sin daños ante la acción de un mismo sismo? ¿Qué es lo que marca la diferencia en el comportamiento sísmico?

El daño que un sismo provoca en las estructuras está relacionado principalmente con dos aspectos, la naturaleza del sismo y la capacidad que tiene la estructura para soportar la acción del sismo. El primero se refiere a las intensidades que el sismo ocasiona, es decir, las demandas a las que se someten las estructuras en términos de aceleración, desplazamiento, etc.

La Ciudad de México tiene uno de los suelos más complejos del mundo, se encuentra edificada sobre antiguos lagos, lo que conlleva a tener diferentes tipos de suelo dependiendo del espesor de los sedimentos lacustres. El suelo de la ciudad puede dividirse en tres grupos: suelo firme, suelo de transición y suelo blando (zona de lago). El tipo de suelo es un factor muy importante que interviene en las intensidades provocadas por un sismo, en terreno blando se pueden tener amplificaciones de las ondas sísmica de hasta 50 veces más, respecto al terreno firme (Cruz *et al*, 2017).

Entonces los daños pueden explicarse a partir de la ubicación de las estructuras, las demandas sísmicas serán diferentes dependiendo del tipo de suelo en que una estructura esté desplantada. Pero ¿Qué pasa con estructuras semejantes, situadas en una misma zona? ¿Por qué continúan las diferencias en los daños?

Respecto al segundo aspecto que gobierna en el daño que provoca un sismo a las estructuras, el parámetro que rige la resistencia de las estructuras son las especificaciones de diseño con las cuales el edificio fue construido. El Reglamento de Construcción del Distrito Federal ha tendido grandes cambios en los últimos 60 años, haciéndose cada vez más estricto para asegurar el buen comportamiento de los edificios (Lara, 2018). Basados en lo anterior, se espera que los edificios antiguos sean más susceptibles a sufrir daño que los edificios construidos recientes.

Por otro lado, sismos recientes alrededor del mundo han puesto de manifiesto que las prácticas constructivas y de diseño arquitectónico tienen una gran repercusión en el daño que presentan las estructuras durante estos eventos sísmicos (Tena, 2010). Estas prácticas muchas veces reciben el nombre de patologías estructurales, que son en pocas palabras, características de la configuración estructural que modifican de manera negativa el comportamiento sísmico de las edificaciones.

Basados en lo anterior, la diferencia en el daño que presentan las estructuras puede explicarse a través de las patologías que estas estructuras presenten. Por esta razón, en esta tesis se lleva a cabo un estudio estadístico de un conjunto de edificios que varían de 6 a 8 niveles, a fin de conocer cuáles son las patologías que hacen que un edificio sea más susceptible a daño respecto a otro.

Al final de esta tesis se propone una función que estima cuantitativamente el efecto de las patologías en la vulnerabilidad sísmica, a partir del estudio estadístico realizado. Esto se logra a través de una función que amplifica el daño esperado en una función de vulnerabilidad con características de diseño, es decir, a partir de una función de vulnerabilidad que no considera la presencia de patologías.

Antecedentes

El efecto de las patologías en las edificaciones ha llamado la atención de los ingenieros desde la década de los 50's, pues los sismos que se han presentado desde entonces, han dejado en evidencia que las irregularidades en la configuración de las estructuras tienen una gran influencia en el daño que estas sufren. Tena (2010) hace un recuento de las investigaciones hechas alrededor del mundo en que se ha estudiado el efecto de las patologías en el comportamiento estructural y en la vulnerabilidad sísmica de los edificios, los cuales se comentan a continuación:

- Esteva (1963) documenta los daños en Acapulco debido a los sismos de 11 y 19 de mayo de 1962, Esteva discute con detalle los importantes daños presentados en 21 estructuras del puerto de Acapulco. De los edificios estudiados por Esteva, el 71.4% de estos contaban con patologías estructurales, ya sea debido a su configuración en planta y/o elevación, o a una estructuración deficiente por cambios de rigidez y de resistencia abruptos en pisos contiguos.
- Rosenblueth y Prince (1965) hicieron un análisis de los daños en San Salvador por el sismo del 3 de mayo de 1965, en el cual destacan la torsión como uno de los causales de daño, tanto la que fue ignorada en el diseño, como la debida a la liga entre cuerpos con distintas frecuencias naturales de vibración. En la torsión que fue ignorada en el diseño, destacaron la distribución asimétrica en planta de muros de relleno y en la torsión debido a la liga entre cuerpo, resaltan las fallas producidas por no respetar las juntas de construcción.
- Esteva *et al* (1970) revisaron los daños en la ciudad de Caracas, Venezuela, luego del sismo del 29 de julio de 1967, ellos comentan que la excesiva irregularidad por esbeltez de muchos edificios fue una de las principales causas de daño estructural severo.
- Tena y Abrams (1992) destacan el mal comportamiento que exhibieron las estructuras de mampostería con sistemas de piso flexible de madera durante el sismo del 17 de octubre de 1989 en Loma Prieta, California, Estados Unidos.
- Tena (2004) hace una revisión de lo aprendido durante el sismo de 1985 en México, en la cual destaca la combinación de piso débil y torsión, donde más del 40% de los colapsos se dieron en edificios en esquina. Algunos edificios fallaron por esbeltez excesiva, que provocaron importantes efectos de segundo orden e importantes momentos de volteo.
- Orozco y Reinoso (2007) realizaron un estudio estadístico sobre los efectos que influyen en el daño sísmico de las estructuras durante el sismo de 1957 que afectó a la Ciudad de México, en el cual determinaron que, del total del inventario de estructuras con daño estructural, el 40% correspondía a edificios con asimetría de esquina, los cuales normalmente presentan problemas de torsión, debido a que los muros de colindancia son más rígidos que las fachadas. Además, Orozco y Reinoso (2007) reportan que el 50% del inventario de las estructuras dañadas poseían irregularidades en planta, las cuales también presentan problemas importantes de torsión.
- El sismo del 9 de febrero de 1971, en San Fernando, California, Estados Unidos, provocó el colapso de dos hospitales. Tena (2010) menciona que el hospital Olive View en Sylma, era una estructura compuesta por varios edificios que formaban una planta irregular. Cada edificio era de planta rectangular alargada, y el colapso de una sección del hospital por piso suave ha sido destacada mundialmente.
- El sismo del 14 de marzo de 1979 en México, conocido también como el sismo de la Ibero, provocó el colapso de algunos edificios del campus original de la Universidad Iberoamericana. Tena (2010) comenta que los edificios de la universidad estaban estructurados con base en marcos de concreto reforzado que disponían de plantas alargadas. Sin embargo, la falla se debió principalmente a la conexión excéntrica de las vigas con las columnas del marco.
- En el sismo del 3 de marzo de 1985, en Valparaíso, Chile, Tena (2010) destaca los comportamientos indeseables de muchos edificios de concreto reforzado en Viña del Mar, con base en muros por efectos de torsión, acentuados en parte por el uso de plantas irregulares y

también la esbeltez de algunas estructuras, de igual manera problemas por planta baja débil, irregularidad de masas, rigidez y resistencia.

- Tena (2010) hace un análisis de los daños ocasionados por el sismo del 17 de enero de 1995 en Kobe, Japón, el cual demostró nuevamente que las estructuras muy esbeltas y de aquellas con planta baja débil son muy vulnerables a la acción de sismos.
- En el sismo del 12 de enero de 2010 en Haití, el EERI (2010) relaciona los efectos devastadores del sismo con la baja calidad de los materiales de construcción y la ausencia en la mayoría de las estructuras colapsadas de un diseño estructural sólido, principalmente desde el punto de vista sismo resistente.
- Durante el sismo del 27 de febrero de 2010 en Maule, Chile, se presentaron daños severos e incluso colapsos en estructuras diseñadas con reglamentos sismo-resistentes modernos. Estas estructuras tenían algo en común: eran estructuras sumamente irregulares tanto en planta como en elevación (Moehle, 2010).

Estos, como muchos otros sismos recientes, ponen de manifiesto que las patologías en la configuración estructural tienen una gran influencia en la vulnerabilidad sísmica. Debido a lo anterior, muchos países, a través de su reglamento de construcción, dejan las disposiciones que sus estructuras deben de satisfacer para considerar una estructura regular a fin de aminorar los posibles daños en eventos telúricos futuros.

Algunos autores como Bonnet (2003), Herrera (2016), Rivera (2017), entre otros, estudian el efecto de las patologías en la vulnerabilidad sísmica de edificios de concreto reforzado, través de análisis no lineales de modelos estructurales propuestos por ellos

Bonnet (2003) presenta una metodología para evaluar el desempeño de edificios a partir de la amenaza sísmica del sitio y la tipología estructural de los edificios considerados. En este trabajo, Bonnet (2003) menciona que un gran porcentaje de los daños registrados después de la ocurrencia de un sismo, podrían ser evitados mediante el adecuado uso de los criterios contemplados en las normativas de diseño sismoresistente. Los edificios deben dimensionarse de tal forma que sean consistentes con el modo de deformación inelástico esperado y evitar las discontinuidades del sistema resistente de cargas laterales y verticales.

Herrera (2016) evalúa en su trabajo la vulnerabilidad y estima el daño sísmico esperado en edificios porticados de concreto reforzado, irregulares en planta, mediante métodos de análisis no lineal en una zona de alta sismicidad de Venezuela. En donde demostró que las edificaciones con entradas y salientes simétricas respecto a los dos ejes ortogonales, a pesar de ser clasificadas por las normas venezolanas como estructuras regulares, en realidad se comportan como no regulares provocando efectos de torsión y aumentando el daño presentado.

Rivera (2017) estima la vulnerabilidad de estructuras con primer piso débil a través de análisis dinámicos incrementales, llegando a la conclusión de que las estructuras con primer piso débil presentaron mayores distorsiones y por lo tanto mayores daños esperados para una misma intensidad sísmica.

Objetivos

Identificar las patologías que más influyeron en el daño observado en estructuras de losas planas de concreto de entre seis y ocho niveles durante el sismo del 19 de septiembre de 2017, ubicados en las colonias Hipódromo y Roma Norte, situadas en la zona del borde del lago de la Ciudad de México ya que estos edificios fueron los más dañados durante el sismo mencionado.

Determinar una función que describa de manera cuantitativa cómo se modifica la vulnerabilidad sísmica debido a la presencia de patologías a partir de las estadísticas obtenidas de los edificios de estudio.

Hipótesis y limitaciones

- Se considera que los edificios con mismo tipo estructural considerados en el estudio, tuvieron la misma demanda sísmica.
- La caracterización de los edificios de estudio: tipo estructural, configuración y estado de daño, se realiza mediante servidores de mapas en internet (Google Maps y Google Earth), reportes publicados de los daños y por observaciones hechas en el sitio, sin hacer una inspección por dentro de los edificios.
- El estudio del cambio en la vulnerabilidad sísmica se realiza mediante las estadísticas presentadas en el área de estudio y no mediante análisis analítico del comportamiento dinámico no lineal de las estructuras.
- Se considera que las estructuras analizadas representan a la totalidad de estructuras con características estructurales semejantes situados en suelos con características dinámicas similares.

Organización de la tesis

- **Introducción**
- **Capítulo 1.** Se presenta el marco teórico de los temas que se abordarán en el cuerpo de la tesis.
- **Capítulo 2.** Se presenta una descripción de las características del sismo del 19 de septiembre de 2017, sus consecuencias en la Ciudad de México, se presenta la zona y edificios que se estudian en esta tesis.
- **Capítulo 3.** Se presentan los resultados más relevantes del análisis estadístico realizado a lo edificios de estudio.
- **Capítulo 4.** Se propone una metodología para estimar la influencia de las patologías en la vulnerabilidad sísmica, a partir de las estadísticas obtenidas. Se presenta la aplicación de la metodología a las estructuras de losas planas de concreto, considerando las patologías más relevantes detectadas en el capítulo 3.
- **Conclusiones**
- **Referencias**

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1 Objetivo

Proporcionar al lector una síntesis sobre los conceptos teóricos a los que se hagan mención en esta tesis como son: daño sísmico, demanda sísmica, vulnerabilidad sísmica y las patologías en las edificaciones.

1.2 Daño sísmico

El daño es la degradación o destrucción causado por un fenómeno peligroso sobre las personas, bienes, etc. Desde el punto de vista estructural, generalmente se relaciona con deformaciones irreversibles (inelásticas) de los elementos de una estructura (vigas, columnas y muros), por lo tanto, cualquier variable de daño puede ser referida a una cierta cantidad de deformación (Bonnet, 2003). La necesidad y la interpretación del daño causado por los sismos surge de la necesidad de cuantificar y explicar los efectos del fenómeno sobre los diferentes tipos de estructuras existentes. Existen varios métodos para estimar el daño sísmico, ya que no existe un criterio unificado, tanto para la definición de los modelos analíticos, como para la descripción del daño en sí, principalmente debido a la gran variedad de tipos estructurales y a sus propiedades, por lo que la definición del daño en una estructura queda sujeta al autor y a la representación del daño que éste utilice.

1.2.1 Representación del daño

En la literatura es común encontrar diferentes tipos de representación del daño, que dependen tanto del modelo utilizado como de la clase de estudio que se desea realizar. Bonett (2003) describe las cuatro representaciones del daño más utilizadas:

- **Representaciones mecánicas**

Implican la definición de un modelo teórico que permita describir el comportamiento del mecanismo estructural a través de los índices de daño (el cuál se definirá más adelante). Usualmente estos índices se expresan como función de ciertos parámetros, esto es:

$$I_D = I_D(Q_i) \quad (1.1)$$

Donde I_D es el índice de daño y Q_i es el parámetro utilizado para evaluar el nivel de daño.

Los parámetros de daño pueden dividirse en dos clases principales: 1, parámetros basados en el nivel alcanzado por la demanda de un cierto recurso (deformación, resistencia, disipación de energía, etc.) y 2, parámetros basados en la degradación experimentada por ciertas variables (rigidez, frecuencia fundamental, etc.).

Una de las funciones más empleadas de este tipo de representación del daño, en estructuras de concreto reforzado, corresponde al índice propuesto por Park y Ang (1985). Este índice expresa el daño en función de la ductilidad de deformación y de la energía inelástica disipada.

- **Representaciones físicas**

Son representaciones directas que no requieren de un modelo analítico pre-establecido. Se basan en los “estados de daño”, esto es, descripciones cualitativas del daño por medio de palabras de diagnóstico (menor, sustancial, moderado, entre otras). Su inconveniente, desde el punto de vista de la interpretación del daño, radica en la ambigüedad en la definición de los estados de daño, conduciendo de esta forma a incertidumbre en las operaciones de campo a la hora de valorar los daños en una estructura mediante valores subjetivos.

- **Representaciones orientadas a pérdidas**

Requieren la definición de modelos de pérdidas que expresen el daño por medio de “relaciones de daño”, las cuales cuantifican el valor relativo de una pérdida como la relación entre el costo de reparación y el costo de reposición. Igualmente, existen también relaciones de daño funcional, que expresan la degradación de alguna función en el sistema dañado. Estas representaciones son las que se utilizan con más frecuencia debido a su relación con una especie de contexto socioeconómico.

- **Representaciones orientadas a reglas de deducción**

Se apoyan en la teoría de la inteligencia artificial para expresar el daño a través de un “estado de daño”, definido en términos lingüísticos. Es una representación muy versátil, pero, por otro lado, es bastante compleja, y su interpretación requiere de chequeos sustanciales ante casos ensayados. Hasta el momento este tipo de representación ha sido restringida a un análisis especializado o dirigidos hacia sistemas expertos.

En términos generales las representaciones de daño se pueden dividir en dos: estados continuos de daño o “índices de daño”, los cuales expresan el daño de forma cuantitativa basado en el comportamiento estructural de los materiales; y los estados discretos de daño, los cuales expresan el daño de forma cualitativa basados en la descripción del daño observado. A continuación, se muestran de manera más detallada estas representaciones de daño.

1.2.1.1 Estados continuos de daño

Mayormente conocidos como indicadores o índices de daño, son funciones matemáticas que permiten relacionar las demandas mecánicas asociadas con el nivel de deterioro que deja una acción de una determinada historia de carga (Buendía, 2016). En estas funciones usualmente se involucran una o más variables que representan la respuesta estructural, tales como: deformaciones unitarias, curvatura, rotaciones, desplazamientos, deriva de entre piso, fuerzas, energía absorbida y energía disipada, entre otras (Bonnet, 2003).

Generalmente los índices de daño están calibrados para elementos estructurales; pero existen metodologías para pasar de un índice de daño local a uno global. Un valor de índice de daño igual a uno, representa el colapso total del elemento, mientras que un valor de índice de daño igual a cero, presenta un daño nulo (Buendía, 2016).

Las dos formas más antiguas y simples de cuantificar el daño corresponden a la ductilidad y la deriva de entre piso. Entendiendo ductilidad como la capacidad de un elemento o estructura de deformarse inelásticamente sin llegar a la falla (Miramontes, 2016). El factor de ductilidad μ puede definirse en términos de rotación θ , curvatura Φ , o desplazamiento d , mediante las siguientes expresiones:

$$\mu_{\theta} = \frac{\theta_m}{\theta_y} \quad (1.2)$$

$$\mu_{\Phi} = \frac{\Phi_m}{\Phi_y} \quad (1.3)$$

$$\mu_d = \frac{d_m}{d_y} \quad (1.4)$$

Donde los subíndices m e y corresponden al valor máximo alcanzado por el elemento y al valor alcanzado en el punto de fluencia, respectivamente.

La ec. 1.4 corresponde al modelo propuesto por Newmark y Rosenblueth en 1971 para el cálculo de I_D , basado en la capacidad de deformación de los elementos. Posteriormente, Banon (1981) propone utilizar la ec. 1.3 como un índice en función de la curvatura.

En la figura 1.1 se muestra la definición de ductilidad mencionada anteriormente, en las abscisas se tiene la respuesta del elemento en términos de: rotación θ , curvatura Φ , o desplazamiento d , mientras que en las ordenadas se tiene la demanda ejercida en términos de fuerza y momento flexionante.

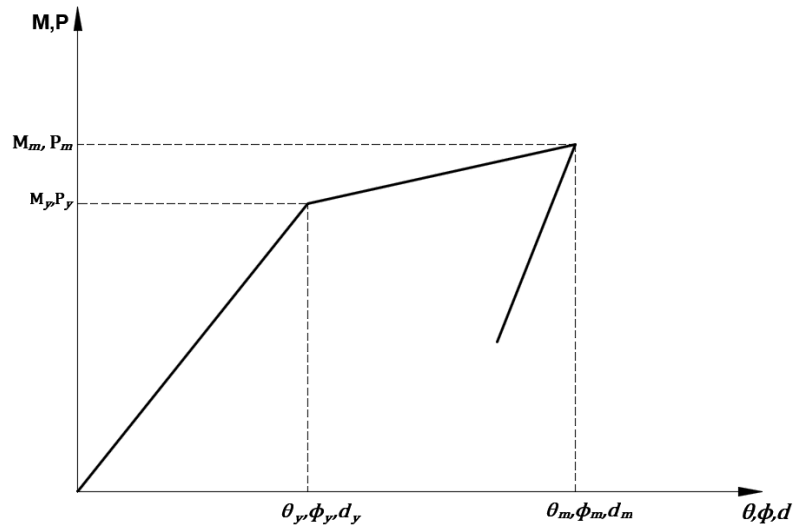


Figura 1.1 Definición de ductilidad de rotación, de curvatura y de desplazamiento (adaptada de Banon *et al.*, 1981)

El inconveniente de este tipo de modelos es que las relaciones de ductilidad no tienen en cuenta los efectos de los ciclos repetitivos ocasionados por las cargas sísmicas; sin embargo, debido a su simplicidad y fácil interpretación, continúan siendo utilizadas como parámetros críticos de diseño y evaluación estructural (Park, 1986).

Los índices de daño mencionados corresponden a los primeros modelos de daño desarrollados, su principal limitación es que no son capaces de representar el daño acumulativo en los elementos sujetos a cargas cíclicas, estos reciben el nombre de “índices no acumulativos”. Para modelar la acumulación del daño, generalmente se utiliza una formulación de fatiga de ciclos, relacionando la energía histéretica absorbida durante el sismo, estos son los índices acumulativos.

Los primeros índices acumulativos conservaron los conceptos de ductilidad y simplemente incluyeron el efecto de carga cíclica. Para ello, Banon *et al.* (1981) propone una rotación acumulada normalizada y la expresa como sigue (ec. 1.5):

$$I_D = \frac{\sum_{i=1}^n |\theta_{im} - \theta_y|}{\theta_y} \quad (1.5)$$

Donde n es el número de ciclos histéretico y θ_{im} es la rotación máxima que alcanza la sección en el ciclo histéretico i . Este indicador fue evaluado para un amplio rango de ensayos de carga cíclica, principalmente por la flexión y, en algunos casos, considerando la carga axial. Los valores obtenidos del índice I_D cerca del fallo mostraron una dispersión considerable.

En general, la ventaja principal de un índice de daño sobre los parámetros comúnmente utilizados, es que un índice de daño considera los efectos del comportamiento estructural de los elementos a evaluar. Por otro lado, la principal desventaja de los índices de daño es que algunos de sus parámetros no se encuentran lo suficientemente calibrados, y muchas de las incertidumbres que involucran los índices de daño surgen de la alta variabilidad que exhibe la capacidad de deformación de las estructuras sismo-resistentes, resultando en la asignación de deformaciones que estén por debajo de la capacidad real de la estructura. Otra fuente de incertidumbre se centra alrededor de la definición al colapso o falla, la definición de si la estructura tiene capacidad adecuada o no, se basa mucho en el juicio que tiene mucho de subjetivo (Bojórquez *et al.*, 2009).

Además de los índices de daño mencionados, existen muchos más, y no se hace mención de estos pues quedan fuera del alcance de esta tesis.

1.2.1.2 Estados discretos de daño

Un estado de daño corresponde a una descripción cualitativa de los efectos producidos por un sismo sobre los daños físicos de los elementos estructurales y no estructurales, el riesgo al que se encuentran expuestos los ocupantes de la estructura, o la funcionalidad de la estructura posterior al terremoto (Bonett, 2003). La implementación de estados discretos de daño resulta bastante útil a la hora de identificar el daño ocasionado por un sismo, cuando se evalúa un gran número de edificaciones; empero, tienen un carácter subjetivo y pueden existir discrepancias en el daño observado.

Las primeras clasificaciones de los estados de daño se basan en el daño físico observado, no obstante, se han incluido otros aspectos a partir de las lecciones aprendidas durante los últimos sismos. A continuación, se presentan algunas de las clasificaciones de daño que se han hecho hasta el momento:

i. Clasificación de acuerdo con los daños observados

Park *et al* (1987) proponen, a partir de los daños observados después de la ocurrencia de un sismo y mediante ensayos de laboratorio, cinco estados de daño:

- *Sin daño*: en el peor de los casos se producen pequeñas fisuras en el concreto.
- *Ligero*: se producen grietas en varios elementos estructurales.
- *Moderado*: agrietamiento severo y se producen algunos desprendimientos de hormigón.
- *Severo*: aplastamiento del concreto y pérdida del recubrimiento de las barras de acero de refuerzo.
- *Colapso*.

Anagnostopoulos, *et al* (1989) proponen una clasificación del daño basada en daños observados y en la disponibilidad de la estructura para ser utilizada después del sismo. Para ello, definen tres categorías, las cuales son aplicables a estructuras de concreto armado y de mampostería estructural:

- *Utilizable*: los daños son leves, lo cual permite que la estructura puede ser utilizada inmediatamente después de ocurrido el sismo.
- *Temporalmente inutilizable*: los daños estructurales varían entre moderados y severos, por lo tanto, la estructura puede estar temporalmente inutilizable.
- *Completamente inutilizable*: Los daños estructurales son severo. Se puede producir el colapso parcial o total de la estructura. La estructura no puede ser utilizada después del sismo

ii. Clasificación de acuerdo a la reparación de la estructura

Bracci *et al* (1989) describen cuatro estados de daño en función de la reparación de la estructura, para ello utilizan la siguiente categorización:

- *Sin daño o daños leves*
- *Reparable*
- *Irreparable*
- *Colapso*

A pesar de que está propuesta puede ser más difícil de aplicar desde un punto de vista práctico, es mucho más útil como una herramienta para la toma de decisiones de reforzamiento o para la planificación y la valoración económica de las actividades de reconstrucción después de ocurrido un sismo.

En la literatura es posible encontrar una amplia gama de escalas de daño, entre ellas, unas que consideran daños no estructurales, el tiempo que la estructura permanece fuera de operación y el tiempo al que se encuentren expuestos los ocupantes y los contenidos; sin embargo, estos se encuentran fuera del alcance de esta tesis. Estas escalas pueden ser encontradas en publicaciones del EERI (1994), ATC-40 y Vision 2000 committee (1995).

1.2.1.2 Relación entre los estados discretos y continuos de daño

Anteriormente se presentaron algunos índices de daño existentes para las estructuras de concreto reforzado, al igual que diferentes propuestas para clasificar el daño de acuerdo a estados de daño que describen de forma cualitativa el daño observado. En ocasiones, para evaluar la vulnerabilidad sísmica de una estructura o un tipo de estructuras es necesario establecer una relación entre los dos conceptos, ya que permite asignar un nivel de daño cuantitativo a partir del daño observado sin la necesidad de hacer modelos matemáticos que, a la hora de evaluar un gran número de estructuras, resulta bastante útil. Este parámetro será empleado en el estudio estadístico de los datos recabados.

Si bien existen varias propuestas para relacionar el índice de daño con estados de daño, el que será utilizado en esta tesis, es el propuesto por Okada y Takai (1999). Ellos proponen una relación entre diferentes escalas de daño existentes con un umbral de índice de daño equivalente, basados en los patrones de daño observados en sismos recientes. Para las estructuras de concreto reforzado, los patrones de daño se basaron en las fotografías tomadas del sismo de 1985 en México (Moriya, 1985), y la relacionan con la escala de daño propuesta en European Macro seismic earthquake (EMS-98, 1988). De esta manera Okada y Takai agrupan los daños observados en cuatro estados principales, mismos que se describen en la Tabla 1.1 y son representados de manera gráfica en la figura 1.2

Tabla 1.1 Estados de daño y su umbral de daño equivalente (Okada y Takai, 1999)

Estado de daño	Umbral de índice de daño	Descripción
Sin daño (SD)	$0 < ID \leq 0.05$	Posibles grietas pequeñas en acabados sobre elementos estructurales o en muros de relleno.
Daño moderado (Dm)	$0.05 < ID \leq 0.40$	Grietas en miembros estructurales, vigas y columnas. Grietas en muros de relleno, desprendimiento de acabados. Desprendimiento de mortero en las juntas de los muros.
Daño severo (DS)	$0.40 < ID \leq 0.60$	Grietas en columnas y formación de articulaciones en conexiones. Desprendimiento de revestimiento en elementos estructurales, pandeo del acero de refuerzo. Grades grietas en muros de relleno, falla de muros de relleno individuales.
Daño mayor (DM)	$0.60 < ID \leq 1.00$	Grandes grietas en elementos estructurales con falla a compresión del concreto. Colapso de uno o varios niveles.

ESTADOS DE DAÑO										
SIN DAÑO	DAÑO MODERADO			DAÑO SEVERO		DAÑO MAYOR				
ÍNDICE DE DAÑO										
0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0

Figura 1.2 Relación entre estados e índices de daño propuesta por Okada y Takai (1999)

1.3 Demanda sísmica

La demanda sísmica se refiere a la exigencia transmitida a una estructura por el movimiento del suelo, producto de un evento sísmico, generalmente medida en términos de aceleración, velocidad, desplazamiento o energía liberada. El nivel o intensidad de la demanda experimentada por una estructura es relativa al movimiento del suelo, es por esto que las características dinámicas del suelo durante un sismo son de cuantioso interés para la ingeniería sísmica.

1.3.1 Registros sísmicos

El conocimiento de las fuerzas de los terremotos, el análisis de sus efectos sobre las estructuras, el desarrollo de normas de construcción son algunas de las motivaciones para el estudio del comportamiento del suelo (Carreño, 1999). Uno de los parámetros de mayor interés es la aceleración del suelo, para ello son necesarios los registros sísmicos.

Los registros sísmicos son los datos de aceleración que el suelo experimenta en el tiempo, cuando un sismo se presenta. Estos valores de aceleración se obtienen mediante unos instrumentos llamados acelerógrafos y acelerómetros, que registran la aceleración del suelo en tres direcciones perpendiculares: dos horizontales y una vertical. Debido a que la variación de la aceleración es muy irregular en el tiempo, es necesario que la toma de datos se realice en intervalos muy pequeños, utilizándose generalmente valores de 0.01 segundos.

Existen tres factores que influyen en los registros sísmicos: fuente sísmica, trayectoria y efectos locales (Acevedo, 2012). La fuente sísmica se refiere a la liberación de energía; la trayectoria se refiere a la ruta específica que recorre la energía liberada en la fuente sísmica. Los efectos locales se refieren a las características del suelo en donde se tomen los registros sísmicos.

1.3.2 Periodo de vibración

El movimiento del suelo provocado por la acción de un fenómeno sísmico, es en esencia una vibración del suelo, esta vibración se transmitirá hacia la estructura a través de sus soportes (columnas y muros) y por consecuencia, las principales masas de la estructura se moverán o desplazarán de forma relativa al suelo (Martínez, 2013); es decir, la estructura también comenzará a vibrar. La estructura describirá un movimiento oscilatorio que progresivamente se irá amortiguando hasta desaparecer, recuperando la posición de reposo. El periodo de vibración de una estructura es el

tiempo requerido para completar un ciclo de vibración, es decir, el tiempo que transcurre desde que la estructura comienza su movimiento desde un extremo hasta que recupera la posición en que se inició el movimiento.

El comportamiento de una estructura durante un sismo fuerte dependerá no solo de las características dinámicas del sismo, sino también de las propiedades dinámicas de la estructura, siendo el periodo de vibración uno de los más importantes (Hatzigeorgiou *et al*, 2013). El periodo de vibración de una estructura dependerá fundamentalmente de la distribución de masas y de su rigidez (Asteris *et al*, 2017).

Existen varios “modos” o “formas” en los que una estructura puede vibrar frente a una acción sísmica. Cada modo tiene una deformada característica y un periodo de vibración asociado diferente. Estos modos de vibrar se ejemplifican en la figura 1.3.

El modo 1 mostrado en la figura 1.3 coincide con el modo natural o propio de la estructura, es decir, aquel al que se supone que responderá de forma prioritaria.

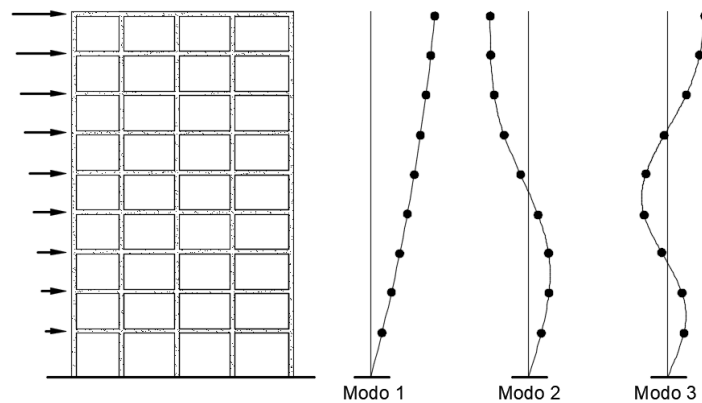


Figura 1.3 Principales modos de vibración de una estructura

El periodo de vibración de una estructura puede determinarse a través de un modelo estructural, usando softwares de análisis estructural, o a través de las ecuaciones de dinámica estructural. En ambos casos, se consideran los factores antes mencionados, masa y rigidez, con estos métodos el resultado será bastante preciso.

Otra forma es usando fórmulas empíricas, producto de la observación del comportamiento de estructuras reales o modelos a escala ante la acción de fenómeno sísmico. Estas fórmulas solo son válidas para el periodo fundamental y tiene la limitación de que los resultados son aceptables únicamente para las estructuras con características estructurales semejantes al modelo usado. No obstante, debido a su simplicidad son una útil herramienta para estimar las demandas sísmicas aproximadas de una estructura.

En la mayoría de los casos, las formulas empíricas usadas para determinar el periodo fundamental de una estructura, están en función de la altura total del edificio, o por su número de niveles, y tienen la forma de la ec. 1.6 (Asteris *et al*, 2017).

$$T = C \times H^x \quad (1.6)$$

Donde T es el periodo fundamental de la estructura, H es la altura total de la estructura, y C y x son parámetros que dependen del tipo estructural.

1.3.3 Espectros de respuesta

Un parámetro comúnmente utilizado para estimar la intensidad de un sismo es la aceleración máxima del suelo (PGA), pues con esta es posible observar el comportamiento del suelo en diferentes sitios.

Empero, la aceleración máxima del suelo no es necesariamente lo que pone en riesgo la estabilidad de las estructuras. Aún para un mismo movimiento del suelo, las estructuras tendrán diferentes demandas en función, principalmente, de su altura.

La demanda sísmica generalmente es representada a través de un espectro de respuesta, el cual podemos definir como un gráfico de la respuesta máxima que produce una acción dinámica determinada en un oscilador de un grado de libertad. Esta respuesta es usualmente expresada en términos de desplazamiento, velocidad o aceleración. En estos gráficos, se representa en las abscisas el periodo de vibración del oscilador, o su frecuencia, y en las ordenadas la respuesta máxima calculada para distintos factores de amortiguamiento.

En ingeniería estructural la herramienta más utilizada para estimar las demandas sísmicas es la aceleración espectral a partir de los registros sísmicos. Dichos valores brindan una idea de las aceleraciones que pudieron experimentar las estructuras, con diferentes alturas, a nivel de sus azoteas.

El concepto de espectro ha ganado una amplia aceptación como herramienta de la dinámica estructural, es por ello que se han desarrollado varios tipos de espectros, los cuales presentan características diferentes y se utilizan con diferentes objetivos (Crisafulli *et al*, 2002). A continuación, se hará mención de los dos espectros de respuesta más comunes.

Espectro de respuesta elástica

Representan parámetros de respuesta máxima para un registro sísmico determinado y se tienen diferentes espectros de respuesta dependiente de los factores de amortiguamiento que se consideren. Se utilizan fundamentalmente para estudiar las características del sismo y su efecto sobre las estructuras. Las curvas de los espectros de respuesta representan variaciones bruscas, con numerosos picos y valles, que resultan de la complejidad del registro de aceleraciones del sismo. En la figura 1.4 se muestra el gráfico indicativo del procedimiento empleado para la obtención de un espectro de respuesta elástica.

Es conveniente analizar las consideraciones para determinar los valores límites de los espectros de respuesta. En el caso de una estructura muy rígida, su periodo de vibración será cercano a cero, siendo el desplazamiento relativo prácticamente nulo, debido a que no hay deformaciones internas por la gran rigidez de la estructura, el desplazamiento y aceleración total tenderán a ser los mismos del terreno; es decir, la aceleración total máxima (S_a) será prácticamente igual a la aceleración máxima del suelo (PGA).

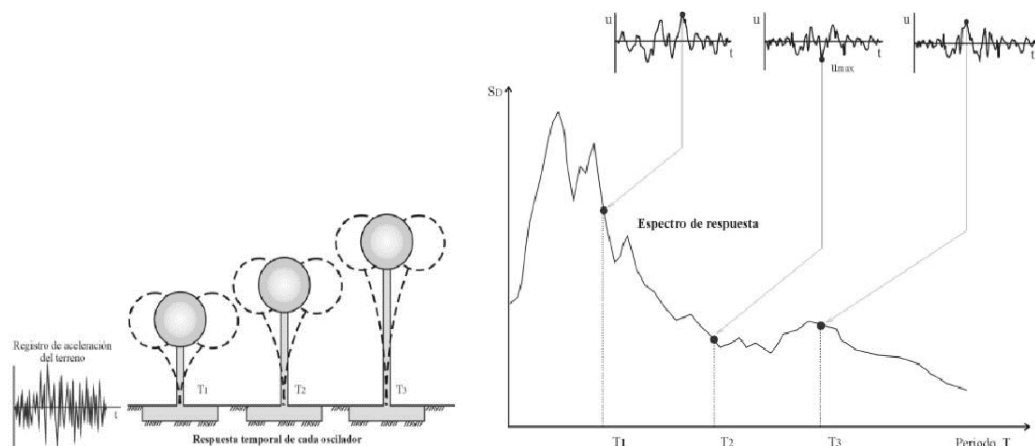


Figura 1.4 Gráfico indicativo del método de determinación del espectro de respuesta (Crisafulli *et al*, 2002).

Por el otro lado, en el caso de una estructura muy flexible, cuyo periodo de vibración tiende al infinito, el desplazamiento total es nulo porque la masa no vibra por la acción del terremoto; sin embargo, el desplazamiento relativo tiende a ser igual al desplazamiento máximo del terreno, por lo tanto, el desplazamiento y la velocidad espectral tienden a los valores máximos del suelo. Desde el

punto de vista práctico, los casos de estructuras muy flexibles son aquellas con periodos de vibración mayores a 10 o 15 segundos. Lo anterior se muestra gráficamente en la figura 1.5, que representa el comportamiento de una estructura muy rígida y otro muy flexible.

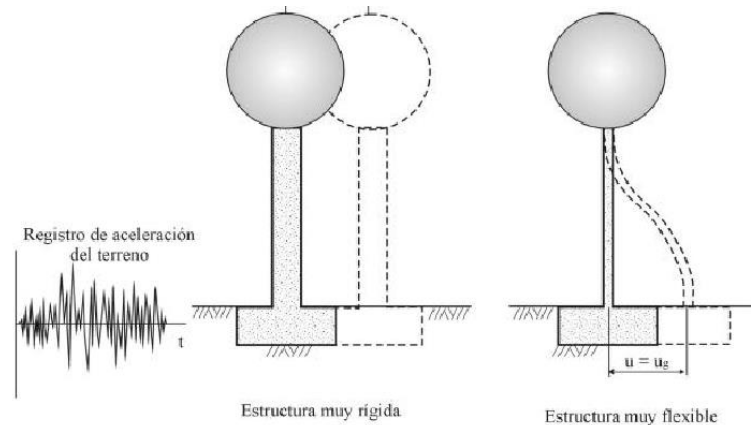


Figura 1.5 Comportamiento de una estructura muy rígida y muy flexible (Crisafulli *et al*, 2002).

Son muchos los factores que pueden influir significativamente en las curvas espectrales, entre las más importantes están el factor de amortiguamiento y el tipo de suelo. Se tendrán diferentes espectros de respuesta en función del sitio donde se haya tomado el registro sísmico y del factor de amortiguamiento considerado. En conclusión, una misma estructura (un periodo de vibración determinado) experimentará diferentes niveles de demanda en función de las características del terreno donde se ubique y de su capacidad para disipar la energía.

Los espectros de respuesta condensan la compleja respuesta dinámica en un parámetro clave: la respuesta máxima; empero, omiten información importante dado que los efectos del sismo sobre la estructura dependen no solo de la respuesta máxima, sino también de la duración del movimiento y el número de ciclos con demanda significativa de desplazamientos.

Espectros de respuesta inelástica

Son similares a los elásticos, pero en este caso el oscilador de un grado de libertad exhibe comportamiento no-lineal, es decir, que la estructura puede experimentar deformaciones en rango plástico por acción del terremoto, en un espectro de respuesta inelástico se considera implícitamente la presencia de daño.

En los espectros de respuesta inelásticos generalmente el parámetro de interés es la resistencia de fluencia (o de deformación de fluencia) necesaria para limitar el nivel de desempeño a un valor específico (Buendía, 2016). En la figura 1.6 se muestra un ejemplo de espectro de respuesta inelástico cuyo parámetro de respuesta es la ductilidad, dicho espectro muestra las ordenadas espectrales en términos de aceleración asociadas a un nivel de ductilidad específico.

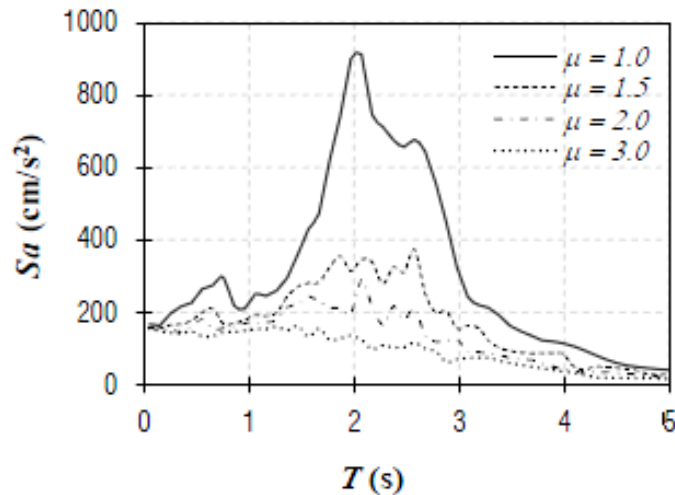


Figura 1.6 Ejemplo de espectros de respuesta inelásticos de ductilidad constante (Buendía, 2016).

1.4 Vulnerabilidad sísmica

La Real Academia Española define vulnerabilidad como: la cualidad de poder ser herido o recibir lesión, física o moralmente. En el tema de ingeniería estructural, la vulnerabilidad de las estructuras está asociada a un tipo de amenaza, que puede ser por fenómenos sísmicos, volcánicos, meteorológicos, etc. Para el caso del fenómeno sísmico, la vulnerabilidad de un estructura o grupo de estructuras se define como el grado de daño que resulta por la ocurrencia de un movimiento sísmico del terreno de una intensidad dada (Caicedo *et al*, 1994).

El concepto de vulnerabilidad sísmica es indispensable en estudios sobre riesgo sísmico y para la mitigación de desastres por terremotos (Bonnet, 2003).

1.4.1 Generalidades

Con el fin de representar matemáticamente esta vulnerabilidad, varios investigadores alrededor del mundo han desarrollado expresiones que describen de forma continua el daño que puede sufrir una estructura en función de la intensidad del fenómeno sísmico, estas expresiones reciben el nombre de “funciones de vulnerabilidad”, donde el daño esperado suele evaluarse entre 0 (sin daño) y 1 (pérdida o destrucción total de la estructura) y la intensidad expresada por valores de algún parámetro físico, como puede ser, la aceleración máxima del suelo (Peak ground acceleration, PGA), o más comúnmente usada por los ingenieros civiles, la pseudo aceleración espectral (S_a).

La representación gráfica de estas funciones recibe el nombre de “curva de vulnerabilidad”, esta relaciona el valor esperado del daño con la intensidad del fenómeno perturbador. En la figura 1.7 se muestra de manera ilustrativa una curva de vulnerabilidad sísmica. Las curvas de vulnerabilidad tienen, en general, la forma característica de una S, donde el daño esperado es poco para intensidades bajas, a medida que la intensidad incrementa el daño esperado también lo hace hasta llegar al colapso o pérdida total de la estructura.

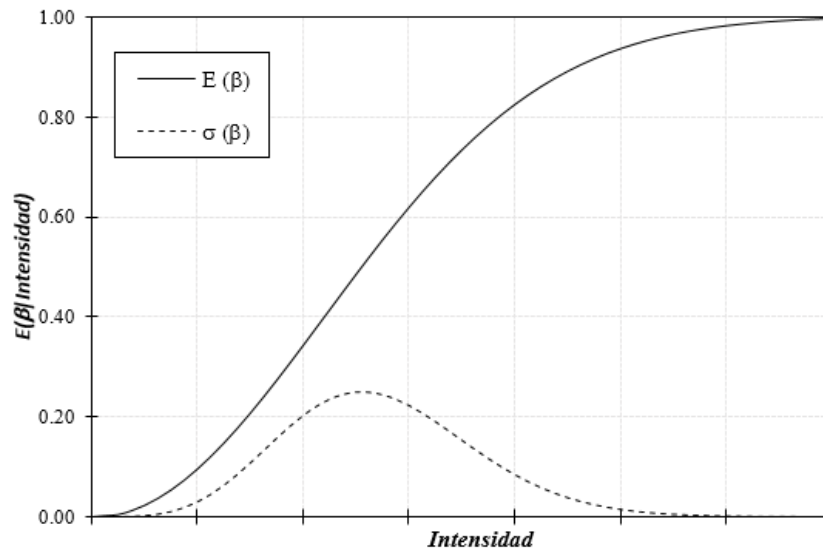


Figura 1.7 Ejemplo de una curva de vulnerabilidad sísmica (Elaboración propia)

La vulnerabilidad sísmica es una característica intrínseca de las estructuras, dependiente sus características físicas y estructurales de diseño (Barbat, 1998), por lo que cada tipo de estructura tiene su propia función de vulnerabilidad y varía en la misma forma en que su comportamiento estructural lo hace. Existen cuatro métodos para determinar las funciones y curvas de vulnerabilidad sísmica de las estructuras, los cuales se presentan a continuación.

Métodos empíricos

Los métodos empíricos se basan en la opinión de expertos en análisis, diseño y patología estructural; la estimación de la vulnerabilidad se obtiene a través de expresiones sencillas que involucran un parámetro cuantificador que relaciona la medida de intensidad con el daño esperado. Tienen la ventaja de la simplicidad involucrada para evaluar un gran número de estructuras rápidamente a través de un procedimiento de reconocimiento rápido, pero presentan desventajas, tales como que es necesario consultar a un gran número de expertos en el tema y debido a esto se crea una gran subjetividad en los resultados.

Métodos analíticos

Los métodos analíticos nacen a través del estudio teórico de la mecánica de materiales y el análisis estructural de un modelo numérico para estimar el comportamiento de las estructuras ante cargas laterales. Dichos modelos analíticos pueden ser muy simples o muy complejos dependiendo del nivel de detalle y tiempo disponible que para el modelado. Una vez definido el modelo, se deberá precisar el modelo de comportamiento que mejor se adecue al sistema estructural analizado, para después estimar la respuesta estructural. Tienen la ventaja de ser la solución más adecuada para poder definir la vulnerabilidad de una estructura, bajo diversos niveles de demanda, aun cuando esta no haya ocurrido. Tienen la desventaja de que se necesita un tiempo computacional considerable, el manejo de los datos deberá ser muy cuidadoso, además deberá obtener una parametrización adecuada para las características estructurales que más influyan en la respuesta se tomen en cuenta.

Métodos experimentales

Las curvas de vulnerabilidad se obtienen a través de la respuesta estructural medida de modelos de tamaño real o a escala de una estructura o edificación determinada sometida a movimientos en su base dentro de un ambiente totalmente controlado. Estos métodos implícitamente, requieren una serie de simplificaciones impuestas por el modelo y los patrones de carga utilizados en el modelo para simular una acción sísmica. Se pueden realizar dos tipos de ensayo que están basados en el tipo de carga aplicada al modelo: 1) carga monótona creciente mediante actuadores de carga o desplazamiento y 2) carga cíclica reversible mediante el uso de una mesa vibradora y registros

sísmicos. Tienen la ventaja de que los datos obtenidos reflejan lo que se presenta en la realidad; no obstante, presentan algunas desventajas tales como: el costo para la realización del proyecto, el rango de error que tienen los encargados de realizar la prueba es pequeño, existe una gran cantidad de personal involucrado, el tiempo de preparación del proyecto puede ser muy largo, se limita a solo la estructura de estudio, entre otros.

Métodos estadísticos

Se realizan mediante la observación de daños en estructuras después de la ocurrencia de un movimiento sísmico real. Para aplicar estos métodos, las estructuras deben ser clasificadas por su tipología. Tienen la ventaja de que representan fielmente los daños ocurridos a estructuras que hayan sido expuestas al fenómeno perturbador, pero tiene la desventaja de no tener datos para todos los eventos y todas las posibles intensidades de ocurrencia, además de que los datos más relevantes se obtienen ante eventos de muy poca frecuencia. Estos métodos la mayoría de las veces son usados para la calibración de los resultados obtenidos por otros métodos.

Como se mencionó anteriormente, la forma más adecuada de determinar una función de vulnerabilidad es a través de métodos analíticos, pues no se cuentan con datos suficientes para emplear los métodos estadísticos. Miranda (1999) y Ordaz (2000) presentan una expresión (ec. 1.7) que permite conocer el daño esperado, medida en términos de la Relación Media de Daño, RMD, que es la relación entre el costo esperado de reparación y el costo de remplazo de la estructura. La ec. 1.7 estima el RMD en una estructura en función de la intensidad sísmica y se expresa como sigue:

$$E(\beta|\gamma_i) = 1 - \exp \left[\ln 0.5 \left(\frac{\gamma_i}{\gamma_0} \right)^\varepsilon \right] \quad (1.7)$$

Donde β es la pérdida, γ_i y γ_0 son los parámetros de vulnerabilidad estructural que depende de la tipología estructural y el año de construcción y $E(\cdot)$ es el valor esperado. Por definición β es la relación entre el costo de la reparación y el costo total del edificio, un valor entre 0 y 1.

El parámetro empleado para estimar el nivel de daño en una estructura es la deriva máxima de entre piso, la cual se define como la relación entre el desplazamiento relativo entre dos niveles continuos dividido entre la altura del entrepiso. Existe un número importante de estudios que concluyen que este parámetro de la respuesta estructural es el que mejor se correlaciona con daño estructural (Bertero *et al*, 1991; Moehle, 1996; Miranda, 1997; Priestley, 1997; Sozen, 1997). Utilizando la aceleración espectral es posible determinar la deriva máxima no lineal de la siguiente forma (Miranda, 1997):

$$\gamma_i = \frac{\beta_1 \beta_2 \beta_3 \beta_4 (\eta N^\rho)^2}{4\pi^2 N h} S_a(T) \quad (1.8)$$

Donde β_1 es la relación entre el desplazamiento lateral máximo en el nivel superior de la estructura y el desplazamiento espectral, considerando un comportamiento elástico lineal. β_2 es la relación entre la distorsión máxima entre pisos y la distorsión global de la estructura, la cual se define como el desplazamiento lateral máximo en el nivel superior dividido entre la altura total; β_3 es la relación entre el desplazamiento máximo lateral inelástico y el desplazamiento máximo del modelo elástico; β_4 es la relación entre los factores β_2 elástico e inelástico; ρ y η son los factores para estimar el periodo fundamental de la estructura a partir del número de niveles, N ; h es la altura de cada entrepiso, que depende del tipo estructural, la localización geográfica y el año de construcción, $S_a(T)$ es la aceleración espectral que depende del periodo fundamental de vibración de la estructura, el amortiguamiento estructural y la amenaza del sitio.

1.5 Patologías en las edificaciones

La Real Academia Española (RAE) define la palabra patología como la parte de la medicina que estudia las enfermedades, sus síntomas y causas. En el área de la construcción, la patología se refiere al estudio de los problemas constructivos que derivan en lesiones de los edificios (Poves, 2015). En esta tesis se entiende como una patología, a aquella característica de la configuración de una

estructura que modifica su comportamiento estructural de manera negativa que muchas veces ni siquiera se consideró dentro del análisis ni diseño, resultando en daños físicos durante la acción de un sismo.

La vulnerabilidad de las estructuras suele reflejarse a través de las patologías que estas poseen, ocasionando múltiples efectos, desde pequeños daños y molestias para sus ocupantes, hasta grandes fallas que pueden ocasionar el colapso de la edificación (CIGIR, 2009). La diversidad de las patologías que se pueden manifestar en una estructura es muy grande, para entenderlas mejor, las patologías se pueden dividir según su causa de origen. De acuerdo con esto, el CIGIR (2009) clasifica las patologías en tres grupos:

Causadas por defectos

Son aquellas relacionadas con las características intrínsecas de la estructura, son los efectos que surgen en la edificación producto de un mal diseño, una errada configuración estructural, una construcción mal elaborada, o un empleo de materiales deficientes o inapropiados para la obra. Estas patologías pueden ser evitadas con la intervención de personal capacitado y honrado durante la elaboración y ejecución del proyecto. Los defectos en la edificación, puede traducirse en altas vulnerabilidades, dejando la estructura expuesta a sufrir daños y deterioros de grandes magnitudes.

Causadas por modificaciones

Son aquellas causadas por la modificación de las estructuras, obligando a soportar un peso superior al que fue concebido inicialmente (sobrecarga), retirando muros estructurales para aumentar la capacidad de espacio o para permitir la entrada de luz (ventanas). Estas patologías se pueden ser evitadas respetando los criterios de diseño.

Causadas por deterioro

Al transcurrir el tiempo, las estructuras van presentado manifestaciones producto de la exposición al medio ambiente (ciclos continuos de lluvia y sol), contacto con sustancias químicas presentes en el agua, en el aire, en el entorno, que hacen que la estructura se debilita continuamente. Por tal motivo es importante un adecuado y correcto mantenimiento.

Diversos estudios realizados por diferentes entidades del sector de la construcción, han concluido que los daños que surgen en las edificaciones se deben, en mayor medida, a los defectos durante las fases de diseño y construcción del proyecto. Debido a lo anterior, en esta tesis se dará un enfoque en la influencia que tienen estas patologías en la vulnerabilidad sísmica. A continuación, se presentan las más relevantes.

1.5.1 Irregularidad en planta

Se considera irregularidad en planta cuando se presenta al menos una de las siguientes condiciones:

- Existe, ya sea desde el punto de vista estructural o arquitectónico, la distribución asimétrica de los elementos y de la masa de la estructura provocando que el centro de masa y el centro de torsión no coincidan; esto durante un sismo induce efectos de torsión, causando mayores desplazamientos y concentración de esfuerzos en las zonas de cambio de sección (GDF, 2004; Orozco, 2007).
- La relación de largo a ancho de la base es mayor a 2.5 (GDF, 2004); en edificios muy alargados, la mayor flexibilidad y la menor capacidad de los sistemas de piso, trabajando como diafragmas horizontales, pueden disminuir la eficiencia de los sistemas verticales, y aumentar la incertidumbre sobre los resultados e introducir nuevos modos de falla (Tena, 2010).
- La estructura presenta entradas y salientes, la planta está compuesta de alas orientadas en diferentes direcciones (formas en H, U, L). Esto puede ocasionar deflexiones en los sistemas de piso con lo que se incurre en situaciones semejantes en los edificios alargados, y disminuye la eficiencia para resistir torsiones (Arnold *et al*, 1986). La solución corrientemente adoptada consiste en la introducción de juntas de dilatación sísmica, estas juntas permiten que cada bloque tenga su propio movimiento sin estar atado al resto del edificio (Dowrick, 1984).

- La estructura presenta aberturas; esto puede disminuir la efectividad de los diafragmas horizontales o inducir excentricidades cuya validación sea complicada (Tena, 2010).

1.5.2 Irregularidad en elevación

Se considera irregularidad en elevación cuando se presenta al menos una de las siguientes condiciones:

- La relación entre la altura y la dimensión menor de la base es mayor que 2.5 (NTC-S, 2004); a medida que crece la esbeltez de un edificio se incrementan los momentos de volteo, lo que trae consigo mayor importancia de los efectos $P-\Delta$, deformaciones importantes en los pisos intermedios y problemas con la cimentación (Tena *et al*, 2005, Tena, 2010).
- El área de alguno de los entresijos es mayor que 110% o menor que 70% del área del piso inmediato inferior (NTC-S, 2004); los cambios bruscos de geometría en elevación producen amplificación dinámica de los desplazamientos en los pisos superiores coloquialmente conocido como “chicoteo” (Tena, 2010).

Arnold *et al* (1986) ejemplifican las irregularidades en planta y en elevación, mismas que se muestran en la figura 1.8.

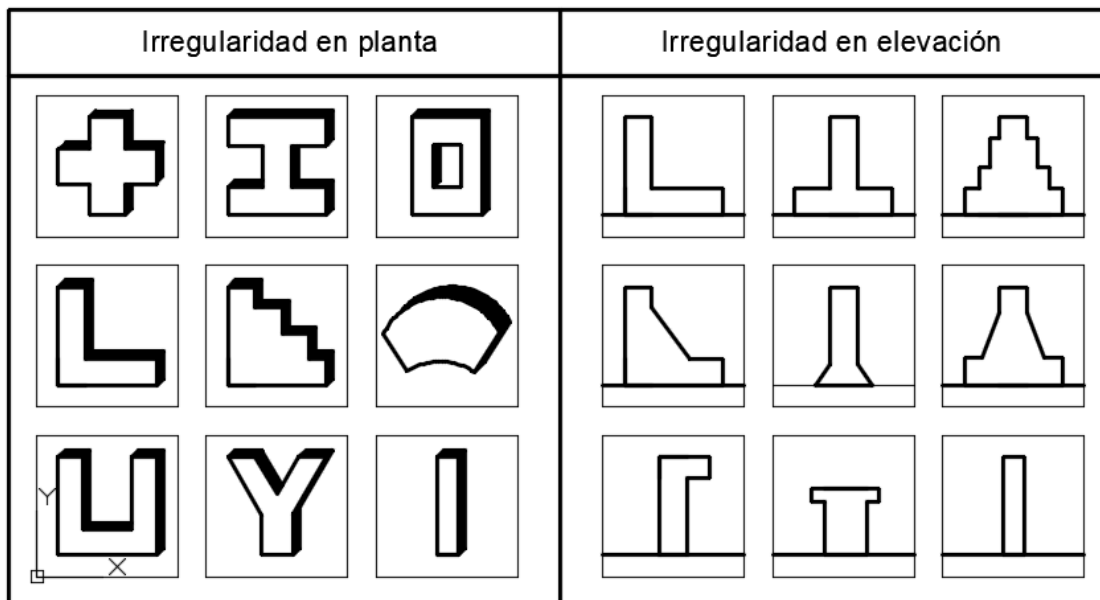


Figura 1.8 Ejemplos de irregularidad en planta y en elevación (Arnold *et al*, 1986)

1.5.3 Columnas cortas

Se considera una columna corta cuando una columna, originalmente concebida con altura igual a la altura de entrespiso, se ve limitada en su desplazamiento lateral por algún elemento rígido (generalmente muros de mampostería), reduciendo su altura. Cuando la altura de la columna se reduce, se concentran los esfuerzos de cortante, superando la demanda para la cual fue diseñada. La ductilidad también puede afectarse, al convertir elementos flexibles a elementos rígidos de falla frágil. El efecto de columna corta es nocivo, no solo ante sollicitaciones de origen sísmico, sino ante cualquier acción que implique desplazamiento horizontal relativo entre la base y el tope de la columna (Beauperthuy, 2016).

Su severidad radica, no solo en la persecución sobre el miembro afectado, sino más bien en los efectos globales sobre el sistema. Las columnas cortas absorben prácticamente todo el cortante que impone el diafragma mientras que el resto de las columnas prácticamente no reaccionan hasta que las primeras fallan prematuramente, lo que inicia mecanismos de reacción en cadena (Beauperthuy, 2016). En la figura 1.9 se muestra un ejemplo de columnas cortas.

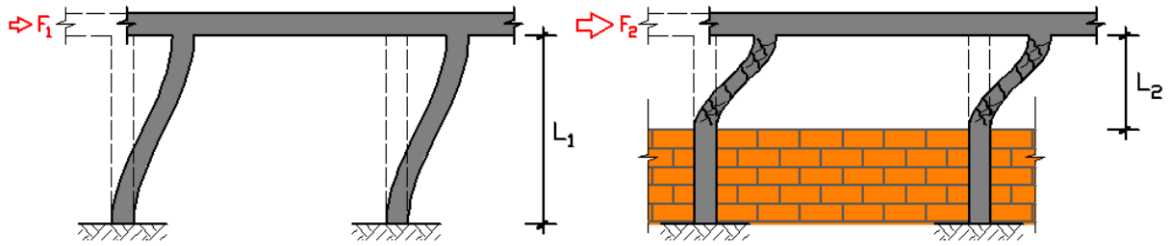


Figura 1.9 Ejemplo de columnas cortas (Beauperthuy, 2016)

1.5.4 Asimetría de Esquina

Se considera que una estructura tiene la patología de asimetría de esquina cuando está localizada en esquina con dos fachadas y los muros colindantes con las edificaciones vecinas son más resistentes y rígidos. Durante un sismo fuerte, la diferencia de rigidez entre fachadas y muros colindantes produce efectos de torsión y desplazamientos muy diferentes en los elementos de la estructura causando daños graves (Orozco, 2007). En la figura 1.10 se ejemplifica un edificio con asimetría de esquina.

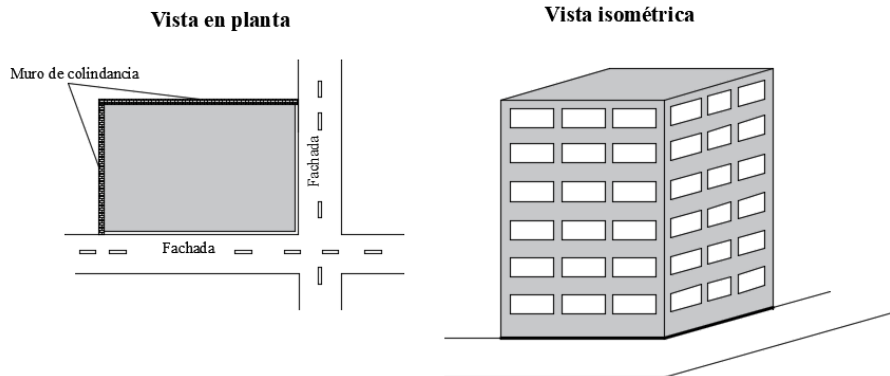


Figura 1.10 Ejemplo de asimetría de esquina (Elaboración propia)

1.5.5 Cambio de rigidez

Se presenta cuando hay una discontinuidad significativa de rigidez entre la estructura vertical de un piso y el resto de la estructura. Esta discontinuidad se puede presentar debido a que un piso es significativamente más alto que el resto o un piso abierto que soporta muros estructurales o no estructurales pesados; esta situación es más grave cuando el muro superior es de cortante y actúa como elemento principal resistente de la fuerza lateral. El problema básico de estas variaciones de cambio de rigidez es que la mayor parte de las fuerzas sísmicas de un edificio, y cualquier deformación estructural consecuentemente, tendrán a concentrarse en el piso más débil o en el punto de discontinuidad, en lugar de distribirse de manera más uniforme entre todos los pisos (Arnold *et al*, 1986). En la figura 1.11a se ejemplifica un edificio con cambios de rigidez.

1.5.6 Planta baja débil

Es un caso específico de cambios de rigidez, en el cual no todos los elementos estructurales verticales se proyectan hacia la cimentación, sino que algunos terminan en el segundo piso para aumentar los espacios en la planta baja. Esta condición crea una trayectoria discontinua que produce un cambio abrupto de resistencia y rigidez en el punto de cambio. En la figura 1.11b se ejemplifica un edificio con planta baja débil.

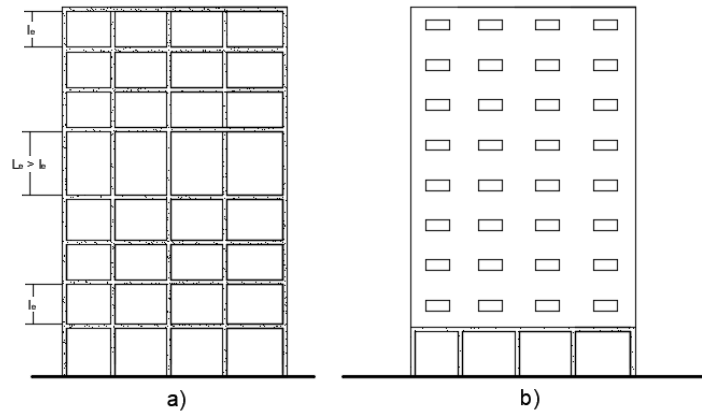


Figura 1.11 a) Ejemplo de cambio de rigidez y b) Ejemplo planta baja débil (Elaboración propia)

1.5.7 Golpeteo

El efecto de golpeteo se presenta cuando la distancia entre dos edificios adyacentes no es suficiente para evitar el impacto entre ellos al momento de desplazarse cuando un sismo fuerte se presenta. Esta distancia estará en función de dos temas: la altura del edificio y su rigidez, ya que, entre más alto sea el edificio y menos rigidez posea, mayor espacio necesitará para desplazarse sin golpear al edificio vecino.

Existen varios tipos de golpeteo, según la altura de los edificios y la coincidencia de las losas. En la figura 1.12 se muestran algunos tipos de, a) golpeteo entre edificios de la misma altura y losas colineales, b) edificios de diferente altura y losas colineales, c) edificios con misma altura, pero losas no colineales y d) edificios de alturas diferentes y losas no colineales. Intervienen otros factores en el fenómeno de golpeteo además de los antes mencionados, como pueden ser: el tipo estructural, la configuración en planta y en elevación, hundimientos, etc. Pero estos dos, altura y colinealidad de losas, son los más fáciles reconocer y aportan una herramienta útil para la clasificación rápida del tipo de golpeteo.

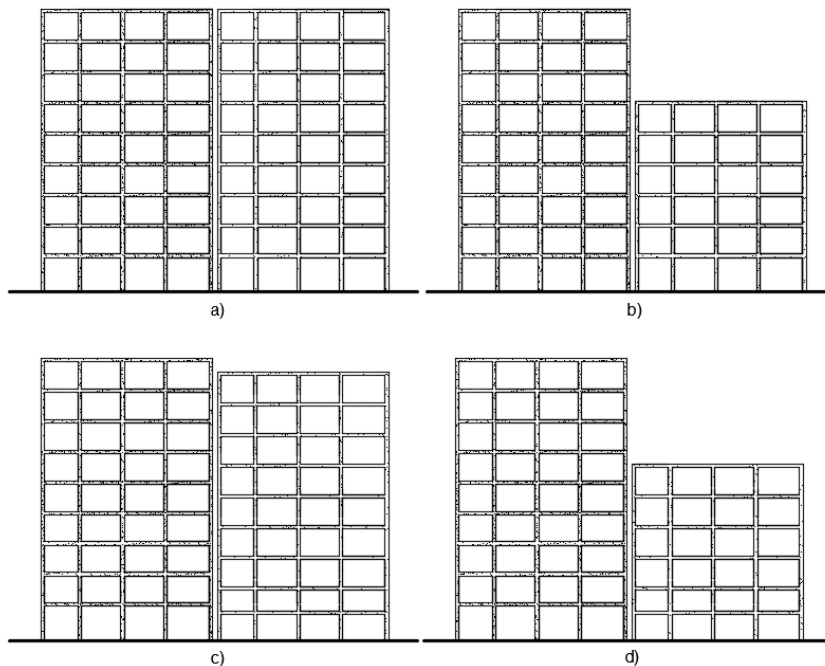


Figura 1.12 Ejemplos de diferentes tipos de golpeteo (Elaboración propia)

En la planificación de una nueva estructura es necesario tener una cuenta que una de las mayores causas de daño en edificaciones han sido las patologías. De cualquier forma, dada la naturaleza errática de los sismos, así como la posibilidad de que se exceda el nivel de diseño, es aconsejable evitar el planteamiento de configuraciones riesgosas, independientemente del grado de sofisticación que sea posible en el análisis de cada caso (OPS, 2000).

Existen muchas otras patologías que pueden estar presentes en las estructuras (hundimientos, sobrecarga, etc.). En esta tesis se analizarán las presentadas anteriormente por su sencillez para ser identificadas desde servidores de mapas en internet (Google Maps y Google Earth) y porque se ha observado que son las que más inciden en el daño sísmico.

CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

CAPÍTULO 2

DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1 Objetivo

Mostrar una breve descripción del sismo del 19 de septiembre de 2017 y las secuelas de este en la Ciudad de México, así como mostrar la zona y las estructuras que se analizarán en esta tesis.

2.2 Daños observados durante el sismo 19S

El día 19 de septiembre de 2017 a las 13:14:40 horas del centro de México, el Servicio Sismológico Nacional reportó un sismo con magnitud 7.1 grados en la escala de Richter. El epicentro del sismo fue localizado en el límite estatal entre los estados de Puebla y Morelos, a 12 Km al sureste de Axochiapan, Morelos y a 120 Km de la Ciudad de México (SSN, 2017), transmitiéndose rápidamente a la capital del país.

Es insólito que dos sismos en el mismo día, pero con 32 años de diferencia, marcarán la historia de una nación. Comparado con el sismo de 1985, el de 2017 liberó 32 veces menos energía sísmica que el primero; sin embargo, en 1985, el epicentro fue muy lejano (a más de 400 km de la ciudad), mientras que el de 7.1 ocurrió apenas a 120 km al sur de la ciudad, lo que provocó que el movimiento del suelo fuese muy violento y responsable de la devastación suscitada. La intensidad del sismo de 2017 se reflejó en un saldo de 228 muertos y más de 50 edificios que tuvieron que ser demolidos, solo en la Ciudad de México (SEGOB, 2017).

La Ciudad de México está edificada sobre sedimentos blandos de los antiguos lagos que ahí existieron. Estos sedimentos provocan una enorme amplificación de las ondas sísmicas. La amplificación de las ondas con periodos cercanos a 2.0 segundos, característico de algunas partes de la zona de lago, puede llegar a ser 50 veces mayor que un sitio de suelo firme de la Ciudad de México (Cruz *et al*, 2017).

La figura 2.1 muestra el mapa de la Ciudad de México con los daños en estructuras registrados y el periodo natural de vibración del suelo. El periodo del suelo es una característica que refleja el potencial de amplificación del suelo blando de la Ciudad de México. Como se puede observar en la figura 2.1, los daños se concentraron en los sitios con un periodo del suelo de 0.6 a 1.2 segundos, que se ilustra con tonos amarillos, esta zona corresponde a la zona de transición del valle de México, según las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Sismo y el Reglamento de Construcción del Distrito Federal (GDF, 2004). Tal como lo muestra el mapa, las zonas donde se concentraron los daños son las delegaciones Benito Juárez y Cuauhtémoc.

Desde el punto de vista de las demandas experimentadas por las estructuras, en términos de aceleración espectral, las mayores aceleraciones se presentaron en la zona de transición, en edificios de 4 a 10 niveles. Esto confirma la correlación que hay entre los daños presentados, con su ubicación geográfica y su altura, la mayoría de los daños se encuentran al oeste de la cuenca sedimentaria, en la zona centro de la Ciudad (véase figura 2.1), sobre la zona de transición y parte del suelo blando, muy cerca de su límite poniente.

En resumen, el sismo del 19 de septiembre de 2017 se caracterizó por movimientos muy violentos del suelo, provocados por la cercanía del epicentro y por la amplificación de las ondas sísmicas debido al suelo blando de la Ciudad.

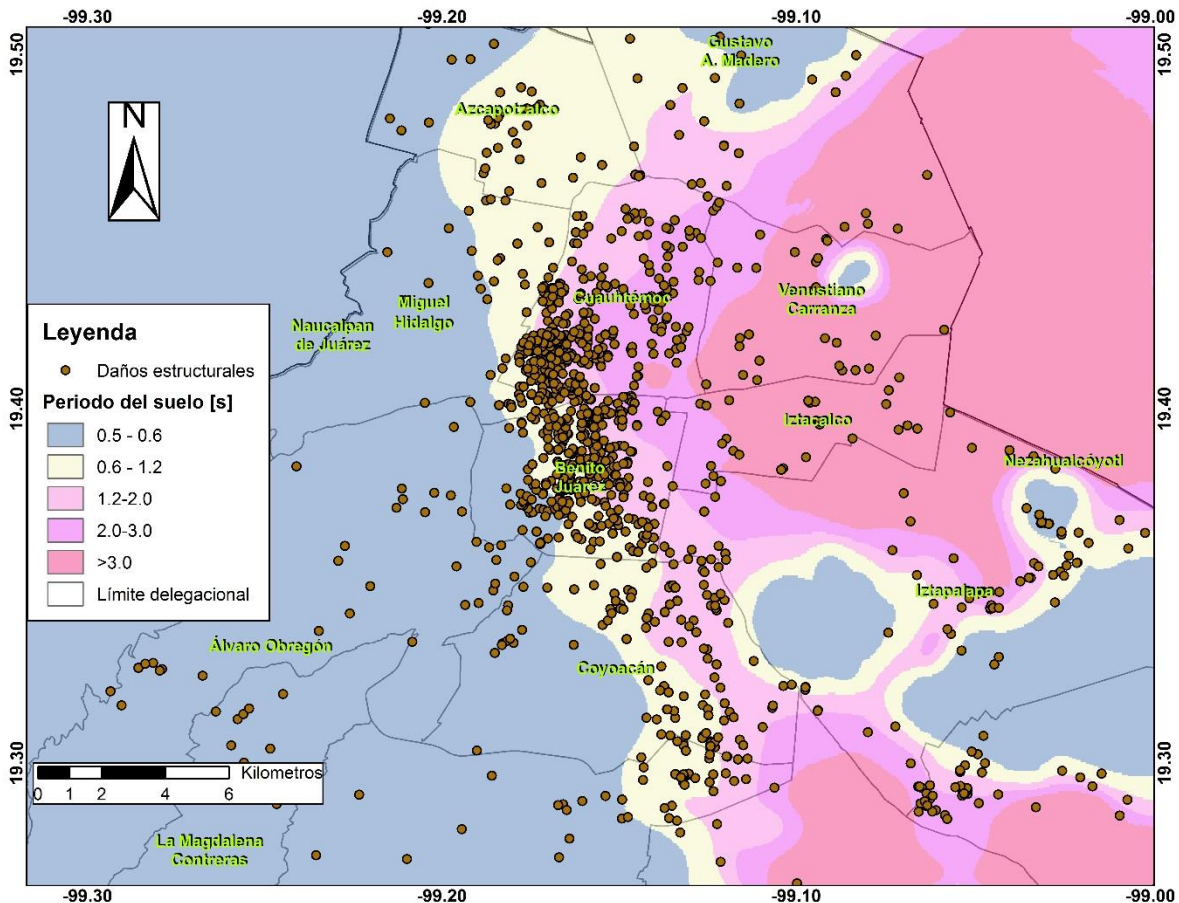


Figura 2.1 Localización de daños estructurales y periodo natural del suelo (Elaboración propia con datos del II-UNAM)

2.3 Zona y edificios de estudio

La delegación Cuauhtémoc fue una de la más afectadas por el sismo 19S, tan solo en esta delegación se tuvieron 16 edificios colapsados, parcial o totalmente. Entre los inmuebles colapsados en esta zona, uno de los más significativos fue el edificio ubicado en Álvaro Obregón 286, donde se tuvo un total de 49 personas fallecidas (Excélsior, 2017). Es por esta razón que surge la necesidad de encontrar la razón de su colapso e identificar las características que lo hacían más susceptible a dañarse respecto a otras estructuras. Para atender a lo anterior es necesaria una comparación entre estructuras, para identificar estas características agravantes de daño y así poder tomar acciones que nos permitan reducir los daños en eventos sísmicos futuros.

Álvaro Obregón 286 es un edificio designado para el uso de oficinas, construido en 1958 a base de columnas y losas planas de concreto y de 7 niveles de altura. Por el uso del inmueble y debido a la hora en que se suscitó el sismo, el lugar se encontraba lleno por el personal que ahí laboraba, provocando la muerte de 49 personas, mientras otras 28 fueron rescatadas con vida. Varios periodistas (Sandoval, 2017; Páramo, 2017; Pulso, 2018) asocian el colapso de la estructura a supuestas modificaciones hechas para ampliar la capacidad de espacio; sin embargo, no se ha comprobado físicamente este hecho.

La figura 2.2a corresponde a este edificio antes del sismo, en esta imagen se puede observar que la separación con sus colindancias, tanto izquierda como derecha, era casi nula. Esto dio pie al golpeteo entre las estructuras, ocasionando el colapso del edificio ubicado en el número 286 de Álvaro Obregón y el daño severo del edificio con el número 284 (a la izquierda), ambos edificios tuvieron que ser demolidos. En la figura 2.2b se muestra el edificio después del sismo, donde observando detenidamente los escombros, el piso a partir del cual sucedió el colapso y el daño que presenta el edificio con el número 284, se puede inferir que el edificio con el número 286, al desplazarse

lateralmente, sufrió de golpeteo con las dos edificaciones adyacentes; el golpeteo simultáneo fue, si bien no la única, la causa predominante en el colapso.

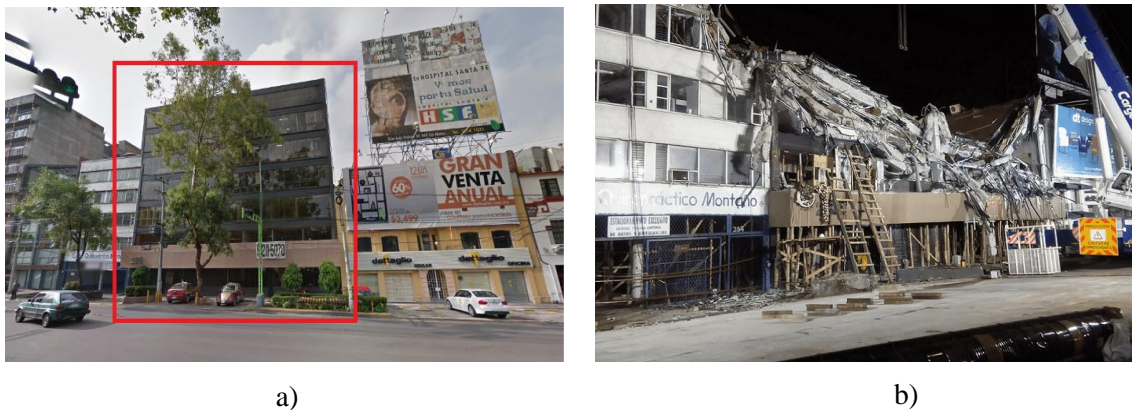


Figura 2.2 Edificio Álvaro Obregón 286: a) antes del sismo y b) después del sismo (Google Maps y El big Data, 2017)

Para encontrar las propiedades que hacían a este edificio más vulnerable respecto a los demás es necesario realizar una comparación entre estructuras con características semejantes y encontrar las diferencias que pudieron influir en el daño. Esta comparación, que se presenta más adelante, se limitó a edificios de seis a ocho niveles de altura, (más-menos un nivel del edificio principal), en las que las demandas sísmicas experimentadas se esperan que hayan sido muy parecidas, por lo menos en los edificios con mismo tipo estructural. Si la demanda en los edificios fue casi la misma, la única diferencia radica en la configuración estructural de estos. De esta manera se logran exponer más fácilmente las condiciones de la configuración que amplifican la vulnerabilidad estructural.

Acotada la comparación a edificios de seis a ocho niveles de altura, lo siguiente fue seleccionar un área para la recaudación de información. El área de búsqueda de edificios se limitó a un círculo de 300 metros de radio, tomando como centro el edificio principal (Álvaro Obregón 286). Este círculo contempla las colonias Roma Norte e Hipódromo de la delegación Cuauhtémoc. Al tener un área relativamente pequeña para realizar el estudio, se disminuyen las probabilidades de que las aceleraciones del suelo hayan sido diferentes y, de nuevo, que las demandas sísmicas sean semejantes.

Al terminar la búsqueda de edificios en la zona considerada, se contó con un total de 63 estructuras, las cuales poseen diferentes sistemas estructurales y en las cuales se observaron diferentes niveles de daño. La zona de estudio se ilustra en la figura 2.3, en esta figura se muestran la ubicación de los daños estructurales registrados durante el sismo, la delegación Cuauhtémoc dividida en colonias y el periodo del suelo del sitio, para disminuir la probabilidad de que el comportamiento del suelo sea diferentes, ya que como se observó en el capítulo anterior, las máximas aceleraciones espectrales se presentan en periodos cercanos al periodo del suelo.

En la figura 2.3 se puede observar como en las colonias Condesa, Roma Norte, Roma Sur e Hipódromo se presentaron mayor número de daños que en el resto de la delegación. Estas colonias se encuentran justamente a la zona límite del lago. Los daños mostrados en la figura 2.3 son todos los registrados, sin importar el tipo estructural ni el número de niveles, por lo que, no todos los edificios mostrados en este mapa fueron considerados para el estudio.

Para esta tesis, el daño observado en los edificios de estudio se clasificó de acuerdo con la escala propuesta por Okada y Takai (1999), la cual relaciona directamente un estado de daño (estados discretos de daño) con un umbral de daño equivalente (estados continuos de daño), la clasificación propuesta por estos autores se muestra en la Tabla 1.1. De esta manera el daño observado en las estructuras analizadas se agrupó en cuatro estados principales de daño: Sin daños (SD), Daño moderado (Dm), daño severo (DS) y daño mayor (DM), con esta discretización se podrá realizar el estudio estadístico posterior, a partir del estado de daño observado en los edificios.

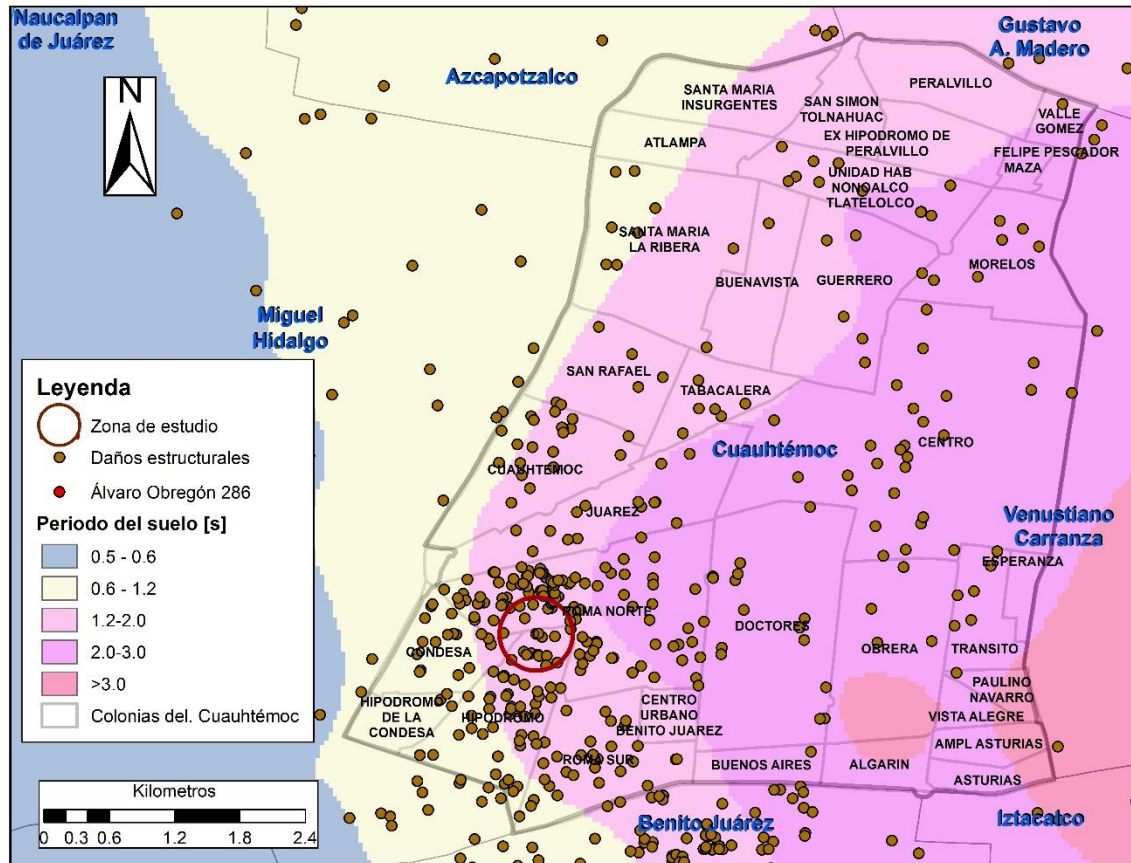


Figura 2.3 Daños en la delegación Cuauhtémoc, zonificación sísmica y zona de estudio (Elaboración propia con datos del II-UNAM)

También se asignó un índice de daño a cada edificio, el índice de daño asignado a cada edificio corresponde al valor medio del umbral de daño en el estado correspondiente, esto es: 0.025 para el estado “Sin daño”; 0.20 para el estado “Daño moderado”; 0.5 para el estado “Daño severo”; y 0.95 para el estado “Daño mayor”. Las estructuras que presentaron daños mayores tuvieron que ser demolidas, es decir, la pérdida fue total, por esta razón el índice de daño asignado no es un valor medio del umbral de daño, sino 0.95 que corresponde básicamente a la pérdida total del inmueble. La asignación de un índice de daño ayuda a tener una idea aproximada del daño, no obstante, el daño en cada estructura fue distinto. Con esta información se podrá hacer una relación entre el daño presentado en los edificios de estudio y la demanda estimada de los mismos, y de esta manera realizar el análisis estadístico.

La diferencia en el comportamiento estructural y, por ende, en el nivel de daño que presenta un edificio respecto a otro ante la acción de un sismo, se puede atribuir en buena parte a la configuración de la estructura. La configuración se define como el tamaño, la forma del edificio y la situación de los elementos estructurales y no estructurales que pueden influir en el comportamiento estructural (Arnold y Reitherman, 1987). Dentro de la configuración de las estructuras podemos encontrar las patologías que se mostraron en el capítulo anterior. En esta tesis se estudiarán las patologías mostradas en la Tabla 2.1; en esta tabla también se muestran las abreviaturas de las patologías que se utilizarán en el resto del documento. En la Tabla 2.1 solo se muestra la patología como “Golpeteo”; sin embargo, al momento de obtener la información se analizó el golpeteo en ambos sentidos, derecho e izquierdo.

Tabla 2.1 Patologías y sus abreviaturas

Patología	Abreviaturas a utilizar
Asimetría de Esquina	Es
Planta baja débil	PBD
Irregularidad en elevación	Irre Ele
Irregularidad en planta	Irre Plan
Columnas cortas	Col cort
Golpeteo	Golp
Cambio de rigidez en elevación	C. Rig Ele
Daños previos	D. previos

Cabe precisar que tanto el daño observado como la configuración de los edificios de estudio se obtuvieron mediante servidores de mapas en internet (Google Maps y Google Earth), reportes publicados de los daños y por observaciones hechas en el sitio. En todos los casos, la información disponible se encontraba limitada a lo observable desde la calle; es decir, no se hicieron inspecciones dentro de los edificios ni tampoco se cuentan con planos de los mismos. Por lo que pueden existir diferencias entre lo reportado en esta tesis y lo que realmente tienen las estructuras.

Además de lo antes descrito, se buscó también el año de construcción de los edificios, el uso que se tenía de estos y el sistema estructural con el que fueron construidos. Toda esta información se encuentra compilada en la Tabla 2. 2. En la figura 2,4 se muestra un mapa con la ubicación de los edificios considerados para el estudio, identificados por el ID asignado y clasificados por el estado de daño observado.

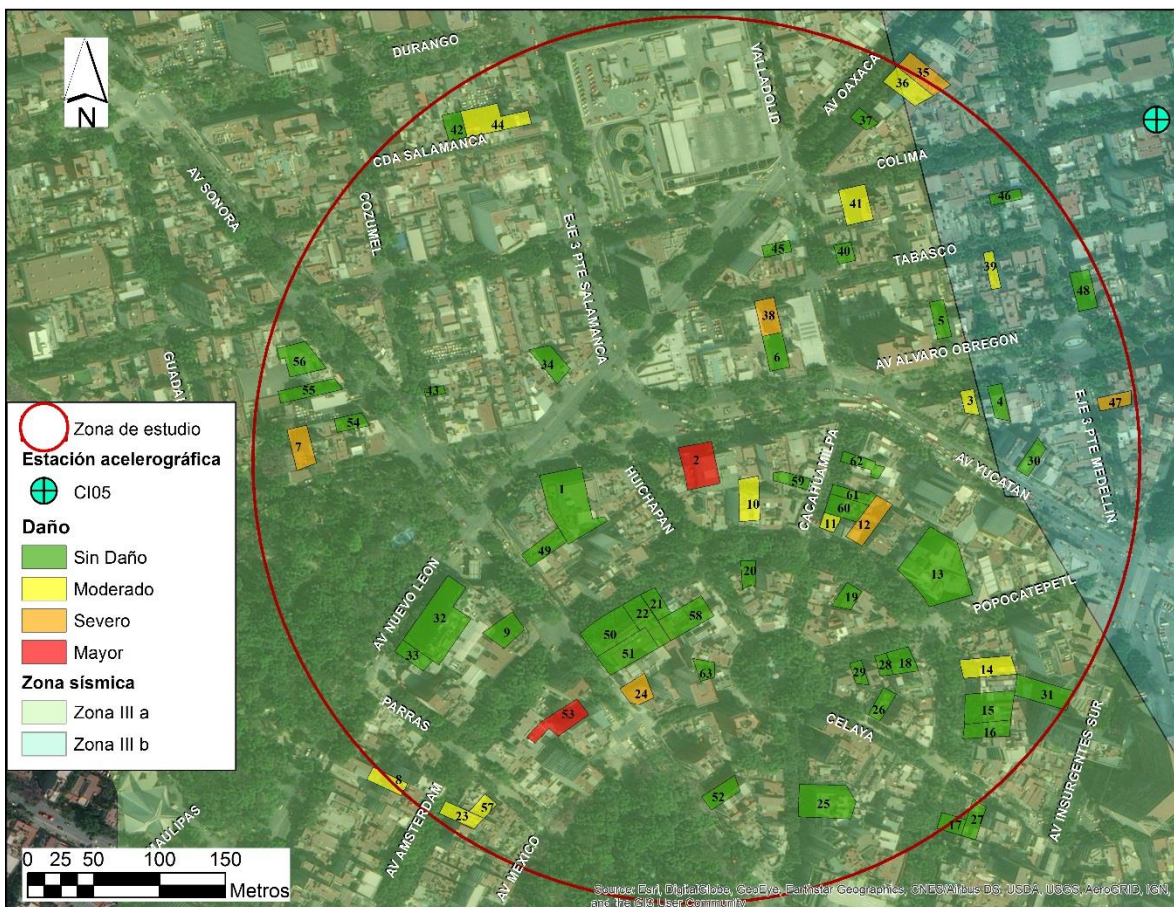


Figura 2.4 Edificios de estudio clasificados por estado de daño (elaboración propia con datos recabados en campo y del II-UNAM)

Tabla 2.2 Descripción de los edificios de estudio

ID N°	Dirección		# Niveles	Año de construcción	Tipo estructural	Estado de daño	Índice de daño	Asimetría de Esquina	Planta baja débil	Irregularidad en elevación	Irregularidad en planta	Columnas cortas	Daños previos	Cambio de rigidez	Posible Golpeteo Izq.	Posible Golpeteo Der.
	Calle	No.														
1	Álvaro Obregón	302	6	1966	EM	SD	0.025	No	No	M	No	No	No	No	No	No
2	Álvaro Obregón	286	7	1958	LP	DM	0.95	No	No	No	No	No	No	No	F	F
3	Álvaro Obregón	250	8	1982	MC	Dm	0.20	No	No	No	F	No	No	No	No	I
4	Álvaro Obregón	242	6	1976	LP	SD	0.025	No	No	No	No	No	No	No	No	No
5	Álvaro Obregón	255	7	2014	EM	SD	0.025	No	No	No	No	No	No	No	No	No
6	Álvaro Obregón	273	6	1998	LP	SD	0.025	No	No	No	No	No	No	Si	No	No
7	Parque España	21	8	1983	MC	DS	0.50	No	M	No	M	No	No	No	No	No
8	Ámsterdam	79	7	1974	MC	Dm	0.20	No	M	No	M	No	No	No	No	No
9	Ámsterdam	55	6	1979	EM	SD	0.025	M	M	No	No	No	No	No	No	No
10	Ámsterdam	27	7	1972	LP	Dm	0.20	No	No	No	M	No	No	No	No	F
11	Ámsterdam	21	8	1976	MC	Dm	0.20	M	M	No	M	No	No	No	No	I
12	Ámsterdam	15	8	1979	LP	DS	0.50	No	M	No	F	No	No	Si	No	No
13	Ámsterdam	1	6	2006	MC	SD	0.025	No	No	No	F	No	No	No	No	No
14	Ámsterdam	319	6	1979	MC	Dm	0.20	No	F	No	No	No	No	No	No	No
15	Ámsterdam	315	7	2006	EM	SD	0.025	No	No	No	M	No	No	No	No	No
16	Ámsterdam	311	7	2006	EM	SD	0.025	No	No	No	M	No	No	No	No	F
17	Ámsterdam	299	6	2015	EM	SD	0.025	No	No	No	No	No	No	No	No	No
18	Ámsterdam	322	7	1986	EM	SD	0.025	M	M	No	F	40	No	No	No	No
19	Ámsterdam	12	6	1975	LP	SD	0.025	No	No	No	No	No	No	No	No	No
20	Ámsterdam	28	7	1935	MC	SD	0.025	No	No	No	No	No	No	No	No	No
21	Ámsterdam	42	6	2012	LP	SD	0.025	No	No	No	No	No	No	No	No	No
22	Ámsterdam	46	6	1982	MC	SD	0.025	No	No	F	No	No	No	No	No	No
23	Ámsterdam	80	6	1957	LP	Dm	0.20	No	M	No	No	40	No	No	No	I
24	Av. México	11	8	1966	LP	DS	0.50	F	M	No	F	35	No	No	No	I
25	Av. México	195	6	2006	MC	SD	0.025	No	No	No	No	No	No	No	No	No
26	Celaya	21	8	1964	MC	SD	0.025	No	F	No	No	No	No	No	No	No
27	Celaya	8	6	2016	EM	SD	0.025	No	No	No	M	No	No	Si	No	No
28	Popocatépetl	26	6	1993	MC	SD	0.025	No	No	M	M	No	No	No	No	No
29	Popocatépetl	30	6	1994	MC	SD	0.025	No	No	M	No	45	No	No	F	No
30	Yucatán	24	7	2016	MA	SD	0.025	No	No	No	No	No	No	No	No	I
31	Insurgentes Sur	299	8	1960	LP	SD	0.025	No	No	No	No	No	No	No	No	No
32	Nuevo León	18	8	2006	MC	SD	0.025	No	No	No	F	No	No	No	No	No
33	Nuevo León	22	6	1991	MC	SD	0.00	No	No	No	No	No	No	Si	No	No
34	Oaxaca	129	7	1998	MC	SD	0.00	No	No	No	No	No	No	No	No	No
35	Oaxaca	80	7	1993	MC	DS	0.50	No	No	No	No	No	Si	No	No	No
36	Oaxaca	86	7	1987	MC	Dm	0.20	No	No	No	No	No	No	No	No	No
37	Oaxaca	92	6	1988	MC	SD	0.025	No	No	No	M	No	No	No	No	No
38	Tabasco	324	8	1980	LP	DS	0.50	No	M	No	M	50	No	No	No	No
39	Tabasco	294	6	1963	MC	Dm	0.20	No	M	No	No	50	No	Si	No	I
40	Tabasco	313	6	1970	MC	SD	0.025	No	No	No	No	No	No	No	No	No

Tabla 2.2 Descripción de los edificios de estudio (continuación)

ID N ^o	Dirección		# Niveles	Año de construcción	Tipo estructural	Estado de daño	Índice de daño	Asimetría de Esquina	Planta baja débil	Irregularidad en elevación	Irregularidad en planta	Columnas cortas	Daños previos	Cambio de rigidez	Posible Golpeteo Izq.	Posible Golpeteo Der.
	Calle	No.														
41	Colima	340	8	1980	LP	Dm	0.20	No	No	No	M	No	No	No	No	No
42	Cda. Salamanca	7	6	1966	LP	SD	0.025	No	No	No	No	No	No	No	No	No
43	Cozumel	88	6	2001	MA	SD	0.025	No	No	No	M	No	No	No	F	No
44	Salamanca	73	7	2005	EM	Dm	0.20	No	M	No	M	No	No	No	No	No
45	Valladolid	97	6	1971	MC	SD	0.025	No	No	No	No	50	No	No	No	No
46	Medellín	79	6	1971	MC	SD	0.025	No	No	M	No	No	No	No	No	No
47	Medellín	104	8	1981	MC	DS	0.50	No	M	No	No	65	No	Si	No	No
48	Medellín	94	6	1994	EM	SD	0.025	M	No	F	No	No	No	No	No	No
49	Sonora	134	6	1964	MC	SD	0.025	No	No	No	M	40	No	No	No	No
50	Sonora	144	7	2005	EM	SD	0.025	M	No	No	No	No	No	No	No	No
51	Sonora	148	7	1978	LP	SD	0.025	No	No	No	M	No	No	No	No	No
52	Sonora	170	7	1950	LP	SD	0.025	No	No	No	No	No	No	No	No	No
53	Sonora	149	8	1973	LP	DM	0.95	No	No	No	F	60	No	Si	F	F
54	Sonora	119	7	1974	MC	SD	0.025	No	No	No	M	20	No	No	No	No
55	Sonora	113	6	2013	EM	SD	0.025	No	No	M	M	No	No	No	No	No
56	Sonora	105	7	2006	MA	SD	0.025	No	No	F	F	No	No	No	No	No
57	Parras	8	6	1960	LP	Dm	0.20	No	No	No	No	No	No	No	No	F
58	Huichapan	21A	6	2015	MA	SD	0.025	No	No	M	No	No	No	No	No	No
59	Cacahuamilpa	11	6	2002	MA	SD	0.025	No	M	M	No	No	No	Si	No	No
60	Cacahuamilpa	14	6	1976	EM	SD	0.025	No	M	No	F	No	No	No	No	No
61	Cacahuamilpa	12	6	1958	EM	SD	0.025	No	M	No	F	No	No	No	No	No
62	Cacahuamilpa	6	6	2015	MC	SD	0.025	No	No	No	No	No	No	No	No	No
63	Plaza Popocatepetl	47	6	2008	EM	SD	0.025	F	No	No	No	No	No	No	No	No

Como se puede observar en la Tabla 2.2, los sistemas estructurales de los edificios de estudio se clasificaron en cinco diferentes grupos, de acuerdo las características que comparten. Estos tipos estructurales se describen a continuación:

- **Marcos de acero (MA).** Estructuras a base de columnas y vigas de acero.
- **Estructuras Mixtas (EM).** Estructuras con una combinación de sistemas estructurales, ej. Columnas de concreto y vigas de acero, marcos y muros de concreto, marcos de concreto y muros de mampostería confinada, etc.
- **Marcos de concreto (MC).** Estructuras a base de columnas y vigas de concreto
- **Losas planas de concreto (LP).** Estructuras a base de losas planas de concreto, soportadas por columnas de concreto o por muros de mampostería.

De igual manera, las patologías presentes en los edificios se dividieron en cuatro posibles categorías, según el nivel de las mismas:

- **Poco (P)**
- **Moderado (M)**
- **Fuerte (F)**
- **Intenso (I)**

Las patologías de asimetría de esquina, planta baja débil, irregularidad en planta e irregularidad en elevación, solo tienen dos categorías posibles: Moderado o Fuerte; mientras que la patología de golpeteo tiene cuatro categorías posibles: Poco, Moderado, Fuerte e Intenso. Por otro lado, para las patologías de daños previos y cambio de rigidez, solo se muestra su presencia (Si o No). La definición de la subcategorización de cada patología se mostrará más adelante.

En la figura 2.4 cada estado de daño está representado por un color: rojo para los daños mayores (colapsos), naranja para los daños severos, amarillo para los daños moderados y verde para los daños nulos. En la figura 2.4 también se muestra la estación acelerográfica más cercana (marcador círculo verde turmalina), con la cual es posible estimar de manera aproximada la demanda sísmica experimentada por los edificios de estudio durante el sismo. Se muestran también las zonas geotécnicas de acuerdo con el reglamento de construcción del Distrito Federal (GDF, 2004), la mayoría de los edificios en estudio se encuentran en la zona III-a, y otros pocos en la zona III-b, la primera zona (III-a) se caracteriza por una menor profundidad de los sedimentos lacustres, por lo que bien puede considerarse como una extensión de la zona de transición (zona II).

A simple vista, se puede apreciar que los daños nulos (Sin daño) fueron superiores en número a todos los demás estados de daño, seguidos por los daños moderados, severos y finalmente los daños mayores. También hay que recordar que existen daños que no se muestran en el mapa puesto que, estos daños, no corresponden a los edificios de estudio.

Como se puede observar en la figura 2.4, no existe una relación entre la ubicación de los edificios y su nivel de daño, lo que brinda mayor soporte a la suposición de que la aceleración del suelo fue la misma en toda la zona de estudio. Con lo anterior se puede afirmar que la diferencia en el comportamiento de las estructuras corresponde a su configuración (a las patologías que estas posean) y a la edad, o los criterios con los cuales fueron diseñados.

Dentro de los edificios considerados para el estudio se tuvieron dos estructuras con daños mayores, como se puede apreciar en la figura anterior. Estos edificios tuvieron que ser demolidos, estos edificios son: el edificio 2 de la Tabla 2.2 (Álvaro Obregón 286), del cual ya se han comentado antes, y el edificio 53 (Sonora 149).

El edificio ubicado en Sonora 149 es un edificio de ocho niveles de altura, construido en 1973 a base de columnas y losas planas de concreto, con uso mixto, habitacional y de oficinas. El daño de esta estructura se presentó en el sexto nivel, donde las columnas fallaron y se provocó el colapso de este piso. El colapso parcial de la estructura provocó la muerte de una persona.

La figura 2.5 muestra imágenes del inmueble antes y después del sismo. Como se puede observar en la figura 2.5b, el edificio tenía un cambio de rigidez en elevación, pues en los cinco primeros niveles las columnas se encontraban unidas completamente por muros en una de sus fachadas laterales, pero a partir del nivel seis se reduce el área de muros para colocar ventanas, reduciendo la rigidez de la estructura. No se sabe si el diseño original contemplaba este efecto, o si fue producto de las modificaciones de los inquilinos.

La reducción de muros también provocó la presencia de columna cortas que, aunado a la fuerte irregularidad en planta del edificio, debieron incrementar los efectos de torsión en la estructura, dando pie a la falla de las columnas justo donde se dio el cambio de rigidez.

A pesar de que el colapso solo fue parcial, y por tal solo se encontraban comprometidos los niveles superiores, la decisión fue demoler completamente el inmueble y la pérdida fue total.

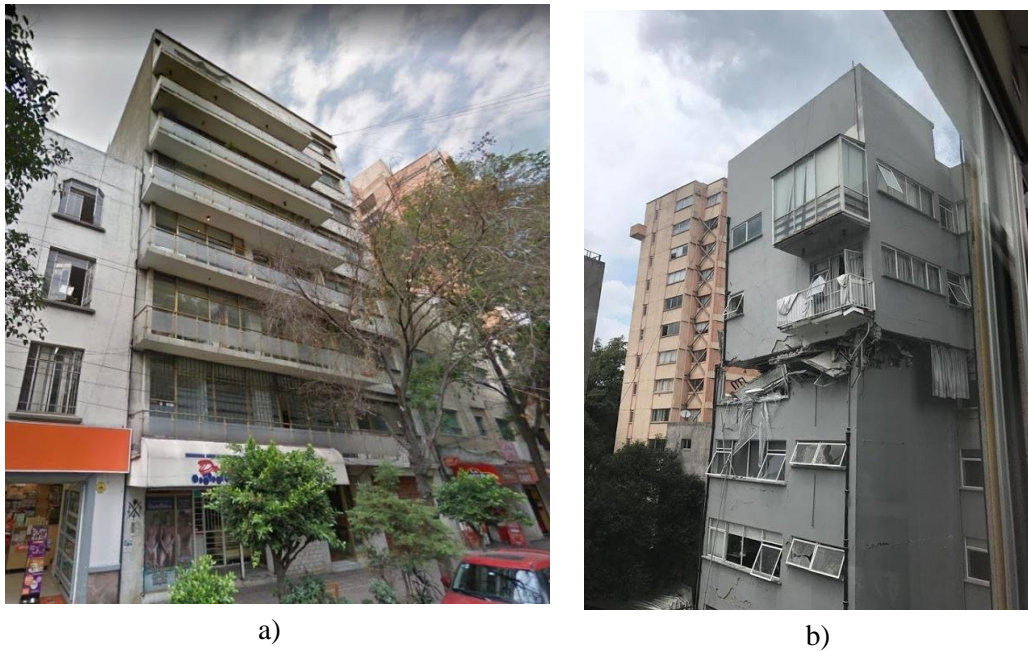


Figura 2.5 Edificio Sonora 149: a) antes del sismo y b) después del sismo (Google Maps y Valdez, 2017)

2.4 Intensidades presentadas durante el sismo 19S

Los registros sísmicos muestran que la amplitud de las ondas sísmicas con periodo de oscilación menores a 2.0 segundos fue mucho más grande en 2017 que en 1985, unas cinco veces en promedio. Caso contrario para las ondas con periodos mayores a 2.0 segundos, cuya amplitud fue hasta 10 veces mayor en 1985. Esto se puede observar gráficamente comparando los espectros de respuesta de estos dos sismos, la figura 2.6a muestra la comparación entre el espectro de respuesta de la estación CU (terreno firme) para el sismo de 1985 y 2017, en donde se observa que el sismo 19S generó mayores intensidades en periodos menores a 0.5 segundos. Por el otro lado, en la figura 2.6b al comparar los espectros de respuesta de la estación SCT (terreno blando) para los sismos de 1985 y 2017, se observa que las intensidades presentadas fueron mayores en 1985 en periodos mayores a 2.0 segundos.

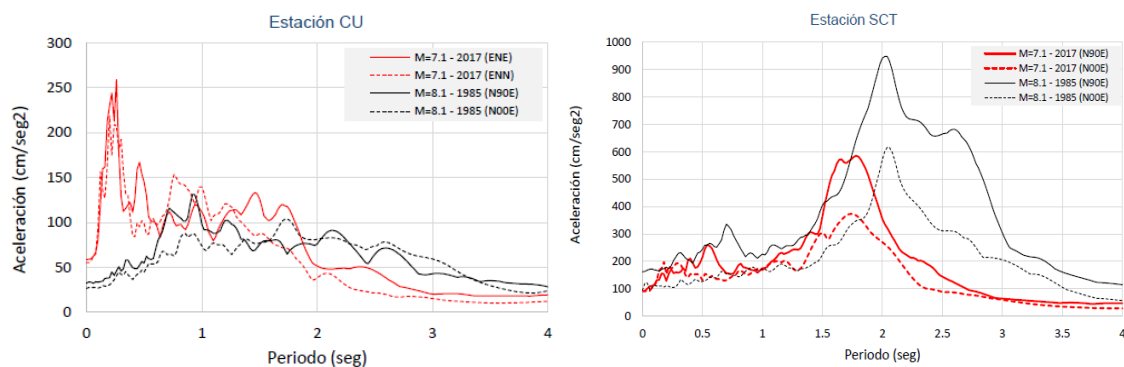


Figura 2.6 espectros de respuesta para los sismos de 1985 y 2017 en las estaciones a) CU y b) SCT (SMIG, 2017)

En la figura 2.7 se muestra una comparación entre los espectros de respuesta de diferentes estaciones acelerográficas, estas estaciones se encuentran situadas sobre diferentes puntos de la ciudad, diferentes tipos de suelo y, por ende, el comportamiento que describen es distinto. La estación de Ciudad Universitaria (CU) se encuentra sobre suelo firme, por lo que las aceleraciones espectrales en este sitio fueron relativamente bajas, y el pico se representa en periodos cercanos a cero, entre 0.2 y 0.5 segundos. Las estaciones SCT y CO56 se encuentran situadas sobre la zona de lago (suelo blando), en sus espectros de respuesta se puede apreciar un incremento en las aceleraciones y que el pico se recorre a periodos cercanos a 2.0 segundos. Por último, las estaciones CH84 y JC54 se

encuentran situadas en la zona del borde lago, en los espectros de respuesta de estas estaciones, las máximas aceleraciones se encuentran en periodos cercanos a 1.0 segundo.

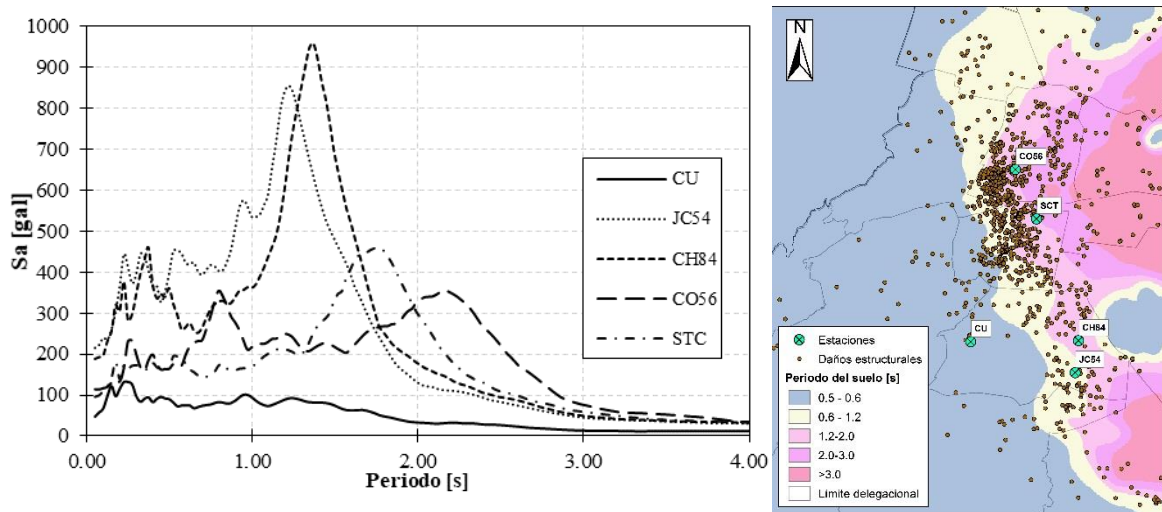


Figura 2.7 Espectros de respuesta de la media geométrica de los componentes norte-sur y este-oeste de las estaciones CU, STC, CH84, JC54 y CO56, y su ubicación (Elaboración propia con datos del II-UNAM y SSN)

Como se puede apreciar en la figura 2.7, las máximas aceleraciones de todos los espectros mostrados se presentaron en las estaciones ubicadas en la zona del borde del lago, además de que el pico de estas se tiene en periodos cercanos a 1.0 segundo. Las estructuras con este periodo de vibración son edificios de mediana altura, de 5 a 10 niveles. Cabe aclarar que los espectros de respuesta mostrados en la figura 2.7 son espectros elásticos construidos considerando un factor de amortiguamiento del 5%, y que el valor que se muestra en los espectros corresponde a la media geométrica de sus dos componentes, norte-sur y este-oeste.

Cabe mencionar que la estación CH84, donde se registró la máxima aceleración en toda la ciudad, se encuentra situada en una zona donde la extensión del lago es poca y se halla restringida por suelo firme, en esta zona ocurre un fenómeno conocido como efecto de borde. El efecto de borde puede amplificar las aceleraciones del suelo, por lo que, si bien es claro que las aceleraciones espectrales fueron mayores en el límite de la zona del lago, es equivocado pensar que todas las aceleraciones fueron similares a la de esta estación.

De acuerdo con lo anterior, se pueden correlacionar los daños con el movimiento del terreno. Las estructuras más demandadas fueron aquellas situadas en las zonas donde se produjeron las mayores aceleraciones espectrales: estructuras de mediana altura, a lo largo de una franja con orientación norte-sur dentro de la zona de transición (entre las zonas de suelo firme y blando) al poniente de la zona de lago.

Lo explicado en el párrafo anterior se muestra en la figura 2.8, la cual es una interpolación de las aceleraciones espectrales registradas en cada estación acelerográfica de la Ciudad, para un periodo de 1.0 segundos (Quinde *et al.*, 2018).

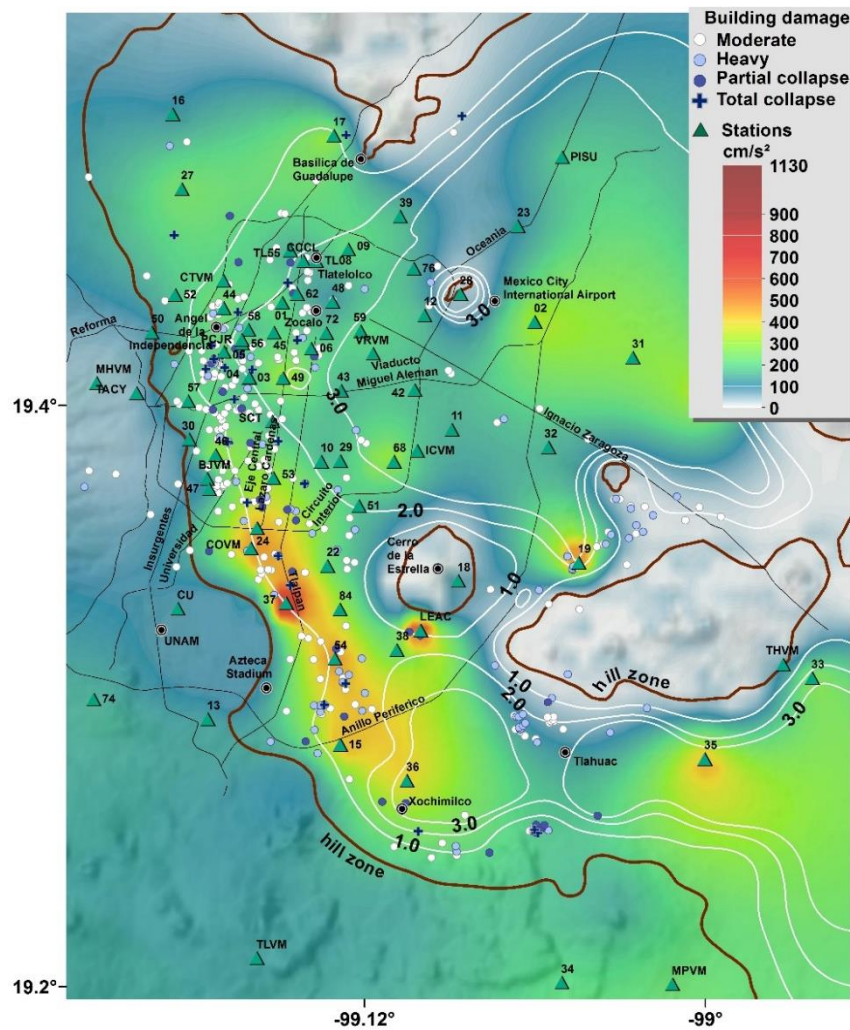


Figura 2.8 Mapa de aceleraciones espectrales para periodos de 1 segundo y edificios colapsados o fuertemente dañados (Quinde *et al*, 2018).

En la figura 2.8 se puede observar como los daños graves y colapsos (triángulos negros) se distribuyen a lo largo de la franja de mayores aceleraciones. También es posible observar algunos daños que se presentaron lejos de la zona de mayores aceleraciones. Lo anterior se explica debido a que daños corresponden a construcciones de baja altura, casas unifamiliares principalmente. Estas construcciones fueron hechas por autoconstrucción principalmente, por lo que es difícil que cumplan con las especificaciones de las normas de diseño sismo-resistentes. Además de esto, al ser construcciones de baja altura, su periodo de vibración corresponde con el pico de aceleraciones experimentadas en el sitio, como se pudo observar en el espectro de respuesta de la estación CU, en la figura 2.7

2.4.1 Intensidades en la zona de estudio

Como se vio en la figura 2.4 cerca de la zona de estudio se encuentra una estación acelerográfica (estación 05- Cibeles), a 415 metros del centro del área de estudio. Aunque el comportamiento del suelo de la Ciudad de México puede llegar a ser muy variable inclusive en distancias tan cortas como esta, para objeto de esta tesis se consideran que las intensidades experimentadas en la estación 05- Cibeles son las mismas en toda la zona de estudio. A través de los registros de la estación se puede tener una idea general del nivel de las intensidades de la zona de estudio.

En la figura 2.9 se muestra las aceleraciones registradas por la estación 05-Cibeles durante el sismo del 19 de septiembre de 2017 en las tres componentes: norte-sur, vertical y este-oeste. La aceleración máxima del suelo fue de 114.24 gal (1 gal = 1 cm/s²), y se presentó en la componente este-oeste. La

parte intensa del sismo, es decir, el lapso donde se tuvieron las máximas aceleraciones, fue entre los 80 y 140 segundos después de que empezó el movimiento.

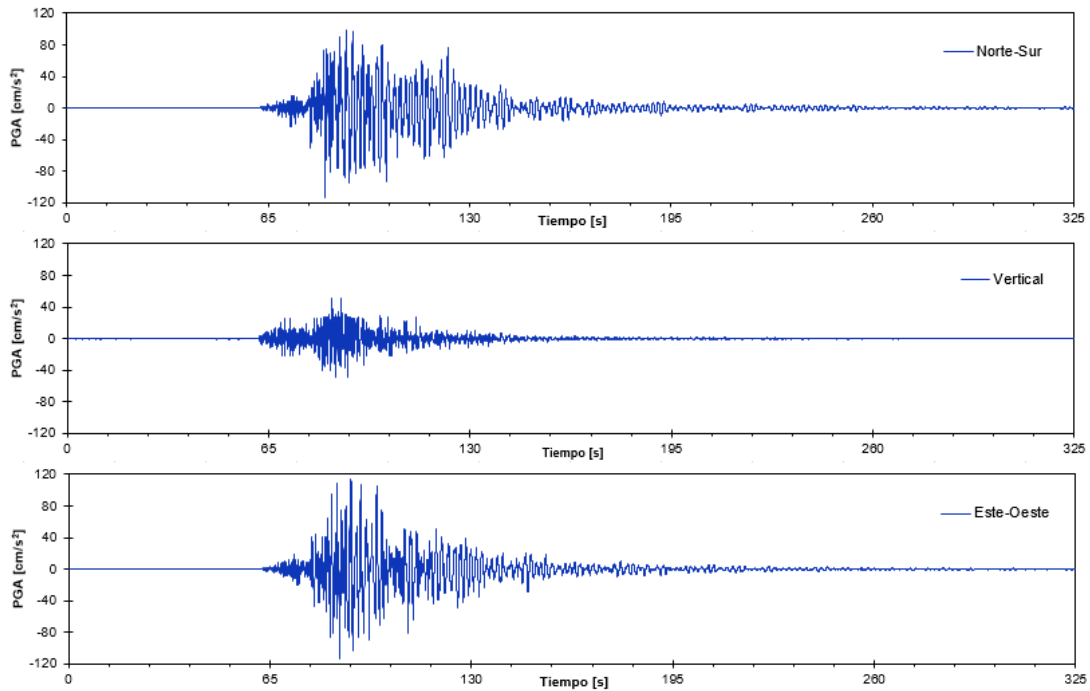


Figura 2.9 Registro acelerográfico de la estación 05-Cibeles (Elaboración propia con datos del SSN)

A partir de los registros sísmicos de la estación 05 se construye el espectro de respuesta del sitio donde esta estación está situada, con este espectro se podrá tener una idea aproximada de las intensidades experimentadas en los edificios de estudio. El espectro de respuesta que se construyó, al igual que los espectros de la figura 2.7, es un espectro elástico con un coeficiente de amortiguamiento $\xi=5\%$ respecto al amortiguamiento crítico.

Se determinaron los espectros de respuesta para ambas componentes (norte-sur y este-oeste). No obstante, para tener un valor más fácil de interpretar, se determinó la media geométrica en el espacio espectral de ambas componentes, recordando que la media geométrica es igual a la raíz cuadrada del producto de las dos componentes (ec. 2.1).

$$MG = \sqrt{C_{N-S} * C_{E-O}} \tag{2.1}$$

donde MG es la media geométrica, C_{N-S} es la componente Norte-Sur y C_{E-O} es la componente Este-Oeste.

En la figura 2.10 se muestra el espectro de respuesta de la estación 05-cibeles para las dos componentes y media geométrica. Como se puede observar, el pico de máxima aceleración se presenta en un periodo aproximado de 1.6 segundos, congruente con el periodo del suelo donde se encuentra la estación. El espectro muestra valores de aceleración muy parecidos en ambas componentes, exceptuando en periodos cercanos a 2.0 segundos, donde la diferencia entre las dos componentes es de casi 200 gal.

Ya que los edificios de estudio son de seis a ocho niveles de altura, su periodo de vibración debe ser del orden de 0.7 segundos, esto se ilustra en la figura a través de un degradado en color azul el cual representa el periodo promedio de los edificios de estudio. Acorde con el periodo promedio de los edificios de estudio, las aceleraciones espectrales en este periodo son de aproximadamente 270 gal, por lo que las demandas de los edificios de estudio deben ser del orden de este valor.

Este espectro de respuesta será el empleado para estimar las demandas a las que se sometieron los edificios de estudio; así, en el siguiente capítulo se relacionará la demanda estimada de las estructuras

con el estado de daño observado en las mismas para observar de manera más acertada la diferencia en el comportamiento que tienen las estructuras.

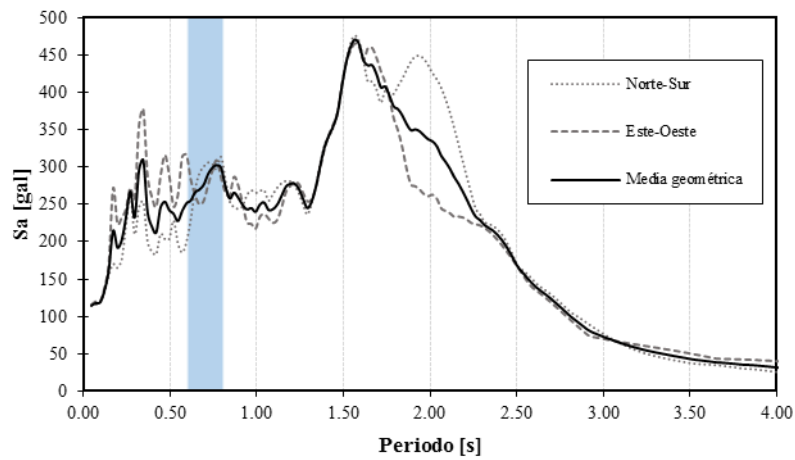


Figura 2.10 Espectro de respuesta de la estación 05-Cibeles en las componentes Norte-Sur, Este-Oeste y media geométrica (Elaboración propia con datos del SSN)

CAPÍTULO 3: ESTUDIO ESTADÍSTICO DE LOS DAÑOS EN LA ZONA DE ESTUDIO

CAPÍTULO 3

ESTUDIO ESTADÍSTICO DE LOS DAÑOS EN LA ZONA DE ESTUDIO

3.1 Objetivo

Mostrar los resultados más relevantes del análisis estadístico sobre los edificios de estudio que relacionen los daños observados con su tipo estructural y las patologías presentes, para encontrar las características que tienen mayor influencia en el daño.

3.2 Distribución de los daños

Se analizaron los datos mostrados en la Tabla 2.2, correspondientes a los edificios de estudio con el propósito de conocer mejor el comportamiento de estas estructuras durante el sismo del 19 de septiembre de 2017. En la figura 3.1 se muestra la distribución de los daños observados en los edificios de estudio; en las abscisas se tienen los estados de daño y en las ordenadas se muestra la cantidad de estructuras en cada estado de daño y el porcentaje que este número representa del total de edificios. Se puede observar en esta figura que los edificios en donde los daños fueron nulos (Sin daños) representan la mayoría de los casos, casi el 70% del total de edificios estudiados y la cantidad de edificios disminuye para los estados de daño siguientes. Los casos de colapso corresponden a los dos edificios mostrados en el capítulo anterior y representan solo el 3% del total de edificios estudiados.

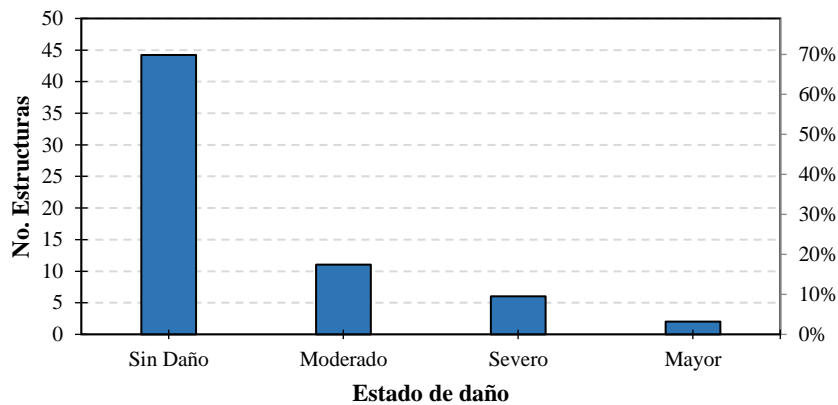


Figura 3.1 Comportamiento de los edificios en la zona de estudio clasificadas por el estado de daño

La distribución de daños observados es una distribución acorde con lo observado en otros sismos, donde muchas estructuras resultan ilesas o con daños menores, mientras que, por otro lado, los colapsos son pocos. Viendo los números, el 3% de colapsos es una cantidad enorme, pues representaría que el 3% de todos los edificios de seis a ocho niveles en la ciudad colapsaron, lo que no es así. Sin embargo, hay que recordar que la zona de estudio se encuentra dentro de las regiones donde se presentaron los mayores daños, y donde este tipo de estructuras se vieron sometidas a las mayores aceleraciones.

Además de la cantidad de edificios en cada estado de daño, es necesario considerar las características principales de las estructuras para entender mejor los daños. A continuación, se presenta la distribución de los edificios considerando su tipo estructural y las patologías presentes.

3.2.1 Tipo estructural

Tomando en cuenta la clasificación de las estructuras según su sistema estructural, se obtuvo la distribución mostrada en la figura 3.2. En esta figura se puede observar que las estructuras más seguras son aquellas con sistema estructural a base de marcos de acero, pues todos los edificios con este tipo estructural permanecieron sin daños después del sismo. Esto es en parte a que las estructuras

de acero son más flexibles que las estructuras de concreto (Rojas *et al*, 2007), pero sobre todo porque estos edificios fueron todos construidos después del año 2000, de modo que estas estructuras fueron diseñadas con los reglamentos de construcción más recientes, y por lo tanto son los más resistentes.

El segundo grupo más seguro es el conformado por las estructuras mixtas, donde solo se tuvieron daños moderados y daños nulos, de los cuales estos últimos representan la mayoría. En las estructuras con sistema estructural de marcos de concreto se presentaron casos con daños nulos, daños moderados y severos, nuevamente, son más los casos con daños nulos. Por último, las estructuras más vulnerables resultaron ser aquellas con sistema estructural de losas planas, en las cuales se presentaron los daños mayores (colapsos). Cabe resaltar que los edificios de losas planas son los más antiguos, la mayoría de estos, con año de construcción anterior a 1985, lo que habla por sí solo, de la menor resistencia que estos edificios tenían.

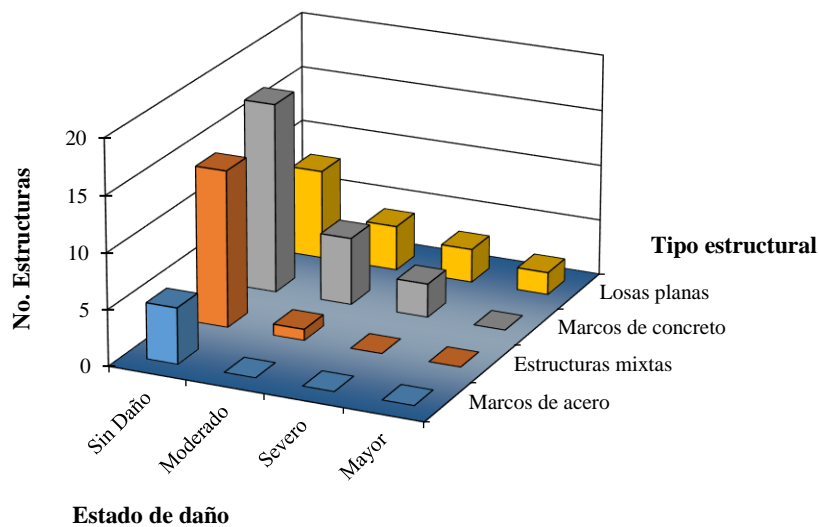


Figura 3.2 Comportamiento de los edificios en estudio clasificados por sistema estructural y estado de daño

3.2.2 Patologías

Gran parte de los daños presentados pueden explicarse a través de las patologías existentes en las estructuras, en esta sección se analiza la presencia de las patologías mostradas en la Tabla 2.1 y cómo se relaciona con el nivel de daño.

La figura 3.3 muestra la distribución de los edificios en estudio clasificados de acuerdo con las patologías presentes y el estado de daño observado, en la cual es posible observar como los daños mayores se presentaron en aquellos edificios que poseían las patologías de: irregularidad en planta, columnas cortas, cambios de rigidez y golpeteo. De las patologías mencionadas anteriormente, se puede observar que la más perjudicial es el golpeteo, pues se presentó en mayor cantidad en los edificios que sufrieron daños mayores. Después del golpeteo, la patología con mayores implicaciones en los daños son las columnas cortas, a pesar de presentar menor cantidad de daños mayores, tiene una distribución más uniforme de los daños y, por lo tanto, existirán mayores posibilidades de que se presente alguno de estos estados.

Los daños severos se presentaron con mayor frecuencia en aquellas estructuras con planta baja débil, seguido de los edificios con irregularidad en planta. Mientras que los daños severos se presentaron en menor cantidad en las estructuras con asimetría de esquina y daños previos. Por otra parte, los edificios menos afectados, fueron aquellos con irregularidad en elevación, en estos edificios no se presentaron daños visibles. Es preciso resaltar que las estructuras con irregularidad en elevación y asimetría de esquina fueron aquellas con tipo estructural de estructuras mixtas o marcos de acero, lo cual explica el buen comportamiento que tuvieron.

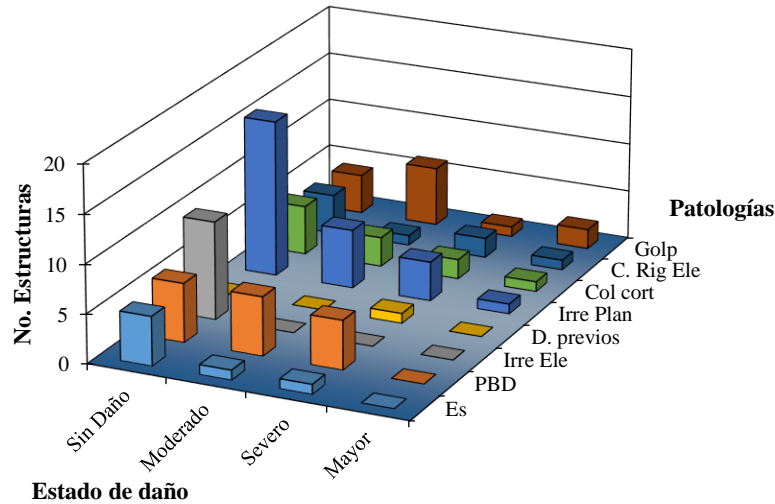


Figura 3.3 Comportamiento de los edificios en estudio clasificados por las patologías presentes y estado de daño

La distribución mostrada en la figura 3.3 corresponde a la distribución de todos de edificios de estudio, pero tal como se ha hecho hincapié anteriormente, el sistema estructural marca una diferencia importante en el comportamiento de un edificio. Por tal motivo, en la figura 3.4 se muestra la distribución de los edificios de losas planas, que fue el grupo más afectado en la zona de estudio, clasificados por las patologías presentes y por el estado de daño observado.

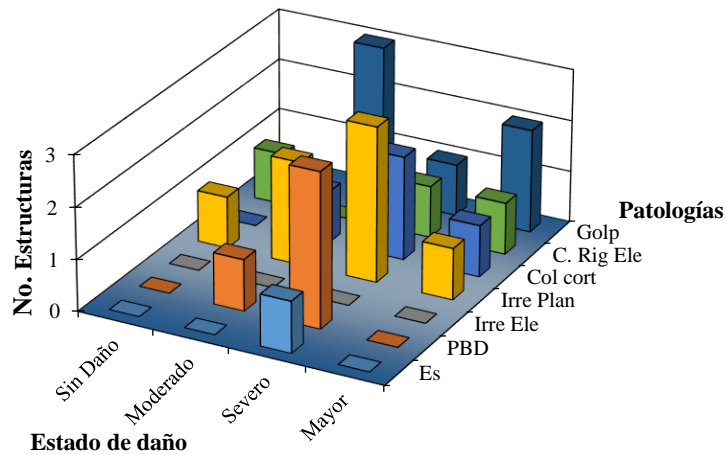


Figura 3.4 Comportamiento de los edificios de losas planas clasificados por las patologías presentes y estado de daño

En la figura 3.4 se reafirma que las patologías presentes en los daños mayores son: irregularidad en planta, columnas cortas, cambio de rigidez y golpeteo, pero en esta nueva distribución se observa más claramente como el golpeteo es la patología más perjudicial. El único edificio de losas planas con asimetría de esquina sufrió daños severos, lo que habla de cómo los edificios de losas planas son más susceptibles a los efectos de torsión.

Los edificios con planta baja débil presentaron daños moderados y severos, siendo mayor la cantidad de daños severos. Los edificios con irregularidad en planta presentaron los cuatro estados de daño posibles, aunque los estados más presentados fueron daños moderados y severos. Caso similar a irregularidad en planta ocurre en los edificios con columnas cortas, se presentaron casos con daños moderados, severos y mayores; pero se intensificaron en los daños severos. Las estructuras que

sufrieron golpeteo muestran una distribución inusual, en la que el número de daños moderados es alto, se reduce en los daños severos y de nuevo se incrementa en los daños mayores; esto se puede deber a que existen diferentes tipos de golpeteo y cada uno causa un nivel de daño distinto.

Cabe mencionar que, al llevar el análisis a este nivel de detalle, el tamaño de la muestra se reduce en gran medida, es por esto que en algunas combinaciones no se tienen datos. Un ejemplo de esto se observa en la patología de irregularidad en elevación, donde ningún edificio de losas planas poseía esta patología. Un caso similar se observa en la patología de asimetría de esquina ya que solo un edificio de losas planas tenía ubicación en esquina y debido a la poca cantidad de datos es casi imposible encontrar una relación o tendencia entre la presencia de las patologías y el nivel de daño observado.

En resumen, la principal diferencia entre la distribución de daños del total de edificios y los edificios de losas planas es que, en las estructuras de losas planas, solo dos edificios que poseían alguna patología (en este caso, irregularidad en planta y cambios de rigidez) permanecieron sin daños, mientras que en el resto se presentaron por lo menos daños moderados; es decir, las estructuras de losas planas fueron más susceptibles a la presencia de patologías. Mientras que los edificios con otros tipos estructurales a pesar de tener presencia de patologías permanecieron intactos, lo cual habla del mejor comportamiento que estos tuvieron.

Uno de los casos observados con mayor claridad es el de los edificios con asimetría de esquina que, tal como se vio en los antecedentes, la asimetría de esquina tuvo un impacto muy importante en el nivel daño. Para solucionar esto, algunos edificios más recientes contrarrestan los efectos de torsión colocando muros de concreto en la esquina más débil de la estructura (estructuras mixtas).

3.2.3 Correlación de los daños con las demandas sísmicas

Una de las maneras para poder explicar el daño de las estructuras es mediante las demandas experimentadas durante el evento sísmico, para esta tesis, las demandas sísmicas se representan a través de las aceleraciones espectrales. Como se presentó en el capítulo anterior, cerca de la zona de estudio se tiene una estación acelerográfica con la cual se estimaron las demandas sísmicas de los edificios de estudio. A pesar de que el comportamiento del suelo de la Ciudad de México puede ser muy variable incluso en distancias cortas, para el objetivo de esta tesis, se considera que el espectro de respuesta de la estación 05-Cibeles (figura 2.10) describe un comportamiento similar al de la zona de estudio.

Debido a la cantidad de edificios considerados para el estudio, resulta impráctico crear un modelo estructural para determinar sus características dinámicas. Es por esto que se utilizaron fórmulas empíricas para estimar el periodo fundamental de las estructuras; sin embargo, es preciso resaltar que el nivel de incertidumbre es bastante alto. Como se comentó anteriormente, los edificios de estudio fueron clasificados en cuatro tipos estructurales. En la tabla 3.1 se presentan las expresiones utilizadas para estimar el periodo fundamental de las estructuras. Cabe mencionar que las expresiones que se muestran y con las cuales se estimó el periodo fundamental de las estructuras no necesariamente reflejan las características de las estructuras antiguas, como lo son las estructuras de losas planas.

Tabla 3.1 Expresiones utilizadas para estimación del periodo fundamental de las estructuras

Tipo estructural	Expresión	Autores	No. Ecuación
Marcos de acero	$T = 0.085H^{0.75}$	Goel y Chopra (1997)	(3.1)
Estructuras mixtas	$T = 0.0488H^{0.75}$	ASCE 7-10	(3.2)
Marcos de concreto	$T = 0.06H^{0.75}$	NZSEE (2006)	(3.3)
Losas planas	$T = 0.075H^{0.75}$	EC8 (2004)	(3.4)
	$T = 0.053H^{0.90}$	Goel y Chopra (1997)	(3.5)

En la tabla anterior, T es el periodo fundamental de la estructura y H es la altura total del edificio en metros.

Para las estructuras de losas planas se tomó un promedio de las dos expresiones presentadas antes (ec. 3.4 y 3.5). A partir del periodo de las estructuras es posible estimar las aceleraciones espectrales correspondientes en el espectro de respuesta de la estación 05-Cibeles.

En la figura 3.5 se presenta el espectro de respuesta de la estación y se utiliza un degradado para ubicar el periodo fundamental de las estructuras, utilizando las expresiones mostradas en la tabla anterior. Como se puede observar, los edificios de estudio tienen diferentes periodos de vibración dependiendo su tipo estructural. Donde las estructuras más rígidas, es decir, aquellas con periodo menor, son las estructuras de marcos de acero. Mientras que las estructuras más flexibles, aquellas con periodos mayores, son las estructuras de losas planas.

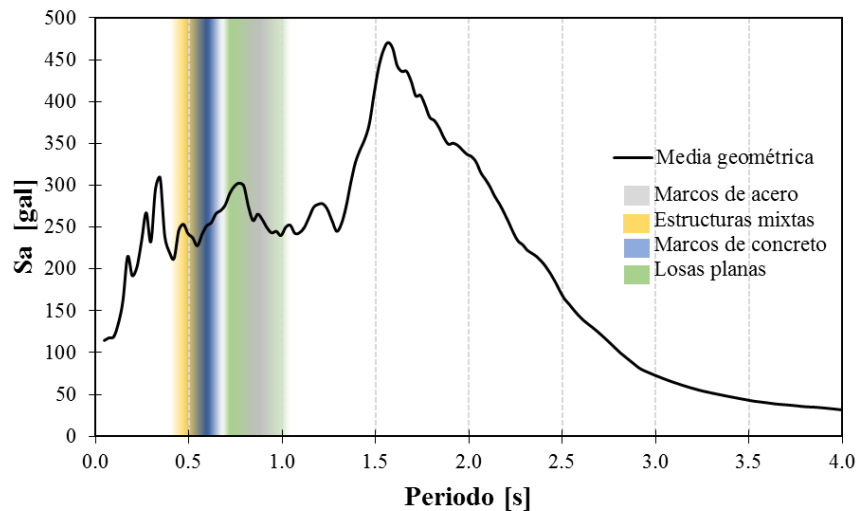


Figura 3.5 Espectro de respuesta estación 05 (media geométrica) y periodo fundamental de las estructuras clasificadas por tipo estructural

En la misma figura se puede observar que, a pesar de que los periodos son diferentes, coincidentemente se tienen aceleraciones espectrales similares. La aceleración espectral mínima es de 233 gal y la máxima es de 395 gal, solo 60 gal de diferencia entre ellas.

Estrictamente, cada estructura presentó una demanda diferente, que depende de su tipo estructural y su altura (número de niveles). No obstante, para objeto de esta tesis, se considera que las estructuras con el mismo tipo estructural fueron sometidas a un mismo nivel de demanda sísmica, pues la única diferencia entre ellas es su altura (más menos un nivel). La aceleración espectral asignada a cada tipo estructural es el valor medio de las aceleraciones estimadas para cada estructura del tipo estructural correspondiente.

Es posible representar de manera gráfica el daño presentado en las estructuras, en una gráfica aceleración espectral vs. daño. Con esto es posible comparar la diferencia en la vulnerabilidad sísmica de los edificios de estudio. Empero, como cada estructura presentó un nivel de daño diferente, se tomó un valor promedio del daño de las estructuras según el tipo estructural. El daño promedio de cada tipo estructural se obtiene como un promedio ponderado de las mismas, es decir, la relación de la suma de estructuras con un mismo estado de daño entre el total de estructuras.

Lo descrito anteriormente es presentando en la ec. 3.1, y se expresa como sigue:

$$D_{prom} = \frac{\sum ID_{ED} \cdot N_E}{\sum N_E} \quad (3.1)$$

Donde D_{prom} es el daño promedio de cada tipo estructural, ID_{ED} es el índice de daño correspondiente a cada estado de daño y N_E es el número de estructuras en cada estado de daño según el tipo estructural correspondiente.

Las características que se han descrito anteriormente: periodo fundamental, aceleración espectral promedio y daño promedio correspondientes a cada tipo estructural, son mostradas en la Tabla 3.2. En dicha tabla también se muestra el número de estructuras de cada tipo estructural.

Tabla 3.2 Características dinámicas de los edificios de estudio

Tipo estructural	No. Estructuras	T_{prom} [s]	Sa_{prom} [gal]	ID_{prom}
Marcos de acero	5	0.34	283.94	0.025
Estructuras mixtas	15	0.47	244.12	0.037
Marcos de concreto	26	0.60	245.45	0.120
Losas planas	17	0.81	273.06	0.259

Comparación de los daños según el tipo estructural

Una vez determinadas las características dinámicas de los edificios de estudio, es posible visualizar la diferencia en la vulnerabilidad de cada tipo estructural. En la figura 3.6 se muestra una gráfica aceleración espectral vs. daño, en donde cada estructura es representada por un marcador, según su tipo estructural. En la figura 3.6, la franja vertical corresponde a la banda de aceleraciones espectrales experimentadas por las estructuras.

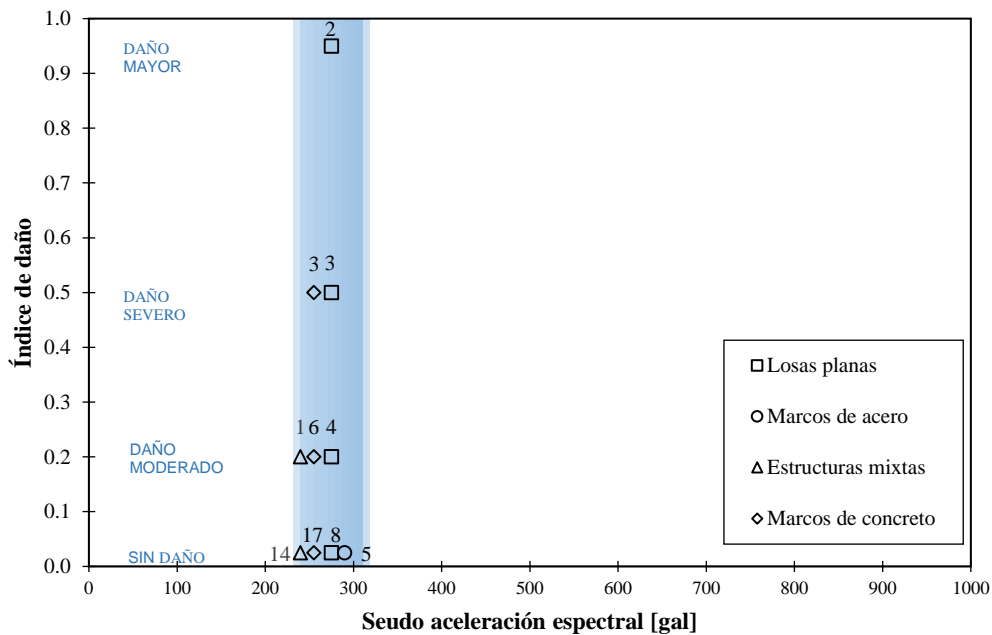


Figura 3.6 Representación gráfica del daño en las estructuras usando la pseudo-aceleración espectral como medida de intensidad sísmica

Cada estructura se ubicó en el estado de daño correspondiente. Se puede observar un escalonamiento de las estructuras pues, como se comentó en el capítulo anterior, se consideró el valor medio de cada umbral de daño para representar el daño de cada estructura. Además, se muestra un número junto a cada marcador, este número representa el número de estructuras presentes en cada estado de daño. Como se puede observar, en la parte baja (Sin daños) se concentran la mayor parte de las estructuras y, el número de estructuras se reducen en los estados de daño siguientes. Este es el mismo comportamiento que describe la figura 3.1. Como se puede observar en la figura 3.6, a pesar de que las aceleraciones espectrales son similares en todos los tipos estructurales, cada uno de ellos describen comportamientos diferentes. En la figura anterior se muestran los daños observados en cada una de los edificios de estudio; sin embargo, para comprender el comportamiento de cada tipo

estructural es necesario establecer un comportamiento promedio que represente a cada grupo estructural. Atendiendo a lo anterior, en la figura 3.7 se muestra el daño promedio de cada tipo estructural según la aceleración correspondiente (véase Tabla 3.2), por el cual se hizo pasar una línea que presenta esquemáticamente una curva de vulnerabilidad.

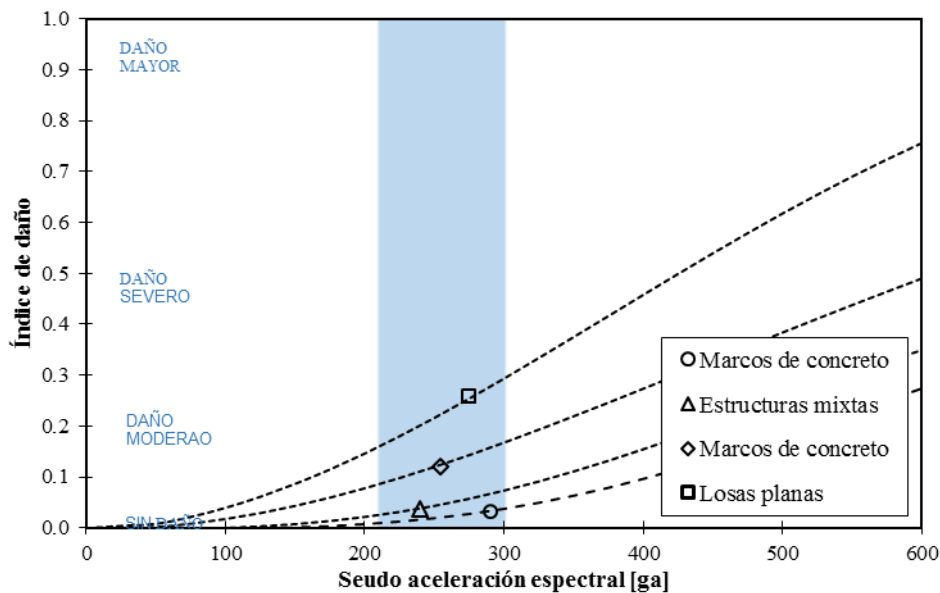


Figura 3.7 Daño promedio de cada tipo estructural y representación esquemática de la curva de vulnerabilidad de cada tipo estructural

Es preciso aclarar que las curvas mostradas en la figura 3.7 no son curvas de vulnerabilidad reales, sino que solo sirven de referencia para apreciar de mejor manera la variación de la vulnerabilidad dependiendo del tipo estructural. Estas curvas se lograron haciendo pasar una curva por el punto correspondiente al daño promedio, respetando la forma S, que es la que usualmente se usa para las curvas de vulnerabilidad.

En contraste con la figura 3.6, en la figura 3.7 no se pueden apreciar los casos con daños severos y mayores, lo que habla del pequeño número que estos casos representan y de que estos casos se debieron a las condiciones específicas de cada edificio.

Con los ejercicios hechos hasta el momento queda claro que las estructuras de losas planas son las más vulnerables de los edificios de estudio. Por esta razón, en la figura 3.8 se muestran los daños presentes en las estructuras de losas planas en una gráfica de aceleración espectral vs daño. Como ya se mencionó antes, se asume que la demanda experimentada por los edificios de un mismo tipo estructural es la misma. Bajo este hecho, en esta figura, las estructuras se distribuyen uniformemente en cada estado de daño, solo para tener una visualización completa de todas las estructuras.

En la figura 3.8, cada estructura es representada por un marcador, y el número mostrado arriba de cada marcador corresponde al número de patologías presente en cada estructura. Como se puede observar, los edificios que no presentaron daños son los edificios con cero o una patología; los edificios que presentaron daño moderados poseían una o dos patologías; los edificios con daños severos poseían de tres a cuatro patologías; mientras que los colapsos se dieron en edificios con una y con cuatro patologías.

En términos generales, el comportamiento que muestra la figura 3.8 es que, a medida que el número de patologías en las estructuras aumenta, el daño también lo hace. En un caso se contradice esto, un edificio con daño mayor solo poseía una patología; sin embargo, hay que recordar que la contabilización de las patologías es de solamente las mostradas en la Tabla 2.2. Por lo que, si el edificio poseía otras patologías diferentes a las estudiadas en esta tesis, estas patologías no se contabilizaron. Además, las patologías analizadas en esta tesis se restringen a las patologías visibles en las estructuras, por lo que los errores en la construcción y en los defectos en los materiales, son imposibles de detectar.

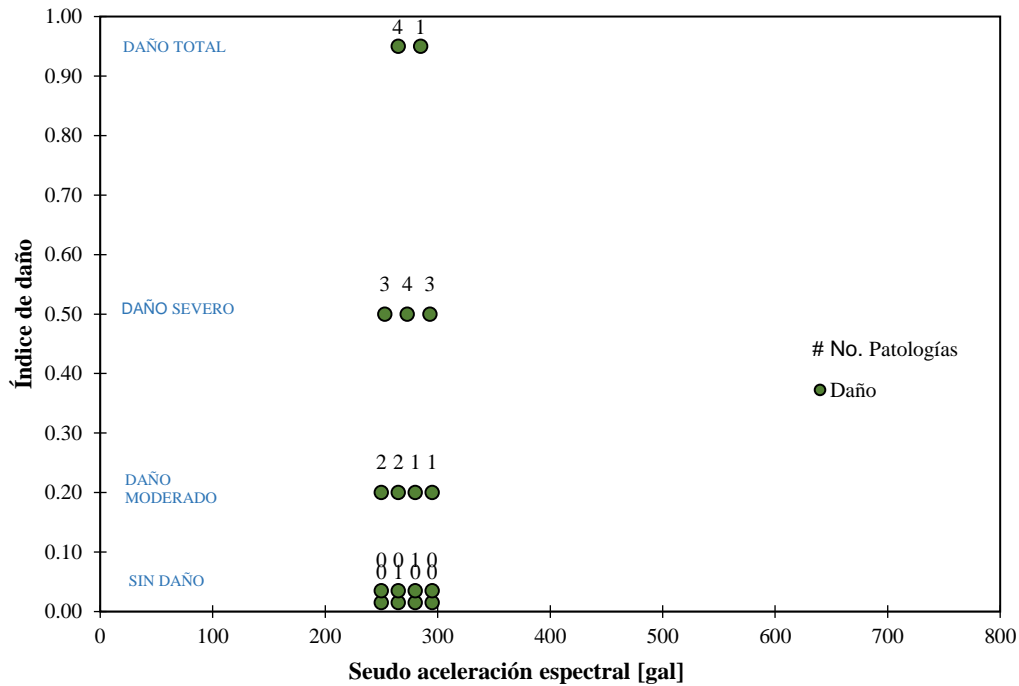


Figura 3.8 Daño en estructuras de losas planas y número de patologías presentes

De esta manera podemos asociar la diferencia en la vulnerabilidad de las estructuras, no solo con el sistema estructural, sino también con el número de patologías presentes. Sin embargo, hay que mencionar que el daño sísmico en una estructura no solo dependerá de la cantidad de patologías que ésta presente, también del tipo de patologías que se tengan. Por lo que, para tener un mejor entendimiento del comportamiento es necesario analizar una a una las patologías, así como los niveles en que estas patologías se pueden categorizar.

3.3 Correlación entre el daño y el nivel de las patologías

Con la finalidad de estudiar más a detalle cada una de las patologías mostradas anteriormente, se presenta una correlación entre los daños observados y el nivel de las patologías presentes. En la Tabla 3.3 se muestra la definición de las patologías con la cual se clasificó cada estructura en la Tabla 2.2, y también se muestran los niveles en que las patologías se pueden categorizar (poco, moderado, fuerte e intenso).

Para las patologías de cambio de rigidez y daños previos no se tiene una subcategorización, solo se clasificó de acuerdo con la presencia de la patología (si o no).

A continuación, se presenta un enfoque detallado en las estructuras de losas planas por ser el grupo más afectado de los edificios en estudio. Se muestra la correlación que existe entre el daño observado en estas estructuras de losas planas y el nivel de las patologías presentes. Esta correlación está vista desde dos puntos: el nivel de las patologías (véase Tabla 3.3) y el estado de daño. Debido a que, al solo considerar las estructuras de losas planas, el tamaño de la muestra se reduce considerablemente, las distribuciones serán mostradas en porcentaje. De igual manera, por la reducción de la muestra, solo se mostrarán los resultados más significativos del análisis.

Tabla 3.3 Subcategorización de patologías

Nivel	Definición
Asimetría de Esquina	
Nulo	Estructura no localizada en una esquina / estructura localizada en esquina pero que cuenta con cuatro fachadas
Moderado	Estructura localizada en esquina con dos fachadas formadas predominantemente con muros o columnas robustas de piso a techo
Fuerte	Estructura localizada en esquina con dos fachadas formadas predominantemente con columnas esbeltas
Planta baja débil	
Nulo	Las columnas o muros son razonablemente uniformes en toda la altura
Moderado	El edificio en altura no es homogéneo en términos de su tipo estructural. En la planta baja posee un sistema estructural con pocos muros, entre el 50% y 20% en relación con las plantas superiores
Fuerte	El edificio en altura no es homogéneo en términos de su tipo estructural. En la planta baja posee un sistema estructural con entre el 20% y 5% de muros en relación con las plantas superiores.
Irregularidad en planta	
Nulo	El edificio tiene una forma regular en planta. Por ejemplo una planta circular, cuadrada o rectangular
Moderado	El edificio mantiene una forma semi-regular en planta. Por ejemplo, rectángulos alargados (Largo > 2 veces el ancho), o cuadrados con salientes pequeñas
Fuerte	El edificio tiene una forma irregular, es decir, no rectangular.
Irregularidad en elevación	
Nulo	El edificio tiene una forma regular en elevación. Por ejemplo, mantiene una forma rectangular constante en elevación con una relación altura / longitud más corta de la base menor que 2.5
Moderado	El edificio mantiene una forma semi-regular en elevación. Por ejemplo, tiene una forma rectangular en elevación con pequeños cambios en las dimensiones de sus entrepisos
Fuerte	El edificio tiene una forma irregular en elevación. Por ejemplo, forma rectangular con cambios bruscos en las dimensiones de sus entrepisos o formas irregulares
Columnas cortas	
0	El edificio posee columnas, los cuales están completamente vacíos o completamente rellenos de muros mampostería o concreto
%	Porcentaje en altura de muros de relleno respecto a la altura de entre piso
Golpeteo	
Nulo	Estructuras separadas por al menos 3 cm por cada nivel del edificio más bajo. No se presentó golpeteo
Poco	Golpeteo presentado entre dos estructuras cuyas alturas son iguales y sus losas son colineales
Moderado	Golpeteo presentado entre dos estructuras cuyas alturas son iguales y sus losas no son colineales
Fuerte	Golpeteo presentado entre dos estructuras cuyas alturas no son iguales y sus losas son colineales
Intenso	Golpeteo presentado entre dos estructuras cuyas alturas no son iguales y sus losas no son colineales

3.3.1 Planta baja débil

En la figura 3.9 se muestra la distribución de los edificios de losas planas con planta baja débil, clasificados por el nivel de la patología y el estado de daño. La figura 3.9a muestra la distribución vista desde el punto de vista del nivel de la patología, en la cual se puede observar que, a pesar de presentar planta baja débil, el nivel de esta patología era moderado en todos los casos. De este grupo, la mayoría de los edificios presentaron daños severos; es decir, a pesar de solo tener planta baja débil

moderada, fue suficiente para generar más daños severos que daños moderados. No es posible conocer el comportamiento de los edificios con planta baja débil de nivel fuerte, pues no se cuenta con datos de estas estructuras en la muestra, es por esto que en la figura 3.9b, la cual muestra la distribución desde el punto de vista del estado de daño, el 100% de los daños moderados y severos fueron presentados en los edificios con planta baja débil moderada.

Con la información mostrada en la figura 3.9 se puede decir que, cuando una estructura de losas planas tiene presencia de planta baja débil, se pueden esperar por lo menos daños moderados después de un sismo intenso como el sismo 19S.

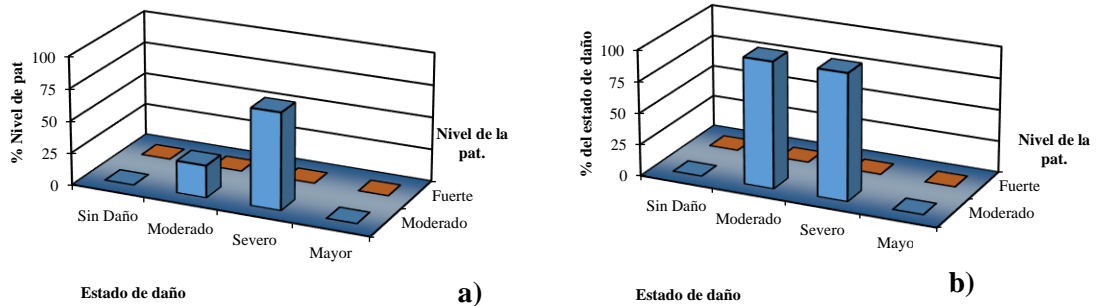


Figura 3.9 Comportamiento de los edificios de losas planas con planta baja débil, clasificados por el nivel de la patología y estado de daño a) visto desde el nivel de la patología y b) visto desde el estado de daño

3.3.2 Irregularidad en planta

En la figura 3.10 se muestra la distribución de las estructuras de losas planas con irregularidad en planta clasificadas por el nivel de la patología y el por el estado de daño. La figura 3.10a muestra la distribución de los edificios desde el punto de vista del nivel de la patología, en la cual es posible observar que en los edificios donde la irregularidad era moderada, la mayoría de los mismos sufrieron daños moderados, muy pocos sufrieron daños severos o nulos, y ninguno sufrió daños mayores. Por otro lado, en los edificios donde la irregularidad era fuerte, la mayoría presentaron daños severos, otros pocos sufrieron daños mayores, mientras que en ningún caso se presentaron daños moderados o nulos.

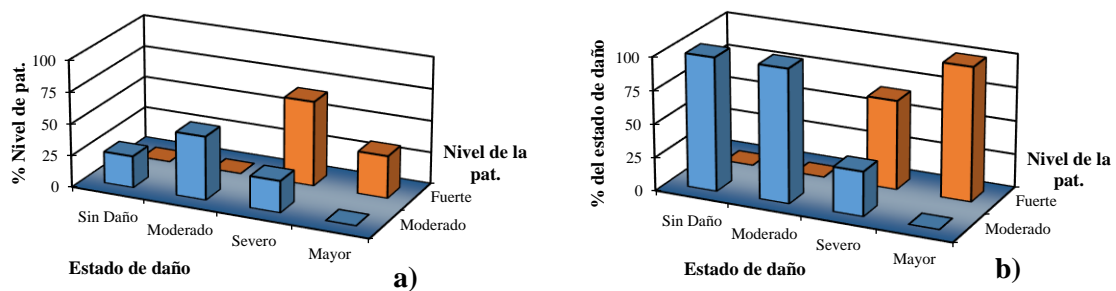


Figura 3.10 Comportamiento de los edificios de losas planas con irregularidad en planta, clasificados por el nivel de la patología y estado de daño, a) visto desde el nivel de la patología y b) visto desde el estado de daño

De la figura 3.10a se puede decir que, los edificios con irregularidad fuerte presentaron daños superiores que los edificios con irregularidad moderada; aunque, fueron más los casos de daños severos que daños mayores. Siguiendo con esta lógica se podría decir que una irregularidad fuerte en un edificio de losas planas podría ser un factor importante para que el edificio presente daños severos cuando un sismo de alta intensidad se presente.

Desde otra perspectiva, la figura 3.10b muestra la distribución de los edificios observada desde el punto de vista del estado de daño. En esta figura se puede observar claramente como los casos de daño nulo o moderado corresponden en su totalidad a los edificios donde la irregularidad era

moderada, lo cual es bastante coherente con lo observado en otros sismos, las estructuras pueden tener un comportamiento aceptable mientras las irregularidades no sean tan significantes. Los daños severos se presentaron dos veces más en las estructuras donde la irregularidad era fuerte que donde la irregularidad era moderada. También es posible observar claramente como los casos de daño mayor corresponden en su totalidad a la irregularidad fuerte.

Extrapolando lo visto en la figura 3.10, se puede decir que, la presencia de irregularidad en planta en edificios losas planas puede ocasionar daños en las estructuras cuando un sismo de intensidad igual o superior al 19S se presente, daños que irán desde moderados hasta mayores dependiendo del nivel de la irregularidad.

3.3.3 Columnas cortas

En la figura 3.11 se muestra la distribución de los edificios de losas planas con presencia de columnas cortas, clasificados por el nivel de la patología y por estado de daño, el nivel de las columnas cortas (véase Tabla 3.3) se dividió en dos categorías, de 0 al 50% y del 50 al 100%. La figura 3.11a muestra la distribución vista desde el punto de vista del nivel de las columnas cortas, en esta figura se puede observar como la distribución muy uniforme, se tuvieron el mismo número de casos con daños moderados que con daños severos cuando la altura de los muros de rellenos es menor a la mitad de la altura de entrepiso y, la misma cantidad de casos con daños severos que daños mayores cuando las columnas cortas son superiores al 50%. Cabe mencionar que, en los edificios donde las columnas cortas eran menores al 50% no se presentaron daños nulos ni daños mayores; mientras que en los edificios donde las columnas cortas eran superiores a este porcentaje, no se presentaron casos sin daños o con daños moderados.

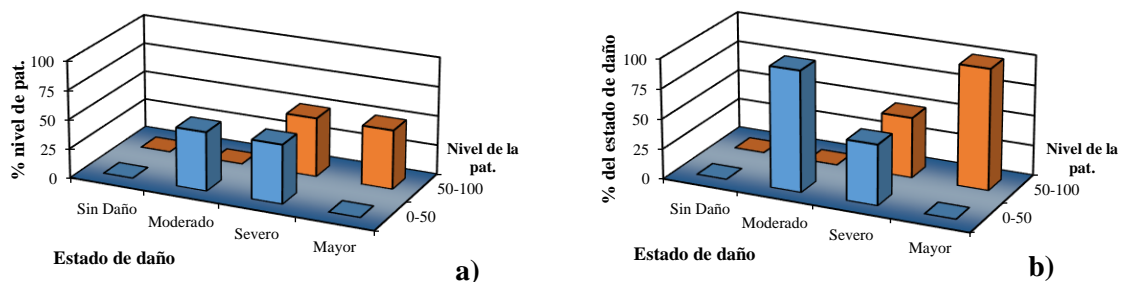


Figura 3.11 Comportamiento de los edificios de losas planas con columnas cortas, clasificados por el nivel de la patología y estado de daño, a) visto desde el nivel de la patología y b) visto desde el estado de daño

Por otro lado, en la figura 3.11b, que muestra la distribución desde el punto de vista del estado de daño, se puede observar claramente como la totalidad de daños mayores se presentaron en aquellos edificios donde las columnas cortas eran superiores al 50%. En contraste con esto, la totalidad de daños moderados se presentaron en los edificios en los cuales las columnas cortas eran menores al 50%. Los daños severos se presentaron en igual cantidad en los edificios con columnas cortas, sin importar el nivel de estas.

En general, la figura 3.11 muestra que el caso más perjudicial es cuando las columnas se ven restringidas a menos de la mitad de su altura original. Aquí cabe resaltar algo, debido al reducido tamaño de la muestra, no se hizo una categorización más detallada, cada 25%, por ejemplo. Acorde con lo observado en la figura 3.11 se podría decir que si el relleno de muros es mayor a la mitad de la altura de entrepiso el comportamiento estructural no es favorable; no obstante, esto puede ser debatible. Si el porcentaje de columnas cortas es 100%, completamente relleno de muros, los esfuerzos son absorbidos por las columnas y también por los muros, por lo tanto, su resistencia se incrementa. En otro orden de ideas, decir que el nivel de columnas cortas es superior al 50% no es suficiente para sentenciar el comportamiento de la estructura. Se debe buscar más evidencia para encontrar el rango en que las columnas se ven más comprometidas.

Extrapolando lo mostrado por la figura 3.11, se podría decir que en edificio de losas planas que además posee columnas cortas se presentarán, por lo menos, daños moderados cuando acontezca un sismo intenso, y el nivel de daño incrementará dependiente del nivel de esta patología.

3.3.4 Golpeteo

Como se puso observar en la Tabla 3.3, la patología de golpeteo tiene cuatro posibles categorías en función de la altura de los edificios y la colinealidad de sus losas: poco, moderado, fuerte e intenso. Debido al reducido tamaño y las características de la muestra, no se tienen datos donde se haya presentado golpeteo de nivel poco o moderado, es por esto que en la figura 3.12 se muestra la distribución de los edificios de losas planas donde se presentó el golpeteo, pero solo se muestran los resultados para los niveles de golpeteo fuerte e intenso.

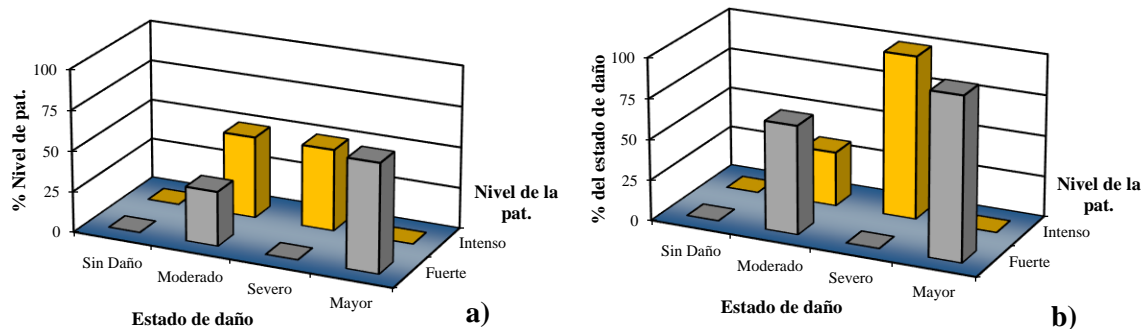


Figura 3.12 Comportamiento de los edificios de losas planas que presentaron golpeteo, clasificados por el nivel de la patología y estado de daño, a) visto desde el nivel de la patología y b) visto desde el estado de daño

La figura 3.12a muestra la distribución de los edificios observada desde el punto de vista del nivel del golpeteo, en esta figura se puede observar que en los edificios donde el golpeteo fue fuerte, se presentaron daños moderados y mayores, siendo mayor la cantidad de daños mayores; aquí se puede observar una discontinuidad en la distribución de los datos, pues no se presentaron daños severos, sino que se pasa de daños moderados a daños mayores. En contraparte, en los edificios donde el golpeteo fue clasificado como intenso, se tuvieron la misma cantidad de daños moderados que daños severos, y no se presentaron daños mayores ni daños nulos.

En la figura 3.12b se muestra la distribución observada desde el punto de vista del estado de daño, en esta figura se puede observar más claramente como los casos de daño mayor se presentaron en los edificios donde el golpeteo fue fuerte, y que los daños severos se presentaron únicamente cuando el golpeteo fue intenso; mientras que los daños moderados se presentaron en mayor cantidad donde el golpeteo fue fuerte que en donde fue intenso.

Cabe aclarar que la clasificación del daño se basó en la evidencia visible del golpeteo entre las estructuras, ya sea que se haya producido daño en el edificio de interés o en su colindancia. Por lo que existe la posibilidad de que se haya presentado el golpeteo entre dos edificios, pero que este haya sido tan poco que no dejó secuelas visibles y por lo tanto no se registró.

En conclusión, la figura 3.12 muestra que la condición más desfavorable de golpeteo es el golpeteo clasificado como fuerte; sin embargo, la altura y colinealidad de las losas de los edificios vecinos no es suficiente para predecir el nivel de daño producido por el impacto de dos edificaciones colindantes. Sino que también se deben considerar qué tan diferentes son en altura y el sistema estructural de cada uno, ya que el daño dependerá de la resistencia de la estructura al recibir el impacto y de la fuerza de inercia que el edificio porta al desplazarse.

El fenómeno de golpeteo es un tema muy complejo por todos los factores que intervienen y todas las combinaciones posibles, por lo que, se requiere de un análisis más detallado para entender este fenómeno. No obstante, dicho análisis queda fuera del alcance de esta tesis, por lo que, se considera que la categorización mostrada es suficiente para ofrecer conclusiones preliminares.

3.4 Combinación de dos patologías

En la realidad es sumamente inusual encontrar edificios con presencia de una sola patología, sino que, generalmente las estructuras poseen dos o más. Por tal razón no basta con analizar la presencia de una patología, también se debe considerar la posible combinación de dos o más. Es por esto que, en esta sección se analiza el comportamiento de los edificios en estudio que presentaron la combinación de dos patologías actuando simultáneamente. Considerando las patologías que se analizaron en la sección anterior, se tiene un total de 21 combinaciones posibles, estas combinaciones son mostradas en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Combinaciones posibles de dos patologías

N° de combinación	Combinación
1	Asimetría de Esquina-Planta baja débil
2	Asimetría de Esquina-Irregularidad en elevación
3	Asimetría de Esquina-Irregularidad en planta
4	Asimetría de Esquina-Columnas cortas
5	Asimetría de Esquina-Golpeteo
6	Planta baja débil-Irregularidad en elevación
7	Planta baja débil-Irregularidad en planta
8	Planta baja débil-Columnas cortas
9	Planta baja débil- Golpeteo
10	Planta baja débil- Cambio de rigidez en elevación
11	Irregularidad en elevación-Irregularidad en planta
12	Irregularidad en elevación-Columnas cortas
13	Irregularidad en elevación-Cambio de rigidez en elevación
14	Irregularidad en elevación-Golpeteo
15	Irregularidad en planta-Columnas cortas
16	Irregularidad en planta-Cambio de rigidez en elevación
17	Irregularidad en planta-Golpeteo
18	Columnas cortas-Cambio de rigidez en elevación
19	Columnas cortas-Golpeteo
20	Cambio de rigidez en elevación-Golpeteo
21	Golpeteo izquierdo-Golpeteo derecho

La distribución de las combinaciones presentadas en la Tabla 3.4 es mostrada en la figura 3.13, uno de los ejes horizontales corresponde a las combinaciones posibles de patologías, el otro corresponde al estado de daño presentado en los edificios con tal combinación y en el eje vertical se tiene el número de estructuras en cada estado de daño para la combinación correspondiente.

En la figura 3.13 se puede observar que las combinaciones donde no se tuvieron daños (estado sin daños) son Las combinaciones 2, 6 y del 11-14 (véase Tabla 3.4). En estas combinaciones se tiene como constante la patología de irregularidad en elevación. Cabe mencionar que los edificios con irregularidad en elevación tienen sistema estructural de marcos de concreto, marcos de acero y estructuras mixtas.

Las estructuras con las combinaciones 1, del 3-5 y del 7-10 (véase Tabla 3.4) presentaron daños moderados, severos y nulos, estas combinaciones tienen como principales componentes las patologías de asimetría en esquina y planta baja débil, de este segundo grupo de patologías, se puede decir que las más perjudiciales fueron planta baja débil-columnas cortas y planta baja débil-cambio de rigidez, en las cuales, el número de casos con daños severos superó a los casos con daños moderado o nulos.

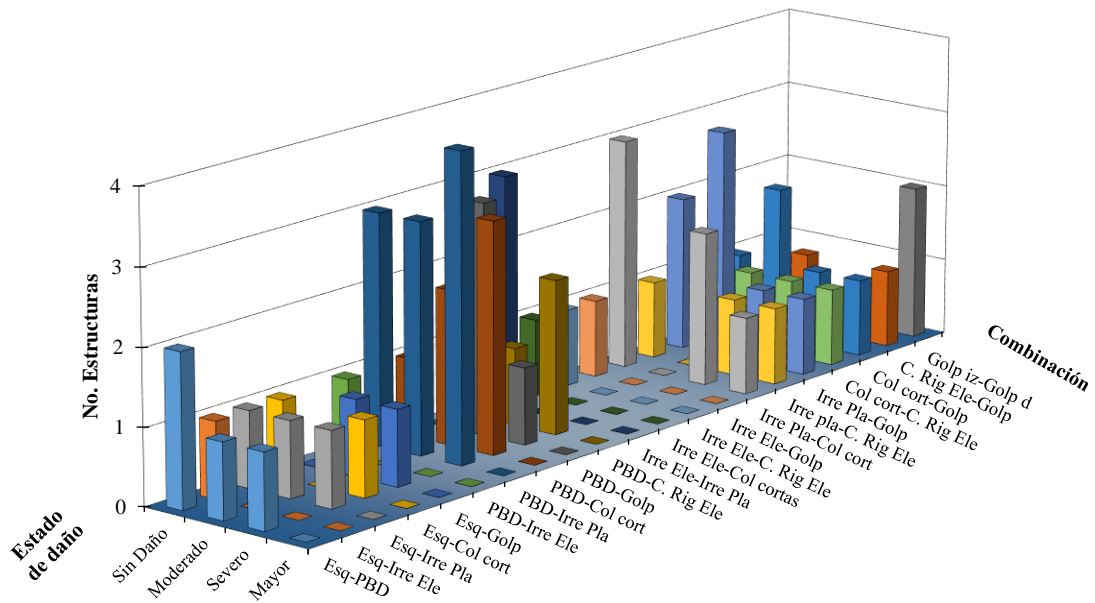


Figura 3.13 Distribución de los edificios de estudio, clasificados por la combinación de patologías presentes y el estado de daño observado

Por último, en la figura anterior se puede observar que las combinaciones más peligrosas fueron las combinaciones del 15 al 21 (véase Tabla 3.4), en donde se tuvieron los daños mayores. Estas combinaciones tienen como componentes las patologías de: irregularidad en planta, columnas cortas, cambio de rigidez y golpeteo, congruente con lo observado en la figura 3.3. De este último grupo de combinaciones, se puede observar que la más desfavorable corresponde a la combinación golpeteo derecho-golpeteo izquierdo, donde se tiene más cantidad de daños mayores.

Cabe mencionar que al seleccionar solo los edificios que cumplen con la combinación de dos patologías, según las combinaciones posibles, la muestra se reduce en gran manera. Lo anterior se puede observar en la figura 3.13, dado que el eje vertical solo llega a 4. Estas estadísticas ofrecen un plano general de los efectos de la combinación de patologías en el nivel de daño observado, sin embargo, son insuficientes para ofrecer conclusiones contundentes.

La distribución mostrada en la figura 3.13 corresponde al total de los edificios de estudio; es decir, no hace distinción de los tipos estructurales. Como ya se discutió anteriormente, las estructuras más vulnerables fueron las estructuras a base de losas planas, por tal, es preciso analizar el efecto de estas combinaciones en este grupo de estructuras. En la figura 3.14 se muestra la distribución de edificios de losas planas, de acuerdo con las combinaciones presentes en los edificios y el estado de daño observado.

En la figura 3.14 lo primero que llama la atención es la carencia de datos, en muchas de las combinaciones no se presentaron datos o únicamente hay un caso por combinación. Lo anterior debido a la reducción de la muestra por el grado de precisión del análisis.

En la figura 3.14 se pueden identificar dos grupos: uno donde los daños fueron principalmente severos, en este grupo las patologías predominantes son asimetría de esquina y planta baja débil; en el segundo grupo se tuvieron daños mayores, en este grupo de nuevo se observa que las combinaciones en donde se presentaron los daños mayores son aquellas en donde las patologías presentes son: irregularidad en planta, columnas cortas, cambio de rigidez y golpeteo.

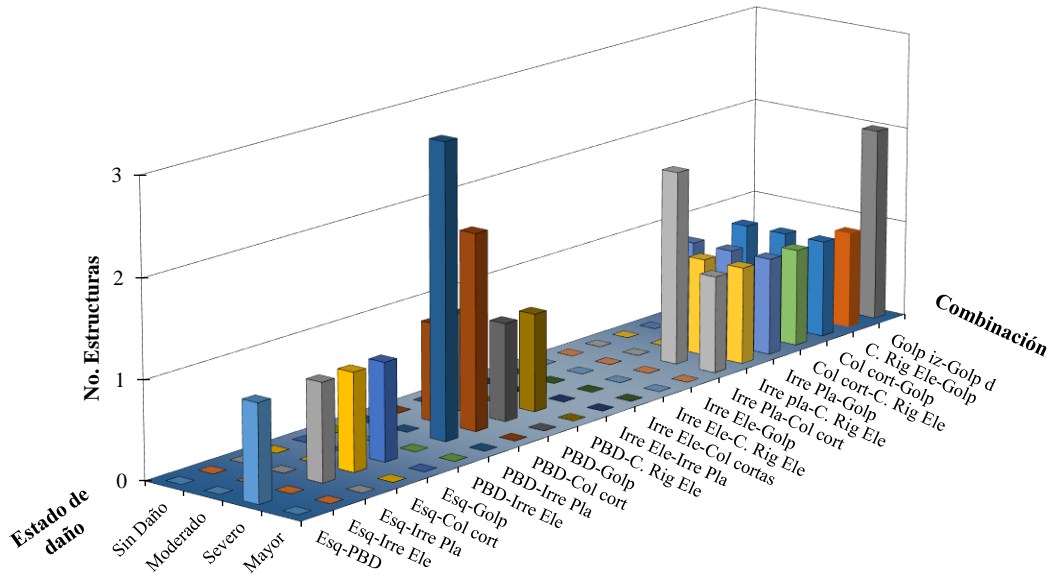


Figura 3.14 Distribución de los edificios de losas planas, clasificados por la combinación de patologías presentes y el estado de daño observado

Cabe mencionar que las estructuras de losas planas fueron muy susceptibles a las combinaciones de dos patologías, pues en todos los casos donde se tuvieron estas combinaciones se presentaron por lo menos daños moderados. Es decir, no se dieron casos en donde un edificio con dos patologías o más hayan permanecido sin daños.

Con lo anterior se puede decir que, cuando un edificio de losas planas tiene dos o más agravantes se pueden esperar, por lo menos, daños moderados cuando un sismo intenso se haga presente.

El principal problema de analizar únicamente las estructuras con tipo estructuras de losas planas, es que el tamaño de la muestra se reduce, y ya no es posible observar una relación o tendencia en el comportamiento. Es por esto que, a diferencia de la sección anterior, no se analizarán las combinaciones contemplando el nivel de las patologías, pues no se cuentan con datos suficientes.

CAPÍTULO 4: INFLUENCIA DE PATOLOGÍAS EN LA VULNERABILIDAD SÍSMICA

CAPÍTULO 4

INFLUENCIA DE PATOLOGÍAS EN LA VULNERABILIDAD SÍSMICA

4.1 Objetivo

Proponer una metodología para determinar una función que permita estimar la relación entre el daño esperado en una estructura construida sin la presencia de patologías estructurales contra el daño esperado en una estructura con una patología, esto ante la presencia de un mismo nivel de intensidad sísmica. Por otro lado, aplicar la metodología que se propone para las patologías mostradas en el capítulo anterior, en las estructuras de losas planas.

4.2 Antecedentes

En el primer capítulo de esta tesis se presentó el concepto de vulnerabilidad sísmica, es decir, el daño esperado en una estructura debido a una intensidad sísmica determinada. Se presentó un ejemplo de una curva de vulnerabilidad, en la cual se observa cómo el daño esperado aumenta en función de la intensidad del movimiento sísmico hasta llegar a un punto cercano al colapso de la estructura. También se habló sobre las diferentes maneras de estimar las funciones de vulnerabilidad y se concluyó que la forma más acertada para hacerlo es mediante métodos analíticos.

La ecuación 1.7, propuesta por Miranda (1999) y Ordaz (2000), se formuló a través del análisis no lineal de un gran número de modelos estructurales, para poder representar el universo completo de los edificios con características similares (tipo estructural, número de niveles y fecha de construcción), a fin de abarcar todo el catálogo de estructuras. Los resultados de esta ecuación proporcionan el daño esperado de las estructuras con características de diseño, es decir, sin considerar la presencia de patologías.

Por otro lado, en el capítulo anterior se demostró que existe una relación entre las patologías presentes en las estructuras y el nivel de daño observado en ellas. Sin embargo, no se mostró una forma de cuantificar la influencia de estas patologías en el daño.

Para atender a lo anterior, en este capítulo se propone una metodología para, a partir de las estadísticas obtenidas, estimar la influencia de las patologías en el nivel de daño. Mediante la modificación del daño esperado en una estructura con características de diseño (FV de referencia), se obtiene una función de amplificación de daño.

Para ejemplificar esta metodología, se analizarán los edificios de losas planas, por ser el grupo más vulnerable de los edificios de estudio y por contar con la información suficiente para establecer una relación entre el nivel de las patologías y los daños observados. Para esto se tomará como FV de referencia, a la curva determinada mediante la ec. 1.7, para lo cual se consideraron los siguientes parámetros:

- Edificio de 7 niveles de altura
- Año de construcción 1960
- Estructuración a base de losas planas y columnas de concreto
- Uso de oficinas
- Situado en la zona designada como zona de estudio

La plataforma CAPRA utiliza la ecuación 1.7 para de estimar el daño y así evaluar el riesgo sísmico en las estructuras, y esta plataforma se ha convertido en una referencia ineludible para los profesionales de la evaluación de riesgos en todo el mundo (Reinoso *et al*, 2018). Por lo cual se considera la ec. 1.7.

Se debe aclarar que, debido a que la metodología se basa en las estadísticas obtenidas de los edificios de estudio en la zona de estudio, los resultados obtenidos en este capítulo son válidos únicamente para edificios con características estructurales semejantes a los edificios estudiados, situados sobre suelos con características dinámicas similares a esta zona en donde se realizó la investigación.

4.3 Metodología propuesta

La metodología propuesta parte de la siguiente hipótesis: la intensidad experimentada por el grupo de estructuras que se considere fue la misma, y esta intensidad hizo que se presentaran estas estadísticas en específico.

Se analizará la influencia individual de cada patología, según el nivel de esta, por lo que en los edificios donde se tengan dos o más patologías solo se considerará el efecto de una a la vez. La figura 4.1 muestra de manera esquemática el procedimiento a seguir, a fin de encontrar la función de amplificación de daño por la presencia de patologías en las estructuras.

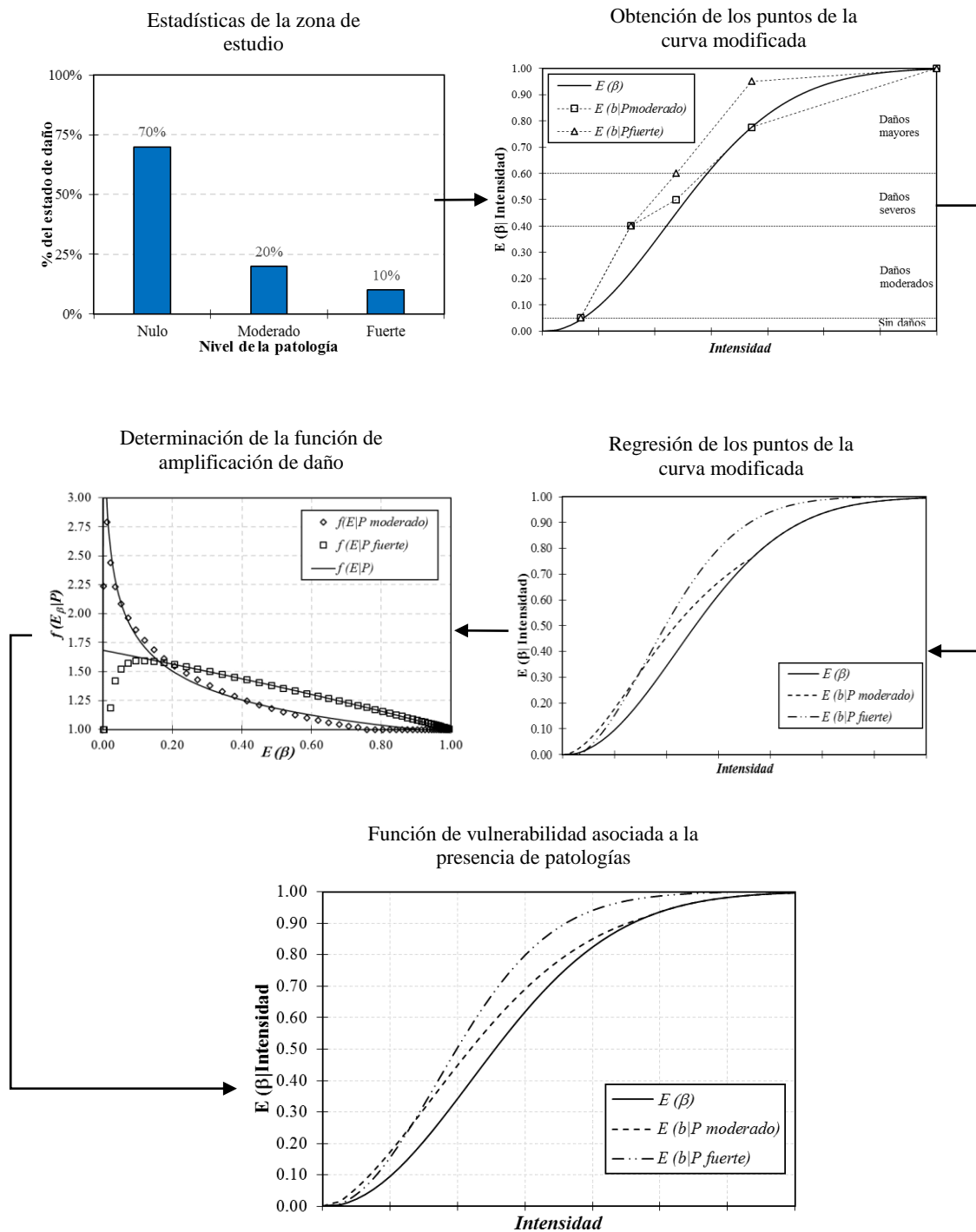


Figura 4.1 Representación gráfica de la metodología propuesta.

I. Estadísticas de la zona de estudio

La metodología parte de las estadísticas obtenidas, para lo cual se consideran todos los niveles posibles de la patología: Nulo, Poco, Moderado, Fuerte e Intenso, según sea el caso (véase Tabla 3.3). Estas estadísticas están vistas desde el estado de daño, es decir, la suma de los datos en cada estado de daño es el 100% de estos. En otras palabras, se hace una subclasificación de la muestra en donde la suma de cada columna será el 100%; por ejemplo, la suma de todos los daños moderados será el 100% pues se consideran los diferentes niveles de la patología, la suma de los daños severos también será el 100% y así sucesivamente.

Se define una zonificación de la curva de vulnerabilidad (CV) de referencia, de acuerdo con el umbral de daño de cada estado de daño (véase Tabla 1.1). De esta manera se tendrán cuatro zonas en la CV de referencia: sin daños ($0 < ID \leq 0.05$), daños moderados ($0.05 < ID \leq 0.40$), daños severos ($0.40 < ID \leq 0.60$) y daños mayores ($0.60 < ID \leq 0.95$). Se tiene un cambio respecto a lo mostrado en la Tabla 1.1, en el estado de daño mayor, el límite superior se cambió a 0.95, que corresponde al 95% de daño, es decir, un punto cercano al colapso de la estructura. Esta variación en el umbral de daño es despreciable, sin embargo, esto será importante en la determinación de la función de amplificación de daño.

II. Obtención de los puntos de la curva modificada

Las estadísticas obtenidas se asocian al umbral de daño en el estado de daño correspondiente, esto es: multiplicar las estadísticas por el valor del umbral de daño. De esta manera se obtiene la participación de cada nivel de la patología en cada estado de daño. El valor de la participación del primer nivel (nulo) de la patología se suma al límite superior del estado de daño anterior. Con esto se obtiene el valor del daño asociado al nivel nulo de la patología. Para obtener el valor del daño esperado asociado a los siguientes niveles de la patología, se debe sumar el valor de su participación al daño esperado del nivel anterior. La ec. 4.1 representa lo antes descrito, y se expresa como sigue:

$$E(\beta|P_i) = \left[\%_{i_j} + \sum_{i=1}^n \%_{i-1_j} \right] \cdot U_j + \sum_{j=1}^n U_{j-1} \quad (4.1)$$

Donde $E(\beta|P_i)$ es el daño esperado asociado al nivel i de la patología que se esté analizando, $\%_{i_j}$ es la estadística presentada por la patología de nivel i en el estado de daño j , U_j es el valor del umbral de daño del estado de daño j , $\%_{i-1_j}$ es la estadística presentada por la patología de nivel $i - 1$ en estado de daño j y U_{j-1} es el valor del umbral de daño del estado de daño $j - 1$.

De acuerdo con su concepción, la CV de referencia, representa el daño esperado en estructuras **sin la presencia de patologías**, por lo que las estadísticas correspondientes al nivel “nulo” (ausencia) de la patología que se esté analizando, es reproducida fielmente por la esta curva.

Basados en lo anterior, la intensidad en la que se presenta la estadística es la intersección del valor del daño esperado asociado al nivel nulo de la patología con la CV de referencia. Como se considera que las patologías tienen un efecto amplificante de daño, todos los valores de daño esperado asociadas a los diferentes niveles de la patología se presentan en una misma intensidad sísmica. A manera de ejemplo, en la figura 4.2, se muestran algunos valores estadísticos superpuestos en la CV de referencia.

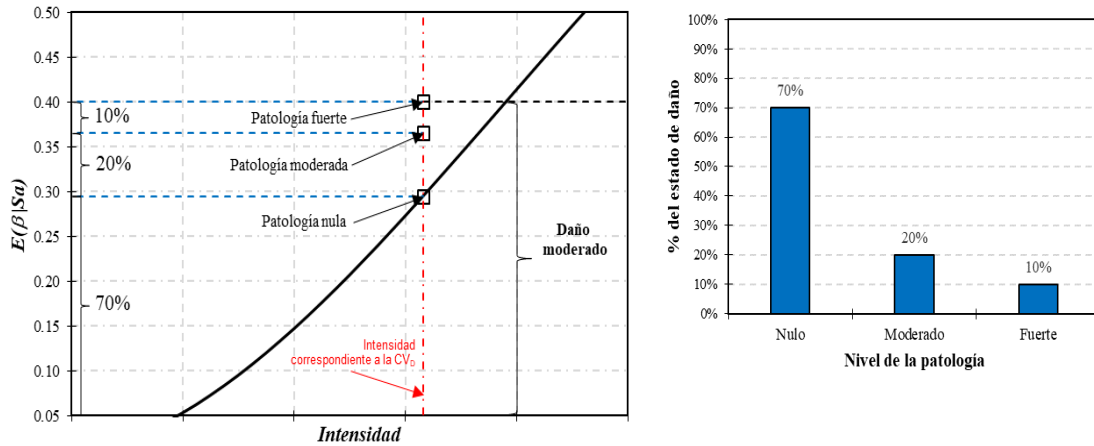


Figura 4.2 Estadística ilustrativa del estado de daño moderado y su relación con la CV de referencia

Como se puede observar en la figura 4.2 existen tres niveles de daño para una misma intensidad sísmica, cada nivel de daño está asociado a un nivel de la patología (nulo, moderado y fuerte, en el ejemplo). Repitiendo lo mostrado hasta este punto para todos los estados de daño se tendrán cuatro nuevos puntos que indican los valores de daño que tendría la estructura con presencia de una patología. Además de los puntos correspondientes a cada estado de daño se tendrán dos puntos de control: 0 (PC1) y 1 (PC2). Estos puntos de control resultan de que, para una intensidad sísmica nula no se presentarán daños, es decir, cuando la intensidad es cero el daño también es cero; mientras que, para intensidades muy altas se espera el daño total de la estructura, esto es, a intensidades máximas el daño será 1.

III. Regresión de los puntos de la curva modificada

Estos nuevos puntos representan los nuevos niveles de daño que una curva de vulnerabilidad hipotética debería de describir para una misma intensidad ante la presencia de patologías. No obstante, con esta serie de puntos es casi imposible obtener una función continua. Para atender a lo anterior, se realiza una regresión de los puntos y así se tendrá una nueva curva, que corresponde a la curva de vulnerabilidad modificada. Esta nueva curva deberá estar sujeta a las siguientes restricciones: se encuentra limitada entre 0 y 1 y, en ningún caso, el daño esperado será menor que el daño esperado de la CV de referencia.

Estas restricciones se deben a que, el daño fuera de estos límites (0 y 1) no tiene interpretación física, no existen daños negativos ni daños mayores al colapso. Mientras que un daño menor al esperado sin la presencia de patologías contradice las hipótesis con las cuales se construyó esta metodología.

IV. Determinación de la función de amplificación de daño

Recordando que el objetivo es encontrar una función de amplificación de daño por la presencia de patologías, es necesario determinar esta amplificación. Lo anterior se logra dividiendo el daño esperado asociado a un nivel de la patología entre el daño esperado correspondiente a la CV de referencia, ambos daños para una misma intensidad. La ec. 4.2 describe lo antes explicado y, se expresa como sigue:

$$f(E_{\beta}|P_i) = \frac{E(\beta|P_i, I_k)}{E(\beta|I_k)} \quad (4.2)$$

Donde $f(E_{\beta}|P_i, I_k)$ es el factor de amplificación de daño por la presencia de patologías de nivel i , $E(\beta|P_i, I_k)$ es el daño esperado asociado al nivel de la patología i correspondiente a una intensidad sísmica k y, $E(\beta|I_k)$ es el daño esperado en estructuras con características de diseño (CV de referencia) correspondiente a una intensidad sísmica k .

La ec. 4.2 devuelve un valor de f para cada nivel de la patología, asociado al daño esperado en las estructuras con características de diseño. Es decir, para cada valor del daño esperado en la CV de referencia se tendrá un diferente valor de f . Se obtendrán diferentes valores del factor de amplificación dependiendo del intervalo de intensidad que se utilice para determinarlos, por lo que se tendrá una secuencia discreta de puntos.

Finalmente, ajustando estos puntos a una curva se obtiene la función de amplificación de daño por la presencia de patologías. Esta nueva curva es función del daño esperado en la CV de referencia y tiene la siguiente característica: el factor es grande para los primeros valores del daño esperado y se reduce bruscamente a medida que el daño esperado se acerca a la unidad.

Esta función de amplificación de daño debe de sujetarse a la siguiente restricción: en ningún caso, el valor de f es menor a la unidad. Al no cumplirse esta restricción significaría que el daño esperado asociado a la presencia de una patología es menor que el daño esperado en la CV de referencia. En la figura 4.3 se muestra un ejemplo del ajuste de los valores de f , la función que describe esta curva de ajuste es la función buscada.

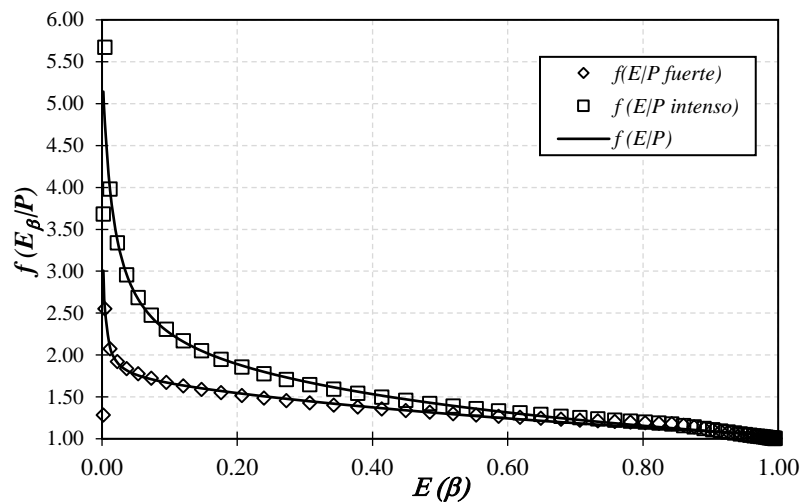


Figura 4.3 Valores de f y su curva de ajuste (función de amplificación de daño)

Cabe mencionar que las restricciones impuestas tanto en la función de amplificación como en la primera curva modificada son para compensar los posibles errores al momento de hacer la regresión de los puntos determinados.

V. Función de vulnerabilidad asociada a la presencia de patologías

Finalmente, al aplicar estas funciones de amplificación de daño, se pueden obtener nuevas funciones de vulnerabilidad asociadas a cada patología a partir de una función de vulnerabilidad asociada a un tipo estructural. Esto se expresa en la ec. 4.3:

$$E(\beta_{mod}|I, P_i) = E(\beta_{diseño}|I) f(E_\beta|P_i) \quad (4.3)$$

Donde $E(\beta_{mod}|I, P_i)$ es el daño esperado asociado a una intensidad de demanda I considerando la presencia de una patología de nivel i a partir del daño esperado de una estructura con características de diseño $E(\beta_{diseño}|I)$ asociado a una intensidad de demanda I , afectado por un factor de amplificación de daño asociado a una patología de nivel i , que está en función del daño esperado en estructuras sin la presencia de patologías, $f(E_\beta|P_i)$.

4.4 Aplicación de la metodología propuesta

Para ejemplificar esta metodología, se considerarán las estructuras de losas planas, examinando las patologías que se analizaron en el capítulo anterior. Solo se aplica la metodología para estas patologías por ser las influyentes en el daño y, por lo tal, las más concluyentes.

Planta baja débil

I. Estadísticas de la zona de estudio

Como se mostró en la Tabla 3.3, se consideran tres posibles niveles de planta baja débil: nulo, moderado y fuerte. Las estadísticas obtenidas se muestran en la Tabla 4.1, el 100% de los datos en el estado de daño “Sin daño” corresponden al nivel nulo de planta baja débil, es decir, todas las estructuras de losas planas que permanecieron sin daños luego del sismo, no tenían planta baja débil. El mismo caso a este se presenta en el estado de daño “Mayor”. La mayor influencia en el daño se presenta en el estado de daño “severo”, donde el 75% de los daños se presentaron en los edificios que sí poseían planta baja débil.

Tabla 4.1 Estadísticas correspondientes a los edificios de losas planas con planta baja débil vistas desde el estado de daño

Nivel de la patología	Estado de daño			
	Sin Daño	Moderado	Severo	Mayor
Nulo	100%	75%	25%	100%
Moderado	0%	25%	75%	0%
Fuerte	0%	0%	0%	0%

II. Obtención de los puntos de la curva modificada

Aplicando la ec. 4.1 es posible asociar las estadísticas de la Tabla 4.1 para obtener el daño esperado asociado a los diferentes niveles de planta baja débil. Los daños esperados y los puntos de control, que se explicaron en el planteamiento de la metodología son mostrados en la Tabla 4.2. Como se puede observar, para el nivel nulo (ausencia) de planta baja débil, el daño esperado se expresa como $E(\beta|\gamma)$, pues con la hipótesis asumida, este daño corresponde al daño esperado en estructuras con características de diseño y se calculó con la ec. 1.7 (Ordaz *et al*, 2000).

Cabe resaltar que los daños esperados son iguales en los dos niveles de planta baja débil (moderada y fuerte), pues como se observó en la Tabla 4.1, no se tienen edificios con planta baja débil de nivel fuerte en la muestra de estudio. Por lo anterior se considera que la planta baja débil tiene el mismo efecto en las estructuras de losas planas, sin importar el nivel de esta. No obstante, en investigaciones futuras, cuando el tamaño de la muestra lo permita, se estimará la influencia este nivel de la patología en el daño sísmico.

Tabla 4.2 Daño esperado asociado a los diferentes niveles de planta baja débil

Nivel de la Patología	E (βP_i)	Estados de daño					
		PC1	Sin Daño	Moderado	Severo	Mayor	PC2
Nulo	$E(\beta \gamma)$	0.00	0.05	0.31	0.45	0.95	1.00
Moderado	$E(\beta P_{\text{moderado}})$	0.00	0.05	0.40	0.60	0.95	1.00
Fuerte	$E(\beta P_{\text{fuerte}})$	0.00	0.05	0.40	0.60	0.95	1.00

Como se estipuló en el planteamiento de la metodología, los daños esperados asociados a cada nivel de la patología se presentan para una misma intensidad sísmica. La intensidad sísmica correspondiente es la intersección del daño esperado asociado a la ausencia de patologías, con la curva de vulnerabilidad de estructuras con características de diseño (CV de referencia). Por tal, los daños esperados en el mismo estado de daño, se sitúan sobre una línea vertical en las intensidades. Lo anterior se puede observar la figura 4.4, donde se mapean los daños esperados asociados a la presencia de planta baja débil y la CV de referencia.

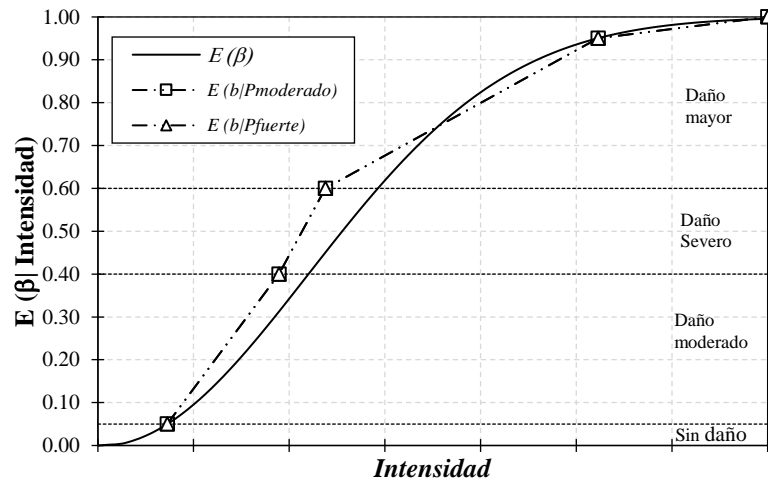


Figura 4.4 Daño esperado asociado a la presencia de planta baja débil en edificios de losas planas de 6 a 8 niveles (curva discreta)

III. Regresión de los puntos de la curva modificada

Al hacer una regresión de los puntos mostrados en la figura anterior, se obtienen las curvas mostradas en la figura 4.5. Se pudo observar en la figura 4.4 que la influencia de la planta baja débil se presenta únicamente en los daños moderados y severos; sin embargo, ajustar los puntos de la figura 4.4 a una curva produce también una amplificación de los daños mayores.

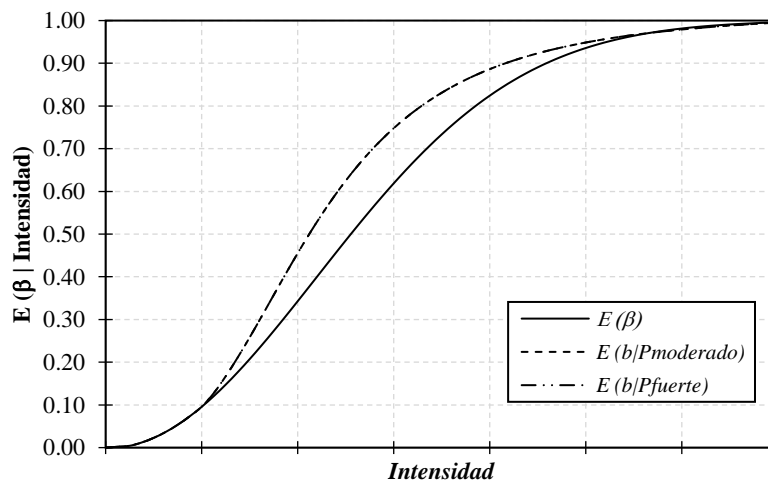


Figura 4.5 Daño esperado asociado a la presencia de planta baja débil en edificios de losas planas de 6 a 8 niveles (curva continua)

IV. Determinación de la función de amplificación de daño

La curva suavizada que se muestra en la figura 4.5 ofrece un valor de daño para cada intensidad, con lo cual es posible aplicar la ec. 4.2 y así obtener los valores de f asociados a los diferentes valores

de daño esperado en la CV de referencia. Estos valores de f se muestran en la figura 4.6 que es una gráfica del factor de amplificación vs el daño esperado en la CV de referencia.

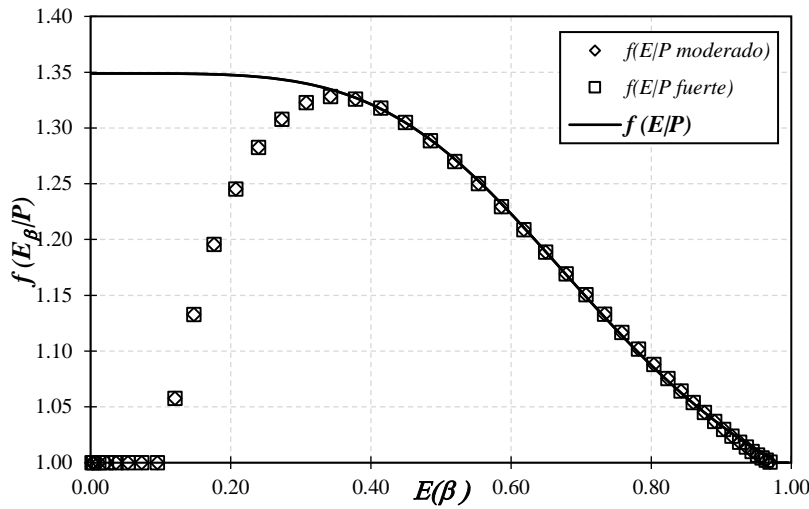


Figura 4.6 Valores de f y función de amplificación de daño por la presencia de planta baja débil

La función que describe el comportamiento del factor de amplificación (curva de ajuste) y, por lo tanto, la función de amplificación de daño, está dada por la ec. 4.4:

$$f(E_\beta|PBD) = 1.35 + \frac{-0.455E(\beta)^{4.39}}{0.747^{4.39} + E(\beta)^{4.39}} \quad (4.4)$$

Donde $f(E_\beta|PBD)$ es la función de amplificación de daño por la presencia de planta baja débil, $E(\beta)$ es el daño esperado en la CV de referencia.

Irregularidad en planta

I. Estadísticas de la zona de estudio

Al igual que en la patología de planta baja débil, existen tres posibles niveles de irregularidad en planta: nulo, moderado y fuerte. En la Tabla 4.3 se muestran las estadísticas correspondientes a esta patología. Al igual que en la figura 3.10, en la Tabla 4.3 se puede observar como la irregularidad en planta tuvo mayor influencia en los daños moderados y severos cuando la irregularidad fue moderada; mientras que, cuando la irregularidad fue fuerte, se presentaron más daños severos y mayores.

Tabla 4.3 Estadísticas correspondientes a los edificios de losas planas con irregularidad en planta vistas desde el estado de daño

Nivel de la patología	Estado de daño			
	Sin Daño	Moderado	Severo	Mayor
Nulo	88%	50%	25%	50%
Moderado	13%	50%	25%	0%
Fuerte	0%	0%	50%	50%

II. Obtención de los puntos de la curva modificada

A partir de los datos de la Tabla 4.3, se obtiene el daño esperado asociado a los diferentes niveles de irregularidad. Estos valores de daño esperado son mostrados en la Tabla 4.4. Cabe mencionar que,

debido a la forma en que fue concebida la metodología (ec. 4.1), en ningún caso el daño esperado asociado a un nivel de la patología será menor al daño esperado asociado al nivel anterior de la patología. Esto se puede observar en la Tabla 4.4 en el nivel fuerte pues, a pesar de no tener participación en los daños moderados, el daño esperado es el mismo que el daño esperado asociado a una irregularidad moderada. En otras palabras, el daño esperado asociado a un nivel de patología será, por lo menos, igual al daño esperado asociado al nivel anterior de la patología que se esté analizando.

Tabla 4.4 Daño esperado asociado a los diferentes niveles de irregularidad en planta

Nivel de la Patología	E (βP_1)	Estados de daño					
		PC1	Sin Daño	Moderado	Severo	Mayor	PC2
Nulo	E ($\beta \gamma$)	0.00	0.04	0.23	0.45	0.78	1.00
Moderado	E ($\beta P_{\text{moderado}}$)	0.00	0.05	0.40	0.50	0.78	1.00
Fuerte	E (βP_{fuerte})	0.00	0.05	0.40	0.60	0.95	1.00

Los daños esperados de la Tabla 4.4 se muestran gráficamente en la figura 4.7. De nuevo, los daños esperados dentro de un mismo estado de daño se presentan para una misma intensidad.

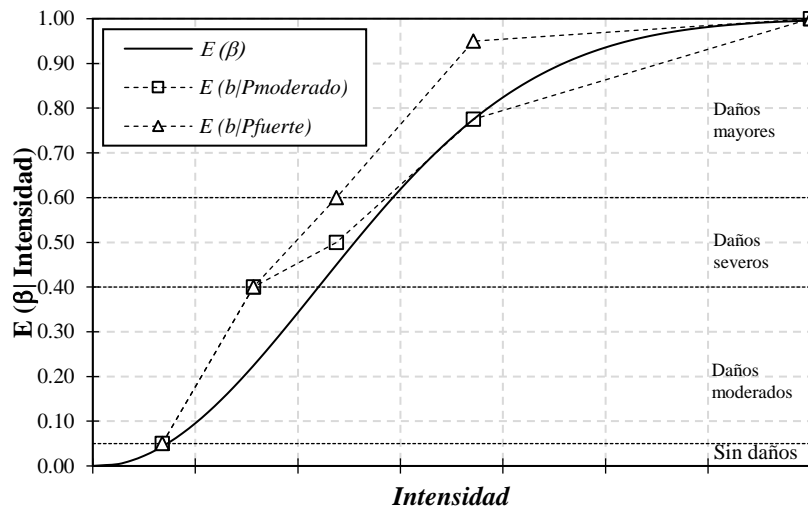


Figura 4.7 Daño esperado asociado a la presencia de irregularidad en planta en edificios de losas planas de 6 a 8 niveles (curva discreta)

III. Regresión de los puntos de la curva modificada

Al ajustar los puntos de la figura anterior se obtienen las curvas que se presentan en la figura 4.8, estas son las curvas de vulnerabilidad modificadas por la presencia de irregularidad en planta, para los dos niveles de esta patología (modera y fuerte).

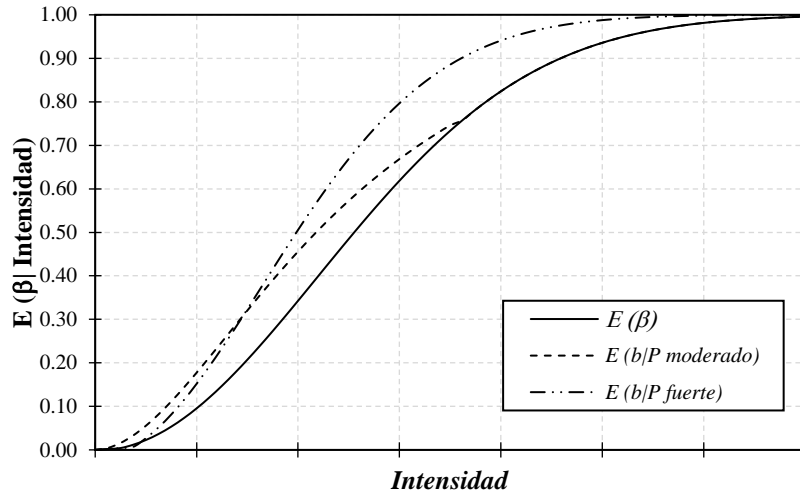


Figura 4.8 Daño esperado asociado a la presencia de irregularidad en planta en edificios de losas planas de 6 a 8 niveles (curva continua)

IV. Determinación de la función de amplificación de daño

Con la información proporcionada por las curvas modificadas de la figura anterior y aplicando la ec. 4.2 se obtienen valores del factor f para los diferentes valores del daño esperado en la CV de referencia. Los valores de f son mostrados en la figura 4.9.

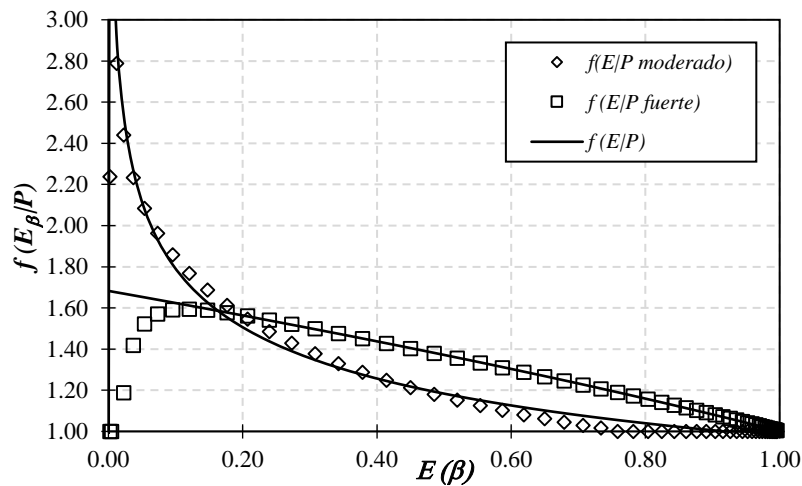


Figura 4.9 Valores de f y función de amplificación de daño por la presencia de irregularidad en planta

Las curvas de ajuste de los valores de f en la figura anterior son las curvas de amplificación de daño, por lo tal, las funciones que describen el comportamiento de estas curvas son las funciones de amplificación de daño. Las funciones de amplificación de daño por la presencia de irregularidad en planta, de nivel moderado (ec. 4.5) y de nivel fuerte (ec. 4.6) se muestran a continuación:

$$f(E_{\beta}|IP_{mod}) = -0.33 + \frac{25.55E(\beta)^{-0.23}}{3.24 + E(\beta)^{-0.23}} \quad (4.5)$$

$$f(E_{\beta}|IP_{fuer}) = 1.68 \left(1 + \frac{-1.69E(\beta)}{2.89} \right)^{\left(\frac{-1}{-1.69} \right)} \quad (4.6)$$

Donde $f(E_\beta | IP_{mod})$ y $f(E_\beta | IP_{fuer})$ son las funciones de amplificación de daño por la presencia de irregularidad en planta de nivel moderado y fuerte, respectivamente.

Columnas cortas

I. Estadísticas de la zona de estudio

Como se mencionó en el capítulo anterior, las columnas cortas se clasificaron en tres posibles categorías; ausencia (nulo); altura de los muros de relleno respecto a la altura de entrepiso, de 0 al 50%; y altura de los muros de relleno respecto a la altura de entrepiso, del 50 al 100%. Las estadísticas correspondientes a esta patología en los edificios de losas planas se muestran en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Estadísticas correspondientes a los edificios de losas planas con columnas cortas vistas desde el estado de daño

Nivel de la patología	Estado de daño			
	Sin Daño	Moderado	Severo	Mayor
Nulo	100%	75%	33%	50%
0-50%	0%	25%	33%	0%
50-100%	0%	0%	33%	50%

II. Obtención de los puntos de la curva modificada

Al aplicar la ec. 4.1 con los datos mostrados en la Tabla 4.5 se obtiene el daño esperado asociado a los diferentes niveles de columnas cortas. Estos valores de daño esperado son lo mostrados en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6 Daño esperado asociado a los diferentes niveles de columnas cortas

Nivel de la Patología	E (βP_i)	Estados de daño					PC2
		PC1	Sin Daño	Moderado	Severo	Mayor	
Nulo	E ($\beta \gamma$)	0.00	0.05	0.31	0.47	0.78	1.00
0-50%	E ($\beta P_{0-50\%}$)	0.00	0.05	0.40	0.53	0.78	1.00
50-100%	E ($\beta P_{50-100\%}$)	0.00	0.05	0.40	0.60	0.95	1.00

Nuevamente, al mapear los datos de la Tabla 4.6 en una gráfica de daño vs intensidad se obtiene la figura 4.10.

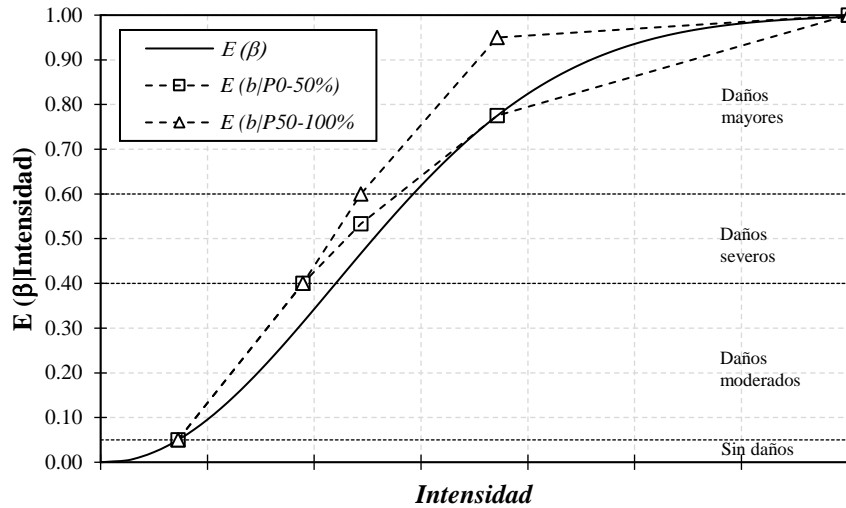


Figura 4.10 Daño esperado asociado a la presencia de columnas cortas en edificios de losas planas de 6 a 8 niveles (curva discreta)

III. Regresión de los puntos de la curva modificada

Al ajustar los puntos de la figura anterior a una curva, se obtienen las curvas mostradas en la figura 4.11. Lo que llama la atención de este par de curvas es que, al principio ambas curvas son iguales y, cuando alcanzan la zona de daños severos, la curva asociada a columnas cortas superiores al 50% se separa en gran manera de la CV de referencia. Mientras que la curva asociada a columnas cortas inferiores al 50% se reincorpora a la CV de referencia después de este valor de daño.

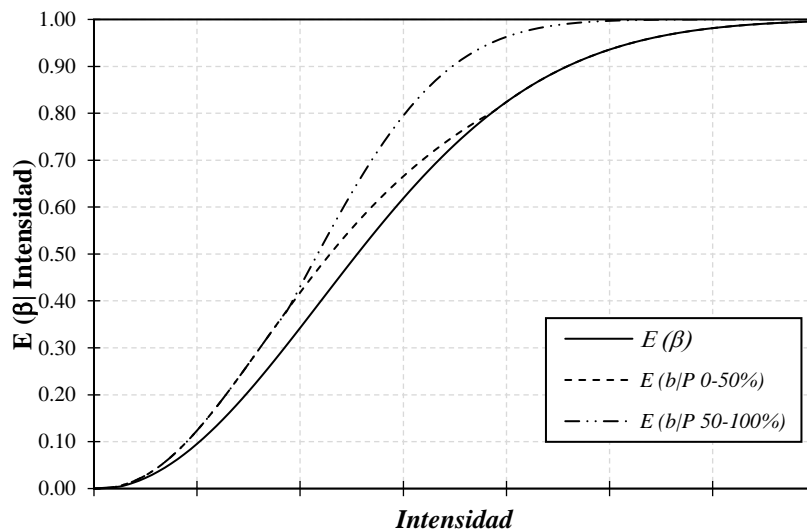


Figura 4.11 Daño esperado asociado a la presencia de columnas cortas en edificios de losas planas de 6 a 8 niveles (curva continua)

IV. Determinación de la función de amplificación de daño

Con la información que proporcionan las curvas modificadas mostradas en la figura anterior, es posible aplicar la ec. 4.2 para obtener los valores del factor f y al ajustar estos valores a una curva se obtienen las funciones de amplificación de daño asociadas a la presencia de columnas cortas, según el nivel de la patología. Los valores del factor f y las funciones de amplificación de daño se muestran en la figura 4.12.

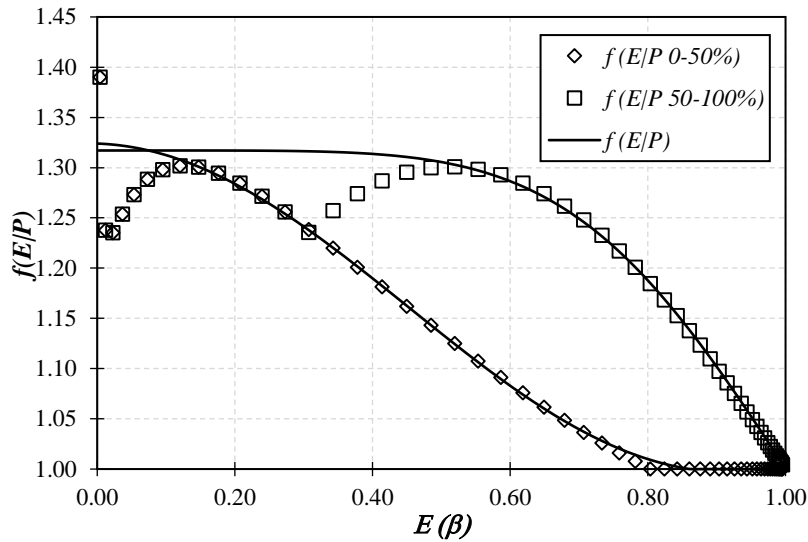


Figura 4.12 Valores de f y función de amplificación de daño por la presencia de columnas cortas

Las funciones de amplificación de daño por la presencia de columnas cortas inferiores al 50% (4.7) y superiores al 50% (ec. 4.8) se presentan a continuación:

$$f(E_\beta | CC_{0-50\%}) = 1.16 + 0.16 \cos(3.37E(\beta) + 0.04) \quad (4.7)$$

$$f(E_\beta | CC_{50-100\%}) = 0.53 + \frac{0.79E(\beta)^{-5.5}}{0.67 + E(\beta)^{-5.5}} \quad (4.8)$$

Donde $f(E_\beta | CC_{0-50\%})$ y $f(E_\beta | CC_{50-100\%})$ son las funciones de amplificación de daño por la presencia de columnas cortas inferiores al 50% y superiores al 50%, respectivamente.

Golpeteo

I. Estadísticas de la zona de estudio

Como se comentó en el capítulo anterior, se propone una clasificación del golpeteo en cuatro posibles niveles: poco, moderado, fuerte e intenso. Pero debido a la reducción del tamaño de la muestra por analizar únicamente las estructuras de losas planas, no se cuentan con datos de estructuras que hayan sufrido los primeros dos niveles de golpeteo. En la Tabla 4.7 se muestran las estadísticas de los edificios de losas planas que sufrieron golpeteo clasificado como fuerte o intenso.

Tabla 4.7 Estadísticas correspondientes a los edificios de losas planas que sufrieron golpeteo vistas desde el estado de daño

Nivel de la patología	Estado de daño			
	Sin Daño	Moderado	Severo	Mayor
Nulo	100%	25%	67%	20%
Fuerte	0%	50%	0%	80%
Intenso	0%	25%	33%	0%

II. Obtención de los puntos de la curva modificada

A partir de los datos de la Tabla 4.7 y aplicando la ec. 4.1 se obtiene el daño esperado asociado a los diferentes niveles de golpeteo. Los valores de daño esperado son mostrados en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8 Daño esperado asociado a diferentes niveles de golpeteo

Nivel de la Patología	E (βP_i)	Estados de daño					
		PC1	Sin Daño	Moderado	Severo	Mayor	PC2
Nulo	E ($\beta \gamma$)	0.00	0.05	0.14	0.53	0.67	1.00
Fuerte	E (βP_{fuerte})	0.00	0.05	0.31	0.53	0.95	1.00
Intenso	E ($\beta P_{intenso}$)	0.00	0.05	0.04	0.60	0.95	1.00

Graficando los datos mostrados en la Tabla 4.8 se construyó la figura 4.13. En esta figura se observa un comportamiento extraño del daño esperado asociado a la ocurrencia de golpeteo, esto debido a la irregularidad en los datos. Pues como se mostró en la Tabla 4.7, en los edificios donde se presentó el golpeteo de nivel fuerte, no se tiene participación de la patología en los daños severo, pero sí tiene participación en los estados anterior y posterior.

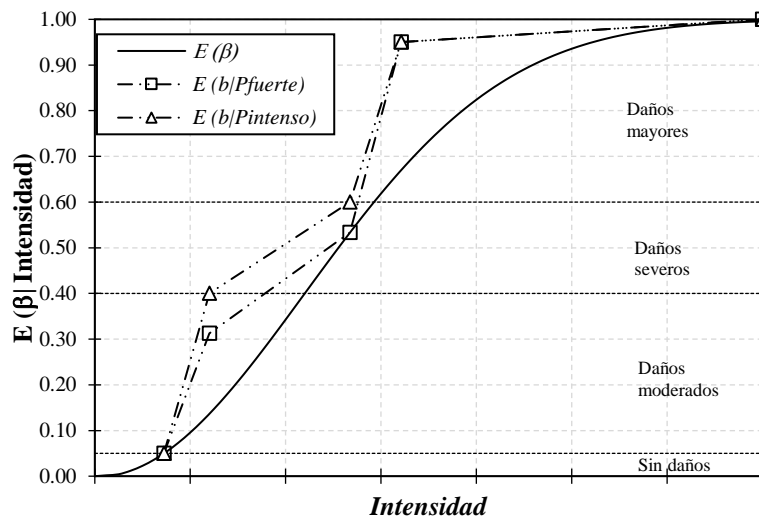


Figura 4.13 Daño esperado asociado a la presencia de golpeteo en edificios de losas planas de 6 a 8 niveles (curva discreta)

Al hacer una regresión de los puntos mostrados en la figura anterior se obtienen las curvas mostradas en la figura 4.14. Se observa una discontinuidad en la forma de las curvas, esto debido a que, por la irregularidad de los datos, al momento de hacer la regresión, la curva sobrepasa el límite de daño (1). Por las restricciones impuestas a la curva modificada es que se tiene la forma que se muestra en la figura, la curva se acerca rápidamente a la unidad y en este valor se obliga a la curva a ser constante.

III. Regresión de los puntos de la curva modificada

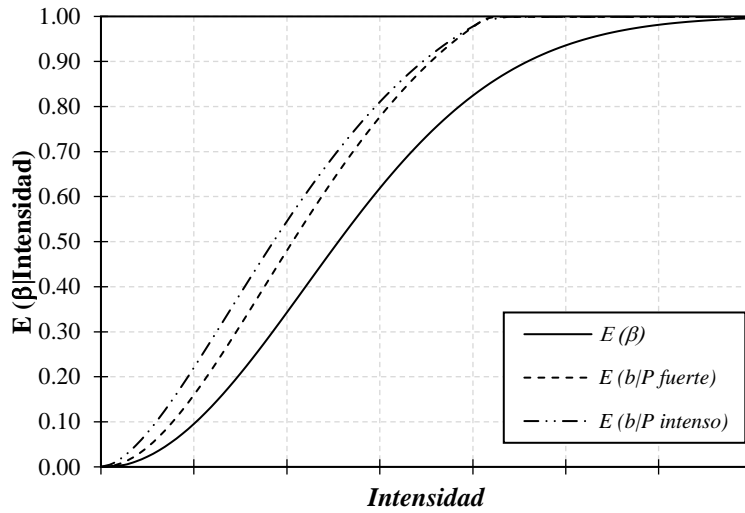


Figura 4.14 Daño esperado asociado a la presencia de golpeteo en edificios de losas planas de 6 a 8 niveles (curva continua)

III. Determinación de la función de amplificación de daño

Con la información que proporcionan las curvas modificada es posible determinar los valores del factor f a través del empleo de la ec. 4.2. Los valores del factor f para los daños esperados en la CV de referencia, así como las curvas de ajuste de estos valores son mostrados en la figura 4.15.

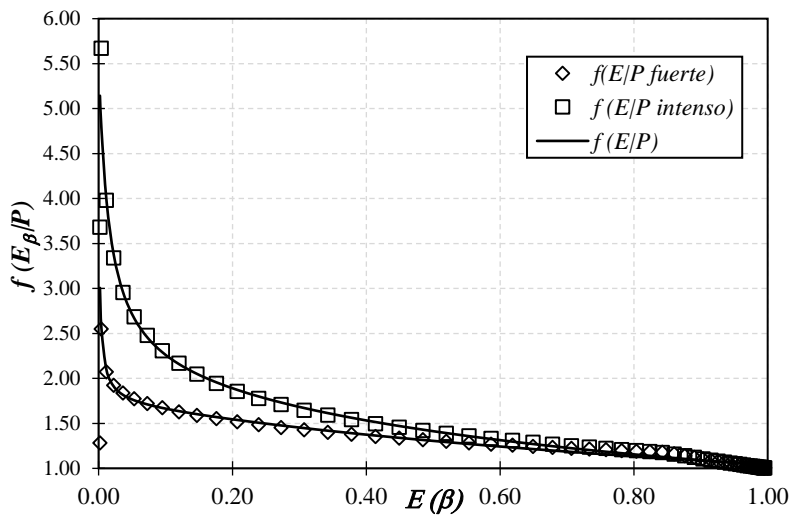


Figura 4.15 valores de f y función amplificante de daño por la ocurrencia de golpeteo.

Las funciones que describen las curvas de ajuste son las funciones de amplificación de daño por la ocurrencia de golpeteo de nivel fuerte (ec. 4.9) y de nivel intenso (ec. 4.10). Estas ecuaciones se muestran a continuación:

$$f(E_\beta|Golp_{fuer}) = \frac{4.18 + 777.44E(\beta)}{1 + 452.67E(\beta) + 294.47E(\beta)^2} \quad (4.9)$$

$$f(E_{\beta}|Golp_{int}) = \frac{5.56 + 131.45E(\beta)}{1 + 66.12E(\beta) + 65.48E(\beta)^2} \quad (4.10)$$

Donde $f(E_{\beta}|Golp_{fuer})$ y $f(E_{\beta}|Golp_{int})$ son las funciones de amplificación de daño por la ocurrencia de golpeteo de nivel fuerte e intenso, respectivamente.

4.5 Análisis de resultados

La figura 4.16 muestra una comparación entre las funciones de amplificación de daño mostradas anteriormente. En esta figura se muestra el daño esperado asociada a las patologías que se analizaron en este capítulo, a partir del daño esperado en la CV de referencia y con base en la información obtenida en la zona de estudio.

En la figura, $E(\beta)$ es el daño esperado en estructuras sin la presencia de patologías (CV de referencia), $E(\beta|PBD)$ es el daño esperado en estructuras con planta baja débil, $E(\beta|IPmod)$ y $E(\beta|IP fuer)$ es el daño esperado en estructuras con irregularidad en planta de nivel moderado y fuerte, respectivamente, $E(\beta|CC 0 - 50\%)$ y $E(\beta|CC 50 - 100\%)$ es el daño esperado en estructuras con columnas cortas menores al 50% y mayores al 50%, respectivamente, $E(\beta|Golp fuer)$ y $E(\beta|Golp int)$ es el daño esperado en estructuras que sufrieren golpeteo de nivel fuerte e intenso, respectivamente.

En los siguientes párrafos se muestra un análisis más profundo de cada una de las curvas de vulnerabilidad asociadas a las patologías.

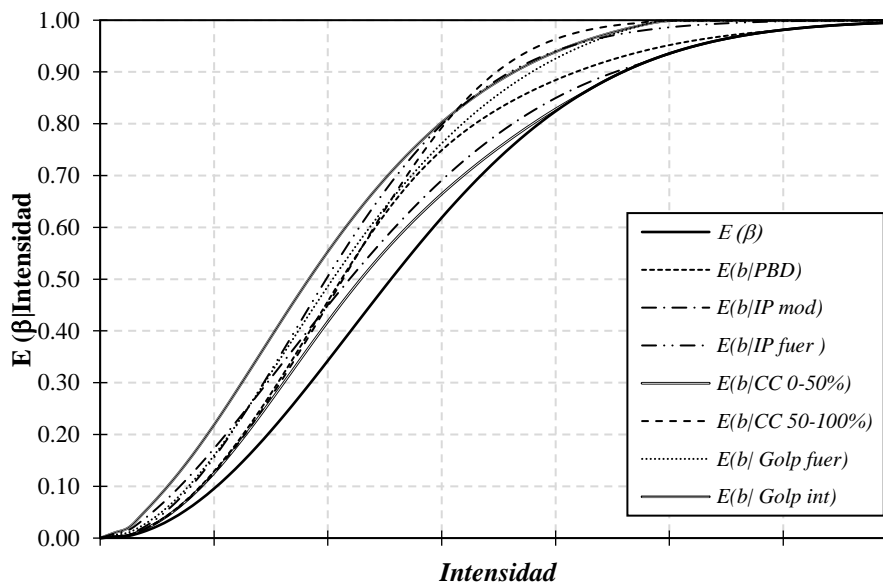


Figura 4.16 Daño esperado en estructuras sin patologías $E(\beta)$, y daño esperado asociado a la presencia de diferentes patologías.

Planta baja débil

Como se pudo observar en las estadísticas correspondientes a esta patología, la influencia de la planta baja débil se presentó en los daños moderados y severo. Sin embargo, al momento de obtener la curva modificada, por el ajuste de los datos, se puede observar que se tiene también una amplificación de los daños mayores, aunque esta amplificación es poca. Debido a la ausencia de datos, no es posible analizar el comportamiento de estructuras con la presencia de planta baja débil de nivel fuerte,

aunque, juzgando las estadísticas, se espera que la influencia en los daños sea superior que la que se observa actualmente.

Al analizar detenidamente la curva de vulnerabilidad modificada por la presencia de planta baja débil (figura 4.5), se puede observar cómo para intensidades bajas, el daño esperado es el mismo que si no se contara con la patología. A medida que la intensidad aumenta, los daños esperados son mayores a los daños descritos por la CV de referencia.

Si se analiza la función de amplificación de daño por la presencia de planta baja en las estructuras, se puede observar cómo para niveles bajos del daño esperado en la CV de referencia, el factor de amplificación es bastante grande. A pesar de que el factor f es grande al principio, no hay una gran diferencia entre los daños esperados. El factor f empieza a tener una repercusión importante en el sector medio de la curva de vulnerabilidad.

A partir de lo observado en la función de amplificación, se espera un incremento promedio del 25%, en los daños severos, en las estructuras con presencia de planta baja débil, respecto a las estructuras que no poseen patologías.

Irregularidad en planta

En las estadísticas se pudo observar que la irregularidad moderada tiene una participación importante en los daños moderados, y una menor participación en los daños severos. Mientras que, la irregularidad fuerte tiene una mayor participación en los daños severos, y una participación casi total en los mayores. Además de esto se puede apreciar que la irregularidad moderada tiene una ligera participación en el estado “Sin daño”, esto se puede interpretar como que, una estructura puede tener irregularidades y resultar ileso siempre y cuando las irregularidades no sean significativas.

Al observar las estadísticas se puede interpretar que la irregularidad fuerte no tendrá participación en los daños moderados y, por tal, su curva de vulnerabilidad sería la misma que la CV de referencia, al menos en este segmento. Sin embargo, debido a la forma en que fue concebida la metodología, el daño esperado asociado a un nivel de patología no puede ser menor al daño asociado al nivel anterior de la misma patología.

Es por esto que en la presentación gráfica de los daños esperados asociados a los diferentes niveles de irregularidad (figura 4.7) al principio los daños esperados son los mismos tanto para la irregularidad moderada como para la irregularidad fuerte. Al sobrepasar el límite de los daños moderados, los daños esperados son diferentes. El daño esperado asociado a una irregularidad fuerte crece en buena cantidad respecto a la CV de referencia. Mientras que, el daño esperado asociado a una irregularidad moderada se incorpora rápidamente a la CV de referencia.

Llama la atención que, en los primeros sectores de la curva de vulnerabilidad, el daño esperado asociado a una irregularidad fuerte es menor que el daño esperado asociado a una irregularidad moderada. Es decir, estas dos curvas se entrecruzan (figura 4.8). Por lo comentado antes sobre la concepción de la metodología, esto no debería de ser; sin embargo, este hecho se debe al ajuste de los puntos mostrados en la figura 4.7.

Esto también se puede apreciar en las funciones de amplificación por la presencia de irregularidad en planta (figura 4.9). Se observa claramente un entrecruzamiento de las funciones. En la forma de las funciones se reafirma el comentario hecho al principio, la irregularidad moderada excita más los daños ligeros, aunque debido a que los valores de $E(\beta)$ son pequeños, no se aprecia tan acentuada la diferencia.

De esto se puede decir que, con la presencia de irregularidad en planta se esperará un incremento en los daños moderados del 50% en promedio, sin importar el nivel de la patología. Si la irregularidad es fuerte se esperará un incremento aproximado del 30% en los daños severos y del 15% en los daños mayores.

Columnas cortas

Como se aprecia en las estadísticas, la distribución de datos de columnas cortas es parecida a la distribución de los datos de irregularidad en planta, por lo que se espera que la influencia sea semejante.

La diferencia entre estas dos patologías se puede observar comparando las estadísticas y las curvas modificadas. La presencia de columnas cortas provoca un desfase respecto a la CV de referencia, menor que el provocado por la irregularidad en planta. Esta diferencia se observa más pronunciada en la zona de daños moderados y más sutil en la zona de daño severos.

Al analizar las funciones de amplificación de daño por la presencia de columnas cortas, llama la atención que al principio los valores del factor f es el mismo para los dos niveles de la patología (marcadores rombo y cuadro en la figura 4.12). Esto debido a la restricción impuesta de que la curva modificada no puede ser menor a la CV de referencia. En contraste con la irregularidad en planta, el entrecruzamiento entre las funciones de amplificación de daño por la presencia de columnas cortas ocurre mucho antes, en un valor muy cercano a cero. Es por esto que en la figura 4.11, pareciera que ambas curvas de vulnerabilidad son tangentes.

Golpeteo

Como se comentó antes, debido a la poca cantidad de datos, se optó por solo mostrar los resultados de la ocurrencia de golpeteo clasificado como fuerte e intenso. Cabe mencionar que en el fenómeno de golpeteo intervienen más factores que los considerados en la clasificación propuesta, altura de los edificios colindantes y la colinealidad de sus losas. Esto ayudaría a entender el por qué la irregularidad de los datos, además del pequeño tamaño de la muestra.

Como se pudo observar en las estadísticas correspondientes a esta patología, la ocurrencia tiene una participación casi total en los daños moderados y mayores, mientras que la participación es muy poca en los daños severos. También llama la atención que la mayor participación se tiene en el golpeteo de nivel fuerte y, debido a lo comentado antes respecto a concepción de la metodología, el daño esperado no será muy distinto en ambos niveles de la patología.

Lo anterior se puede apreciar en la Tabla 4.8 y en la figura 4.13. Lo daños esperados asociados a la ocurrencia de golpeteo se apartan mucho de la CV de referencia, pero se mantienen cercanos entre sí. En la misma figura también se puede apreciar como el daño esperado asociado a la ocurrencia de golpeteo es mucho mayor al daño en la CV de referencia en la zona de daños mayores. No obstante, al hacer la regresión de los puntos, el punto en la zona de daños severos retiene la curva de ajuste a la CV de referencia.

Si se hiciera la regresión de los datos sin considerar este punto (en la zona de daños severos), el resultado sería muy diferente. Este ejercicio se muestra en la figura 4.17, donde se comparan la CV de referencia con la curva modifica originalmente y la curva modificada sin considerar el punto en la zona de daños severos.

Como se puede apreciar, la diferencia es enorme. Aquí queda claro que el golpeteo es la patología más influyente en los daños, como se comentó en el capítulo anterior. Empero, siendo estrictos con la metodología propuesta, se considera que los resultados obtenidos son correctos. Es decir, que tanto la curva modificada como la función de amplificación de daño son adecuadas. A pesar de esto, se deja abierta la opción de modificar la función de amplificación si se cuenta con mayor cantidad de datos, y que estos contradigan los resultados mostrados en esta tesis.

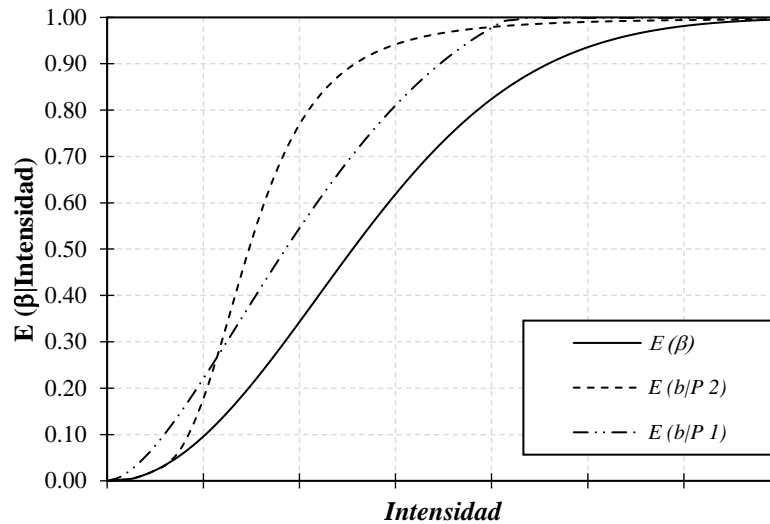


Figura 4.17 Comparación entre la CV de referencia $E(\beta)$ con la curva modificada original $E(\beta|P1)$ y la curva modificada sin considerar los daños severos $E(\beta|P2)$

Comparación entre funciones de amplificación

En la figura 4.18 se presenta una comparación entre las funciones de amplificación de daño asociadas a las patologías mostradas en este capítulo, según el nivel de estas. En esta figura también se muestran unas líneas verticales, estas líneas representan los límites de casa estado de daño.

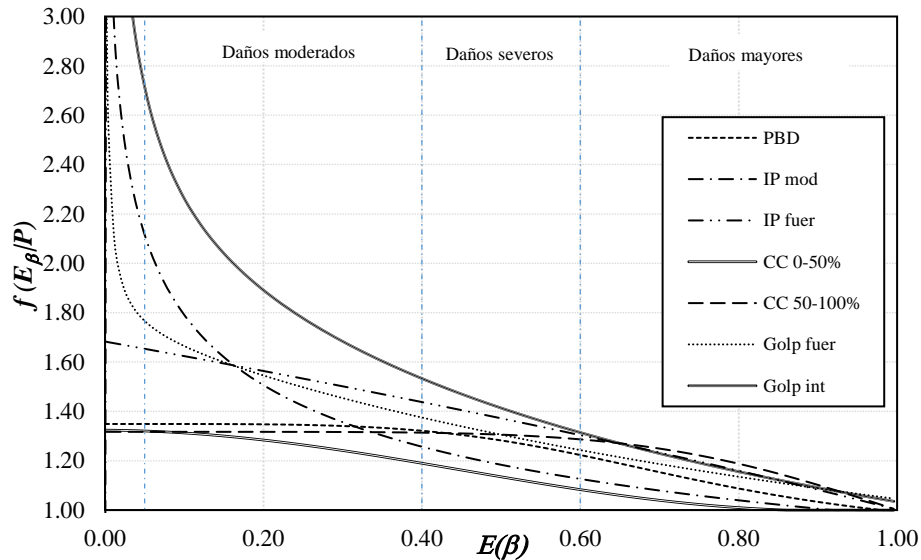


Figura 4.18 Comparación entre funciones de amplificación de daño

Analizando la figura 4.18 se puede observar que, en los daños moderados, la patología que mayor influencia tiene en este estado de daño es el golpeteo de nivel intenso. Debido a la forma de la función de amplificación asociada a este nivel de la patología, la amplificación es muy grande para valores bajo de $E(\beta)$, a más del doble de este valor. Mientras que en los valores de $E(\beta)$ cercanos al límite de este estado de daño, la amplificación es de aproximadamente el 60%. Esto se tiene como que, la ocurrencia de golpeteo intenso, aumenta considerablemente la posibilidad de que una estructura presente daños menores, pero se vuelve más conservador en niveles de daño superiores.

En este mismo estado de daño, llama la atención que, la amplificación asociada a la irregularidad fuerte, es mayor que la amplificación asociada al golpeteo fuerte. Esto, solo para valores de daño esperado en la CV de referencia mayores a 0.20. Las patologías de columnas cortas del 50-100% y

Planta baja débil, producen una amplificación casi constante en este estado de daño. Esta amplificación es de aproximadamente del 30%, siendo la amplificación por planta baja débil un poco mayor que por columnas cortas de altura menor a la mitad de la altura de entrepiso.

Finalmente, la patología que menor impacto tiene en este estado de daño, son las columnas cortas con altura inferior a la mitad de la altura de entrepiso. La amplificación que este nivel de patología produce, es del 25% en promedio.

Continuando con el estado de daños severos, se observa como la amplificación de daños asociada a estas patologías se acota a valores entre el 15 y 40% (valor promedio). En este estado de daño, la patología con mayor influencia en el daño, continúa siendo el golpeteo intenso, seguido de la irregularidad fuerte. Las patologías de: golpeteo fuerte, columnas cortas superiores al 50% y planta baja débil, producen una amplificación similar en los daños, cercana al 30%. Las patologías con menor influencia en los daños resultan ser: irregularidad moderada y columnas cortas inferiores al 50%, siendo esta última la patología que menor repercusión tiene en los daños severos.

Finalmente, analizando las funciones de amplificación en el último segmento, que corresponde a la zona de daños mayores. Se observa un cambio en la tendencia de las curvas. La patología con mayor influencia en los daños pasa a ser columnas cortas superiores al 50%. Después de esta y, describiendo casi la misma curva, se encuentran las funciones asociadas al golpeteo intenso y la irregularidad fuerte. Las patologías de planta baja débil e irregularidad moderada tienen una amplificación menor que las patologías anteriores. Y, por último, las columnas cortas inferiores al 50%, tiene una participación casi nula en este estado de daño.

Haciendo una sinopsis de las funciones de amplificación, la patología que mayor influencia tiene en el daño, es el golpeteo de nivel intenso, seguida por irregularidad en planta de nivel fuerte y columnas cortas superiores al 50%. Mientras que la patología con menor trascendencia en los daños es columnas cortas inferiores al 50%.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

En el capítulo 1 se presentó el concepto de patologías en edificaciones y se concluyó que las patologías que mayor repercusión tienen en el daño sísmico son las patologías causadas por defectos (mala configuración, error en la construcción o deficiencias de materiales). Las patologías en el proceso de construcción son las difíciles de detectar y las peligrosas, pues solo salen a la luz después de una amenaza (un sismo, por ejemplo) y generalmente son el producto de grandes daños. Las patologías asociadas con la configuración son más fáciles de identificar, aunque también tienen una alta influencia en el daño, y su aporte en el comportamiento estructural se ha estudiado en investigaciones anteriores.

En el capítulo 2 se mostró una síntesis sobre las características del sismo del 19 de septiembre de 2017 en la Ciudad de México. Se observó cómo los daños registrados se concentraron a lo largo del límite de la zona de lago, donde el periodo de suelo va de 0.6 a 1.2 segundos. También se pudo observar que, dentro de la zona de daños, las estructuras con mayores daños fueron aquellas de mediana altura, es decir, de 5 a 10 niveles. Se llegó a la conclusión de que existe una correlación entre la ubicación y la altura de los edificios, los edificios de este número de niveles y ubicados en estas zonas de la ciudad fueron los más afectados porque fueron los que presentaron mayores demandas.

En el mismo capítulo, se observó que los daños se concentraron en las delegaciones Benito Juárez y Cuauhtémoc. En esta última se presentó el colapso de una estructura que resultó en la muerte de 49 personas, este es el edificio ubicado en Álvaro Obregón 286. Por esta razón, se decidió tomar esta zona como zona de estudio, analizando todas las estructuras de 6 a 8 niveles dentro de un círculo de 300 metros tomando como centro el colapso en Álvaro Obregón 286. El resultado fue un total de 63 edificios con diferente sistema estructural y con diferentes niveles de daño, a fin de evaluar las características que modifican la vulnerabilidad sísmica de las estructuras.

En el capítulo 3 se presentaron los resultados más relevantes del análisis estadístico hecho a este grupo de estructuras. Se observó que la distribución de daños concuerda con los daños observados en otros sismos, donde muchos edificios resultaron ilesos o con daños menores. Mientras que los casos de colapso son muy pocos. Llama la atención que los colapsos representan el 3% del total de los edificios de estudio. Sin embargo, hay que recordar que la zona de estudio se escogió de la región más afectada, y el que tamaño de la muestra es relativamente pequeño.

Los edificios de estudio se clasificaron por tipo estructural y se llegó a la conclusión de que los edificios más seguros son los edificios con tipo estructural de marcos de acero. Estos edificios permanecieron sin daños luego del sismo. Aunque hay que mencionar que, por el material de construcción, estos son los más rígidos y todos ellos fueron construidos después del año 2000. Por otro lado, las estructuras más afectadas fueron aquellas con sistemas estructural de losas planas de concreto. Así, se puede concluir que el primer parámetro que rige la vulnerabilidad de las estructuras es el tipo estructural.

Al clasificar los edificios de estudio por las patologías presentes y por el estado de daño observado (figura 3.3), se observó que los daños mayores se presentaron en aquellas estructuras que tenían presentes las patologías de irregularidad en planta, columnas cortas, cambio de rigidez y golpeteo, siendo el golpeteo el que más veces se presentó en este estado de daño. Por otro lado, los menores daños se presentaron en las estructuras con la presencia de irregularidad en elevación y asimetría de esquina. No obstante, cabe resaltar que los edificios con asimetría de esquina son principalmente de marcos de acero o de estructuras mixtas, lo que explica el buen comportamiento que tuvieron antes los efectos de torsión.

Se analizó también la misma clasificación, pero esta vez, considerando únicamente los edificios de losas planas (figura 3.4). Se observó que solo dos estructuras con presencia de alguna patología permanecieron sin daños, lo cual contrasta con lo observado en la distribución anterior (figura 3.3).

De esto se puede concluir que las estructuras de losas planas son más susceptibles a la presencia de patologías, es decir, con la presencia de patologías se esperan por lo menos daños moderados en estas estructuras. Comparándolo con la distribución de la figura 3.3 se puede decir que, otros tipos estructurales (marcos de acero o estructuras mixtas, por ejemplo), pueden tener presencia de patologías y aun así permanecer ilesos luego de un sismo.

Se analizó también la relación que existe entre los daños y el número de patologías presentes (figura 3.8), considerando únicamente las estructuras de losas planas. Al hacer este ejercicio se observó cómo el nivel de daño está relacionado también con el número de patologías presentes: a mayor número de patologías, mayor nivel de daño.

Para llegar a un nivel más detallado de análisis, se analizó la relación entre los daños observados con el nivel de las patologías, según la categorización propuesta en la Tabla 3.3. En este análisis solo se consideraron las estructuras de losas planas pues, como ya se comentó, resultaron ser las más vulnerables.

Al analizar la planta baja débil, se observó que la presencia de esta patología está relacionada con los daños moderados y severos, siendo estos últimos los más frecuentes. Hay que mencionar que, por lo reducido de la muestra, al solo analizar estructuras de losas planas, no se cuentan con datos de edificios con planta baja de nivel fuerte. No obstante, debido a la tendencia de los datos se espera que la irregularidad fuerte está relacionada con niveles de daño superiores a los mostrados en los edificios donde la irregularidad fue moderada.

Al analizar la irregularidad en planta, se observó que la presencia de irregularidad moderada está relacionada con los daños moderados y severos, donde los primeros son los más frecuentes. Mientras que la irregularidad fuerte está relacionada con los daños severos y mayores, siendo estos últimos los más frecuentes. Llama la atención que hubo edificios con irregularidad moderada que permanecieron sin daños, esto se puede interpretar como que las estructuras son capaces de resistir irregularidad siempre y cuando no sean muy significativas.

Al analizar las columnas cortas, se observó que la presencia de columnas cortas inferiores al 50%, o sea, donde la altura de las columnas es menor que la mitad de la altura de entrepiso, está relacionada con los daños moderados y severos. Mientras que la presencia de columnas cortas superiores a este número, está relacionada con los daños severos y mayores.

Al analizar el golpeteo, se observó que el golpeteo clasificado como fuerte, esto es: altura de los edificios desigual y colinealidad de sus losas, está relacionado con los daños mayores y moderados. Mientras que el golpeteo intenso (alturas no iguales y losas no colineales), está relacionado con los daños moderados y severos. Como se puede observar en la figura 3.12, la distribución de los daños en los edificios que sufrieron golpeteo, es discontinua, pasando de daños moderados a daños mayores donde el golpeteo fue fuerte, no se observa una tendencia en los datos. Esto se puede deber a que en el fenómeno de golpeteo interviene otros factores, además de los utilizados en la clasificación propuesta.

Al analizar las combinaciones posibles de dos patologías, se observó que las combinaciones más desfavorables son aquellas en donde se involucran las patologías de irregularidad en planta, columnas cortas, cambio de rigidez y golpeteo, que fue donde se tuvieron daños mayores. Mientras que las combinaciones donde no se tuvieron daños, son aquellas en la que la irregularidad en elevación estaba presente.

En el capítulo 4 se presentó una metodología para estimar la influencia de las patologías en el daño sísmico. Dicha metodología parte de las estadísticas obtenidas y permite relacionar el daño esperado en una estructura con características de diseño, es decir, sin la presencia de patologías, con el daño esperado en estructuras con presencia de una patología. Así, es posible obtener una función de amplificación de daño por la presencia de patologías, según el nivel de estas. Y Finalmente es posible determinar nuevas curvas de vulnerabilidad asociadas a las patologías que se considere.

La implementación de la metodología propuesta se realizó a las estructuras de losas planas, considerando las patologías mostradas en el análisis estadístico. Al final, comparando los resultados de cada patología se llegó a la conclusión de que la patología con mayor influencia en el daño de este

grupo de estructuras, es el golpeteo intenso. Seguido de este, se encuentran las patologías de irregularidad en planta fuerte y columnas cortas superiores al 50%. Mientras que la patología con menor influencia en el daño es columnas cortas inferiores al 50%.

Cabe resaltar que en la metodología propuesta se considera la influencia de una patología a la vez, pero como se pudo observar en la figura 3.8, existen edificios con más de una patología. En otras palabras, las estadísticas muestran la presencia o no, de una patología en específico, pero no es posible observar si se cuenta con patologías adicionales. Lo que lleva a considerar que los resultados obtenidos tienen implícitos los efectos de una combinación de patologías. Empero, es casi imposible encontrar un número suficiente de estructuras con un solo tipo de patologías para estudiar su efecto. El siguiente paso para una investigación futura sería aislar el efecto de una patología o estudiar una combinación de estas y determinar la influencia correspondiente de cada patología participante.

Por último, se debe hacer mención que los resultados mostrados en esta tesis se basan en la información recabada de la zona designada como zona de estudio. Sin embargo, esta información es insuficiente para representar el comportamiento de todas las estructuras de la Ciudad de México y otros países. Por lo que, esta información puede ser complementada por estudios posteriores, a fin de tener una muestra de tamaño suficiente para considerar que los resultados son representativos de todo el universo de estructuras.

REFERENCIAS

- Acevedo, A. (2012). Criterios sismológicos para seleccionar acelerogramas reales de la red nacional de acelerógrafos de Colombia para su uso en análisis dinámicos, *Revista EIA*, ISSN, 17974-1237(17), pp.57-70.
- Arnold, C y Reitherman, R. (1986). *Configuración y diseño sísmico de edificios*, primera edición, Editorial Limusa.
- ASCE (2010). *Minimum design loads for buildings and other structures*, SEI/ASCE Standard No. 7-10, American Society of Civil Engineers, Reston, Va.
- Asteris, G., Repapis, C., Repapi, V y Cavaleri, L. (2017). Fundamental period of infilled reinforced concrete frame structures, *Structure and Infrastructure Engineering*, 13(7), pp. 929-941.
- Astorga, A. y Rivero, P. (2009). *Patologías en las edificaciones, Módulo III-Sección IV*. Centro de investigación de Gestión Integral de Riesgos (CIGIR), Mérida, Venezuela.
- ATC-13 (1985). Earthquake damage evaluation for California, FEMA.
- Banon, H., Biggs, J.M., e Irvine, H.M. (1981). Seismic damage in reinforced concrete frames. *Journal of Structural Engineering, ASCE*. 107(9), pp. 1713-1729.
- Barbat, A. (1988). *El riesgo sísmico en el diseño de edificios*. Calidad Siderúrgica, S.R.L.
- Beauperthuy, J.L. y Urich, A. J. (2016). Efecto de columna corta estudio de casos, B.R.S, Ingenieros, C.A.
- Bertero, V.V., Anderson, J.C., Krawinkler, H. y Miranda, E. (1991). Design Guidelines for Ductility and Drift Limits: Review of the State-of-the-Practice and State-of-the-Art in Ductility and Drift-Based Earthquake-Resistant Design of Buildings, Report No. UCB/EERC-91/15, EERC, U.C. Berkeley.
- Bojórquez, E., Terán, A., Bojórquez J. y Ruiz, S. (2009). Consideración explícita del daño acumulado en el diseño sísmico de estructuras a través de factores de reducción de resistencia por ductilidad. *Revista de Ingeniería sísmica*, 62(80), pp. 31-62
- Bonnet, R.L. (2003). *Vulnerabilidad y riesgos sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada* (tesis doctoral). Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- Buendía, L.M. (2016). *Estimación de espectros de vulnerabilidad uniforme para el diseño sísmico de estructuras* (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Carreño, E., Bravo, B., Suárez A. y Tordesillas J. (1999). Registro y Tratamiento de acelerogramas, *Física de la Tierra*, 11, pp. 81-111.
- Crisafulli, F. y Villafañe, E. (2002). *Espectros de respuesta y de diseño, Guía de estudio*, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina.
- Cruz V., Krishna S. y Ordaz M. (2017). ¿Qué ocurrió el 19 de septiembre de 2017 en México? *Ciencia, UNAM*.
- Dowrick, D.J. (1984). *Diseño de estructuras resistentes a sismos para ingenieros y arquitectos*, México: Limusa.
- Esteva, L. (1963), Los temblores de mayo de 1962 en Acapulco, *Revista de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica*, 1 (2), pp. 39-62.
- Esteva, L., Rascón, O. y Gutiérrez, A. (1970), Lecciones de algunos temblores recientes en América Latina, *Ingeniería Sísmica*, 3, pp. 1-28.
- Eurocode 8 (2005). *Design of structures for earthquake resistance, part 1: general rules, seismic actions and rules for building*, Brussels.

- Gobierno del Distrito Federal (2004), Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Sismo, Gaceta Oficial del Distrito Federal, Tomo II No. 103-bis.
- Goel, R. y Chopra, A. (1997). Period formulas for moment-resisting frame buildings, *Journal fo Structural Engineering*, 123(11), pp. 1451-1461.
- Granados, E. y Lemus, M. (2003). *Evaluación de daños típicos de edificaciones en el área metropolitana de San Salvador ante los sismos ocurridos en 1986 y 2001*. Tesis de licenciatura, Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador.
- Hatzigeorgio, D. y Kanapitsas, G. (2013). Evaluation of fundamental period of low-rise and mid-rise reinforced concrete building, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42, pp. 1599-1616.
- Herrera, R. (2016). *Vulnerabilidad y daño sísmico de edificios porticados de hormigón armado, irregulares en planta, en Barquisimeto-Venezuela*, Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.
- Lara, Ricardo (2018). ¿Cómo cambió el reglamento de construcciones tras los sismos?, periódico Milenio.
- Martínez, F. (2013). *Estructuras sismo resistentes. Análisis modal espectral. Capítulo 2*, XFMA, (recuperado de: <https://xfma.wordpress.com/2013/02/19/estructuras-sismoresistentes-analisis-modal-espectral-capitulo-2/>).
- Miramontes, C. A. et al (2016). Relación amortiguamiento-ductilidad de marcos planos de concreto reforzado con fibras de PVA. *Memorias del XX Congreso Nacional de ingeniería Estructural*, Mérida, Yucatán.
- Miranda, E. (1997). Estimation of Maximum Interstory Drift Demands in Displacement-Based Design, *Seismic design Methodologies for the Next Generation of Codes*. H, Krawinkler y P. Fajfar editor, Balkema.
- Miranda, E. (1999). Approximate seismic lateral deformation demands on multistory buildings, *Journal of Structural Engineering*, 125(4), pp. 417-425.
- Moehle, J. (2010), 27 March 2010, offshore Maule, Chile earthquake, *EERI Learning Earthquakes Program*, Presentado en una reunion técnica en Beskeley. California.
- Moehle, J.P. (1996). Displacement-Based Seismic Design Criteria, *Proceedings of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco, México.
- New Zealand Society of Earthquake Engineering (NZSEE). (2006). *Recommendations for the assessment and improvement of the structural performance of buildings in earthquakes*. NZSEE Study Group on Earthquake Risk Buildings.
- Newmark. N. M. y Rosenblueth (1971). *Fundamentals of Earthquake Engineering*, Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
- Okada, S. y Takai, N. (1999). Classifications of structural types and damage patterns of buildings for earthquake field investigation, *Memorias del XII Congreso Mundial de Ingeniería Sísmica*, Ackland, Nueva Zelanda
- Ordaz, M. (2000) *Metodología para la Evaluación del Riesgo Sísmico Enfocada a la Gerencia de Seguros por Terremotos*, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Ordaz, M., Miranda, E., Reinoso, E. y Pérez-Rocha, L.E. (1988). *Seismic loss Estimation Model for Mexico City*, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Organización Panamericana de la Salud (2000), *Fundamentos para la mitigación de desastres en establecimientos de salud*, Washington, D.C, EUA.
- Orozco, V. (2007). *Estudio estadístico de efectos que influyeron en el daño sísmico analizando estructuras existentes en la Ciudad de México durante los sismos de 1957 y 1985 con ayuda de*

sistemas de información geográfica (tesis de maestría), Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

Páramo, Arturo (2017). *Álvaro Obregón 286; mucho peso sin soporte*, Excelsior. (Recuperado de: <https://www.excelsior.com.mx/comunidad/2017/10/01/1191835>)

Park, R. (1986). Ductile design approach for reinforced concrete frames. *Earthquake spectra*, 2(3), pp. 565-619.

Park, Y. y Ang, A. (1985). Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 111(4), pp. 722-739.

Park, Y., Ang, A. y Wenn Y. (1987). Damage limiting aseismic design of buildings. *Earthquake Spectra*, 3(1), pp. 1-26.

Poves, D. F. (2015). *Exposición de las patologías más habituales en los edificios*, Colegio de la Arquitectura Técnica de Cantabria, Cantabria, España.

Priestley, M.J.N. (1997). Displacement-Based Seismic Assessment of Reinforced Concrete Buildings, *Journal of Earthquake Engineering*, 1(1), pp. 157-192.

Pulso Diario de San Luis (2018), *Álvaro Obregón 286, el fantasma de la corrupción reina en la zona cero del sismo*. (Recuperado de: <https://pulsoslp.com.mx/2018/09/16/alvaro-obregon-286-el-fantasma-de-corrupcion-reina-en-la-zona-cero-del-sismo/>)

Quinde P, Reinoso E. (2018). *Spectral ratios, acceleration and hysteretic energy spectra for the Mexico earthquake of September 19, 2017*. Sometido a Geofísica Internacional.

Reinoso, E., Ordaz, M., Cardona, O., Bernal, A. y Contreras M. (2018). After 10 years of CAPRA, *16th European Conference on Earthquake Engineering*, Thessaloniki, June 2018.

Resonblueth, E. y Prine. J (1965). El temblor de San Salvador, 3 de mayo de 1965: Ingeniería Sísmica, *Revista de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica*, 3(2), pp. 33-60.

Rivera, J. (2017). *Estimación de la vulnerabilidad sísmica en estructuras con primer piso débil*, Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de México, Ciudad de México.

Rojas, M. y Arenas, G. (2008). *Comparación técnico-financiero del acero estructural y el hormigón armado*, Dyna 15, pp. 47.56, Medellín, Colombia.

Sandoval, Francisco (2017), *El edificio de Álvaro Obregón se colapsó en 15 segundos: sobreviviente*, Animal Político. (Recuperado de: <https://www.animalpolitico.com/2017/09/edificio-alvaro-obregon-sobreviviente-escaleras/>)

Servicio Sismológico Nacional (2017). Grupo de trabajo del Servicio Sismológico Nacional, UNAM. Sismo del día 19 de septiembre de 2017, Puebla-Morelos (M 7.1).

Solera, C. y Nava A. (2017). *Derrumbe en Álvaro Obregón 286, el rescate de mayor duración registrado en la historia*, Periódico Excelsior, Ciudad de México.

Sozen, M.A. (1997). Drift-Driven Design for Earthquake Resistance of Reinforced Concrete, *Proc. EERC-CURE e Symposium in Honour of Vitelmo V. Bertero*, Berkeley, California.

Subcommission on Engineering Seismology (1998). *European Macroseismic Scale EMS-98*. G Grünthal, GeoForschungsZentrum Potsdam, Germany.

Tena, A. (2004). Daños durante sismos recientes y enseñanzas principales, *Memorias, II Seminario de Reaseguro Facultativo "Terremoto y Huracán"*, México, pp. 51-87.

Tena, A. (2010). Irregularidad estructural y su efecto en la respuesta sísmica de edificios, *V Congreso Iberoamericano de Ingeniería Civil*, Mérida, Venezuela.

Tena, A. y Abrams, D. (1992). Response of an unreinforced masonry building during the Loma Prieta Earthquake, *Structural Research Series No. 576*, Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign.

Tena, A. y Cheja, C (2005). Comportamiento sísmico de edificios esbeltos con base en marcos dúctiles de acero estructural diseñados conforme al reglamento de la Ciudad de México, *Revista Internacional de Ingeniería en Estructuras*, 10(1), pp. 1-20.

Ureste M. y Aroche E., Lo que el #19S nos dejó: las víctimas, daños y damnificados en México. URL: <https://www.animalpolitico.com/2017/10/cifras-oficiales-sismo-19s/> (Obtenida:30 de julio de 2018).