

VULNERABILIDAD Y PROTECCION SISMICA DE ESTRUCTURAS

DIGNA PATRICIA MORA ANGARITA

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL  
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL  
PAMPLONA  
2015

VULNERABILIDAD Y PROTECCION SISMICA DE ESTRUCTURAS

DIGNA PATRICIA MORA ANGARITA

Propuesta de trabajo de grado como requisito para matricular la asignatura TRABAJO DE GRADO en el programa de ingeniería civil

Director:  
MARCELINO MALDONADO TRILLOS  
Ingeniero Civil

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL  
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL  
PAMPLONA  
2015

## DEDICATORIA

La concepción de esta monografía está dedicada a mis padres, pilares fundamentales en mi vida, por su apoyo infaltable, por su dedicación y esfuerzo para hacer posible que pudiese llegar a esta instancia, a mis hermanas por ser parte y estar presentes de una u otra manera durante este proceso, por su apoyo y cariño incondicional y a mis amigos por su apoyo y compañía durante este proceso.

---

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma de jurado

---

Firma de jurado

Pamplona Norte de Santander, junio de 2016

## CONTENIDO

1.	INTRODUCCION.....	7
2.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	8
3.	OBJETIVOS.....	9
3.1	OBJETIVO GENERAL.....	9
3.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	9
4.	PARAMETROS BASICOS TENIDOS EN CUENTA PARA REALIZAR UN ANALISIS DE VULNERABILIDAD.....	10
5.	VULNERABILIDAD SISMICA DE UNA ESTRUCTURA.....	11
5.1	CLASES DE VULNERABILIDAD.....	11
<b>5.1.1</b>	<b>Vulnerabilidad estructural.....</b>	<b>11</b>
<b>5.1.2</b>	<b>Vulnerabilidad no estructural.....</b>	<b>12</b>
<b>5.1.3</b>	<b>Vulnerabilidad funcional.....</b>	<b>13</b>
6.	CLASIFICACION DE LAS METODOLOGIAS DE EVALUACION DE VULNERABILIDAD.....	13
6.1	METODOLOGIAS EN FUNCION DEL TIPO DE RESULTADO.....	14
<b>6.1.1.1</b>	<b>Los métodos tipológicos.....</b>	<b>14</b>
<b>6.1.1.2</b>	<b>Métodos mecánicos.....</b>	<b>15</b>
6.1.2	TECNICAS INDIRECTAS.....	17
<b>6.1.2.1</b>	<b>Método del índice de vulnerabilidad.....</b>	<b>17</b>
6.1.3	TÉCNICAS CONVENCIONALES.....	19
6.1.4	TÉCNICAS HIBRIDAS.....	20
6.2	METODOLOGIAS EN FUNCION DE LA FUENTE DE INFORMACION.....	20
<b>6.2.1</b>	<b>Métodos empíricos.....</b>	<b>21</b>
<b>6.2.2</b>	<b>Métodos analíticos o teóricos.....</b>	<b>22</b>
<b>6.2.3</b>	<b>Métodos experimentales.....</b>	<b>22</b>
7.	METODOLOGIAS DE EVALUACION DE LA VULNERABILIDAD SISMICA.....	22
7.1	MÉTODO ATC-21.....	22
7.2	MÉTODO FEMA-273.....	24
7.3	MÉTODO DE MATRICES DE PROBABILIDAD DE DAÑO (MPD).....	26
7.4	MÉTODO DE LAS CURVAS CONTINUÚAS DE VULNERABILIDAD (FRAGILIDAD).....	28
7.5	MÉTODO BASADO EN EL ESPECTRO DE CAPACIDAD.....	30
7.6	MÉTODO BASADO EN DESPLAZAMIENTO.....	32

7.7 METODO DE CALVIN (1999) .....	32
8. ASPECTOS MAS RELEVANTES QUE AFECTAN LA SEGURIDAD SÍSMICA DE UNA EDIFICACIÓN.....	33
8.1 PESO .....	33
8.2 ESTRUCTURACIÓN EN PLANTA. ....	35
8.4 PISO DÉBIL .....	36
8.5 VARIACIÓN EN LA RIGIDEZ.....	37
8.6 ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES .....	37
8.7 UBICACIÓN Y SU RELACIÓN CON ESTRUCTURAS VECINAS. ....	37
8.8 EXCESIVA FLEXIBILIDAD ESTRUCTURAL .....	38
8.9 TORSIÓN.....	39
8.10 FUNDACIONES INADECUADAS .....	39
9. SISTEMAS DE PROTECCION SISMICA .....	40
9.1 SISTEMAS ACTIVOS.....	41
9.2 SISTEMAS SEMI-ACTIVOS.....	42
9.3 SISTEMAS PASIVOS .....	43
<b>9.3.1 Disipadores activados por desplazamientos.....</b>	<b>44</b>
<b>9.3.2 disipadores activados por velocidad .....</b>	<b>47</b>
<b>9.3.3 disipadores activados por desplazamiento y velocidad .....</b>	<b>49</b>
<b>9.3.4 dispositivos activados por movimiento .....</b>	<b>50</b>
10. RECOMENDACIONES.....	51
11. CONCLUSIONES .....	52
12. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	54

## 1. INTRODUCCION

A lo largo de la historia la humanidad ha tenido que soportar grandes catástrofes naturales, muchas de estas ocasionadas por sismos de gran intensidad o terremotos, uno de los sectores más afectados por dichos eventos, es el sector de la construcción ya que durante el desarrollo de estos episodios sísmicos se producen graves consecuencias a las estructuras, debido a todo esto el hombre se ha visto en la necesidad de desarrollar métodos que ayuden a minimizar el riesgo al que se exponen las construcciones, dicho riesgo está estrechamente relacionado con la vulnerabilidad que presenta todas y cada una de ellas, por tal motivo durante las últimas décadas se ha venido desarrollando diferentes metodologías con el fin de conocer el grado de vulnerabilidad que se presenta en las estructuras, para esto se ha implementado una serie de técnicas teniendo en cuenta diferentes parámetros esenciales que permiten conocer el grado de vulnerabilidad que presenta la estructura a la cual se le aplique el estudio.

Otro avance importante que permite minimizar el riesgo al que se enfrentan las estructuras durante la eventualidad de un sismo son los sistemas de protección sísmica que se han venido implementando en las edificaciones y que permiten tener un mayor control sobre las reacciones causadas por los sismos a las edificaciones y así garantizar la sismoresistencia de dicha edificación.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### VULNERABILIDAD Y PROTECCION SISMICA DE ESTRUCTURAS

En esta monografía se describe además de la importancia de conocer la vulnerabilidad sísmica de las estructuras las metodologías que se pueden utilizar para determinar la misma y además los mecanismos o técnicas constructivas que se pueden utilizar para proteger sísmicamente las diferentes estructuras, esto debido a que los sismos representan una de las mayores amenazas a cualquier tipo de construcción, por las afectaciones que estos pueden producirles, por esta razón ha sido necesario reglamentar en el área de la construcción el diseño y ejecución de estructuras sismo resistentes. Sin embargo algunas de las eventualidades sísmicas ocurridas en los últimos años y los daños causados a las estructuras han dejado ver además de las graves consecuencias del no cumplimiento de los lineamientos y exigencias de las normas, que estas no garantizan en un 100% la estabilidad estructural de las construcciones, motivo por el cual se hace necesario que en el sector constructivo además de las actividades propuestas en las normas se desarrollen nuevas estrategias que ayuden a mejorar la protección sísmica de las estructuras.

Hoy en día este es un tema que no se trata con mucha profundidad durante el proceso formativo de la ingeniería civil, si bien se dan las pautas para diseñar las estructuras lo más resistentes posibles y para que se garantice el cumplimiento de las normas constructivas no se profundiza en el análisis de vulnerabilidad sísmica ni tampoco en el desarrollo de metodologías o mecanismos constructivos que ayuden a la protección de las estructuras ante la eventualidad de un sismo, siendo esto uno de los motivos por los que solo nos limitamos a construir cumpliendo los parámetros de la norma pero no nos animamos a desarrollar técnicas que permitan mejorar el comportamiento sísmico de las estructuras.

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1 OBJETIVO GENERAL

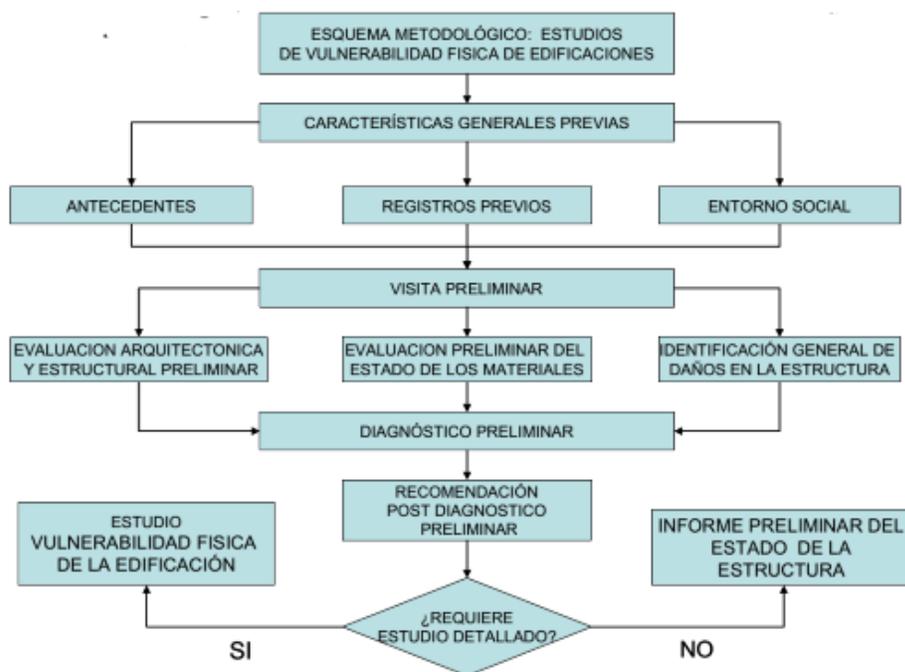
Analizar los aspectos conceptuales y metodológicos relacionados con la evaluación de la vulnerabilidad y la protección sísmica de las estructuras.

#### 3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Describir los parámetros básicos que se deben tener en cuenta para la estimación del nivel de vulnerabilidad de las estructuras.
- Identificar las diferentes metodologías utilizadas para evaluar la vulnerabilidad sísmica de las estructuras.
- Investigar las variables que se deben tener en cuenta para el control del comportamiento estructural ante los efectos producidos por un sismo.
- Definir los sistemas de protección sísmica empleados en las diferentes construcciones.

#### 4. PARAMETROS BASICOS TENIDOS EN CUENTA PARA REALIZAR UN ANALISIS DE VULNERABILIDAD.

Los parámetros que definen la vulnerabilidad de una estructura pueden ser, el comportamiento estructural ante una sollicitación de tipo natural o antrópica cualquiera está sujeto a las condiciones bajo las cuales fue idealizada y concebida la estructura (diseño y cálculo), cuyo nivel de significancia dentro del proyecto integral dependerá en fuerte medida de la eficacia y cumplimiento de las especificaciones de los materiales propuestos, del sistema de calidad y del nivel de seguimiento en los procesos constructivos, de la respectiva correspondencia en el nivel y tipo de ocupación y de la forma de mantenimiento y conservación de la estructura. Este comportamiento, expresado principalmente en términos de resistencia y rigidez, determina el grado de seguridad estructural y el grado de funcionalidad que tendrá la obra en estudio ante la demanda prevista. Estos parámetros, finalmente, determinarán la vulnerabilidad de la estructura estudiada. (Paez & Hernandes)



Esquema metodológico de evaluación de vulnerabilidad preliminar

## 5. VULNERABILIDAD SISMICA DE UNA ESTRUCTURA

La experiencia ha enseñado, a través de los sismos y terremotos pasados que existen estructuras de una misma tipología que pueden sufrir un mayor grado de daño a pesar de localizarse en el mismo sitio (Benedetti, et al, 1988; EERI Committee on Siesmic Risk (Paez & Hernandez) 1989) lo cual se debe a que no todas las estructuras tienen la misma calidad estructural, lo que lleva a plantear la vulnerabilidad sísmica como la capacidad de los elementos estructurales para soportar un sismo de gran magnitud.

El grado de vulnerabilidad sísmica es una característica propia de cada estructura, que además es independiente del nivel de sismicidad de la zona en donde se encuentre, por lo tanto una estructura puede ser vulnerable pero no estar en riesgo. Los estudios de vulnerabilidad sísmica pueden aplicarse a cualquier tipo de obra civil, como lo son edificaciones, presas, puentes, carreteras, etc. En general a cualquier obra de la cual se desee conocer su comportamiento ante la posible eventualidad de sismo y las consecuencias que este pueda causar a la misma.

### 5.1 CLASES DE VULNERABILIDAD

#### **5.1.1 Vulnerabilidad estructural**

La vulnerabilidad estructural está asociada a la susceptibilidad de los elementos o componentes estructurales de sufrir daño debido a un sismo, lo que se ha llamado daño sísmico estructural. El mismo comprende el deterioro físico de aquellos elementos de la edificación y es el que tradicionalmente ha merecido la atención prioritaria de los investigadores.

El nivel de daño estructural que sufrirá una construcción depende tanto del comportamiento global como local de la estructura. Está relacionado con la calidad de los

materiales empleados, la característica de los elementos estructurales, su configuración, esquema resistente obviamente, con las cargas actuantes.

La naturaleza y grado de daño estructural pueden ser descritos en términos cualitativos o cuantitativos, y constituye un aspecto de primordial importancia para verificar el nivel de deterioro de una construcción, así como su situación relativa con respecto al colapso estructural, que representa una situación límite donde se compromete la Estabilidad del sistema. (Safina, Vulnerabilidad sísmica de edificaciones esenciales, Análisis a su contribución el riesgo sísmico, 2002)

### **5.1.2 Vulnerabilidad no estructural**

El término no estructural se refiere a aquellos componentes de la edificación que están unidos a las partes estructurales (tabiques, ventanas, techos, puertas, cerramientos, cielos rasos, etc.), que cumplen funciones esenciales en el edificio (gasfitería, calefacción, aire acondicionado, conexiones eléctricas, etc.), o que simplemente están dentro de las edificaciones (equipos, mecánicos, muebles, etc.); pudiendo así agruparlas en tres categorías: arquitectónicas, instalaciones y equipos.

Un edificio puede quedar en pie luego de un desastre y quedar inhabilitado debido a daños no estructurales. Un estudio de vulnerabilidad no estructural busca determinar la susceptibilidad a daños que presentan estos elementos, los cuales pueden verse afectados por sismos moderados y por tanto más frecuentes durante la vida útil de la edificación. En cambio, los elementos estructurales se verán afectados frente a sismos severos y poco frecuentes.

(Fernandez)

### 5.1.3 Vulnerabilidad funcional

en situaciones de emergencia o crisis sísmicas, las edificaciones esenciales se caracterizan por presentar un incremento abrupto en la demanda de sus servicios, mientras que la capacidad de prestar dichos servicios puede haber decrecido como consecuencia del impacto del sismo, creando una situación crítica caracterizada por un incremento brusco del riesgo asociado que puede llevar al colapso funcional.

El colapso funcional se produce cuando la instalación, aunque no haya sufrido ningún daño en su estructura física, se ve incapacitada de brindar los servicios inmediatos de atención a la demanda sísmica y la posterior recuperación de la comunidad afectada. (Safina, Vulnerabilidad sísmica de edificaciones esenciales, 2002)

## 6. CLASIFICACION DE LAS METODOLOGIAS DE EVALUACION DE VULNERABILIDAD

El primer paso de un estudio de vulnerabilidad consiste en definir su naturaleza y el alcance, lo cual está condicionado por varios factores, tales como: el tipo de daño que se pretende evaluar, el nivel de amenaza existente en la zona, la información disponible sobre las estructuras y los datos relacionados con los daños observados durante sismos que han afectado la zona de interés. Una vez definidos estos factores, es posible evaluar la vulnerabilidad mediante una definición adecuada de la acción sísmica y la capacidad de la estructura. (Bonett, 2003)

A lo largo de la historia se han desarrollado diversas metodologías para evaluar la vulnerabilidad sísmica, a lo largo de este trabajo se presentan algunas de las metodologías más importantes que se han venido implementando.

## 6.1 METODOLOGIAS EN FUNCION DEL TIPO DE RESULTADO

Esta metodología desarrollada por Corsanegro y Petrini (1990), donde los estudios se dividen en clases de acuerdo a los resultados que producen. Estas clases son definidas de acuerdo a las características de las aproximaciones adoptadas con más frecuencia, dentro de estas metodologías encontramos diversas técnicas:

### 6.1.1 TECNICAS DIRECTAS

Estas técnicas predicen con un solo paso el daño causado por un sismo a una estructura, a partir de dos tipos de métodos: los tipológicos y los mecánicos.

#### 6.1.1.1 Los métodos tipológicos:

Clasifica los edificios en clases dependiendo de los materiales, técnicas de construcción, características de construcción y otros factores que influyen en la respuesta sísmica del edificio. La vulnerabilidad se define como la probabilidad de una estructura de sufrir un cierto nivel de daño para una intensidad sísmica definida. La evaluación de la probabilidad de daño se basa en los daños observados y registrados después de los terremotos anteriores, y también en el conocimiento experto. Los resultados obtenidos con este método deben ser considerados en términos de su precisión estadística, ya que se basan en investigación de campo sencilla.

Los resultados obtenidos a partir de este método son válidos solo en el sentido estadístico, ya que para definir la relación entre la intensidad y el daño producido es necesario contar con una cantidad considerable de datos que son propios de cada región o zona, debido a esto el método solo será válido para la región o zona en estudio y para para regiones con características similares en cuanto a la parte constructiva y las presentes en el terreno. Este método presenta una gran limitación y es que no tiene en cuenta las modificaciones o cambios que ha sufrido la estructura a lo largo de su vida útil.

### **6.1.1.2 Métodos mecánicos:**

Hacen la predicción de un efecto sísmico por medio de modelos mecánicos adecuados de las construcciones. Dentro de estos métodos pueden distinguirse dos grupos que están relacionados con el tipo de modelo utilizado para representar la estructura.

#### **- 6.1.1.2.1 Modelos analíticos basados en modelos simples:**

Se caracterizan por la capacidad que tienen de analizar gran cantidad de construcciones en cortos periodos de tiempo, esto debido a que manejan pocos parámetros de entrada, por medio de los cuales es posible determinar el comportamiento sísmico de las construcciones.

#### **6.1.1.2.2 Métodos de análisis detallados**

La evaluación de los daños sísmicos en edificaciones está influenciada por incertidumbres en cada paso del proceso, las tendencias más recientes en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica es aplicar métodos mecánicos simplificados basados en desempeño, estos métodos solo son aplicables a las construcciones que puedan ser representadas por modelos mecánicos y generalmente, son utilizados para la evaluación de estructuras individuales, debido a que involucran análisis detallados y modelos más refinados que son solo adecuados para proyectos de escenarios sísmicos, donde es necesario evaluar la vulnerabilidad de un numero de estructuras. Los dos procedimientos de análisis más utilizados en este tipo de métodos son: Análisis lineal (estático y dinámico) y el Análisis no lineal (estático y dinámico) (Vielma, Herrera, Ugel, Martinez, & Barbat, 2013)

#### **Análisis estático lineal:**

La estructura se moldea como un sistema de 1 grado de libertad (1GDL) con una rigidez elástica lineal y un amortiguamiento viscoso equivalente. La acción sísmica se

modela mediante una distribución de fuerzas laterales equivalentes a partir de la estimación de la primera frecuencia fundamental de la estructura usando relaciones empíricas o el método de Rayleigh, se determina, a partir del espectro de respuesta apropiado, la aceleración espectral  $S_a$ , la cual multiplicada por la masa  $m$  de la estructura, corresponde a la fuerza lateral equivalente o cortante basal  $V$ . Esta fuerza se distribuye a lo largo de toda la altura y se determinan, mediante un análisis estático lineal, las fuerzas y los desplazamientos internos de la estructura. Este tipo de procedimientos se utilizan principalmente para propósito de diseño, su uso se limita a estructuras regulares donde el primer modo de vibración es el predominante.

#### **Análisis estático no lineal:**

En este tipo de análisis el modelo de estructura incorpora directamente las características no lineales de la relación fuerza- deformación de los elementos y componentes individuales debidas a la respuesta inelástica del material lo cual representa una ventaja sobre los métodos de análisis estático lineal. La representación más común para este análisis es la curva de capacidad o curva “pushover”, la cual corresponde a la relación entre el cortante basal y el desplazamiento en el nivel superior de la estructura.

#### **Análisis dinámico lineal:**

La estructura se modela con un sistema de múltiples grados de libertad (MGDL) con una matriz de rigidez elástica lineal y una matriz de amortiguamiento viscoso equivalente. La acción sísmica se modela utilizando un análisis temporal. El análisis espectral modal supone que la respuesta dinámica de una estructura se puede determinar considerando de forma independiente, la respuesta de cada modo natural de vibración utilizando un espectro de respuesta elástico. Solo se consideran los modos que contribuyen considerablemente a la

respuesta de la estructura. Las respuestas modales se combinan usando métodos tales como “la raíz cuadrada de los cuadrados”. El análisis temporal involucra una evaluación paso a paso de la respuesta de la estructura, usando registros de sismos reales o acelerogramas sintéticos. En ambos casos, las fuerzas y los desplazamientos internos de la estructura se determinan mediante un análisis dinámico lineal.

### **Análisis dinámico no lineal**

En este tipo de análisis la estructura se modela de forma similar a la utilizada para el análisis estático no lineal. La principal diferencia es que la acción sísmica se modela con historias temporales de movimiento (acelerogramas reales o simulados). Este es el procedimiento más sofisticado para predecir las fuerzas y los desplazamientos internos de una estructura cuando se ve sometida a una acción sísmica. Sin embargo la respuesta calculada de la estructura puede ser muy sensible a las características propias de la acción, por la que se recomienda utilizar varios registros de historias temporales de aceleración.

(Bonett, 2003)

## **6.1.2 TECNICAS INDIRECTAS**

Estas técnicas, determinan en primer lugar, un índice de daño de vulnerabilidad y luego establecen una relación entre el daño y la intensidad sísmica, mediante estudios post-terremoto y estudios estadísticos. En su concepción original, estos métodos son útiles únicamente para evaluaciones sísmicas de edificios a gran escala. (Mena, 2002)

### **6.1.2.1 Método del índice de vulnerabilidad**

Este método fue propuesto por D. Benedetti y V. Petrini en Italia, se puede definir como un método indirecto el cual fue adoptado por el Gruppo Nazionale Difesa dai Terremoti (GNDT) del C.N.R en Italia desde el año 1982, con el propósito de determinar de una manera rápida y sencilla la vulnerabilidad sísmica de edificaciones existentes. Tal procedimiento se fundamenta en el análisis de una serie de información sobre las características de los elementos constructivos de una edificación que se recolección a través de formularios de vulnerabilidad. El procedimiento posee la característica de ser subjetivo, basado en el juicio de expertos, permite estimar la vulnerabilidad en función de un cierto número de parámetros que representan la predisposición de una edificación a sufrir daño debido a un evento sísmico. Particularmente algunos parámetros comprenden el comportamiento de los elementos estructurales, mientras otros el comportamiento del conjunto constructivo.

La vulnerabilidad de la edificación  $v$  es asignada de modo convencional, usando un índice numérico que varía entre 0 (para edificaciones que respetan la normatividad sísmica vigente) y 100 (para edificaciones con características de baja calidad) en base a un número de parámetros definidos. Para cada uno de los parámetros viene atribuida una clase que varía de la **A**, la mejor clase, a la **D**, la peor clase (para las edificaciones de hormigos armado se definen 3 clases **A**, **B**, **C**). Para cada parámetro se fijan algunas descripciones que permitan asignar la edificación a una de las clases con un grado alto de objetividad. Cada clase cuenta con una puntuación, atribuida con anterioridad (**K<sub>i</sub>**), a veces esta varia de parámetro a parámetro, además cada parámetro posee un peso atribuido (**W<sub>i</sub>**) que refleja la importancia de cada uno de los parámetros dentro del sistema resistente de la edificación. El índice de vulnerabilidad está definido como la suma ponderada de los puntajes de cada parámetro.

$$V = \sum_i K_i * W_i$$

### 6.1.3 TÉCNICAS CONVENCIONALES

Establecen un índice de vulnerabilidad independiente de daño. Son esencialmente heurísticas, es decir buscan la solución del problema mediante métodos no rigurosos como por tanteo o reglas empíricas, son aplicables exclusivamente a estudios de vulnerabilidad a gran escala. Se utilizan para comparar las edificaciones de diferentes tipologías estructurales, debido a la diferencia en los factores a considerar en la evaluación. Existen básicamente dos grupos de métodos:

- Los que se basan en calificar empíricamente las diferentes características físicas de la estructura.
- Y los que se basan en los mismos criterios propuestos por las normativas de sismo-resistencia, que evalúan la relación demanda/capacidad de las edificaciones de manera simplificada como por ejemplo utilizando los cortantes basales, distribuidos como fuerzas horizontales equivalentes o mediante un análisis modal. (Gomez & Rodriguez, 2006)

El ATC-13(1985) es uno de los primeros trabajos que se han realizado utilizando esta técnica. En este informe, se derivan, a partir del juicio de expertos, las matrices de probabilidad de daño para 78 clases de estructuras diferentes, 40 de las cuales se refieren a edificios. La estimación del porcentaje esperado de daño que podría sufrir una determinada estructura ante la intensidad sísmica dada, se determinó mediante el análisis de las respuestas contenidas en los cuestionarios que fueron repartidos a los expertos. Las matrices de probabilidad de daño obtenidas a partir del juicio de expertos son también difíciles de calibrar o modificar para incorporar nuevos datos o tecnologías. Adicionalmente, es difícil extender el ATC-13 a otros tipos de edificios de vulnerabilidad sísmica hasta mediados del 1990.

Actualmente una de las metodologías más conocidas para el análisis de vulnerabilidad sísmica es la metodología HAZUS. Esta utiliza los desplazamientos y aceleraciones espectrales como medida de una acción sísmica, en vez de la intensidad sísmica que utiliza el ATC-13. Lo igual que este último, el daño de 36 modelos estructurales se estima a partir de la opinión de expertos. Para cada modelo, se describen los cuatro estados de daño estructural considerados: leve, moderado, severo, y colapso. Los daños no estructurales se analizan aparte. La metodología considera cuatro niveles de diseño: alto, moderado, bajo y sin diseño sísmico. Para cada tipo de construcción y nivel diseñado, se dan los parámetros que permiten definir la capacidad de la estructura, las derivas máximas entre piso y finalmente los desplazamientos espectrales en los umbrales de los diferentes estados de daño considerados.

Otra clase de función de vulnerabilidad basada en observaciones como en opiniones de expertos es el uso de la vulnerabilidad de las construcciones contemplada en las escalas macro sísmicas. Estas escalas utilizan el daño en la construcción y otros fenómenos para evaluar el desempeño de las estructuras de una región ante la ocurrencia de un movimiento sísmico. A partir de la descripción de los daños en la estructura para diferentes intensidades, es posible deducir funciones de vulnerabilidad. (Mena, 2002)

#### 6.1.4 TÉCNICAS HIBRIDAS

Estas técnicas combinan elementos de los métodos previos con la opinión de expertos. Las técnicas híbridas son desarrolladas tomando aspectos de las otras técnicas que son útiles para resolver cada problema en particular. (C. Gomez, 2000)

#### 6.2 METODOLOGIAS EN FUNCION DE LA FUENTE DE INFORMACION

Existe otro esquema de clasificación de las técnicas o métodos de análisis de la vulnerabilidad sísmica, que corresponde a la propuesta por Dolce 1994 quien las agrupa en función de la fuente de información.

### **6.2.1 Métodos empíricos**

Estos poseen un alto grado de subjetividad, se encuentran basados principalmente en el conocimiento del comportamiento sísmico de tipologías de edificaciones y la caracterización de las falencias sísmicas de la estructura. Se usan cuando no se necesitan resultados bastante precisos y/o para evaluaciones preliminares. Este tipo de métodos son más apropiados para la evaluación de la vulnerabilidad de edificaciones a gran escala, debido a la relativa facilidad de estas para analizar un gran número de estructuras a menor costo. Estos se dividen en métodos de caracterización y de inspección y puntaje.

#### ***6.2.1.1 Métodos de categorización o caracterización.***

Clasifica las edificaciones según su tipología en clases de vulnerabilidad atendiendo a la experiencia sobre el desempeño sísmico de estructuras similares frente a una intensidad sísmica. El resultado es subjetivo por lo tanto es aplicable solamente para evaluaciones preliminares. Un ejemplo de esta metodología es la propuesta por la EMS-98, en donde se clasifica los tipos de estructuras de acuerdo a su vulnerabilidad.

#### ***6.2.1.2 Métodos de inspección y puntaje***

Permiten caracterizar las edificaciones sísmicas potenciales de una edificación, atribuyéndole a cada componente significativo de la edificación un valor numérico, que ponderado en función de su importancia conduce al cálculo del índice de vulnerabilidad. Un ejemplo de esta metodología fue propuesta por un grupo de investigadores italianos en 1982 (Gruppo Nazionale per la difesa dai terremoto), que desarrollo a partir de la información de este daño en edificios, provocados

por terremotos desde 1976, a partir de esta información se elaboró una gran base de datos con el índice de vulnerabilidad de cada edificio y el daño sufrido por terremotos de determinada intensidad.

### **6.2.2 Métodos analíticos o teóricos**

Evalúan la resistencia estimada de la estructura a los movimientos del terreno utilizando como base modelos mecánicos de respuesta estructurales e involucrando las propiedades mecánicas de los materiales que componen la estructura. Constituyen un enfoque muy completo exigente y costoso, generalmente son muy laboriosos y dependen del grado de sofisticación de la evaluación, de la calidad de la información y de la veracidad de los modelos empleados.

### **6.2.3 Métodos experimentales**

Se realizan ensayos dinámicos para determinar las propiedades de la estructura y/o sus componentes. Generalmente ensayos “in situ” involucrando aspectos importantes como la interacción suelo estructuras y la incidencia de elementos no estructurales etc. Aunque los resultados no son determinantes pueden orientar el criterio sobre el estado de la edificación y los posibles efectos que han producido sismos pasados sobre la estructura. (Gomez & Rodriguez, 2006)

## **7. METODOLOGIAS DE EVALUACION DE LA VULNERABILIDAD SISMICA**

### **7.1 MÉTODO ATC-21**

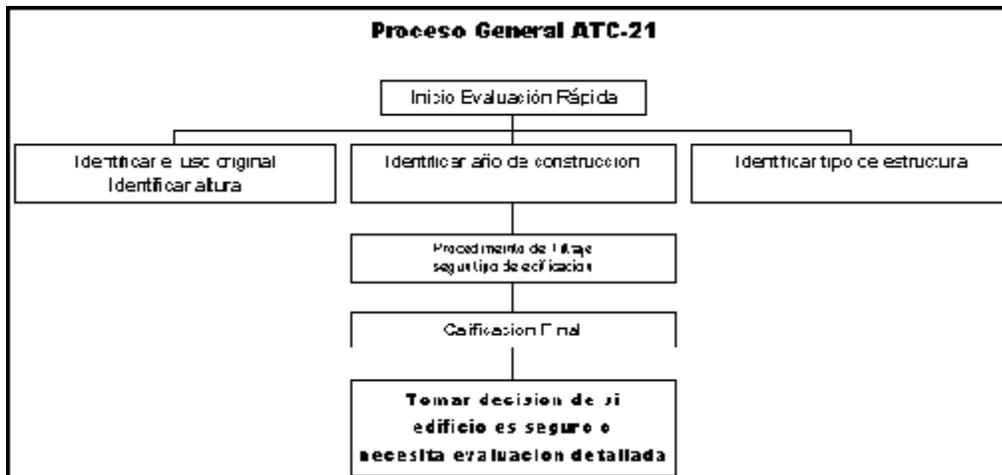
Rapis Visual Screening of Buildings For Potential Seismic Hazards. El método ACT-21, Método de Revisión por Filtro de Peligros Sísmicos Potenciales en edificaciones existentes, es un método analítico muy sencillo que se basa simplemente en darle una calificación inicial a una

edificación y a medida que se avanza en la revisión, se van filtrando las características estructurales de la edificación y así mismo se le van restando o sumando puntos a la calificación inicial.

El procedimiento comienza por identificar el sistema estructural que resiste las fuerzas sísmicas así como los materiales de los que está compuesto. El puntaje se le irá sumando o restando a la calificación inicial dependiendo de factores tales como:

- Si es de gran altura.
- Si está deteriorado.
- Si tiene irregularidades geométricas.
- Si existen pisos flexibles dentro de la edificación.
- Si existe torsión en planta.

La escala en este método va desde 0 (mal comportamiento sísmico), hasta 6 (muy buen comportamiento). Si un edificio resulta con una calificación inferior o igual a 2, se requiere que se lleve a cabo una evaluación más detallada tal como la del NSR -98 y la del FEMA-273. Del resultado de la evaluación preliminar los edificios que resulten deficientes deben ser estudiados y analizados por ingenieros estructurales especialistas en diseño sismo resistente. La Figura 6.7 muestra el proceso general del ATC-21.



Proceso General del ATC-2

## 7.2 MÉTODO FEMA-273

Este "segundo tipo" de evaluación, método FEMA-273, está diseñado para identificar más en detalle los miembros estructurales (columnas y vigas) que se encuentran deficientes en cuanto a su capacidad o resistencia que el detalle al que llega el FEMA-178. Este método adicionalmente nos ofrece una metodología para desarrollar las estrategias de rehabilitación o reforzamiento.

En el FEMA-273, a diferencia de otros métodos, se definen diferentes métodos y criterios de diseño para alcanzar diferentes niveles de desempeño sísmico de la edificación. Dentro de los niveles de desempeño sísmico se encuentran: Nivel Operacional, Nivel de Ocupación Inmediata, Nivel de Protección de la Vida y Nivel de Prevención de Colapso. La escogencia de estos niveles depende del desempeño esperado de la edificación durante y después de un terremoto, de cuánto daño se va permitir que ocurra en la edificación, cuánta pérdida económica se permita y del traumatismo o interrupción que cause en las actividades de los ocupantes de la edificación.

El procedimiento del FEMA-273 permite tanto una Rehabilitación Simplificada como una Rehabilitación Sistemática. La rehabilitación sísmica simplificada se permite usar para edificaciones bajas, de configuración geométrica sencilla, generalmente en zonas de amenaza sísmica intermedia y baja. Para este tipo de rehabilitación se requiere mucho menos análisis y diseño que para la sistemática. El método de rehabilitación sistemática es más completo y consta de un proceso parecido al del diseño de una edificación nueva, en el que se modifica el pre-diseño o diseño preliminar hasta que los resultados del análisis son verificados o aceptados revisando miembro por miembro.

La rehabilitación sistemática generalmente se basa en el comportamiento no-lineal de la respuesta de la estructura y usa procedimientos que no son comunes en los códigos de diseño corrientes. En este tipo de rehabilitación se revisa detalladamente cada miembro estructural, se diseñan nuevos elementos y se verifica la interacción aceptable de los desplazamientos esperados y de las fuerzas internas en los elementos estructurales.

Utilizando el método FEMA-273, se calculan los cortantes en la base, modificados por torsión accidental, se calculan los cortantes por piso y las cargas gravitacionales. Esta información se utiliza para definir los parámetros de aprobación o de aceptación con los que se trabaja, así:

$$mkQ_{ce} \geq Q_{ud} \quad \text{ó} \quad kQ_{cl} \geq Q_{uf}$$

$m$ : es un factor de modificación que depende de las cargas axiales y las cortantes y de las propiedades de los materiales de los diferentes elementos.

$k$ : es un factor que depende de qué tanto se conozca de la estructura.

$Q_{ce}$ : es la resistencia calculada de un miembro en particular que se está estudiando (axial, corte, flexión o flexo-compresión) teniendo en cuenta sus estado actual.

$Q_{ud}$ : es un conjunto de demandas o exigencias controladas por las deformaciones impuestas en la estructura debido a las diferentes cargas (muerta, viva, sismo, etc).

$Q_{cl}$ : es la resistencia mínima de un elemento en el nivel de deformación que se está considerando.

$Q_{uf}$ : es el conjunto de demandas o exigencias controladas por fuerzas impuestas a la estructura por las deformaciones (rigidez) o por una gobernada por las fuerzas (resistencia).

El último paso del procedimiento consiste en revisar o verificar la estrategia de rehabilitación definida desde un comienzo de la estructura reforzada bajo los criterios de flexión, corte, carga axial y de derivas. (htt)

### 7.3 MÉTODO DE MATRICES DE PROBABILIDAD DE DAÑO (MPD)

Una de las primeras aplicaciones de este tipo de métodos fue el trabajo realizado por Whitman et al. (1973). A partir de un levantamiento de daños causados por el sismo de San Fernando en 1971, cubriendo aproximadamente 1600 construcciones de 5 o más niveles, se generaron matrices de probabilidad de daño para cada tipo de construcción. La forma general de estas matrices se muestra en la Tabla N° 1. Cada número en la matriz (indicado por -) expresa la

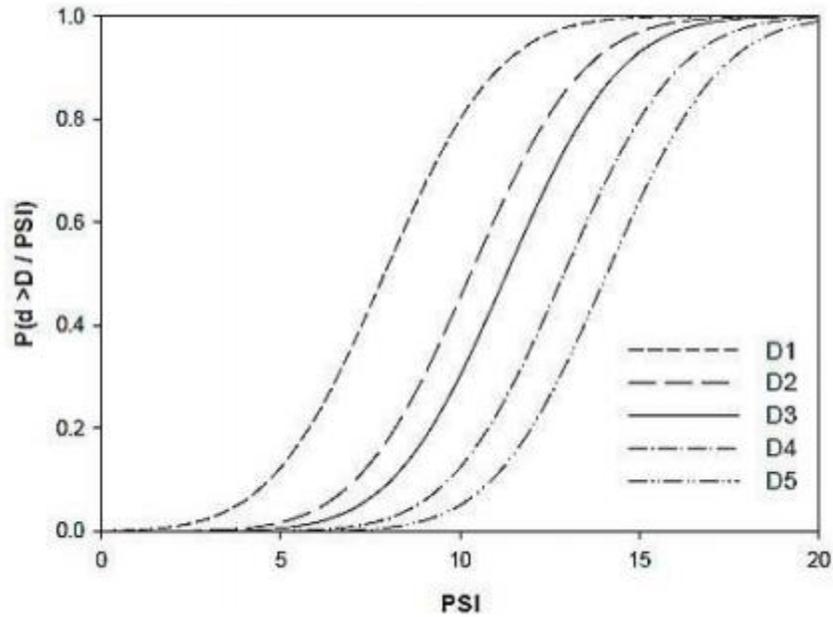
probabilidad que una construcción de una determinada clase, experimente un nivel de daño por causa de una intensidad sísmica dada. La relación de daño se obtiene como la relación entre el costo de reparación y el costo de reposición. Este tipo de método se encuentra dentro de las técnicas directas presentada por Corsanego y Petrini (1990), puesto que establece una relación directa entre la tipología de la construcción y el daño observado, asimismo, una de las primeras versiones europeas de la matriz de probabilidad de daño fue la introducida por Braga et al. (1982), posteriormente en Di Pasquale et al. (2005) presentaron una propuesta para actualizar la versión original. Las MPD basada en la opinión de expertos se introdujeron por primera vez en el ATC-13 (ATC, 1985), elaborado por FEMA para evaluar daños sísmicos causados por terremotos en California. Incluye un total de 78 matrices de probabilidad de daño correspondientes a diferentes tipos de instalaciones y servicios, 40 de los cuales corresponden a edificios. Asimismo, Giovinazzi y Lagomarsino (2004), desarrollaron el método macrosísmico a partir de la definición proporcionada por la escala EMS-98 y haciendo uso de una distribución de daños beta y la teoría de conjuntos difusos (es decir, la evaluación progresiva de la composición de los elementos en un conjunto), utilizan un Índice de Vulnerabilidad Empírico que toma en cuenta la región, el patrimonio inmobiliario y las clases para la producción de MPD relacionados con el parque de viviendas. Recientemente Eleftheriadou et al. (2011), realizaron un estudio de evaluación empírica sobre la base de encuestas de 180.945 edificios dañados en el terremoto de Atenas en 1999, clasificándolos en tipos de especificaciones estructurales, de acuerdo a los materiales, normas sismo-resistente y técnicas de construcción en el sur de Europa, obteniendo las MPD y las curvas de fragilidad para tipos de edificaciones.

**Formato de la matriz de probabilidad de daño para una tipología dada. (Whitman et al. 1973)**

Estado Daño	Daño estructural	Daño no estructural	Relación de daño	Intensidad del sismo				
				V	VI	VII	VIII	IX
0	Ninguno	Ninguno	0 - 0.05	-	-	-	-	-
1	Ninguno	Menor	0.05 - 0.3	-	-	-	-	-
2	Ninguno	Localizado	0.3 - 1.25	-	-	-	-	-
3	No notable	Generalizado	1.25 - 3.5	-	-	-	-	-
4	Menor	Sustancial	3.5 - 4.5	-	-	-	-	-
5	Substancial	Amplio	7.5 - 20	-	-	-	-	-
6	Mayor	Casi Total	20 - 65	-	-	-	-	-
7	Edificio inutilizable		100	-	-	-	-	-
8	Colapso		100	-	-	-	-	-

#### 7.4 MÉTODO DE LAS CURVAS CONTINUAS DE VULNERABILIDAD (FRAGILIDAD)

De naturaleza empírica, se encuentra basado directamente en los daños observados en edificios sometidos a terremotos históricos; se planteó poco después del método MPD; un obstáculo para la obtención de estas curvas es el hecho de que la intensidad macrosísmica no es una variable continua. Este problema fue resuelto por Spence et al. (1992), a través del uso de una escala de parámetros de intensidad para obtener las funciones de vulnerabilidad basada en el daño observado en edificios utilizando la escala de daño MSK.



Curvas de vulnerabilidad de Spence et al (1992), para pórticos de concreto armado

Otras alternativas de curvas de vulnerabilidad empíricas basadas en la observación de daños post-terremoto han sido propuestas para superar inexactitudes o calibrar los resultados obtenidos con métodos analíticos y/o ensayos de laboratorio, en donde el movimiento del terreno se caracteriza con la velocidad máxima del terreno (PGV) como en Yamaguchi y Yamazaki (2000).

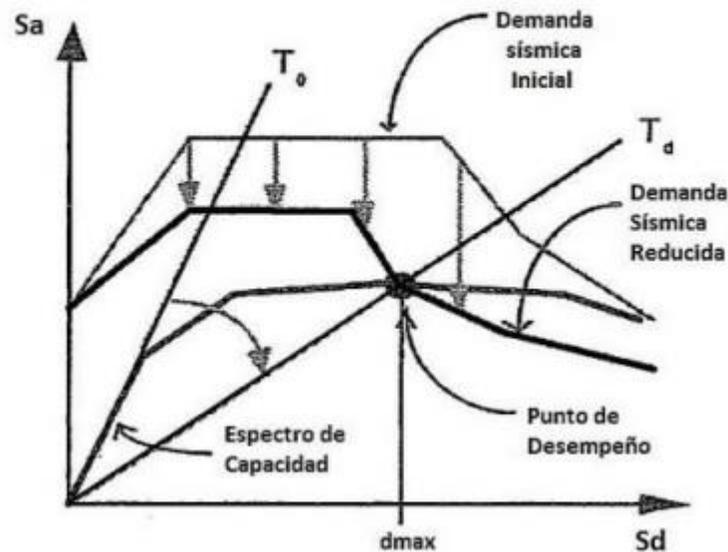


Componentes del cálculo de las curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño con métodos analíticos, (Dumova-Jovanoska 2004).

## 7.5 MÉTODO BASADO EN EL ESPECTRO DE CAPACIDAD

Es una técnica de análisis sísmico basado en comportamiento desarrollado inicialmente por Freeman et al. (1975); luego fue adoptado y modificado como un procedimiento de análisis no lineal estático por el ATC-40 y FEMA 440 (ATC, 1996; ATC, 2005) e implementando en la metodología HAZUS, el MEC establece procedimientos simples para determinar el punto de capacidad por demanda “Performance point” de una estructura cuando se ve sometida a movimientos sísmicos de diferente intensidad, mediante un procedimiento gráfico se compara la capacidad para resistir fuerzas laterales con la demanda sísmica, representada por medio de un

espectro de respuesta reducido, lo que significa la superposición de los espectros de capacidad y de demanda en un sistema cartesiano de formato ADRS (Espectro de aceleración vs desplazamiento)



MEC para determinar el punto de capacidad por demanda

El espectro de capacidad es obtenido de un análisis estático no lineal con empuje incremental (pushover). Basado en un enfoque mecánico simple la estructura es sometida a una carga estática lateral que se representa por un modelo de un solo grado de libertad, además, se caracteriza la demanda sísmica inicial mediante un espectro de respuesta elástica  $S_{ae}(T)$  que se convierte al sistema cartesiano de formato  $S_a$ - $S_d$ . El punto de intersección de los espectros de capacidad y de demanda es el punto de máxima solicitud de la capacidad de la estructura por parte de la demanda a que se ve sometida (punto de capacidad por demanda). El ATC-40 contiene tres técnicas específicas para su determinación.

## 7.6 MÉTODO BASADO EN DESPLAZAMIENTO

Existe un método de evaluación de la vulnerabilidad basado en desplazamientos, propuesto por Priestley en 1993 y desarrollado por Priestley (1997), Calvi (1999); en este método se propone emplear el desplazamiento como indicador fundamental del daño y una representación espectral de la demanda sísmica. Es conocido también como Método directo de diseño basado en desplazamiento “DirectDisplacement-basedDesign (DDBD)”, donde la respuesta de una estructura de múltiples grados de libertad se representa mediante un sistema de un grado de libertad equivalente a un oscilador con una masa efectiva ( $m_e$ ). La representación bilineal de fuerza desplazamiento de la estructura se caracteriza en términos de la rigidez efectiva o secante ( $K_e$ ) en el desplazamiento máximo ( $\Delta_d$ ), (Priestley et al. 2007).

El método contempla que para un nivel de ductilidad de demanda se calcule un amortiguamiento viscoso equivalente, representativo de la combinación del amortiguamiento elástico e histéretico de la energía absorbida durante la respuesta elástica. Con el desplazamiento de diseño determinado en la respuesta máxima y el correspondiente amortiguamiento estimado a partir de la ductilidad de demanda esperada, se obtiene el periodo efectivo ( $T_e$ ) de un grupo de espectros de proyectos expresados en desplazamiento. Esta fuerza de proyecto de la estructura equivalente se distribuye en la estructura real y se dimensiona la estructura; a partir de aquí, se realiza un análisis estático no lineal para verificar que el amortiguamiento de partida se satisface dentro de una tolerancia aceptable. (Herrera, Vielma, Bartat, & Pujades, 2013)

## 7.7 METODO DE CALVIN (1999)

Este es un ejemplo de los métodos basado en modelos simples, fue aplicado en la ciudad de Catania, este método se guía por los conceptos para análisis detallado de construcciones existentes basado en la asignación de la capacidad de desplazamiento de un edificio

correspondiente a varios estados límite y en la demanda de desplazamiento resultante de un espectro de desplazamiento. El modelo utiliza muy pocos parámetros: el periodo de la construcción, el número de niveles y el tipo de material.

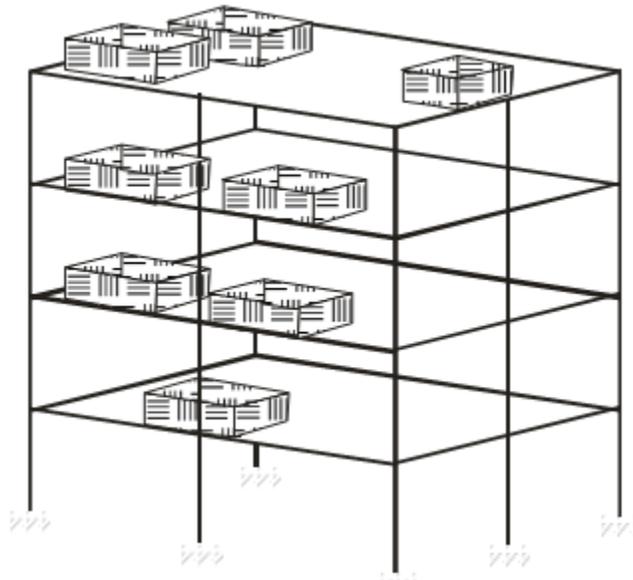
Se consideran cuatro estados de daño: **LS1** el cual indica que no hay daños, **LS2** correspondiente a daños estructurales leves y daños no estructurales moderados, **LS3** indicando daños estructurales significativos y daños no estructurales severos y por último **LS4** que indica el colapso. Para cada tipo de estructura y cada estado de daño se define un modelo estructural, en términos de una rigidez secante en el punto de desplazamiento máxima y un factor de reducción de demanda de desplazamiento, que depende de la energía disipada por la estructura. La fiabilidad de estos dos parámetros, derivados a partir de un número muy reducido de datos es pequeña y, por lo tanto, se proporcionan intervalos, en vez de utilizar valores continuos. Los dos intervalos definen un rectángulo en el plano del espectro de desplazamiento y la probabilidad de ocurrencia de un cierto estado límite se obtiene integrando una función de densidad de probabilidad en el área bajo la línea del espectro de respuesta de desplazamiento. (Gomez & Rodriguez, 2006)

## 8. ASPECTOS MAS RELEVANTES QUE AFECTAN LA SEGURIDAD SÍSMICA DE UNA EDIFICACIÓN.

### 8.1 PESO

El tamaño del edificio indica también el peso del mismo por ello debe procurarse un edificio lo más ligero posible, incluyendo el peso de los revestimientos y elementos divisorios que inducen en la respuesta, fuerzas ajustadas a su peso. Cualquier cambio en el tamaño del edificio afecta su comportamiento y las alternativas en la solución estructural a causa del efecto del tamaño y del cubo cuadrado<sup>15</sup>; en el cual cada sistema estructural (pórtico, muro, arco,

cables etc.) llega al límite de su tipología obligando al cambio en el sistema por otro adecuado; este cambio resulta importante por la incidencia en la forma del edificio. Por ejemplo, las vigas pueden ser usadas aproximadamente, hasta una luz de 30 m, mientras que la cercha soporta mayores luces. (Arnold y Reitherman, 1991; Bazán y Meli, 2001)



## 8.2 DISTRIBUCIÓN IRREGULAR DE UN EDIFICIO

La respuesta sísmica del edificio es difícil de cuantificar cuando la distribución de paredes es de forma complicada, las plantas presentan alas, vestíbulos, balcones, torres, techos en volado, también las que posean aberturas para escaleras, elevadores, ductos y tuberías así como los techos con vacíos para alojar claraboyas, cubos de ventilación y chimeneas.

Se recomienda evitar las masas que sean innecesarias porque se traducen en fuerzas innecesarias.

Además las masas ubicadas en las partes altas de un edificio no son favorables porque la aceleración crece con la altura, de manera que es conveniente ubicar en los pisos bajos las áreas donde se prevén mayores concentraciones de pesos (tales como archivos y bóvedas). También se debe impedir las fuertes diferencias de los pesos en pisos sucesivos y tratar que el peso del

edificio esté distribuido simétricamente en la planta de cada piso, una posición asimétrica generar un mayor momento torsor. (Ambrose y Vergun, 2000; Bazán y Meli, 2001; Grases, López y Hernández, 1987).

En el caso de las estructuras de madera, estas son de poco peso por lo que las fuerzas de inercia serán bajas y es posible violar ciertos principios de configuración, introduciendo irregularidades que constituirían un problema grave en un edificio grande, además, las luces son cortas por lo que habrá mayor número de elementos estructurales para distribuir las cargas en relación con el área de piso. (Arnold y Reitherman, 1991)

## 8.2 ESTRUCTURACIÓN EN PLANTA.

La forma en planta de un edificio incide en la respuesta sísmica. Este hecho ha sido demostrado repetidamente por todos los terremotos acontecidos.

Los problemas que más se presentan en planta son:

1. Longitud de planta: Las estructuras con dimensiones considerables en planta, experimentan grandes variaciones de la vibración a lo largo de la estructura que generan fuerzas rotacionales. Estas variaciones se deben a las diferencias en las condiciones geológicas

Perimetral: Los muros laterales y/o traseros están sobre los límites de la construcción por lo que no tiene aberturas, mientras la fachada frontal con ventanas hacia la calle es abierta; por lo que el techo tiende a torcerse, generando problemas sobre el edificio.

Falsa simetría: Edificios que poseen una configuración en apariencia sencilla, regular y simétrica, pero debido a la distribución de la estructura o la masa es asimétrica.

Esquina: Plantas con formas en L, T, U, H, +, o una combinación de estas. Durante un movimiento sísmico cada ala tiene un movimiento diferente y la esquina interior o entrante que

es la unión entre las dos alas adyacentes es la parte que más daño va a presentar.

### 8.3 ESTRUCTURACIÓN EN ELEVACIÓN.

Las reducciones bruscas de un nivel a otro, tiende a amplificar la vibración en la parte superior y son particularmente críticas. El comportamiento de un edificio ante un sismo es similar a una viga en volado, donde el aumento de la altura implica un cambio en el período de la estructura que incide en el nivel de la respuesta y magnitud de las fuerzas.

La sencillez, regularidad y simetría que se busca en planta también es importante en la elevación del edificio, para evitar que se produzcan concentraciones de esfuerzos en ciertos pisos o amplificaciones de la vibración en las partes superiores del edificio. Son particularmente (Bazán y Meli, 2001)

Los problemas que más se presentan en elevación son:

1. Proporción: Este aspecto puede ser más importante que el tamaño o altura, ya que mientras más esbelto es el edificio mayor es el efecto de voltearse ante un sismo, la contribución de los modos superiores es importante y el edificio puede hacerse inestable por el efecto P- $\Delta$ .

Escalonamiento: Consiste en una o más reducciones abruptas en el tamaño del piso de un nivel con respecto al siguiente. También en hacer el edificio más grande a medida que se eleva, lo que se conoce como escalonamiento invertido.

### 8.4 PISO DÉBIL

El piso débil se refiere a los edificios donde una planta es más débil que las plantas superiores, causado por la discontinuidad de resistencia y rigidez. Este problema es más grave cuando el piso débil es el primero o segundo, niveles donde las fuerzas sísmicas son mayores.

Muro discontinuo: Cuando los muros de cortante no cumplen con los requisitos de diseño se puede considerar que generan un problema como el de piso débil. Por otra parte, un muro de

cortante discontinuo es una contradicción fundamental de diseño; el propósito de un muro de cortante es resistir las fuerzas de inercia que se originan en los diafragmas y transmitir las hacia la fundación en la forma más directa posible, por lo que interrumpir esta trayectoria se convierte en un error y realizarlo en la base es un problema aún mayor, siendo el peor caso de la condición de planta baja débil. (Arnold y Reitherman, 1991)

### 8.5 VARIACIÓN EN LA RIGIDEZ

El origen de este problema por lo general reside en consideraciones arquitectónicas realizadas sobre terrenos en colinas, relleno de porciones con material no estructural pero rigidizante para crear una faja de ventanas altas, elevación de una porción del edificio sobre el nivel del terreno mediante elementos altos, en tanto que otras áreas se apoyan sobre columnas más cortas, o bien, rigidización de algunas columnas con una mezzanina o desván, mientras otras se dejan de doble altura sin rigidizarlas. Estas configuraciones generan una columna corta que es más rígida y bajo cargas laterales, atraerá fuerzas que pueden estar desproporcionadas con su resistencia.

### 8.6 ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES

Los efectos de los elementos no estructurales son menospreciados en un análisis ordinario de estructuras y a menudo son la causa de los daños y la falla. La experiencia ha demostrado que la presencia de elementos no estructurales puede cambiar el comportamiento dinámico de una estructura, ya que las fuerzas sísmicas son atraídas por las áreas de mayor rigidez y si estas no están diseñadas para resistir las fuerzas, posiblemente fallen teniendo efectos desfavorables en la edificación.

### 8.7 UBICACIÓN Y SU RELACIÓN CON ESTRUCTURAS VECINAS.

La relación del contorno del proyecto es importante en cuanto a la ubicación del edificio dentro del terreno, es trascendental guardar una *separación* que sea suficiente con respecto a edificios adyacentes, para evitar que los distintos cuerpos se golpeen al vibrar fuera de fase durante un sismo.

El daño puede ser particularmente grave cuando los pisos de los cuerpos adyacentes no coinciden en las mismas alturas de manera que durante la vibración las losas de piso de un edificio pueden golpear a media altura las columnas del otro. Este choque se denomina *golpeteo* y está relacionado con las juntas de separación y la rigidez. El estudio del golpeteo entre edificios se relaciona con la localización del edificio en relación con otras estructuras. (Arnold y Reitherman, 1991; Bazán y Meli, 2001) (Medina)

## 8.8 EXCESIVA FLEXIBILIDAD ESTRUCTURAL

En el diseño debe garantizarse que la edificación resista los efectos del movimiento sísmico, y también minimizar los daños en elementos no estructurales, juntas, escaleras, entre otros, debido a los desplazamientos laterales. Las edificaciones excesivamente flexibles, son más susceptibles a sufrir grandes desplazamientos laterales entre niveles consecutivos, por el movimiento debido a fuerzas sísmicas.

A dichos desplazamientos relativos se les conoce como deriva y deben ser controlados en el diseño según las especificaciones normativas. (Grases et al. 1987; Arnold & Reitherman, 1982)

Las principales causas de la flexibilidad estructural son:

- Excesiva distancia libre entre elementos verticales (luces o vanos)
- Altura libre entre niveles consecutivos
- Poca rigidez de elementos verticales

- Discontinuidad de elementos verticales

## 8.9 TORSIÓN

La torsión ha sido la causa de importantes daños y, en algunos casos, colapso de edificaciones sometidas a fuertes movimientos sísmicos. Se presenta por la excentricidad entre el centro de masa y el centro de rigidez. Cuando en una configuración, el centro de masa coincide con el centro de rigidez, se dice que existe simetría estructural. A medida de que el edificio sea más simétrico, se reducirá su tendencia a sufrir concentraciones de esfuerzos y torsión, y su comportamiento ante cargas sísmicas será menos difícil de analizar y más predecible.

La simetría va desde la geometría de la forma exterior, hasta las distribuciones internas de elementos resistentes y componentes no estructurales. En los casos donde existen muros, núcleos de ascensores o tabiquería, hacia un lado de la edificación, el centro de rigidez se desplaza en esa dirección. Debido a esto se generan deformaciones no previstas en el cálculo estructural.

## 8.10 FUNDACIONES INADECUADAS

Las fundaciones de una edificación son las bases sobre las cuales ésta se apoya de forma adecuada y estable sobre el terreno. Es imprescindible, para toda obra de ingeniería, realizar un estudio de suelos por expertos en el área. Dicho estudio dependerá de la altura, peso y uso de la edificación.

Evidentemente, escoger el tipo de fundación adecuado dependerá de las características de la estructura, del estudio de suelos y la actividad sísmica probable de la zona.

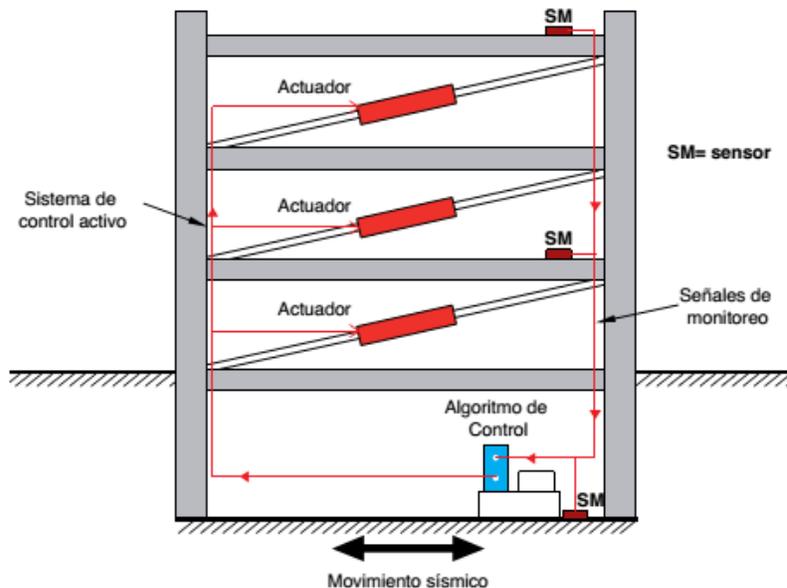
El sistema de fundación deberá ser capaz de transferir al suelo las acciones sísmicas y gravitatorias, sin que supere la capacidad portante de éste, correspondiente al nivel de excitación sísmica previsto y sin que se produzcan movimientos relativos entre los elementos de fundación que puedan originar deformaciones inaceptables en la estructura. Los desplazamientos relativos que eventualmente pueden sufrir los distintos elementos de fundación, deberán ser tales que no comprometan la estabilidad y funcionalidad de la estructura. Cada uno de los bloques estructuralmente independientes de una construcción, tendrá un sistema de fundación único (homogéneo). No se admitirán sistemas diversos dentro de una misma unidad, por ejemplo: algunas columnas sobre pilotes y otras sobre fundaciones directas.

Los apoyos de la estructura deben vincularse entre sí mediante un sistema de riostras o losa que asegure el movimiento conjunto de todos los elementos. Esto con la finalidad de evitar apreciables desplazamientos diferenciales entre ellos que impliquen deformaciones adicionales a la estructura. (Blanco, 2012)

## 9. SISTEMAS DE PROTECCION SISMICA

Los sistemas de protección sísmica de estructuras utilizados en la actualidad incluyen diseños relativamente simples hasta avanzados sistemas totalmente automatizados. Los sistemas de protección sísmica se pueden clasificar en tres categorías: Sistemas activos, sistemas semi-activos y sistemas pasivos.

## 9.1 SISTEMAS ACTIVOS

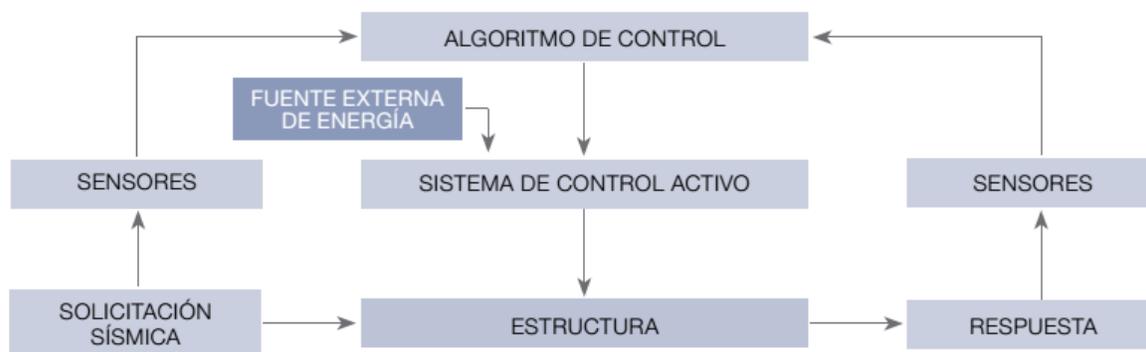


Esquema de estructura con sistema de control activo

Los sistemas activos de protección sísmica son sistemas complejos que incluyen sensores de movimiento, sistemas de control y procesamiento de datos, y actuadores dinámicos.

Estos sistemas monitorean la respuesta sísmica de la estructura en tiempo real, detectando movimientos y aplicando las fuerzas necesarias para contrarrestar los efectos sísmicos. El actuar de los sistemas activos se resume de la siguiente forma: las excitaciones externas y la respuesta de la estructura son medidas mediante sensores, principalmente acelerómetros, instalados en puntos estratégicos de la estructura. Un algoritmo de control procesa, también en tiempo real, la información obtenida por los instrumentos, y determina las fuerzas necesarias que deben aplicar los actuadores para estabilizar la estructura. Las fuerzas que estos sistemas utilizan son, generalmente, aplicadas por actuadores que actúan sobre masas, elementos de arrioste o

tendones activos. Una de las principales desventajas de los sistemas activos de protección sísmica, además de su costo, es que necesitan de una fuente de alimentación externa continua para su funcionamiento durante un sismo. No obstante, constituyen la mejor alternativa de protección sísmica de estructuras, ya que permiten ir modificando la respuesta de los dispositivos en tiempo real, lo que implica un mejor comportamiento de la estructura durante el sismo. Los sistemas de protección sísmica activos han sido desarrollados en Estados Unidos y en Japón. Estos sistemas han sido aplicados principalmente en Japón, donde las restricciones de espacio de las grandes urbes, han detonado la construcción de estructuras de gran esbeltez.

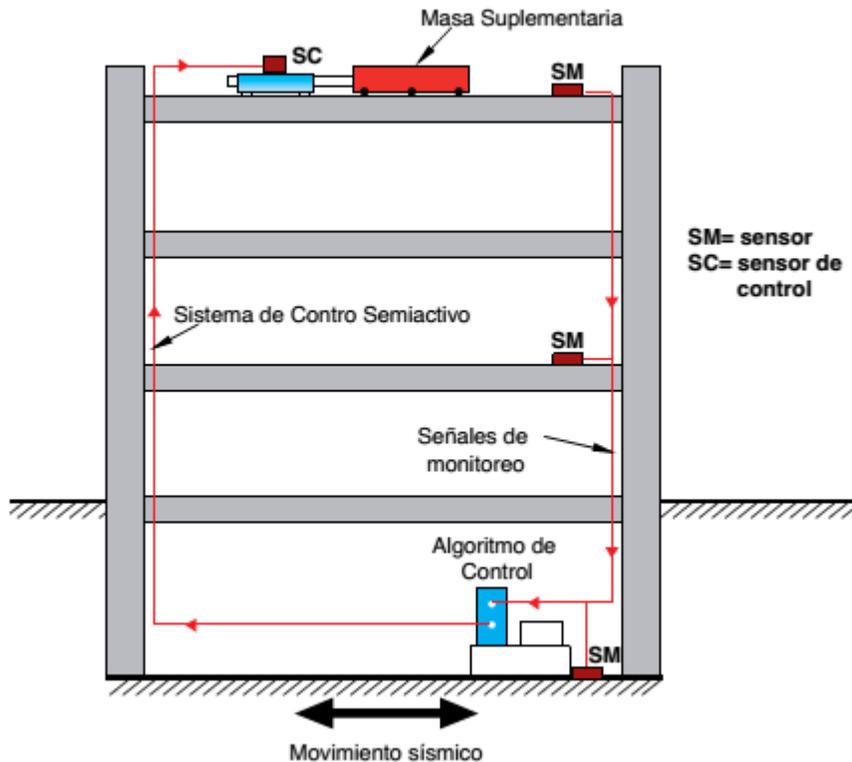


Esquema mecanismos de protección de sistemas activos

## 9.2 SISTEMAS SEMI-ACTIVOS

Los sistemas semi-activos de protección sísmica, al igual que los activos, cuentan con un mecanismo de monitoreo en tiempo real de la respuesta estructural. Sin embargo, a diferencia de los sistemas activos no aplican fuerzas de control directamente sobre la estructura. Los sistemas semi-activos actúan modificando, en tiempo real, las propiedades mecánicas de los dispositivos de disipación de energía. Ejemplos de estos sistemas son los amortiguadores de masa semi-

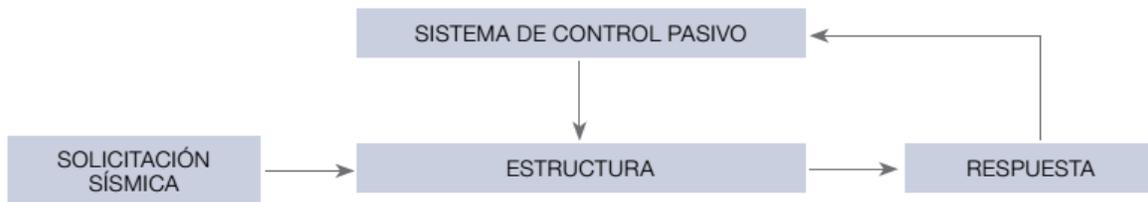
activos, los dispositivos de fricción con fricción controlable, y los disipadores con fluidos electro- o magneto-reológicos. (sistemas de aislacion sismica y discipacion de energia, 2012)



Esquema de estructuras con sistema de control semi-activo

### 9.3 SISTEMAS PASIVOS

Los sistemas pasivos son los dispositivos de protección sísmica más comúnmente utilizados en la actualidad. A esta categoría corresponden los sistemas de aislación sísmica de base y los disipadores de energía. Los sistemas pasivos permiten reducir la respuesta dinámica de las estructuras a través de sistemas mecánicos especialmente diseñados para disipar energía por medio de calor.

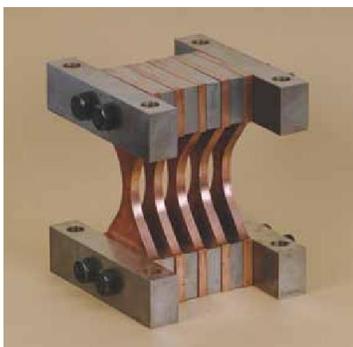


Los sistemas pasivos de disipación de energía pueden ser clasificados en cuatro categorías, según sean estos activados por desplazamientos, velocidades, por una combinación de desplazamientos y velocidades, o por movimiento (fuerzas inerciales). A continuación se detalla brevemente las características generales de cada una de estas categorías de disipadores de energía.

### 9.3.1 Disipadores activados por desplazamientos

Los disipadores de esta categoría se activan por medio de los desplazamientos relativos de los extremos del dispositivo, inducidos por los movimientos de la estructura durante un terremoto. Estos dispositivos disipan energía a través de la deformación plástica de sus componentes o mediante la fricción entre superficies especialmente diseñadas para estos fines. Bajo esta clasificación se encuentran los dispositivos metálicos, friccionales, de extrusión de materiales y los sistemas autocentrantes.

#### 9.3.1.1 Disipadores metálicos



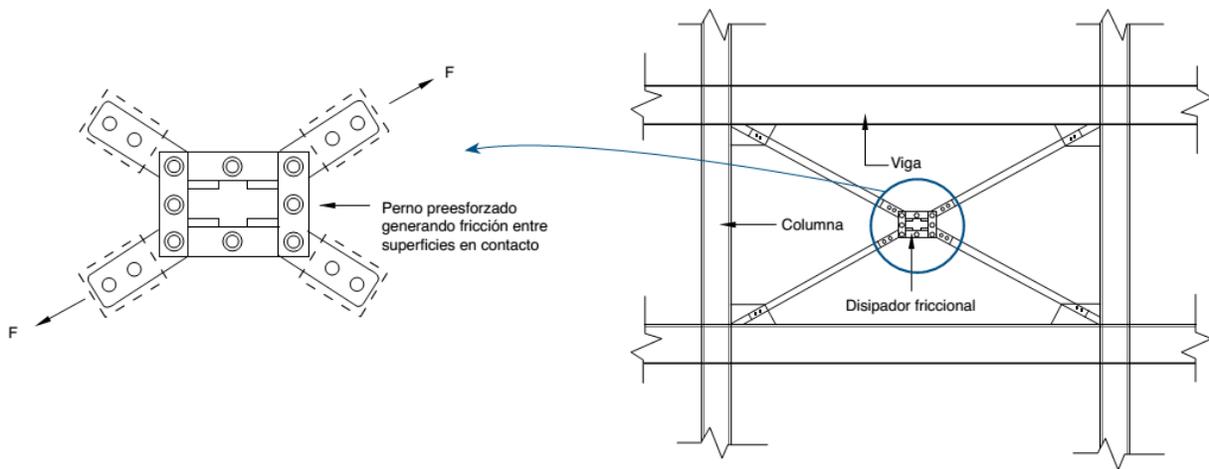
Disipador metálico tipo ADAS.

Estos dispositivos disipan energía por medio de la fluencia de metales sometidos a esfuerzos de flexión, corte, torsión, o una combinación de ellos. Los disipadores metálicos presentan, en general, un comportamiento predecible, estable, y confiable a largo plazo. En general, estos dispositivos poseen buena resistencia ante factores ambientales y temperatura. Este tipo de dispositivo permite añadir, simultáneamente, rigidez y amortiguamiento a la estructura. Los disipadores metálicos tipo ADAS pueden ser fabricados con materiales de uso frecuente en construcción. La geometría de estos dispositivos está especialmente definida para permitir la disipación de energía mediante la deformación plástica uniforme de las placas de acero.

#### ***9.3.1.2 Disipadores friccionales***

Estos dispositivos disipan energía por medio de la fricción que se produce durante el desplazamiento relativo entre dos o más superficies en contacto. Estos disipadores son diseñados para activarse una vez que se alcanza un determinado nivel de carga en el dispositivo. Mientras la sollicitación no alcance dicha carga, el mecanismo de disipación se mantiene inactivo.

Estos disipadores pueden ser materializados de varias maneras, incluyendo conexiones deslizantes con orificios ovalados o SBC (Slotted Bolted Connection), como el que se muestra en la figura, dispositivos con superficies en contacto sometidas a cargas de precompresión, etc. La Figura se muestra un esquema del disipador friccional tipo Pall. Una desventaja importante de este tipo de dispositivo radica en la incertidumbre de la activación de los dispositivos durante un sismo y en el aumento de la probabilidad de observar deformaciones residuales en la estructura



### 9.3.1.3 Disipadores de extrusión de materiales

Estos dispositivos basan su comportamiento en la extrusión de materiales (típicamente plomo) a través de perforaciones. En esta categoría se encuentran las diagonales de pandeo restringido o BRB's (por sus siglas en inglés para Buckling Restrained Braces). Estos elementos permiten añadir, simultáneamente, rigidez y amortiguamiento a las estructuras. Los disipadores de extrusión son durables en el tiempo, sin verse afectados mayormente por el número de ciclos de carga o efectos climáticos. La desventaja de estos dispositivos se encuentra en que pueden aumentar la probabilidad de observar deformaciones residuales al término del sismo.

### 9.3.1.4 Disipadores autocentrantes

Estos dispositivos basan su comportamiento en los ciclos histeréticos que se producen en conexiones o elementos pretensionados. Algunos disipadores autocentrantes pueden ser fabricados utilizando materiales con memoria de forma o SMA (por sus siglas en inglés para Shape Memory Alloys). Estos dispositivos utilizan las propiedades de los elementos que los componen, por ejemplo acero, y de la geometría de su configuración para disipar energía y, una vez finalizada la carga, regresar a su posición inicial. De esta forma, los disipadores

autocentrantes permiten controlar gran parte de los desplazamientos residuales de la estructura luego de un terremoto.



Biela autocentrante

### **9.3.2 disipadores activados por velocidad**

Los disipadores de esta categoría se activan a partir de las velocidades relativas de los extremos del dispositivo, inducidos por los movimientos de la estructura durante un sismo. Estos sistemas, típicamente añaden amortiguamiento a las estructuras, sin afectar su rigidez lateral. Estos disipadores, en general, permiten brindar protección a las estructuras durante sismos de baja, mediana y gran intensidad.

#### ***9.3.2.1 Dispositivos fluido-viscosos***

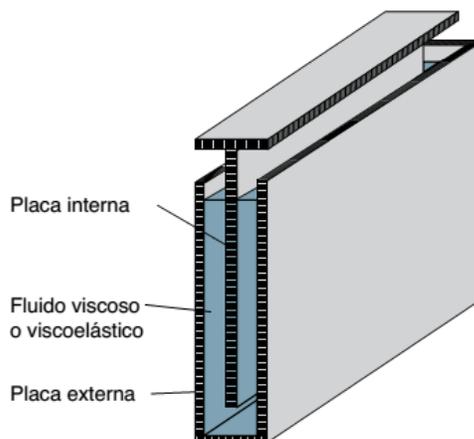
Este tipo de dispositivo disipa energía forzando un fluido altamente viscoso a pasar a través de orificios con diámetros, longitudes e inclinación especialmente determinados para controlar el paso del fluido. Estos dispositivos son similares a los amortiguadores de un automóvil, pero con capacidades para resistir las fuerzas inducidas por terremotos. La Figura muestra el aspecto de

disipadores del tipo fluido-viscoso



### 9.3.2.2 Muros viscosos

Los muros viscosos están compuestos por una placa que se mueve en un fluido altamente viscoso depositado al interior de un molde de acero (muro). El comportamiento de estos dispositivos depende principalmente de la frecuencia y amplitud de la carga, número de ciclos, y temperatura de trabajo. La Figura muestra esquemáticamente un disipador tipo muro viscoso.

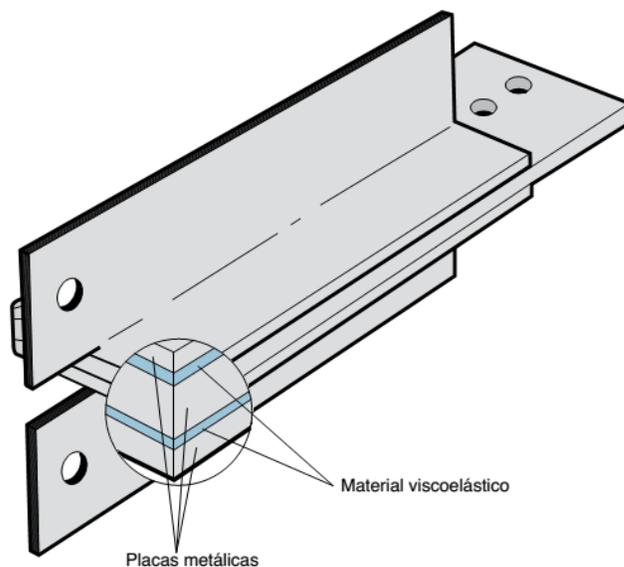


### 9.3.3 disipadores activados por desplazamiento y velocidad

Los disipadores de esta categoría se activan a partir de la acción combinada de los desplazamientos y velocidades relativas de los extremos del dispositivo, inducidos por los movimientos de la estructura producidos durante un terremoto. Estos sistemas, típicamente añaden, simultáneamente, amortiguamiento y rigidez a las estructuras.

#### 9.3.3.1 Dispositivos viscoelásticos sólidos

Estos dispositivos están formados por material viscoelástico ubicado entre placas de acero. Disipan energía a través de la deformación del material viscoelástico producida por el desplazamiento relativo de las placas. Estos dispositivos se ubican generalmente acoplados en arriostres que conectan distintos pisos de la estructura. El comportamiento de los amortiguadores viscoelásticos sólidos puede variar según la frecuencia y amplitud del movimiento, del número de ciclos de carga, y de la temperatura de trabajo. La Figura muestra esquemáticamente un disipador sólido viscoelástico.



### 9.3.4 dispositivos activados por movimiento

Esta categoría de sistemas de protección sísmica incluye los osciladores resonantes o Amortiguadores de Masa Sintonizada (AMS). Estos sistemas, que generalmente se montan en la parte superior de las estructuras, son activados por las fuerzas inerciales transmitidas por la estructura. Un AMS es un sistema constituido por una masa, elementos restituitivos, y mecanismos de disipación de energía. Este tipo de dispositivo utiliza el acoplamiento entre las frecuencias naturales de vibración de la estructura y del oscilador resonante para reducir la respuesta dinámica de la estructura. Los osciladores resonantes son generalmente utilizados en edificios de gran altura para reducir las vibraciones inducidas por el viento, sin embargo, también existen aplicaciones para mejorar el comportamiento de estructuras ante eventos sísmicos. La Figura muestra un amortiguador de masa sintonizada. La gran ventaja de este tipo de dispositivo es que se pueden instalar a nivel de techo de las estructuras, minimizando el impacto en la arquitectura. No obstante, la respuesta de este tipo de dispositivos depende del grado de sintonización con la estructura durante el sismo. El diseño del AMS debe incorporar un mecanismo de ajuste de las propiedades dinámicas del AMS. (construccion.)



## 10. RECOMENDACIONES

Debido a la gran cantidad de metrologías desarrolladas y las diferencias tan notorias entre las mismas en cuanto a la utilización de parámetros distintos para el desarrollo de la evaluación de vulnerabilidad, se hace complicado hacer una comparación fiable entre los resultados obtenidos por cada método, por tal razón considero necesario desarrollar una metodología donde se pueda unificar las variables o parámetros utilizados y de esta manera dar la oportunidad de comparar los resultados obtenidos.

Es importante tener en cuenta que hay estudios de vulnerabilidad que demandan un tratamiento diferente a los convencionales, es el caso de las edificaciones esenciales como lo son hospitales, colegios, edificaciones gubernamentales, estaciones de Bomberos, centros de asistencia primaria, etc. Debido a sus características particulares en cuanto a la funcionalidad, ocupación y equipamiento.

Cuando se quiera implementar un sistema de protección sísmica a alguna estructura es importante conocer muy bien los componentes estructurales que esta van a tener y además tener en cuenta las características sísmicas de la zona donde se desea construir para de esta manera seleccionar el sistema más adecuado y acorde a las necesidades.

Otro aspecto importante que se debe considerar es la ubicación de los disipadores de energía, independientemente de su tipología es recomendable ponerlos en sitios donde sea fácil realizarles mantenimiento en caso de ser necesario y además tratar de que el impacto en la concepción arquitectónica sea mínimo.

## 11. CONCLUSIONES

- Después de estudiar las diferentes metodologías empleadas para evaluar el nivel de vulnerabilidad sísmico de una estructura, se pudo determinar que utilizan parámetros diferentes de acuerdo a la profundidad o precisión que cada una maneja, por tanto los resultados obtenidos por algunos de estos métodos son mucho más precisos y confiables que otros, dejando ver así la importancia de definir con anterioridad el alcance y la profundidad que se le quiere dar al estudio.
- los métodos de evaluación basados en métodos estadísticos y evaluación de daños, son adecuados para estudios a gran escala ya que requieren de poca información y recursos, a diferencia de los métodos analíticos ya que estos necesitan de información detallada y precisa de cada estructura en evaluación, lo que hace que estos métodos sean mayormente utilizados para estudios a pequeña escala.
- Se observa que las formas complejas, la falta de simetría, una mala distribución de los elementos verticales, falta de continuidad en los elementos horizontales, luces de gran tamaño y una mala adecuación de los elementos no estructurales son los principales problemas que se presentan en estructuras y que hacen que su diseño no cumpla con los parámetros sismoresistentes.

- La utilización de sistemas de protección sísmica ayuda a mejorar considerablemente el comportamiento sísmico de las estructuras, lo que permite reducir los daños ocasionados a los elementos tanto estructurales como no estructurales, garantizando así de una manera más efectiva la estabilidad de la estructura.

## 12. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- (s.f.). Obtenido de [http://webserver2.ineter.gob.ni/sis/vulne/cali/6.6.1-met\\_analit.htm](http://webserver2.ineter.gob.ni/sis/vulne/cali/6.6.1-met_analit.htm)
- Acuña, P. (s.f.). *Disipadores de energía técnicas de diseño sísmoresistente*. Obtenido de <https://pavsargonauta.wordpress.com/2015/09/29/disipadores-de-energia-en-la-estructura-de-edificios/>
- Arancibia, F. (mayo de 2007). *Sistema de protección sísmica estudio comparativo económico de edificios con aislamiento sísmico en la base*. Obtenido de Ingeniería y construcción : <http://facingyconst.blogspot.com.co/2007/05/sistema-de-proteccion-sismica-estudio.html>
- Blanco, M. (agosto de 2012). *Criterios fundamentales para el diseño sísmoresistente*. Obtenido de Revista de la facultad de ingeniería univeccidad central de venezuela: [http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0798-40652012000300008](http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652012000300008)
- Bonett, R. (17 de Octubre de 2003). *Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios. aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada*. Obtenido de Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña: <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6230/03CAPITULO2.pdf?sequence=3>
- C. Gomez, S. (2000). *Vulnerabilidad de puentes de autopista. un estado del arte, monografía CIMNE IS 41*. Obtenido de centro internacional de métodos numéricos en ingeniería UPC, Barcelona España: <http://www.cimne.com/tiendaCIMNE/free/MIS41.pdf>
- construccion., C. d.-c. (s.f.). *Protección sísmica de estructuras*. Obtenido de sistemas de aislamiento sísmica y disipación de energías: [http://descargas.coreduc.cl/Proteccion\\_Sismica\\_de\\_Estructuras\\_-\\_Febrero\\_2012\\_CLR\\_v4.1.pdf](http://descargas.coreduc.cl/Proteccion_Sismica_de_Estructuras_-_Febrero_2012_CLR_v4.1.pdf)
- Fernandez, O. (s.f.). *Evaluación de la vulnerabilidad estructural en edificaciones*. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/72999935/Evaluacion-de-la-Vulnerabilidad-Sismica-en-Edificaciones>
- Gomez, I., & Rodriguez, E. (2006). *Generación de funciones de vulnerabilidad para edificaciones de mampostería no reforzada de baja altura utilizando técnicas de simulación*. Obtenido de Proyecto de grado Universidad Industrial de Santander: <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/1740/2/119422.pdf>
- Herrera, G. r., Vielma, J., Bartat, A., & Pujades, L. (julio de 2013). *estado del conocimiento sobre metodologías de evaluación de vulnerabilidad sísmica de edificios*. Obtenido de <http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/IngenieriaYSociedad/a8n1/art01.pdf>
- Medina, J. (s.f.). *El problema sísmico y la arquitectura sísmoresistente*. Obtenido de Facultad de arquitectura y diseño, Universidad de los Andes, Venezuela.
- Mena, U. (julio de 2002). *Evaluación del Riesgo sísmico en zonas urbanas*. Obtenido de Tesis de doctorado en ingeniería sísmica y Dinámica estructural, Universidad politecnica de Cataluña:

- [http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6222/03CAPITULO\\_2.pdf?sequence=2](http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6222/03CAPITULO_2.pdf?sequence=2)
- Paez, D., & Hernandez, J. (s.f.). *Metodología para el estudio de la vulnerabilidad estructural de edificaciones*. Obtenido de [http://tycho.escuelaing.edu.co/contenido/encuentros-suelosyestructuras/documentos/vulnerabilidad/01\\_diego\\_paez.pdf](http://tycho.escuelaing.edu.co/contenido/encuentros-suelosyestructuras/documentos/vulnerabilidad/01_diego_paez.pdf)
- Safina, S. (diciembre de 2002). *tdx*. Obtenido de <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6226/13CAPITULO4.pdf?sequence=13>
- Safina, S. (Diciembre de 2002). *Vulnerabilidad sísmica de edificaciones esenciales*. Obtenido de Tesis doctoral Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona España:  
<http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6226/13CAPITULO4.pdf?sequence=13>
- Safina, S. (diciembre de 2002). *Vulnerabilidad sísmica de edificaciones esenciales, Análisis a su contribución el riesgo sísmico*. Obtenido de Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Cataluña, UPC. Barcelona España:  
<http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6226/13CAPITULO4.pdf?sequence=13>
- sistemas de aislacion sísmica y discipacion de energia*. (diciembre de 2012). Obtenido de Coorporacion de desarrollo tecnologico:  
<http://www.emb.cl/construccion/articulo.mvc?xid=2495>
- Vielma, J., Herrera, R., Ugel, R., Martinez, Y., & Barbat, A. (2013). *Enfoque para evaluar la vulnerabilidad sísmica de edificios de concreto reforzado de baja altura*. Obtenido de <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/21162/Vielma,%20Herrera,%20Ugel,%20Mart%C3%ADnez,%20Barbat,%202013.pdf>