



---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DISEÑO SISMICO DE  
ESTRUCTURAS DE CONCRETO  
CONSIDERANDO CONCEPTOS DE  
RIESGO Y RESILIENCIA**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**INGENIERO CIVIL**

**P R E S E N T A**

Andrea Cabriada Ascencio

**DIRECTOR DE TESIS**

DR. MAURO POMPEYO NIÑO LAZARO

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023



## Dedicatoria

A mi madre Elsa Aida Ascencio Espinosa, que es la otra parte de mí que ha vivido conmigo mi etapa universitaria.

A mis abuelos Carlos Ascencio García, Aida Espinosa Torres y Olga Espinosa Torres quienes son mi retaguarda divina y que continúan alentándome y guiándome para continuar con el camino hacia la honradez y dignidad.

A mi hermana Denisse Cabriada Ascencio, quien es mi Pepe Grillo.

Por último, a un joven amigo, Rodolfo Ascencio Espinosa, de quien soy discípulo. Por creer en mí a cada paso que yo doy y cada aventura nueva a la que entro.

*Arriba y Adelante*

## Agradecimientos

Gracias al Dr. Mauro Pompeyo Niño Lázaro por sus enseñanzas y su confianza que me permitió nunca rendirme en este proceso.

Le agradezco al Dr. Carlos por ser mi mentor en este trabajo y compartirme su conocimiento y alentarme.

A mi universidad que me dio todas a la que le debo educación ética y profesional y que me dio todas las oportunidades que hoy en día sigo disfrutando.

A Dr. Katrin Beyer y Dr Savvas Saloustris por formar parte de mi última etapa de licenciatura y alentarme a continuar mi vida académica.

## Resumen

En este trabajo se presenta una metodología para el diseño sísmico y evaluación de la resiliencia de una estructura de concreto reforzado de un grado de libertad, diseñada bajo tres metodologías sísmo-resistentes distintas; la primera diseñada por el método de fuerzas, la segunda por riesgo y por último basada en resiliencia. La resiliencia sísmica pretende estimar la funcionalidad promedio de una estructura ante un escenario de daño probable, durante un periodo de tiempo. A partir de loa análisis de resultados se encontró que, las estructuras diseñadas con espectros basados en resiliencia presentaron mayor capacidad sísmica, mejor comportamiento en términos de vulnerabilidad y mayor resiliencia anual esperada. Se espera que dichas observaciones abran un espacio para la reflexión de los métodos de diseño sísmico actuales.

## Abstract

This bachelor's thesis presents a methodology for the seismic design and resilience evaluation of a single degree of freedom reinforced concrete structure, designed with three approaches, first a conventional code-based design was developed, then a risk-based design spectrum was used, and for the third approach a resilience-based spectrum was used. Seismic resilience aims to estimate the functionality of a structure in a probable damage scenario within a specific period. From the results analysis, it was found that the structures designed with resilience-based spectra presented higher seismic capacity, better behavior in terms of vulnerability and higher expected annual resilience. These observations are expected to open a space for reflection on current seismic design methods.

# Índice

|   |    |
|---|----|
| Introducción.....   | 5  |
| Objetivo .....  | 7  |
| 1. Antecedentes.....  | 8  |
| 1.1.    Diseño por Fuerzas .....                                      | 8  |
| 1.2.    Diseño por Desempeño .....                                    | 9  |
| 1.2.1.    Diseño por Desplazamientos .....                            | 11 |
| 1.3.    Diseño por Riesgo.....  | 14 |
| 1.4.    Diseño Considerando Resiliencia .....                         | 15 |
| 2. Metodología .....  | 18 |
| 2.1    Diseño Sísmico por Reglamento Ciudad de México 2017 .....      | 19 |
| 2.1.1.    Características de la estructura .....                      | 19 |
| 2.1.2.    Acciones sísmicas de Diseño .....                           | 20 |
| 2.1.3.    Análisis Modal Espectral.....                               | 22 |
| 2.1.4.    Revisión de Desplazamientos .....                           | 25 |
| 2.1.5.    Cortante Basal .....  | 26 |
| 2.1.6.    Fuerzas Internas de Diseño .....                            | 26 |
| 2.2    Diseño Sísmico por Riesgo .....                                | 27 |
| 2.3    Diseño Sísmico por Resiliencia.....                            | 33 |
| 2.3.1    Metodología para definición de Espectros de Resiliencia..... | 34 |
| 2.3.2    Vulnerabilidad .....   | 37 |
| 2.3.3    Análisis de Riesgo .....                                     | 41 |
| 2.3.4    Cálculo de Resiliencia .....                                 | 42 |
| 3. Casos de Estudio.....  | 45 |
| 4. Análisis de Resultados .....                                       | 58 |
| 4.1.    Curvas de Capacidad .....                                     | 58 |
| 4.2.    Vulnerabilidad .....  | 59 |
| 4.3.    Riesgo .....  | 60 |
| 4.4.    Resiliencia obtenida.....                                     | 61 |
| 5. Conclusiones.....  | 62 |
| 6. Referencias .....  | 63 |

## Introducción

México se ubica dentro de cinco placas tectónicas: Caribe, Pacífico, Norteamérica, Rivera y Cocos, algunas de las cuales subyacen entre sí en la costa este del país (Fig. 1), ocasionando que gran parte del territorio nacional sea considerado como una zona de alto riesgo sísmico, ya que las ondas emitidas por la liberación de energía del movimiento de las placas pueden viajar varios kilómetros a lo largo de la superficie terrestre antes de disiparse.

Aunada a la geografía, la peculiar topografía de la ciudad de México hace que la zona sea propensa a eventos sísmicos de magnitudes medianas a altas, ya que es una ciudad que se yergue en diferentes puntos sobre áreas lacustres, que son producto de lagos que una vez existieron al final de la época glacial (CONAGUA, 2002), lo que favorece la amplificación de ondas sísmicas.

Eventos históricos y recientes, como el terremoto del 19 de septiembre de 1985 y 2017 respectivamente, registraron daños y pérdidas significativas, y en muchos casos irreparables, que afectaron directamente a la población y a la funcionalidad de las estructuras en la ciudad de México y estados vecinos. Eventos como estos marcaron una diferencia en la concepción del diseño en las estructuras mexicanas, por lo que se han renovado los estándares de construcción a lo largo de las décadas, intentando, cada vez más, construir edificaciones sismo-resistentes que eviten el colapso y limiten los daños al mínimo.

Desastres naturales como estos, han incentivado a las y los especialistas alrededor del mundo a seguir desarrollando nuevas metodologías y enfoques en el diseño y evaluación de las estructuras y que así estas tengan un mejor desempeño.

Hoy día, los códigos y reglamentos que rigen en particular a la ciudad de México utilizan métodos de diseño basados en fuerzas laterales y gravitacionales, para tener una mayor comprensión en el comportamiento elástico de las estructuras con el objeto de construir edificaciones que eviten el colapso y/o presenten un daño mínimo ante un sismo.



FIGURA. 1. PLACAS TECTÓNICAS EN MÉXICO. (SERVICIO SISMOLÓGICO NACIONAL, 2021)

No obstante, estos diseños se ven limitados para evaluar el desempeño de las estructuras, en términos del daño, los tiempos de inactividad y su funcionalidad. Por ello varios autores han impulsado investigaciones para poder analizar y diseñar edificaciones con un objetivo de desempeño estructural específico ante las demandas sísmicas (Priestley et al, 2007).

Como resultado de estas investigaciones, el concepto de resiliencia sísmica surge como un nuevo parámetro para evaluar el desempeño de las estructuras. Esta nueva ideología tiene como objetivo evaluar la funcionalidad de la estructura pasado el evento sísmico, así como medir el nivel de recuperación en un periodo de tiempo ante una amenaza de tipo sísmico y poder determinar, si se requiere, el costo y el tiempo de reparación para la reanudación de las actividades (Bruneau, 2003).

La presente tesis evaluará, las diferencias en el diseño estructural llevado a cabo con tres demandas sísmicas distintas, una asociada a los códigos convencionales de diseño actualmente vigentes, una segunda en donde se hace hincapié en las pérdidas económicas por daños estructurales (metodología basada en riesgo), por último, se consideran demandas sísmicas asociadas a un cierto nivel de resiliencia. El objeto será evaluar el desempeño de cada estructura ante acciones sísmicas sobre el suelo blando de la ciudad de México y así poder comparar, en términos de resistencia, vulnerabilidad, riesgo y resiliencia, observándose las bondades y desventajas de cada espectro de diseño utilizado.

## Objetivo

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo identificar las bondades y desventajas al usar distintos espectros de diseño basados en: peligro uniforme (reglamento convencional), riesgo uniforme, o bien resiliencia uniforme. Para lo cual se tiene como caso de estudio marcos de concreto reforzado, situados en la Ciudad de México.

Entre los objetivos secundarios, se encuentran:

- Evaluar la diferencia entre capacidad resistente de estructuras diseñadas con enfoques tradicionales, basados en riesgo y basados en resiliencia.
- Identificar la influencia del uso de distintas demandas sísmicas en la vulnerabilidad estructural.
- Calcular el riesgo sísmico de distintas estructuras situadas en suelo blando de la Ciudad de México.
- Cuantificar la resiliencia sísmica de estructuras sometidas a una amenaza particular a la Ciudad de México, comparando 3 distintos enfoques de demandas sísmicas.

# 1. Antecedentes

Gracias a la innovación y al desarrollo, las sociedades humanas junto con sus paisajes urbanos han crecido a un ritmo exponencial. Siendo, dicho crecimiento, causa del surgimiento de nuevas demandas y retos en las edificaciones modernas. El riesgo de daños ante desastres naturales como lo son los sismos ha alentado a ingenieros e ingenieras alrededor del mundo, a desarrollar y perfeccionar nuevas metodologías de diseño en las estructuras.

Los actuales códigos que rigen a muchas ciudades, incluida la ciudad de México, son consecuencia de la búsqueda constante por desarrollar diseños sismo-resistentes, sin embargo, su filosofía de diseño se relaciona poco con el desempeño propio de la estructura, ocasionando una incertidumbre en los daños ocasionados por un sismo.

A continuación, se revisarán diferentes tipos de diseño sismo-resistente que han surgido durante el tiempo.

## 1.1. Diseño por Fuerzas

Como primera filosofía, se encuentra el diseño basado en fuerzas, el cual rige en el actual Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal 2004-2020 (RCDF, 2020). Presenta un análisis a la resistencia de una estructura en base a las fuerzas laterales de inercia, que ocurren durante un sismo y a las fuerzas gravitacionales. Su finalidad es evitar el colapso de las estructuras ante sismos de gran magnitud, aceptando cierto daño, además de evitar cualquier clase de daño y/o deformación ante sismos moderados.

En estos códigos se establecen criterios de diseño de los cuales se consideran los tipos de acciones que actúan en la edificación conforme a su duración (NTC-CA, 2017):

- i. Permanentes. Se presentan a lo largo de la vida de la estructura y su intensidad es continua con el tiempo como: cargas muertas, empujes estáticos del suelo y líquidos, etc.
- ii. Variables. A lo largo del tiempo, se presentan con fluctuaciones de intensidad como: carga viva, efectos de temperatura, maquinaria y equipo, etc.
- iii. Accidentales. Son fenómenos esporádicos y la intensidad varía significativamente durante un lapso breve como viento, granizo, etc. Para el caso de estudio de esta tesis la acción accidental a emplear es las acciones sísmicas.

Para establecer las condiciones de seguridad y de servicio que debe de tener el diseño, se aplican criterios de los cuales existen los estados límite:

- Estado Límite Último: Resistencia de diseño que debe de soportar ante las fuerzas o momentos internos para que la estructura no colapse. (NTC-S, 2017)

- Estados Limite de Servicio: Parámetro que al ser rebasado produce perdida funcional o deterioro de la estructura como deformaciones, agrietamientos, etc. (NTC-S, 2017)

Las estructuras que se diseñan mediante esta filosofía están pensadas para soportar los elementos mecánicos calculados mediante análisis lineales elásticos. Dichos análisis utilizan espectros de diseño elásticos, que como lo marca la normativa de la ciudad, son reducidos por diversos factores para así considerar, entre otros aspectos, el comportamiento inelástico de la estructura. Como ejemplo, se muestra en la figura 2, los distintos tipos de espectros; espectro elástico y espectros de diseño reducidos para  $Q=2$ ,  $Q=3$  y  $Q=4$  respectivamente, para la zona III (suelo lacustre) de la ciudad de México.

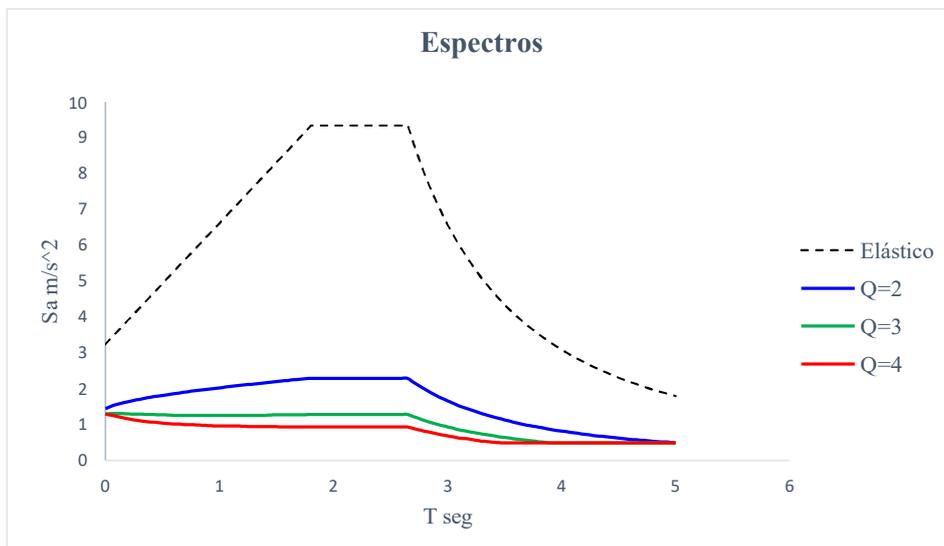


FIGURA. 2 ESPECTROS ELÁSTICOS Y DE DISEÑO

## 1.2. Diseño por Desempeño

El diseño tradicional expuesto anteriormente, es usado hoy día en varios países alrededor del mundo (incluido México), sin embargo, en su aplicación se encuentran limitantes ya que no garantiza que se cumpla un desempeño objetivo en una estructura ante distintas demandas sísmicas a lo largo de su vida útil.

Surgió entonces una propuesta por parte del Comité Visión 2000, fundado por la Sociedad de Ingenieros Estructurales de California (SEAOC) en el año 1995, llamada "Diseño Sísmico Basado en Desempeño" (PBSD). Se define entonces como aquel diseño que muestra un desempeño objetivo en las estructuras a nivel global y local mediante la predicción de las amenazas sísmicas dado un periodo de tiempo, y estableciendo límites en el daño que tendrían los elementos estructurales y no estructurales (SEAOC, 1995).

Esta filosofía hace cuantificable la cantidad de daño sufrido de la edificación ante la demanda sísmica y el impacto que tienen los daños en las actividades posteriores al evento. El primer código en donde se encuentra este procedimiento es el (ATC40, 1996) y un año más tarde (FEMA273, 1997). Dichos documentos evolucionaron a lo largo de los años hasta llegar a los más actuales; (FEMAP58, 2012) y (ASCE41-13, 2013).

Existen dos elementos principales que componen la representación gráfica del método (Fig.3) que a continuación se definen.

#### NIVEL DE DEMANDA

Como primer elemento tenemos el nivel de demanda, el cual se define por medio de la amenaza, es decir, las probabilidades de que un sismo de cierta magnitud ocurra durante un periodo de tiempo. El nivel de demanda se describe en términos cualitativos como *frecuente, ocasional, rara y muy rara* (SEAOC, 1995).

#### NIVEL DE DESEMPEÑO

Se refiere al estado límite o tolerable de los daños físicos posibles en la edificación y se expresan de manera cualitativa, es decir, el daño estará asociado con una serie de consecuencias económicas, estado de peligro para los usuarios y estado de inseguridad estructural. Estos objetivos son establecidos según el tipo de estructura, según su importancia y el nivel de desempeño que debe lograrse para la demanda sísmica (SEAOC, 1995).

- Completamente Funcional. Aquí no se presentan daños o bien son despreciables, toda la edificación es operacional y segura
- Funcional. Ocurren daños moderados y ligeros en elementos no estructurales y estructurales, respectivamente. No compromete la operación del edificio, pero pueden requerirse reparaciones.
- Seguridad. Daños moderados en elementos estructurales y no estructurales. Se deteriora la rigidez lateral y la capacidad resistente del sistema. Algunas instalaciones pueden verse interrumpidas. Reparaciones considerables
- Cercano al Colapso. La estabilidad de la estructura está comprometida acercándose a la falla estructural. Los servicios son suspendidos y es completamente inseguro para los usuarios. Las reparaciones pueden dejar de ser rentables.

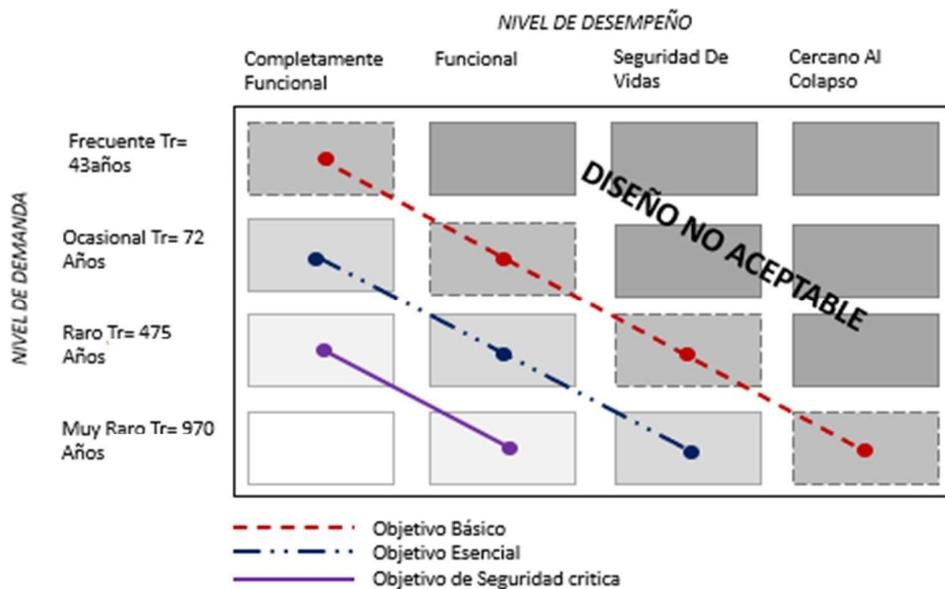


FIGURA. 3 MATRIZ DE DESEMPEÑO. ADAPTADO (SEAOC, 1995)

En la Fig. 3 se representan edificios ordinarios, a los cuales les corresponden valores máximos de distorsión global o local asociados a los valores 0.002, 0.005, 0.015 y 0.025 para los niveles de desempeño; completamente funcional, funcional, seguridad de vidas y cercano al colapso, respectivamente (Maraboto, 2001).

El enfoque de diseño previamente descrito permite al estructurista seleccionar el nivel deseado de rendimiento de la estructura o edificio contra el evento sísmico que se plantee, de esta forma se puede caracterizar los criterios de aceptación ante los distintos niveles de demanda del suelo con sus respectivos riesgos, lo cual es de utilidad para evaluar el nivel de los daños en los elementos estructurales y no estructurales (Botas & Espinosa, 2011).

### 1.2.1. Diseño por Desplazamientos

Dentro de las filosofías del PBSO se encuentra el diseño por desplazamientos. Cabe mencionar que dicha metodología ha sido adoptada por varios reglamentos internacionales, entre ellos las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, 2017 (NTC-S, 2017), sin embargo, su uso aún no se encuentra ampliamente practicado, siendo la preferencia de muchos ingenieros el diseño por fuerzas.

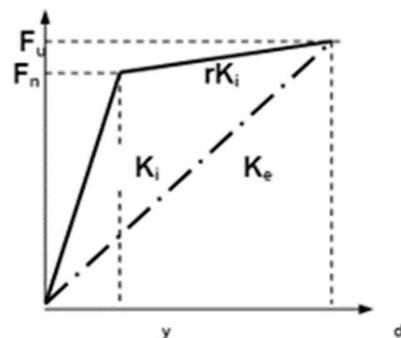
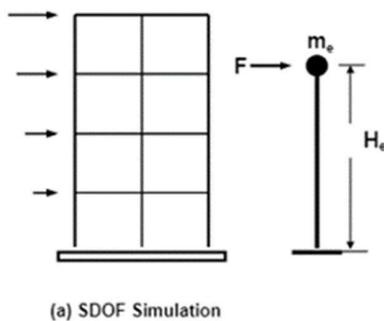
Esta propuesta se fundamenta en que el daño que sufre una estructura debido a un evento sísmico se puede asociar con las deformaciones de los elementos estructurales y las distorsiones de entrepiso, las cuales están relacionadas con los desplazamientos, por lo tanto, es correcto decir que el vínculo que existe entre el daño y los desplazamientos es directo. El procedimiento por el que

parte es llamado “Diseño basado en desplazamiento directo” o por sus siglas DBDD, introducido por primera vez por el autor Priestley en 1993. Posteriormente autores como Kappos (2007), López (2010), entre otros, elaborarían y profundizarían trabajos enfocados en este diseño.

En el método DBDD se reemplaza la estructura real por una simulación equivalente de un grado de libertad en el que se conoce sus características fundamentales como el primer modo de vibración como se presenta en la Fig. 4. El DBDD caracteriza la estructura por tener la rigidez secante  $K_e$  (en vez de la rigidez elástica inicial utilizada en el diseño por fuerzas) al máximo desplazamiento como se puede observar en la Fig. 4 inciso B), que representa la relación de la fuerza lateral y el desplazamiento (Morales, 2012).

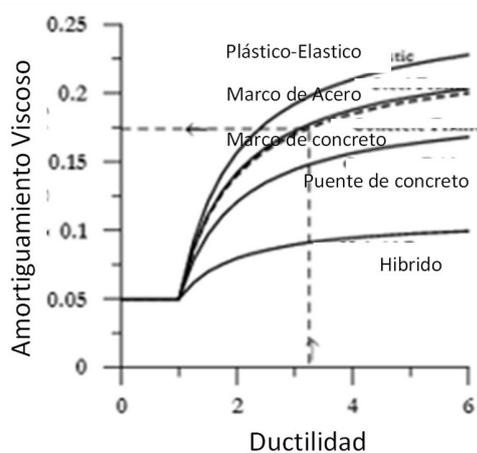
Asimismo, existe un nivel de amortiguamiento viscoso equivalente, que muestra el comportamiento no lineal, así como todas las fuentes de disipación de energía elásticas e inelásticas en la estructura. Para el inciso C) de la Fig. 4, dado un nivel de ductilidad objetivo se representa el nivel de amortiguamiento equivalente, así pues, un puente de acero se le asigna un nivel alto de amortiguamiento viscoso comparado con el de un puente de concreto con acero de refuerzo (Morales, 2012).

Determina el amortiguamiento correspondiente a partir de la demanda de ductilidad esperada y el periodo efectivo  $T_e$  en la respuesta de desplazamiento máximo, medido a la altura efectiva y la masa agrupada equivalente a la masa participativa del modo fundamental de vibración de la estructura real Fig. 4 inciso D).

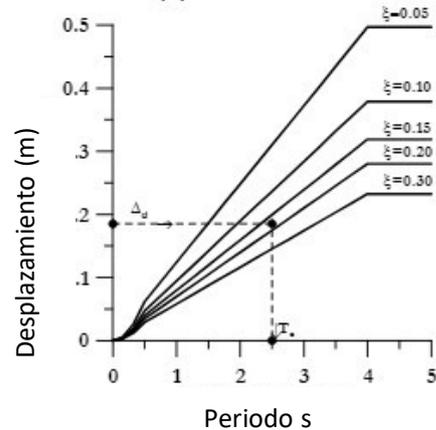


A) SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD

B) AMORTIGUACIÓN EQUIVALENTE VS DUCTILIDAD



c) AMORTIGUAMIENTO VISCOSO VS DUCTILIDAD



d) ESPECTRO DE DISEÑO POR DESPLAZAMIENTO

**FIGURA. 4** DISEÑO POR DESPLAZAMIENTO. ADAPTADO. A) SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD, B) AMORTIGUACIÓN EQUIVALENTE VS DUCTILIDAD C) AMORTIGUAMIENTO VISCOSO VS DUCTILIDAD, D) ESPECTRO DE DISEÑO POR DESPLAZAMIENTO. (PRIESTLEY, CALVI, & KOWALSKY, 2007)

Con este enfoque, se busca desarrollar un desplazamiento predeterminado para el sismo de diseño. Autores como López y Ayala (2013) convienen en que la aplicación de este diseño ofrece resultados satisfactorios en estructuras sismo-resistentes que se puedan asimilar a sistemas de un grado de libertad ya que permite controlar el daño bajo un nivel dado de excitación sísmica.

Con el fin de mantener consistencia con las nuevas tendencias de diseño sismo-resistente orientadas al desempeño estructural, diversos autores han realizado propuestas para cambiar de demandas sísmicas asociadas a un valor de peligro uniforme (EPU), a otros parámetros. Ejemplo de ello, se da de la mano de Avelar (2003) quien propone orientar los EPU a niveles de desempeño específicos. Posteriormente, Niño et al (2008) proponen espectros de fragilidad uniforme. En 2016, Buendía presenta espectros de riesgo uniforme, los cuales contienen ordenadas espectrales asociadas a un valor constante de pérdidas económicas por daños en elementos estructurales. Finalmente, de manera reciente, González et al (2022) muestran espectros cuyas ordenadas representan un valor teórico constante de tiempo, funcionalidad o bien resiliencia.

Dichas propuestas muestran el interés por lograr enfoques de obtención de demandas sísmicas que sean consistentes con las nuevas filosofías de diseño sísmico basadas en desempeño.

En particular, los enfoques que toman en cuenta el riesgo y la resiliencia son de particular interés por tratarse de temas relativamente recientes y con poca investigación, siendo objeto de estudio de la presente tesis.

### 1.3. Riesgo sísmico

El riesgo sísmico involucra el análisis probabilista de las pérdidas que puede sufrir una estructura, y está en función de tres parámetros importantes; la vulnerabilidad, la amenaza o peligro sísmico y la exposición (Fig. 5).

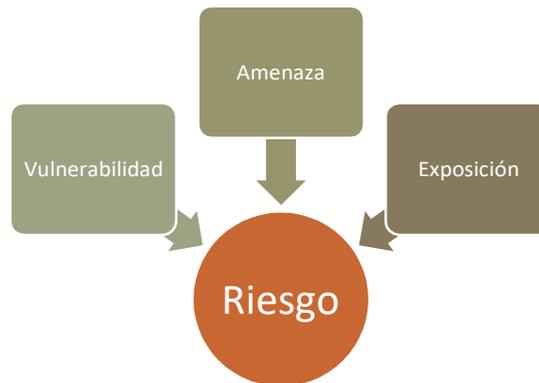


FIGURA. 5 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS PARÁMETROS QUE AFECTAN AL RIESGO SÍSMICO

#### 1.3.1) AMENAZA SÍSMICA

La amenaza sísmica se refiere a los eventos estocásticos que puede describir la distribución espacial la frecuencia anual y la aleatoriedad de la intensidad del peligro en la ubicación del estudio (Jaimes y Niño, 2017). Actualmente existen dos enfoques principales para la evaluación de la amenaza sísmica (Buendía, 2016).

- a) Método de análisis determinista de amenaza sísmica: A partir de modelos numéricos y teóricos se busca el sismo histórico máximo probable. El objeto es obtener con precisión el valor de los movimientos del suelo esperados en un sitio durante un evento. Este método empírico tiene sus limitantes a la hora de recopilar la información necesaria, además de que no contempla la incertidumbre de los resultados que se obtienen.
- b) Método de análisis probabilista de amenaza sísmica: busca dar, para un sitio, el valor del movimiento del suelo probable que será alcanzado o superado, durante un periodo específico. Se necesita saber, donde son producidos los movimientos del suelo pasados y cuales fueron su magnitud y frecuencia. Este método utiliza el modelo probabilista de Poisson.

#### 1.3.2) VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL

La vulnerabilidad puede ser representada como las pérdidas posibles ante una catástrofe sísmica; pérdidas humanas, bienes y actividades productivas. Ahora bien, la vulnerabilidad sísmica relaciona la pérdida incierta con una medida de excitación sísmica, como la respuesta de aceleración para un amortiguamiento y periodo dado. Existe una combinación de factores que definen el comportamiento estructural; como el material de construcción, el uso de edificio, el número de

niveles, el Reglamento de diseño, entre otros. Por lo anterior, debe existir una función de vulnerabilidad para cada caso de estudio.

### 1.3.3) EXPOSICIÓN

Finalmente, la exposición se refiere a todos los elementos o población que están expuestos a un peligro sísmico. Es imperativo la identificación de la ubicación, así como otras características físicas de la estructura estudio (Jaimes y Niño, 2017).

## 1.4. Resiliencia sísmica

Los diseños presentados anteriormente se comprometen a evitar los daños irreparables, tales como las pérdidas de vida humana, sin embargo, no contemplan el control del daño en elementos no estructurales ni en contenidos, así tampoco, los prolongados tiempos de inactividad post-sismo. Es por ello por lo que una nueva propuesta se ha creado en los últimos años el “Diseño Sísmico Basado en Resiliencia” cuyo objetivo principal es mantener la funcionalidad esperada de un edificio después de un movimiento fuerte en el suelo (Mahini, 2015).

Bruneau (2003) junto con su equipo multidisciplinario de trabajo (MCEER) propusieron una nueva evaluación del comportamiento sísmico de los sistemas estructurales basado en el Diseño por Resiliencia (RBD). Mediante la aplicación de dicho diseño es posible identificar el desempeño y la recuperación en medidas cuantitativas ante una respuesta sísmica y así permitir permitir la reanudación del funcionamiento y uso de la estructura (Cimellaro, 2013).

Bruneau define la resiliencia como la capacidad de un sistema para reducir las posibilidades de un choque, absorberlo (si ocurre) y para recuperarse rápidamente después de una descarga. Un sistema resiliente es pues aquel que posee las siguientes características (Bruneau, 2003):

- Probabilidad de falla reducida.
- Reducción de las consecuencias de fallas en términos de vidas perdidas, daños y consecuencias económicas y sociales.
- Reducción del tiempo de recuperación.

En la Fig. 6 se puede observar el desempeño en términos de porcentaje de una infraestructura, en donde el 100% significa que no existe degradación de la utilidad, mientras que un 0% significa que la estructura no es funcional. Continuando con la misma figura, se puede observar que una perturbación ocurre en el tiempo  $t_0$  lo cual reduce de la funcionalidad del sistema. Esperando una recuperación a lo largo del tiempo, se espera que para el  $t_1$  la funcionalidad sea restaurada por completo.

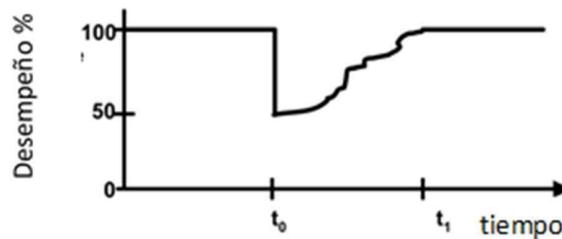


FIGURA. 6 GRAFICA DE DESEMPEÑO ESTRUCTURA VS TIEMPO (BRUNEAU, 2003)

En años posteriores, Cimellaro et al. (2010) aplicaron esta teoría a un caso de estudio de un hospital San Fernando Valley, California, tomando en consideración funciones de fragilidad y otras incertidumbres con el objeto de evaluar la resiliencia de cuatro sistemas; marcos resistentes al momento, pandeo de tirantes restringidos, muros de corte, debilitamiento y amortiguamiento en las columnas. En dicho trabajo, se propuso el siguiente modelo matemático para estimar cuantitativamente la resiliencia sísmica:

$$Rc = \int_{t_{oE}}^{t_{oE}+T_{LC}} Q(t)/T_c dt \quad \text{Ec(1)}$$

En la ecuación 1 la variable  $Rc$  es la resiliencia sísmica, la variable  $T_c$  es tiempo de control (asociado con la vida útil del sistema), la variable  $t_{oE}$  que es el tiempo de ocurrencia del evento sísmico, por último, la variable  $Q(t)$  que es función del nivel de funcionalidad en un punto de  $t$ .

Más tarde, Biondini et al (2015) llevan el diseño a sistemas de concreto y toman en cuenta la exposición al ambiente y el deterioro a lo largo del tiempo. Es por estas consideraciones que la evaluación de la resiliencia de Biondini se asocia al desempeño ante un evento sísmico y además del deterioro por la exposición ambiental de la estructura. Por medio de un análisis probabilístico se asocian las propiedades de las secciones tales como; corrosión de los materiales, geometría, erosión, etc.

Estudios siguientes como Geblein (2017), argumentan que es importante definir la métrica de desempeño en términos de funcionalidad, ocupación y reparabilidad de un edificio después de un terremoto, estableciendo un desempeño objetivo en el diseño. El autor Yeow (2017), sostuvo un análisis de costo-beneficio, considerando la variación del ciclo de vida y la resiliencia sísmica en estructuras de concreto reforzado cuando diferentes capacidades de rigidez y resistencia son especificadas. (González, 2020) Yamin (2019), Hashemi and Anwar (2019), definieron un marco de

estudio para estimar la resiliencia sísmica mediante la incorporación de nuevos alcances en los diseños. Por otro lado, González et al (2020) presentan una metodología desde un punto de vista probabilista, obtiene la resiliencia anual esperada aplicada a un caso de estudio de edificios escolares existentes, ubicados en la Ciudad de México.

La presente investigación propone ocupar esta filosofía de diseño y aplicarla a un caso de estudio de un marco simple para después compararla con la filosofía de riesgo y la de los reglamentos convencionales, antes mencionadas.

## 2. Metodología

La presente investigación se centra en el diseño sísmico de estructuras, utilizando tres enfoques para obtener demandas sísmicas distintos; un enfoque convencional con demandas basadas en peligro sísmico, un enfoque basado en riesgo y finalmente, un enfoque basado en resiliencia. Lo anterior se realiza con el fin de comparar los resultados entre sí y poder avalar las diferencias en cuanto a resistencia, vulnerabilidad, riesgo y resiliencia, así como observar si es posible garantizar un nivel de resiliencia predeterminada, desde el diseño de una estructura.

El diseño de los elementos mecánicos que resulten de los análisis sísmicos para los casos de estudio será basado en las ecuaciones encontradas en Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto 2020, con la peculiaridad de que los espectros de diseño tendrán características particulares para cada filosofía del diseño, dichas características se expondrán a lo largo del trabajo.

En la siguiente figura, se muestra un diagrama de flujo de las actividades a realizar para la presente tesis.



FIGURA. 7 DIAGRAMA DE FLUJO. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

## 2.1 DISEÑO SÍSMICO POR REGLAMENTO CIUDAD DE MÉXICO 2017

Como ya se mencionó en los antecedentes, los códigos actuales de la Ciudad de México están basados en el método tradicional de fuerzas en donde se caracteriza a la estructura en términos de la rigidez inicial y al mismo tiempo se utilizan espectros asociados a un peligro uniforme.

De manera breve, el método inicia realizando un diseño preliminar de los elementos y estimando criterios como la rigidez, inercia bruta y efectiva, periodo fundamental de vibración y masa efectiva. Después se seleccionan los factores de reducción de la fuerza sísmica adecuados para el sistema y con ello realizar un análisis sísmico estimar las frecuencias y formas modales. Se determinan los desplazamientos y se comprueban las distorsiones. Por último, se realiza el diseño según las fuerzas internas de diseño.

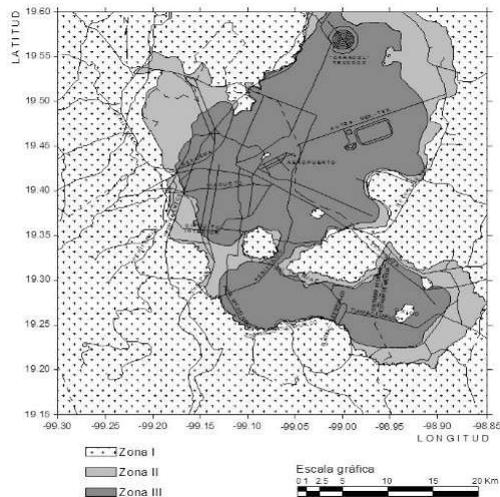
### 2.1.1 CARACTERÍSTICAS DE LA ESTRUCTURA

Como parte del diseño preliminar, es importante definir características propias de la estructura para así poder identificar y analizar el comportamiento y amenazas a las que está sujeta.

#### ZONIFICACIÓN

En primera instancia, se concreta la zona en donde se diseñará la estructura; según la Zonificación Geotécnica de la Ciudad de México (estipulada por las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Cimentaciones) se reconoce el sitio mediante las siguientes tres zonas:

- i. Zona I. Lomas, conformados por rocas en su mayoría firmes, puede existir depósitos arenosos sueltos o en estado de cohesión.
- ii. Zona II. Transición, conformados por arenas y limos arenosos intercalados en donde los depósitos profundos se encuentran a 20 metros de profundidad.
- iii. Zona III. Lacustre, principalmente depósitos de arcilla altamente comprensible, con capas de arena y contenido de limo o arcilla de 50 m de profundidad.



**FIGURA. 8 ZONIFICACIÓN SÍSMICA CIUDAD DE MÉXICO**

## IMPORTANCIA

Una vez reconocida la zona en la que se analizara la edificación, se clasifica según su grupo de importancia como lo marca el artículo 139 del “Titulo sexto de la seguridad estructural de las construcciones”:

- Grupo A. La falla estructural de estas edificaciones representa un peligro ya que su funcionamiento es esencial en la sociedad.
  - A1. Hospitales, aeropuertos, terminales, servicios de emergencia, etc. También pueden contener sustancias tóxicas o explosivas como las gasolineras.
  - A2. La falla podría causar pérdidas humanas como estadios, templos y auditorias. Alberga al sector de la población vulnerable, como educación preescolar.
- Grupo B. Su funcionalidad se destina a viviendas, oficinas, hoteles y comercios. Se subdividen en los siguientes:
  - B1. Edificios mayores a 30m de altura o con más de 6,000 m<sup>2</sup> de área construida, que se ubican en zonas I y II y edificios mayores a 15m de altura o más de 3,000 m<sup>2</sup> en la zona III.
  - B2. Los demás.

### 2.1.2 Acciones sísmicas de Diseño

El análisis de la respuesta sísmica es un paso fundamental para el diseño de edificaciones que están localizadas en zonas de riesgo sísmico como lo es la ciudad de México. Mediante estos análisis es posible determinar la capacidad que tendrá un sistema ante un evento determinado, y pueden

considerarse “exactos” y “aproximados”. Los primeros permiten hacer un análisis cuyos resultados son óptimos ya que analizan la dinámica del sistema, para los cual son necesarios modelos matemáticos y analíticos más complejos. Por otra parte, los llamados “aproximados” son los más utilizados en los códigos, sin excepción en las (NTC-CA, 2017), ya que su principal ventaja es usa métodos simplificados que no requieren de un gran tiempo de ejecución, entre ellos se encuentran el análisis estático lineal y no lineal.

En la tabla 1 se muestran los distintos análisis que existen.

| Estructura/ Acción | Estática                  | Dinámica              |
|--------------------|---------------------------|-----------------------|
| Elástico           | Fuerzas de desplazamiento | Espectro de Respuesta |
| No Elástico        | Push-Over                 | Dinámica no lineal    |

TABLA 1 ANÁLISIS SÍSMICOS

El análisis dinámico lineal que está disponible en las NTC (2020) ha resultado ser un método confiable usado para edificaciones del grupo A y B en la ciudad de México. Es por ello que en los siguientes rubros se explica esta metodología y sus factores que son necesarios para ejecutarlo.

#### ESPECTROS DE RESPUESTA ELÁSTICA

Ellos representan parámetros de respuesta máxima para un sismo determinado y generalmente incluyen varias curvas que consideran distintos factores de amortiguamiento. Ya que las estructuras en general presentan cierta elasticidad por lo que el periodo de vibración y las aceleraciones son distintas. En la figura.9 se ve representado este espectro.

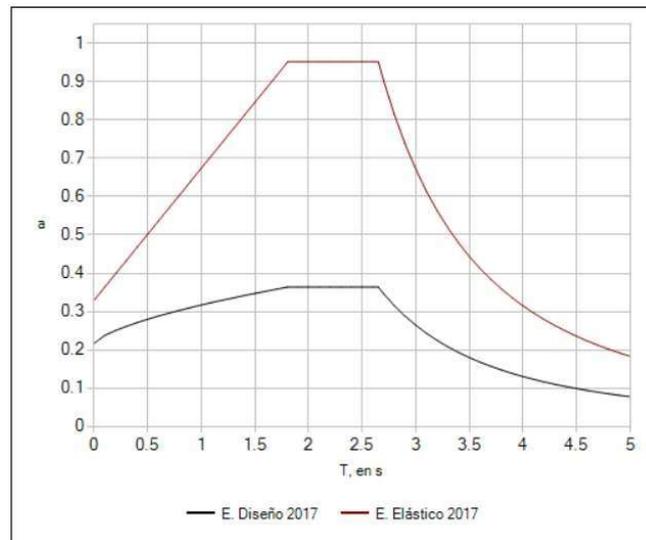


FIGURA. 9 ESPECTRO ELÁSTICO Y ESPECTRO DE DISEÑO

## ESPECTROS DE DISEÑO

Los espectros de diseño se construyen a partir de una familia de espectros de respuesta, es decir, representan una envolvente de los sismos típicos de una zona. Son obtenidos generalmente por procesos estadísticos y se componen de líneas suavizadas (Fig. 9) afectados por factores de reducción por comportamiento sísmico,  $Q'$ , y por sobre-resistencia,  $R$  que se verán a continuación.

### FACTOR DE REDUCCIÓN POR COMPORTAMIENTO SÍSMICO

Este factor  $Q'$  se puede estimar gracias al comportamiento sísmico  $Q$ , y representa la capacidad de deformación plástica de una edificación resistente a un sismo. Con estos dos factores el diseño que proponen las Normas Técnicas Complementarias proporciona una menor resistencia lateral a la estructura cuanto mayor es su capacidad de deformación plástica. Para obtener las fuerzas sísmicas de diseño se utiliza el factor  $Q'$  para reducir las fuerzas sísmicas mínimas requeridas que mantienen a la edificación en su rango elástico cuando ocurre el sismo de diseño. (Arroyo Espinoza & Terán Gilmore, Amador, 2002).

### FACTOR DE SOBRE RESISTENCIA

El objetivo de este factor es el de incluir en el diseño la resistencia adicional que adquiere la estructura ante el endurecimiento por la deformación del acero, la redistribución de esfuerzos internos y el sobredimensionamiento de elementos. Al igual que el Factor de Reducción anterior  $Q'$ , este factor se utiliza en los códigos para evaluar la respuesta de una estructura en el rango inelástico. (Carrillo, Julián, Hernández-Barrios, Hugo, & Rubiano-Fonseca, Astrid, 2014).

### CONDICIONES DE REGULARIDAD

Los códigos actuales definen los requisitos para que una estructura sea considerada "regular", sin embargo, cabe mencionar que si dichos requisitos no se cumplen la estructura tendrá que ser denominada invariablemente como una estructura irregular, por lo que el factor de reducción por comportamiento sísmico  $Q'$  será corregido si es que la estructura resulta ser irregular, muy irregular o el edificio tiene un sistema de planta débil.

## 2.1.3 Análisis Modal Espectral

Se trata de un análisis que permite obtener los valores de las fuerzas internas y desplazamientos máximos que actúan en la estructura durante un sismo. Según el (NTC-S, 2017), para implementar esta metodología se puede emplear un modelo tridimensional elástico que para efectos de la tesis se realizara en el software ETABS.

Con el supuesto de que la estructura se comporta elásticamente, el análisis modal espectral requiere datos de entrada para su aplicación, es decir, conocer los modos y frecuencias naturales del sistema con múltiples grados de libertad. Su metodología es la siguiente:

- I. Como primer paso, dada una estructura de múltiples grados de libertad (MGDL) se discretiza a una simulación de 1GDL en el que se caracteriza cada nivel por su rigidez  $k$  y masa  $m$  Fig. 10.

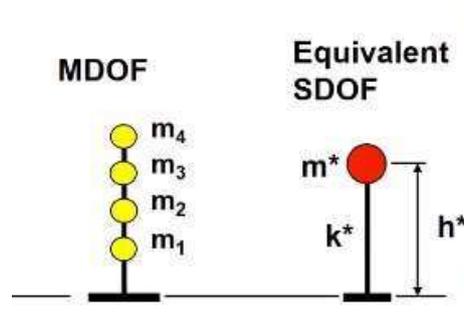


FIGURA. 10 SISTEMA DE MGDL Y 1GDL (VINCES, 2021)

- II. Dada la ecuación de movimiento para múltiples grados de libertad:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -Me_x\ddot{x}_g(t) \quad (\text{Ec.5})$$

Se ensambla las siguientes matrices:

- $M$ = Matriz de Masas
  - $C$ = Matriz de amortiguamiento
  - $K$ = Matriz global de rigideces (que es la relación entre las fuerzas aplicadas en los niveles y desplazamientos)
  - $e_x$  = vector de dirección, que distribuye la aceleración basal en los grados de libertad correspondientes
- III. La Ec.5 se puede transformar en un sistema de osciladores simples utilizando coordenadas modales, los modos propios que las definen son los modos naturales de vibración de la estructura y se obtienen cancelando el determinante de la siguiente ecuación:

$$|k - \omega_{\text{H}}^2 M| = 0 \quad (\text{Ec.6})$$

- IV. Los desplazamientos relativos ( $x_j$ ) se pueden expresar en coordenadas modales ( $z_n$ ) por el cambio de variables:

$$x = Az = \sum_{n=1}^N A_n * z_n \quad (\text{Ec.7})$$

Donde  $A_n$  son los vectores propios,  $z$  las coordenadas modales y  $A$  la matriz de los vectores modales.

- V. Se multiplica la (Ec.7) por la matriz  $A$  transpuesta y a su vez por la ecuación de movimiento (Ec.5)

$$A^T * M * A * \ddot{z} + A^T * C * A * \dot{z} + A^T * K * A * z = -A^T M e_x * \ddot{x}_g(t) = -r * \ddot{x}_g(t) \quad (\text{Ec.8})$$

$$M^* * \ddot{z} + C^* * \dot{z} + K^* * z = -r * \ddot{x}_g(t) \quad (\text{Ec.9})$$

Donde  $r$  es el vector de los factores de participación

- VI. Se normaliza y se divide por la masa correspondiente y obtiene la ecuación para el modo  $i$  :

$$\ddot{z}_i + 2\zeta_i \omega_i * \dot{z}_i + \omega_i^2 * z_i = -\frac{r_i}{m_i^*} x_g(t) \quad (\text{Ec.10})$$

- VII. De la ecuación anterior pueden deducirse el factor de participación, que define en qué nivel cada modo participa en la respuesta completa de un sistema con múltiples grados de libertad Fig.11:

$$\Gamma_i = \frac{r_i}{m_i^*} \quad (\text{Ec.11})$$

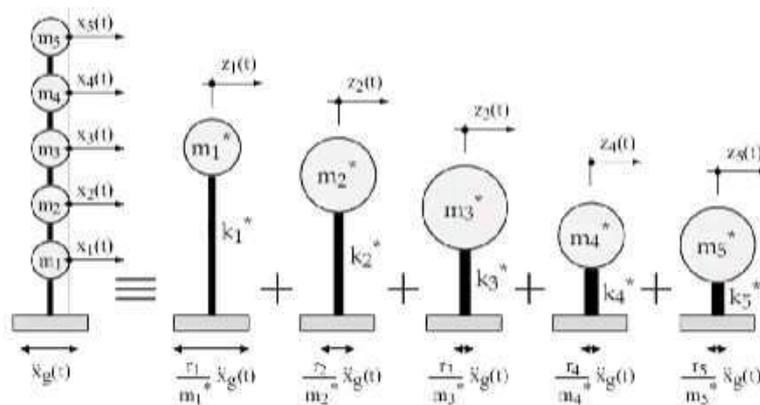


FIGURA. 5 PROCESO DE DESCOMPOSICIÓN MODAL (PIERINO & BADOUX, 2011)

VIII. Ahora bien, para estimar la máxima respuesta de un sistema MGDJ con N osciladores simples. Si el comportamiento es lineal, la respuesta modal máxima se obtiene directamente por el espectro de respuesta. Por lo que la siguiente ecuación nos ayuda a obtener el valor máximo de la coordenada modal  $z_i(t)$  en términos de la pseudo aceleración  $S_{pa}$ :

$$|z_i \max| = \Gamma_i * \frac{1}{\omega_i^2} * S_{pa}(\zeta_i \omega_i) \quad (\text{Ec.12})$$

Los máximos desplazamientos relativos están dados como:

$$x_i \max = |z_i \max| * A_i \quad (\text{Ec.13})$$

IX. Según la regla de SRSS, podemos obtener los desplazamientos máximos

$$x_j \max = \sqrt{\sum_{i=1}^N |A_{ji} * z_{j,i} \max|^2} \quad (\text{Ec.14})$$

X. Mediante la obtención de las fuerzas estáticas equivalentes es posible calcular el cortante basal:

$$f_{ji} = \Gamma_i * a_{ji} * m_j * S_{pa}(\zeta_i \omega_i) \quad (\text{Ec.15})$$

$$V_{bi} = \sum_{j=1}^N f_{ji} \quad (\text{Ec.16})$$

### 2.1.1. Revisión de Desplazamientos

Gracias al análisis anterior es posible obtener los desplazamientos laterales que se presentan en la estructura y además es indispensable conocer las distorsiones de entre piso, las cuales se definen como la diferencia entre los desplazamientos laterales de los pisos consecutivos, dividida entre la diferencia de elevaciones por nivel correspondiente.

La revisión de desplazamientos considera la distorsión máxima que se calculó para cada elemento estructural o subsistema vertical; marcos, muros, etc. Existen las siguientes condiciones de diseño para los estados límites según las Normas Técnicas Complementarias actuales:

- Estado límite contra colapso: en este caso, las distorsiones calculadas serán multiplicadas por QR, y no deberán exceder los valores que se especifican para la distorsión límite según: el sistema estructural y según el factor de comportamiento sísmico. Para efectos de la tesis se hace uso de la tabla 4.21 “Factores de comportamiento sísmico y distorsiones límite para estructuras de concreto” que se encuentra en las Normas Técnicas Complementarias de Diseño por Sismo 2017”

- Estado límite de daños ante sismos frecuentes: El valor de las distorsiones no podrán exceder 0.002 veces las diferencias de elevaciones correspondientes, a menos que no haya elementos incapaces de soportar deformaciones apreciables (como es el caso de muros de mampostería), o estos estén separados de la estructura principal de manera que no sufran daños por sus deformaciones. En tal caso, el límite será de 0.004.

### 2.1.2. Cortante Basal

Una vez hecho el análisis modal espectral y haber obtenido los desplazamientos y distorsiones permisibles se calcula el cortante basal mínimo. Se le llama cortante basal a la acumulación de las fuerzas cortantes de cada nivel y se ve reflejada en la base del edificio. Los cortantes de cada nivel son la fuerza sísmica expresada de forma lateral en el piso que va acumulándose conforme se acerca a la base.

Según el reglamento de la ciudad el cortante basal obtenido  $V_0$  del análisis dinámico modal es menor a la expresión  $a_{min}W_0$ , se tendrá que incrementar todas las fuerzas de diseño tal que el cortante  $V_0$  iguale ese valor. El peso total de la estructura al nivel del desplante se expresa como  $W_0$  y  $a_{min}$  se tomará igual a 0.3 si  $T_s < 0.5$  s o bien se tomara como 0.05 si  $T_s > 1.0$ s, donde  $T_s$  es el periodo dominante más largo del terreno en el predio. (NTC-S, 2017)

### 2.1.3. Fuerzas Internas de Diseño

Un elemento estructural es una parte diseñada para soportar las demandas de una estructura. Su diseño se clasifica según su forma geométrica y a las fuerzas internas de diseño a las que están sometidas. Estas fuerzas internas se presentan a lo largo un cuerpo rígido y se desarrollan cuando dicho elemento es sometido a distintas cargas, normalmente tensión y compresión. Un elemento de dos dimensiones tiene tres grados de libertad que requieren las siguientes ecuaciones para satisfacer el equilibrio estático.

$$\sum F_x = 0 \quad \text{translación en la dirección } x$$

$$\sum F_y = 0 \quad \text{translación en la dirección } y$$

$$\sum M = 0 \quad \text{rotación}$$

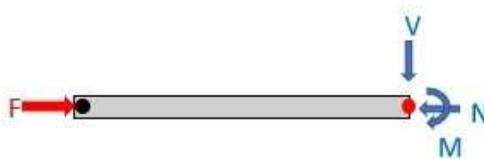


FIGURA. 6 DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE  
CORTADO. COMPRESIÓN

La Fig.12 muestra un diagrama de cuerpo libre de un componente en donde la fuerza que rige es de compresión.

La componente de fuerza interna perpendicular al corte se llama fuerza normal (N). Esta es la misma fuerza de tensión o compresión interna. Si el objeto tiene un eje y el corte es perpendicular a él, la fuerza normal también se puede llamar propiamente fuerza axial. Posteriormente, la componente de fuerza interna paralela al corte se llama fuerza cortante (V). Por último, el momento de par interno se denomina momento flector (M) porque tiende a doblar el material al girar la superficie de corte.

La hipótesis del diseño por fuerzas y el objeto de las (NTC-2020, 2020) es que el diseño de las estructuras tenga contemplado fuerzas de diseño mayores a las fuerzas externas.

## 2.1 Diseño con demandas sísmicas basadas en riesgo

Ahora bien, el diseño utilizando las demandas convencionales de los reglamentos de construcción se limita en que dichas demandas de diseño están en función de la excedencia de un nivel dado de intensidad sísmica, sin preocuparse por garantizar un control del daño en las estructuras. Es por ello por lo que nuevas metodologías intentan dar un nuevo enfoque y así poder contemplar el nivel de desempeño de la estructura en sí. El diseño sísmico por riesgo toma en cuenta dicho desempeño asociando una probabilidad de excedencia de un nivel de pérdida a una demanda sísmica.

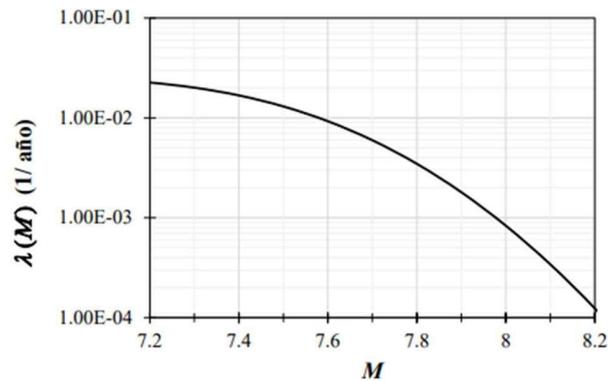
A partir del trabajo de Buendía (2016) se sabe que una forma de incorporar el concepto de riesgo en el diseño sísmico es mediante la creación de espectros de diseño inelásticos llamados “Espectros de Riesgo Uniforme” (ERU) los cuales, proponen una resistencia necesaria para que el sistema presente un daño preestablecido en términos de nivel de pérdidas asociada a un periodo de retorno.

Las variables que se requieren son la probabilidad de excedencia de una demanda de resistencia asociada a un nivel de desempeño y la probabilidad de ocurrencia de los valores posibles de los niveles de pérdida asociados a una misma demanda de resistencia (Buendía, 2016).

El proceso para la obtención de los ERU está referenciado al análisis probabilista de peligro sísmico (por sus siglas en inglés PSHA) (Cornell, 1968) y conlleva los siguientes aspectos:

### CÁLCULO DE LA TASA DE EXCEDENCIA DE MAGNITUDES

Mediante modelos matemáticos que toman en cuenta las características sinológicas de un sitio en específico, es posible calcular la sismicidad en términos de la tasa de excedencia de magnitudes. La presente usa el modelo propuesto por (Buendía, 2016) el cual propone el uso de acelerogramas tomados las fuentes sismológicas aledañas. Una de las características es que se define la magnitud máxima y mínima de los temblores característicos del sitio. A modo de ejemplo se muestra en la Fig. 13. La grafica de la variación de la tasa de excedencia de magnitudes para un rango de 7.2 hasta 8.2.



**FIGURA. 7 TASA DE EXCEDENCIA DE MAGNITUDES DE TEMBLORES CARACTERÍSTICOS DE LA BRECHA DE GUERRERO (BUENDÍA SANCHEZ, 2016)**

#### REPRESENTACIÓN DE LAS INTENSIDADES SÍSMICAS DE LA ZONA

Mediante registros sísmicos que se relacionen con la amenaza sísmica del caso de estudio. En caso de no contar con los acelerogramas se propone la generación de registros sísmicos sintéticos que puedan representar la sismicidad del área.

#### OBTENCIÓN DE ESPECTROS DE ÍNDICE DE DAÑO

Se comienza por la seleccionar el índice de daño y el modelo de comportamiento histerético. Estos espectros son analizados a través de un oscilador de un grado de libertad con resistencia constante en cada uno de los registros sísmicos mencionados en el punto anterior. La finalidad es realizar un análisis estadístico de la respuesta en términos de pérdida de dichos osciladores.

#### NIVEL DE PERDIDA ASOCIADA A CADA ÍNDICE DE DAÑO

Es importante representar de manera cuantitativa la pérdida y el índice de daño, por ello es necesario definir un parámetro físico que pueda caracterizar dichos factores. Para la interpretación del índice de daño (Park;Ang y Wen, 1985) realizaron un umbral en donde asocian al estado de daño (ninguno, localizado, menor, moderado, severo y colapso) a la degradación física visible en los elementos., trabajos posteriores incorporaron, a esta investigación, las consecuencias económicas de los estados de daño junto con las acciones de reparación necesarias para recuperar el estado original del sistema (Chacon, Paz, 2016) como puede observarse en la tabla2

| Umbral de índice de daño | Acciones por reparar  | Costo (US\$) |
|--------------------------|---|--------------|
| ID=0                     | Ninguna   | \$0.00       |
| 0.0<ID<0.10              | Restitución de acabados, pintura y resanado con mezcla elaborada in situ  | \$40.0       |
| 0.0<ID<0.25              | Evaluar el agrietamiento y la necesidad de inyección de resinas epóxicas y restituir el monolitismo del elemento y reponer acabados | \$440.00     |

|              |  |          |
|--------------|--|----------|
| 0.25<ID<0.40 | Evaluar el agrietamiento y la necesidad de resinas epóxicas, se debe reemplazar el recubrimiento con mortero de reparación estructural | \$890    |
| 0.40<ID<1.0  | Restituir el concreto desprendido con mortero de reparación estructural  | \$1430.0 |
| ID>1.0       | Usar concreto con puente de adherencia. Se debe considerar reemplazar el elemento estructural en su totalidad                          | \$1430   |

TABLA 2 ÍNDICE DE DAÑO, COSTO Y ACCIONES DE REPARACIÓN (1 VIGA Y 2 COLUMNAS) (CHACON, PAZ, 2016)

Con los datos anteriores asociados a la estructura que se desee analizar resta determinar los valores esperados de pérdida como un porcentaje del costo de recuperación, por medio de modelos matemáticos. A modo de ejemplo se observa la siguiente Figura (14).

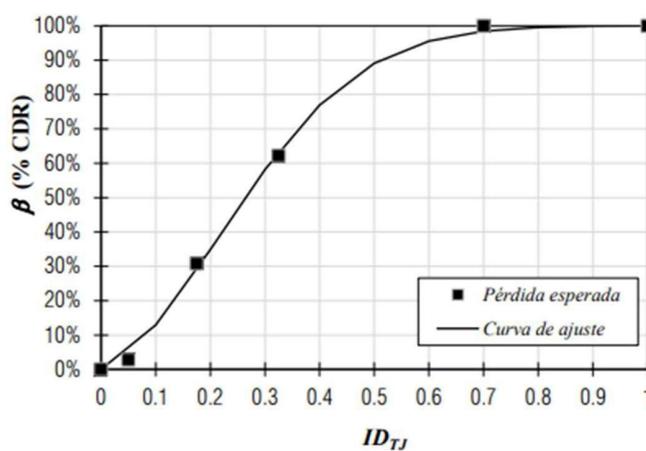


FIGURA. 8 RELACIÓN ENTRE ÍNDICE DE DAÑO Y PERDIDA (BUENDÍA SANCHEZ, 2016)

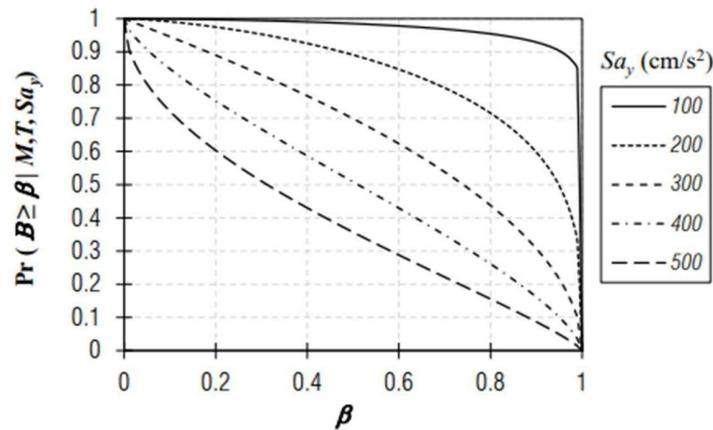
#### AJUSTE DE UNA FUNCIÓN DE DENSIDAD

Como siguiente paso en la creación de espectros de vulnerabilidad uniforme está el seleccionar un periodo estructural y ajustar una función de densidad de probabilidad al comportamiento de un oscilador en términos de pérdida. Esto es posible utilizando una familia de espectros de daño asociados a una magnitud determinada y a una resistencia de fluencia fija. El ajuste de la función de densidad requiere análisis estadísticos, la selección de la función dependerá de las características que se observen en el estudio.

#### PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE UN VALOR DE PERDIDA

Dada una resistencia de diseño, una magnitud y un periodo de vibrar será calculada la probabilidad de que un nivel de daño sea excedido. Para representar lo anterior, en la Figura 2.11 se muestra curvas de probabilidad de excedencia de daño según el trabajo de Buendía 2016. En las ordenadas verticales podemos observar que para todas las resistencias dadas la probabilidad de excedencia del estado cero es uno para todas, es decir, la estructura por muy mínimo que sea el daño, al final de cuentas presentara cierta degradación. Sin embargo, en las ordenadas horizontales, entre menor

es la resistencia (por ejemplo, resistencia de 100) las probabilidades de que la estructura presente un daño mayor suben. Naturalmente esto se comporta de manera lógica.



**FIGURA. 9** PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE UN VALOR DE ÍNDICE DE DAÑO PARA DISTINTOS NIVELES DE RESISTENCIA CON (T=2.2, M=8.2) (BUENDÍA SANCHEZ, 2016)

#### CALCULAR TASA DE EXCEDENCIA DE DAÑO

Este paso permite conocer el comportamiento de la tasa de excedencia de daño asociado a un periodo estructural variando su resistencia de diseño. Este cálculo fue posible mediante el modelo matemático propuesto por (Buendía Sanchez, 2016) que se presenta a continuación:

$$v(\beta) = \sum_{i=1}^N \int_{M_o}^{M_u} \frac{6z_i(M)}{6M} * Pr(B > \beta | M, T, Sa_y) dM \quad (\text{Ec 16})$$

Donde  $v(\beta)$  es el número de veces que un valor de pérdida será excedido en un periodo de tiempo, la relación  $\frac{6z_i(M)}{6M}$  es la cantidad de eventos que se generan de la fuente sísmica  $i$  con una magnitud  $M$ , en seguida la función  $Pr(B > \beta | M, T, Sa_y)$  es la probabilidad condicional de un nivel de pérdida sea excedido; bajo un sismo de magnitud  $M$ , en un sistema de periodo  $T$ , con una resistencia lateral de diseño  $Sa_y$  provenientes de una fuente sísmica  $i$ . Cabe mencionar que las variables  $M_u$  y  $M_o$  son la magnitud máxima y mínima que se generan de la fuente sísmica.

A manera de ejemplificar el modelo se observa en la figura (18) las curvas de tasa de excedencia de daño asociados a un solo periodo estructural de 1s para un oscilador 1GDL y resistencia de diseño de 300 cm/s<sup>2</sup>.

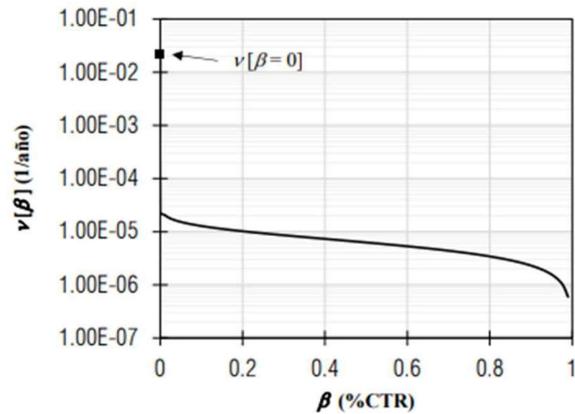


FIGURA. 10 TASA DE EXCEDENCIA DE DAÑO ACEPTADO  $T=1$  (BUENDÍA SANCHEZ, 2016)

OBTENCIÓN DE LOS VALORES DE RESISTENCIA DE FLUENCIA A UN VALOR DE DAÑO

Se obtienen los valores de resistencia de fluencia correspondientes a un valor de daño y a su tasa de excedencia. Esto se consigue a través de interpolaciones entre curvas de tasa de excedencia con un periodo estructural en común.

Se observa en la figura curvas de tasa de excedencia de daño asociadas a varios niveles de resistencia para un solo periodo estructural

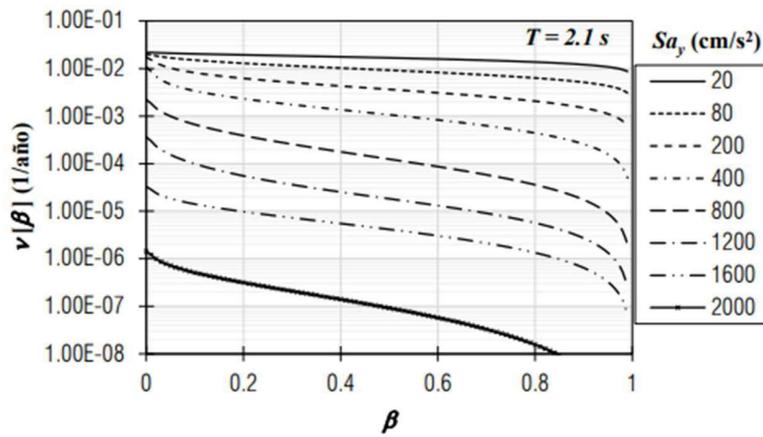


FIGURA. 11 GRAFICA DE CURVAS DE TASA DE EXCEDENCIA DE DAÑO CON UN PERIODO ESTRUCTURAL  $T=2.1s$  (BUENDÍA SANCHEZ, 2016)

## OBTENCIÓN DE LOS ESPECTROS DE VULNERABILIDAD UNIFORME

A través del cálculo de los valores de resistencia de fluencia tal como se expresa en el punto anterior, es posible obtener el espectro de vulnerabilidad uniforme para las curvas de tasa de excedencia de daño que corresponderían a los periodos de vibrar que contendrá el EVU.

Seleccionado una tasa de excedencia de daño y un solo nivel de pérdida se ejecuta una interpolación en un conjunto de curvas de tasa de excedencia de daño de varios periodos de vibrar. La resultante de esta acción será un espectro de resistencias de diseño correspondientes a una pérdida y a una tasa de excedencia el EVU.

En seguida, se presentan espectros de vulnerabilidad uniforme. Cada uno este asociado a un nivel de pérdida  $\beta$  y a cuatro periodos de retorno. Naturalmente, entre mayor sea la pérdida las ordenadas espectrales irán disminuyendo ya que la resistencia de diseño tendrá a ser menor entre mayor sea el valor de pérdida aceptable. Así mismo, la determinación del periodo de retorno impacta igualmente ya que entre menor sea el periodo disminuirá la demanda sísmica y por ende la resistencia correspondiente decrece y viceversa.

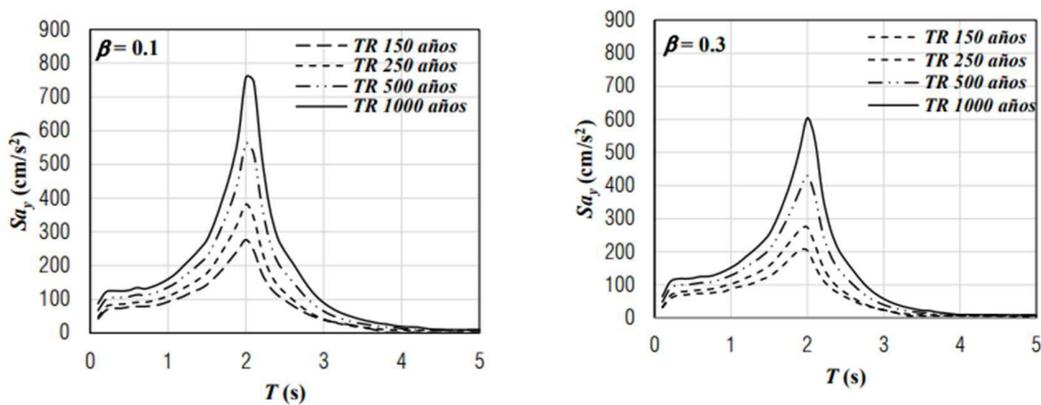


FIGURA. 12 EVU PARA DISTINTOS NIVELES DE DAÑO ESPERADO Y PERIODOS DE RETORNO

En general es posible observar que los espectros de vulnerabilidad uniforme proveen la demanda de resistencia de diseño para que la estructura exceda o presente un nivel de daño específico dentro de un umbral de tiempo definido.

## 2.3 Diseño Sísmico por Resiliencia

Reiterando las diferencias de cada enfoque de demandas sísmicas, el diseño convencional toma en cuenta el peligro sísmico sometido a las estructuras mientras que el diseño basado en riesgo toma en cuenta el desempeño de la estructura en términos de pérdidas económicas sujetas a la reparación de elementos estructurales y no estructurales dadas demandas sísmicas probables en un sitio.

Ahora bien, el diseño basado en resiliencia que a continuación se presenta no solo analiza el desempeño de la estructura en términos de pérdida, sino que considera el tiempo de recuperación y de demora que tardaría la estructura ante un daño sísmico.

El término de resiliencia es usado en varios contextos de la vida cotidiana. En las ciencias exactas se define como la capacidad que tiene un cuerpo para recuperar su tamaño y forma después de deformaciones causadas por distintos esfuerzos (Oxford, 1984). Varios autores especializados en la ingeniería de las estructuras han logrado incorporar este concepto el cual parte de la misma palabra clave “recuperación”.

El diseño sísmico basado en resiliencia trata de garantizar la recuperación en la funcionalidad de una edificación ante las posibles pérdidas y daños que pueda ocasionar un evento sísmico en un periodo de tiempo estipulado (Cimellaro, 2013). El tiempo que entre el inicio del fenómeno hasta el momento en que se restablece el desempeño de la estructura se le llama tiempo de recuperación.

En el presente capítulo se describirán los aspectos de la filosofía de diseño sísmico por resiliencia y algunas variables que las componen y son necesarias para evaluarla.

Para que un sistema tenga la habilidad, tanto en términos físicos como sociales, de evaluar y recuperarse eficazmente ante las demandas de una acción física se tiene que reducir las probabilidades de falla y el tiempo de recuperación.

Según (Bruneau, 2003) la constitución de la resiliencia de un sistema se basa en las siguientes propiedades:

- Robustez: que se refiere a la habilidad de los elementos del sistema para soportar un nivel de esfuerzos que son demandados sin que dicho sistema sufra ninguna pérdida de funcionalidad
- Redundancia: se trata de la medida en la que los distintos elementos se reemplazan unos a otros en los requisitos funcionales en caso de un deterioro del sistema
- Inventiva: es la identificación de problemas, establecer prioridades y movilizar los recursos ante la amenaza de disrupción de algún elemento. En esencia, es la capacidad de habilitar recursos humanos, tecnológicos y monetarios para conseguir los objetivos

### 2.3.1 Metodología para definición de Espectros de Resiliencia

Este diseño sismo-resistente constituye a la incorporación de espectros de diseño considerando resiliencia es por ello por lo que en los párrafos siguientes se expone el proceso de cómo obtener dichos espectros.

#### DEFINICIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA DEL SITIO

De principio, en esta filosofía del diseño se requiere el cálculo de la amenaza sísmica para así representar el peligro esperado. Para evaluar dicha amenaza sísmica se hace uso del análisis probabilista de amenaza sísmica PSHA (Esteva (1968), Cornell (1969) y McGuire (2007)). Los resultados que equivale a obtener la probabilidad de que un nivel de intensidad sísmica sea superado en un periodo de retorno, según la actividad que presente la zona de estudio las propiedades estructurales (Buendía, 2016).

A través de la tasa de excedencia de magnitudes es posible determinar la sismicidad del sitio de estudio, recordando del apartado 2.2 Riesgo, que son necesarios modelos matemáticos que definan de la mejor manera las características de las fuentes de sismicidad.

Así mismo se deben considerar una cantidad de registros sísmicos suficientes para representar la sismicidad del sitio. Ya que se hará uso de registros sintéticos se opta por el método propuesto por los investigadores (Joyner y Boore, 1982; Hartzell, 1978; Ordaz et al, 1994).

#### DEFINIR LA RELACIÓN RESPUESTA ESTRUCTURAL-TIEMPO DE REPARACIÓN/ PERDIDA DE FUNCIONALIDAD PARA ELEMENTOS ESTRUCTURALES

- Tiempo de reparación: a partir de estimar el daño estructural es posible obtener los tiempos de reparación. Realizando análisis no lineales a modelos como marcos planos es posible conocer la ubicación y magnitud de las rotaciones plásticas, que serán las que den a conocer los daños físicos en los elementos de la estructura. Una vez realizado esta acción se proponen estrategias de reparación.
- Pérdida de funcionalidad: Ya que la funcionalidad no solo se puede medir de forma cuantitativa sino también de cualitativa ha resultado complejo un enfoque que pueda abarcar todas las variables que podrían hacer que una edificación pierda su funcionalidad y a que grado. Para efectos de la tesis, la funcionalidad se medirá en términos de capacidad residual, que toma en cuenta la degradación de resistencia y rigidez de la estructura. (González, 2022)

#### DEFINIR RELACIÓN RESPUESTA ESTRUCTURAL TIEMPO DE REPARACIÓN/PERDIDA DE FUNCIONALIDAD PARA ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES Y CONTENIDOS

A pesar de que los elementos estructurales no contribuyen a la resistencia del sistema ante las demandas sísmicas, influyen en su funcionalidad, la cual está estrechamente relacionada con la resiliencia sísmica.

Dependiendo del modelo a estudiar, se identifican los elementos no estructurales y a partir de modelos analíticos o empíricos es posible obtener las curvas de fragilidad asociadas a los estados de daño de cada elemento.

#### OBTENER LOS TIEMPOS DE DEMORA EN INICIO DE REPARACIONES

Como se menciona antes, después de un evento sísmico, la degradación de la funcionalidad no se limita a los elementos estructurales de la edificación, sino que también puede acompañar la interrupción de los servicios y actividades del sistema, causando pérdidas indirectas por tiempos de inactividad.

Los tiempos de inactividad se componen de; los tiempos de reparación  $T_c$  Fig. 19 y del tiempo  $T_b$  Fig.19 que transcurre desde que acontece el sismo y del inicio de las reparaciones de la estructura dañada.

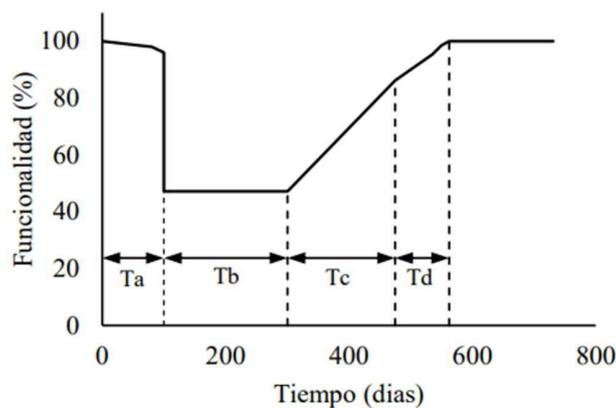


FIGURA. 13 FUNCIONALIDAD VS TIEMPO. TIEMPO DE INACTIVIDAD

#### DEFINIR LÍMITES DE TIEMPO O RESILIENCIA

Los límites aceptables de resiliencia se establecen según el propietario, cliente u entidades municipales encargados de la edificación consideren. Para convenir en valores menos aleatorios se propone definir valores de tiempos de inactividad aceptables para diferentes objetivos a través de una evaluación costo/beneficio, donde se tome en cuenta inversión inicial para la construcción, así como pérdidas directas e indirectas debido a la reparación y a la inactividad (González, 2022).

#### CREAR GRUPO DE OSCILADORES DE 1GDL Y REALIZAR ANÁLISIS PARA UNA SERIE DE REGISTROS SÍSMICOS. PROCESANDO LA RESPUESTA EN TÉRMINOS DE TIEMPO, FUNCIONALIDAD Y RESILIENCIA

Una de las formas de considerar la resiliencia en el diseño es por medio de la respuesta estructural en términos de ductilidad, distorsión, desplazamiento y aceleración de entre piso mediante el análisis de osciladores de 1 grado de libertad (González, 2022). Estos osciladores presentan ciertas características, que para efectos de esta tesis se referencian los trabajos de Buendía (2016) y González (2022).

## FRECUENCIA ACUMULADA DE TIEMPOS, FUNCIONALIDAD Y RESILIENCIA

Al procesar los espectros de respuesta obtenidos es posible desarrollar modelos probabilistas de la excedencia de un nivel dado de resiliencia o alguno de sus parámetros (tiempo o funcionalidad). Se calcula la frecuencia con que se presenta cada valor de RT, FL o RL, dado un periodo, una magnitud, el número de niveles y la resistencia.

## AJUSTAR UNA FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD

Los histogramas anteriores pueden ayudarnos a obtener el comportamiento de los datos por medio de una función de probabilidad, en este caso una función de densidad de probabilidad, y así representar los parámetros a desarrollar los espectros como la funcionalidad, resiliencia y tiempos.

## OBTENER LA TASA DE EXCEDENCIA DE UN TIEMPO RECUPERACIÓN, PERDIDA DE FUNCIONALIDAD O RESILIENCIA

Retomando el apartado 2.2.1 sobre la metodología de ellos espectros de vulnerabilidad uniforme, se retoma la tasa de excedencia de magnitudes, la cual junto con la probabilidad de excedencia del parámetro a escoger; tiempo, funcionalidad y/o resiliencia sísmica, será posible obtener la tasa de excedencia de dicho parámetro mediante la Ec. 17. Para efectos de este trabajo se utiliza la tasa de excedencias de magnitudes representada en la Fig. 20 (Buendía, 2016).

$$v(P) = \int_{M_o}^{M_u} \frac{6\omega(M)}{6M} * Pr(P > P_{lim} | M, T, S_{a_y}, S) dM \quad (Ec. 17)$$

Donde  $v(P)$  es el número de veces que un parámetro de resiliencia será excedido en un periodo de tiempo, la relación  $\frac{6\omega(M)}{6M}$  es la cantidad de eventos que se generan de la fuente sísmica  $i$  con una magnitud  $M$ , en seguida la función  $Pr(P > P_{lim} | M, T, S_{a_y})$  es la probabilidad condicional de un nivel de RT, FL o RL sea excedido; bajo un sismo de magnitud  $M$ , en un sistema de periodo  $T$ , con una resistencia lateral de diseño  $S_{a_y}$  provenientes de una fuente sísmica  $i$ . Cabe mencionar que las variables  $M_u$  y  $M_o$  son la magnitud máxima y mínima que se generan de la fuente sísmica.

## CONSTRUIR ESPECTROS DE DISEÑO CON PARÁMETROS DE RESILIENCIA UNIFORME

La obtención de los espectros de diseño para los parámetros de resiliencia ya mencionados comienza por la selección de un valor de tasa de excedencia, o un periodo de retorno, un valor de tiempo determinado, funcionalidad o resiliencia. Los valores anteriores servirán como coordenadas para ubicar el punto (A) en la Fig. 20 En dicha figura es posible observar el conjunto de curvas de tasa de excedencias asociadas a un periodo, y es posible interpolar entre las curvas más cercanas a l punto A y así estimar la resistencia asociada a dicho punto

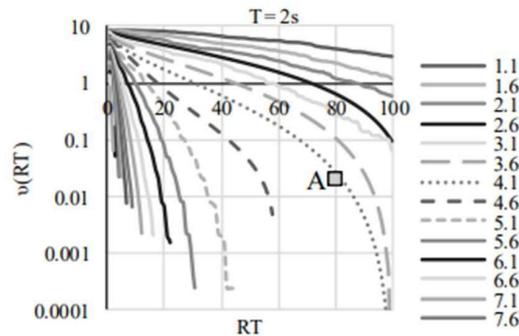


FIGURA. 20 CURVAS DE TASA DE EXCEDENCIA PUNTO A

Se hace este proceso para cada periodo que se desea considerar en el espectro de diseño. Las ordenadas están relacionadas a un valor constante; tiempo, funcionalidad o resiliencia y a un periodo de retorno. Se llamarán, entonces, espectros de tiempo de reparación, pérdida de funcionalidad o pérdida de resiliencia uniforme Fig. 21.

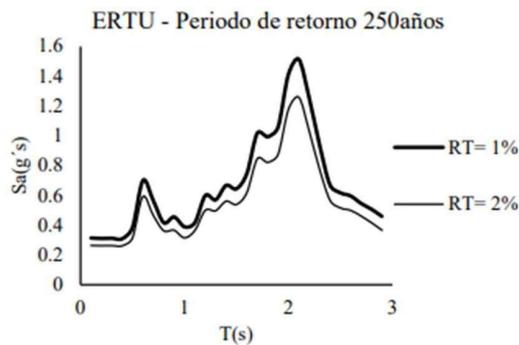


FIGURA. 14 ESPECTROS DE PERDIDA DE RESILIENCIA PARA UN T=250 AÑOS

### 2.3.2 VULNERABILIDAD

La vulnerabilidad sísmica se define como el nivel de pérdida esperado de un sistema cuando está sometido a un evento dañino. La pérdida puede ser medida en términos de costos de reparación, pérdida de funcionalidad, degradación medioambiental, valor histórico, etc. En este caso, la vulnerabilidad sísmica relación a la perdida incierta con una medida de excitación sísmica, como la respuesta de aceleración para un amortiguamiento y periodo dado. Es importante, la identificación de los diferentes factores que inciden en la vulnerabilidad de los edificios para un buen diseño de nuevos sistemas y/o la evaluación de la resistencia sísmica de edificios existentes (Porter, 2018).

Para obtener una función de vulnerabilidad en la ingeniería estructural, se puede recurrir a modelos analíticos los cuales siguen los siguientes pasos:

- Característica estructural: se definen las características de la estructura
- Análisis estructural: Se realiza para determinar la respuesta en términos de deformaciones para distintos niveles de intensidad
- Estimación del daño probable: Se estima el daño probable que puede sufrir la estructura
- estimación de pérdidas: A partir del daño calculado se obtienen las pérdidas para cada intensidad sísmica

Una de las herramientas para definir la vulnerabilidad estructural son los análisis dinámicos incrementales (IDA) propuestos por Vamvatsikos y Cornell (2004), pues relacionan la respuesta estructural con una medida de intensidad sísmica, lo cual es de interés cuando se quiere relacionar el daño con la intensidad sísmica.

Dentro de los IDA una parte importante es definir la no linealidad de los elementos lo cual puede llevarse a cabo, entre otras formas, por medio de los modelos de comportamiento histerético los cuales se describen a continuación.

## MODELOS DE HISTÉRESIS

Una de las consecuencias que tiene el fenómeno sísmico en las estructuras es que estas presenten movimientos oscilatorios los cuales producen deformaciones de tipo cíclicas. La naturaleza de estas condiciones desemboca a analizar de manera no lineal la estructura y así poder evaluar el comportamiento real de los elementos estructurales ante las cargas y descargas de energía de un supuesto sismo. Los modelos de histéresis se caracterizan por representar este comportamiento y así mismo representan la degradación de rigidez y resistencia para los elementos que componen la estructura (Otani, 1981).

Una curva de histéresis refleja la evolución de la resistencia de un elemento dado considerado en función del historial de deformación que sufre. El área contenida en los ciclos de la curva de histéresis es proporcional a la energía disipada en forma de deformación plástica.

En la Fig. 22 se aprecia el comportamiento de un material dado el cual está sometido a cargas cíclicas reversibles. Del punto A-B se observa comportamiento lineal entre la carga y desplazamiento hasta el punto de fluencia y que se convertirá a un comportamiento inelástico (punto B-C). Si existe una descarga a partir del punto C en la zona inelástica podemos decir que existe una deformación permanente (A-D). Posteriormente, si al mismo material se reinserta una fuerza que supere el límite elástico, llegará al punto E, seguido por una descarga y carga hacia el sentido opuesto del punto F al G, el límite elástico será menor que el resultante durante la aplicación de la tensión. Con ello podemos decir que el comportamiento de un material hacia una acción mecánica depende de la historia de deformaciones plástica que ha sufrido y no solo de su estado actual ante la fuerza que soporte (Lorenzo et al.009).

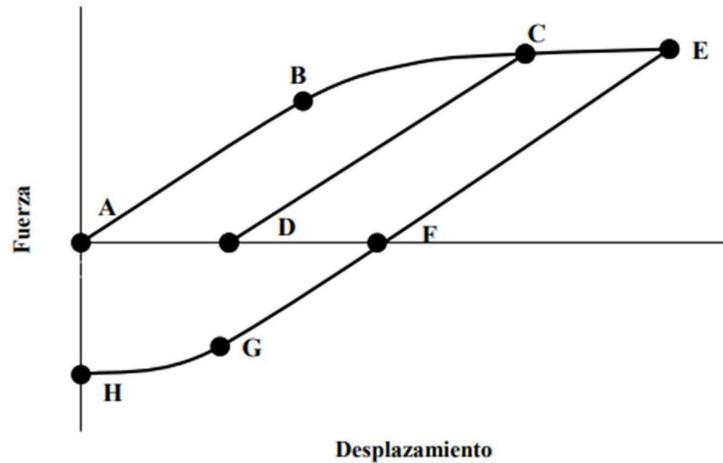


FIGURA. 15 CARGA CÍCLICA REVERSIBLE (TOMADA DE GONZÁLEZ, 2019)

Existen varios modelos para analizar distintos materiales, entre ellos la mampostería y el concreto reforzado. Autores como Takeda(1970), Otani (1981), Ibarra et al (2005), entre otros han dedicado parte de sus investigaciones a proponer distintos modelos de comportamiento.

#### ANÁLISIS DINÁMICO INCREMENTAL

El análisis dinámico incremental (por sus siglas IDA) es un método de naturaleza inelástica que se utiliza para estimar el desempeño y capacidad de una estructura ante cargas sísmicas y que este sujeto a varios registros de movimiento de suelo, escalados a múltiples niveles de intensidad, produciendo varias curvas de respuesta en términos de desplazamiento, distorsión y cortante contra el nivel de intensidad (Vamvasticos, Cornell, 2002).

Las ventajas de esta metodología son:

- Estimación de la capacidad dinámica del sistema global de una estructura
- Mayor entendimiento de los cambios de naturaleza de la respuesta de una estructura conforme la intensidad de los registros se incrementa
- Mayor entendimiento de la respuesta estructural de registros sísmicos intensos y severos

A diferencia de los demás análisis no lineales (el análisis estático no lineal Pushover) el IDA puede capturar el comportamiento de recarga y descarga dependientes de los registros sísmicos que se estén utilizando.

#### CURVA DE CAPACIDAD DINÁMICA

La curva de capacidad es la representación del comportamiento global de la estructura ante una demanda sísmica. Normalmente es utilizada la curva de capacidad cuyas ordenadas son la variación del desplazamiento y el cortante basal dada una demanda sísmica. Ahora bien, la curva de capacidad dinámica caracteriza el desempeño sísmico de una estructura ante cierta demanda sísmica creciente y esta solo esta curva puede representar la no linealidad y la disipación de energía debido a histéresis. Es imperativo para análisis como IDA presentar esta opción como valida ante el sistema estructural estudiado (Bañuelos Garcia, 2013).

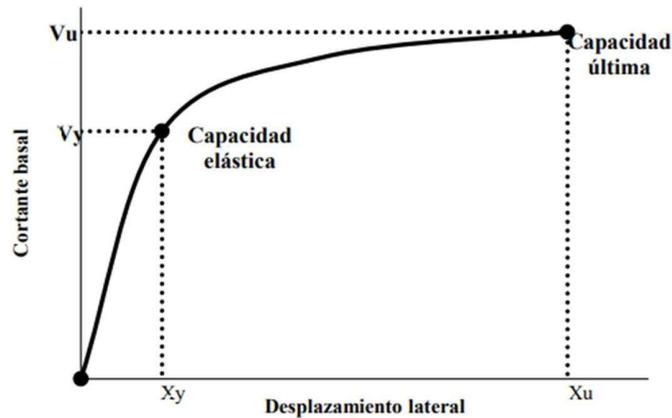
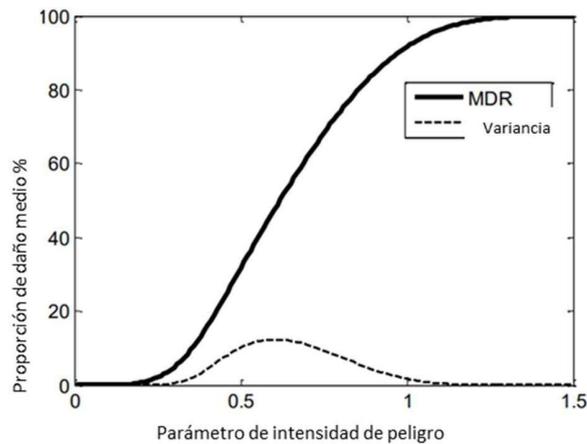


FIGURA. 16 CURVA DE CAPACIDAD DINÁMICA (TOMADA DE GONZÁLEZ, 2019)

#### CURVA DE VULNERABILIDAD

La curva de vulnerabilidad correlaciona la Proporción de Daño Medio (MDR) y su varianza con un parámetro de intensidad de peligro. El MDR suele expresarse en términos económicos, como la relación entre el costo total esperado de reparación al reemplazo total costo del edificio. Según la literatura el total del costo de reposición del edificio se ha definido como el costo real de reconstrucción del edificio de acuerdo con las condiciones de precios locales en el país o zona bajo análisis (GLOSI, 2019).



**FIGURA. 17 EJEMPLO DE CURVA DE VULNERABILIDAD (GLOSI, 2019)**

En la Fig. 24 se puede observar la curva de vulnerabilidad, la cual puede ser derivada en base a dos métodos; el método basado en construcción y el método basado en componentes. El primero es utilizado cuando la estructura presenta algún tipo de diagrama rígido, por otro lado, el método basado en componentes se utiliza en estructuras con un tipo de diagrama flexible. El utilizado en esta tesis será el basado en componentes FUFVUL (Yamin, 2019).

### 2.3.3 Análisis de Riesgo

Como se comentó en los antecedentes, el cálculo de riesgo se compone de tres elementos principales:

- Exposición: En donde se definirán el sistema expuesto a la pérdida en base a su ubicación.
- Amenaza: Sera la frecuencia en que un evento sísmico exceda el límite de intensidad preestablecido para un periodo de tiempo.
- Vulnerabilidad: Son las pérdidas esperadas relacionadas con la intensidad del fenómeno sísmico.

#### PÉRDIDA ANUAL ESPERADA, EAL

La pérdida anual esperada es el promedio de las pérdidas, expresadas en términos de costo de reparación en un lapso de un año para un bien. Para estimarla, la ecuación () propone  $Es(Loss_i)$  como la pérdida esperada que un evento  $E$  ocasiona al bien expuesto, mientras que  $P_A(i)$  es la probabilidad de ocurrencia anual del evento  $i$  (Jaimes y Niño, 2017).

$$EAL = \sum_{i=1}^{EN} Es(Loss_i) P_A(i) \quad (\text{Ec.19})$$

Es posible incluirle a la pérdida anual esperada factores como, costos directos e indirectos, pérdidas humanas, pérdidas por valor histórico, valor ambiental, cultural, etc.

MÁXIMA PERDIDA PROBABLE, PML

Indica la pérdida probable que pudiera excederse en un periodo de tiempo establecido, se expresa con la siguiente ecuación.

$$v(l) = \sum_{i=1}^{EN} Pr(L > l|i) P_A(i) \quad (\text{Ec. 20})$$

En donde  $v(l)$  es la tasa de excedencia de una pérdida establecida  $l$ , ocasionada por el  $i$ -ésimo evento que genera pérdidas  $L$ , ponderado por la probabilidad anual de ocurrencia  $P_A(i)$  (González, 2019).

### 2.3.4 Cálculo de Resiliencia

Para poder estimar la resiliencia de una estructura, se requiere definir las siguientes propiedades.

FUNCIÓN DE RECUPERACIÓN

A través de una función de recuperación que relacione el nivel de funcionalidad con el tiempo de recuperación, es posible estimar el desempeño de la estructura después del evento sísmico. Este tiempo de recuperación se expresa como la variable  $T_{RE}$ , y no es otra cosa que lapso que requiere una estructura para recuperarse dado un nivel de funcionalidad requerido.

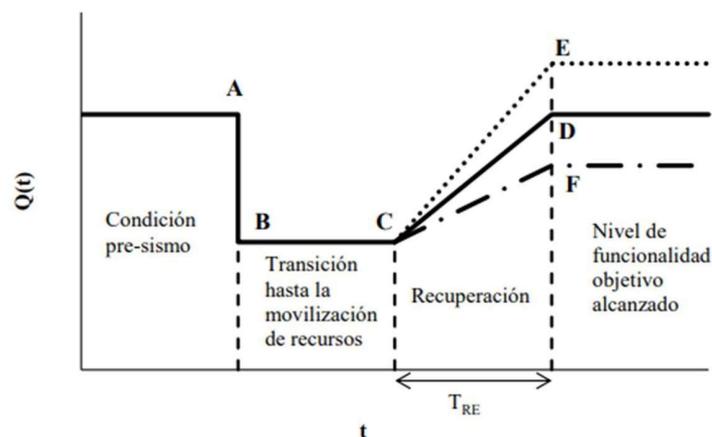


FIGURA. 18 GRAFICA FUNCIONALIDAD % VS TIEMPO (GONZÁLES CALVA, 2019)

Como se puede observar en la Fig. 25 hay cuatro etapas a lo largo de todo el perfil. La primera etapa se trata del sistema previo al fenómeno del sismo, la segunda (del punto B-C) muestra el tiempo que existe después del evento y el inicio de la reparación de la estructura, para la tercera etapa (del punto C – D) contiene la función de recuperación en donde el objetivo es la recuperación del nivel de funcionalidad del sistema que, en este caso, tiene que corresponder a un valor inferior a los puntos C-E y mayor a los puntos C-F. Por último, la cuarta etapa muestra el tiempo entre la total reparación y la reincorporación de las actividades que se realizaban en un principio en la estructura (a partir del punto D).

El tiempo  $T_{RE}$  está relacionado con la ubicación e intensidad del sismo, por lo que es una variable con alto nivel de incertidumbre. Por lo anterior el tiempo de reparación vendrá a sustituir a esta variable con el objetivo de simplificar el cálculo. El tiempo de reparación, en sí, se trata de las técnicas y actividades de rehabilitación llevadas a cabo para restaurar la estructura (Lesur, 2022; Urías, 2005).

## RESILIENCIA SÍSMICA

Retomando la definición de las variables para la ecuación ();  $Rc$  es la resiliencia sísmica, la variable  $T_{LC}$  es tiempo de control ( asociado con la vida útil del sistema), la variable  $t_{oE}$  que es el tiempo de ocurrencia del evento sísmico, por ultimo, la variable  $Q(t)$  que es función del nivel de funcionalidad en un punto de  $t$ . A partir de este modelo matemático es posible estimar la resiliencia sísmica por eventos que es lo mismo que obtener el área bajo la curva de un perfil de funcionalidad (Fig. 27) para un tiempo de control  $T_{LC}$  determinado.

$$Rc = \int_{t_{oE}}^{t_{oE}+T_{LC}} Q(t)/T_{LC} dt \quad (\text{Ec. 21})$$

Hay dos propiedades importantes que considera esta metodología que son la robustez y la rapidez. La robustez se relaciona con la degradación en la funcionalidad medida como el nivel de pérdidas o daños, mientras que la rapidez se define como la eficacia en la movilización de recursos y de alcanzar el nivel de funcionalidad objetivo propuesto.

Para considerar toda la plenitud del ambiente sísmico a la que está expuesta una estructura es necesario cuantificar la resiliencia global (RG). Este valor depende del tiempo de recuperación, la función de pérdidas y la frecuencia de ocurrencia de un evento dado.

$$RG = \sum_{i=1}^n R_{ci} * f_i \quad (\text{Ec. 22})$$

En donde  $R_c$  es la resiliencia símica ante un evento específico y  $f_i$  representa la frecuencia de ocurrencia para ese evento.

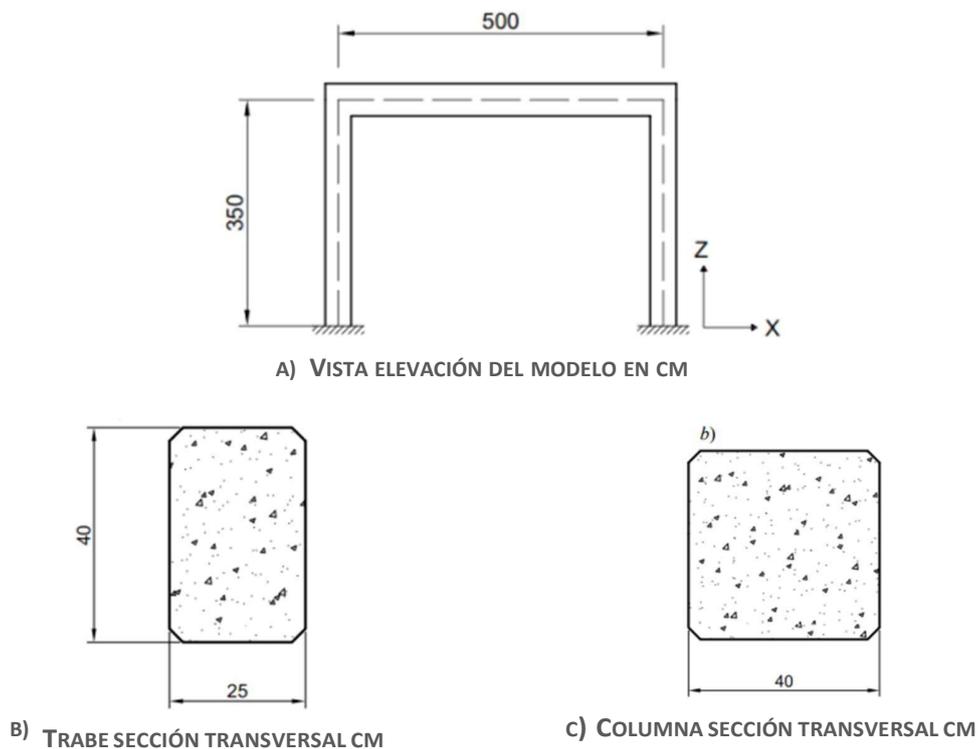
El proceso sería en este caso; calcular el área bajo la curva (de un perfil de funcionalidad dado) para obtener un valor que se dividirá entre el tiempo de control y así estimar un valor de funcionalidad promedio para un periodo de tiempo estipulado. Después, los valores  $R_c$  se multiplicarán por la frecuencia de ocurrencia de cada evento y así tomar en cuenta la probabilidad de ocurrencia de cada evento para el periodo de un año. Finalmente, la sumatoria de dichos valores ponderados por su frecuencia de ocurrencia, permitirá evaluar la resiliencia de una estructura sujeta a un ambiente sísmico.

### 3. Casos de Estudio

#### CARACTERÍSTICAS DEL MODELO

Para poder evaluar y comparar los diseños sísmicos: basados en peligro uniforme, en riesgo uniforme y en resiliencia uniforme con la metodología que se expuso anteriormente, se seleccionó un marco simple de concreto reforzado de una crujía (5m) y un solo nivel (3.5m). Ya que el objetivo de esta investigación es evaluar diseños estructurales con distintos enfoques de demandas sísmicas, se considera que una estructura simple, puede disminuir los efectos de sobre resistencia, y de esta manera se podrá observar mejor la influencia directa de las demandas sísmicas en los resultados en términos de vulnerabilidad, riesgo y resiliencia.

Los parámetros que caracterizan al modelo son que estará ubicado en una zona de lago (III) de la ciudad de México, tendrá una importancia tipo B y el Factor de comportamiento sísmico Q será de 2. Dicha caracterización se hizo en base a que la zona más desfavorable de la ciudad es precisamente la zona lacustre, su importancia y su comportamiento sísmico son la más comúnmente usados en la práctica, y esto podrá permitirnos hacer un diseño con características aplicadas a la realidad. Las características geométricas de los elementos estructurales serán las mismas como la Fig. 26 lo indica.



**FIGURA. 19 CASO DE ESTUDIO. MARCO SIMPLE. A) VISTA ELEVACIÓN, B) TRABE VISTA TRANSVERSAL, C) COLUMNA VISTA TRANSVERSAL**

A continuación, en la Tabla 3 se muestran las características de los materiales que conforman el marco estudiado.

| Material | Peso volumétrico (T/m <sup>3</sup> ) | Esfuerzo a la compresión<br>f'c (kg/cm <sup>2</sup> ) | Módulo de elasticidad<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) |
|----------|--------------------------------------|---|--|
| Concreto | 2.4                                  | 250   | 221359   |
| Acero    | 7.8                                  | 4200  | 210000   |

**TABLA 3 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS MATERIALES**

### CARGAS ACTUANTES

Las cargas introducidas al modelo son las correspondientes al peso propio de la estructura, las cuales incluyen el peso propio de columnas, trabe y losa.

Para el análisis de cargas se muestra a continuación en la Tabla 4, los elementos estructurales del marco.

| Elemento Estructural | Nomenclatura | Cantidad | b (m) | h (m) | l (m) | w (T) |
|----------------------|--------------|----------|-------|-------|-------|-------|
| Columna              | C-1          | 2        | 0.4   | 0.4   | 3.5   | 2.688 |
| Trabe                | T-1          | 1        | 0.25  | 0.4   | 5     | 1.2   |
| Losa                 | L-1          | 1        | 2.5   | 0.2   | 5     | 3     |

**TABLA 4 ANÁLISIS DE CARGA MUERTA**

### CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS

A partir de las siguientes características mostradas en la Tabla 5, es posible estimar las masas y así obtener el periodo de la estructura como se muestra en la Tabla 6.

| Masa (m)<br>(kg-s <sup>2</sup> /cm) | Rigidez (k)<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | Periodo T<br>(s) | Frecuencia w<br>(1/s) |
|-------------------------------------|--------------------------------------|------------------|-----------------------|
| 5.67                                | 14098                                | 0.126            | 49.87                 |

**TABLA 5 MASA, PERIODO, RIGIDEZ Y FRECUENCIA DEL MODELO PROPUESTO**

### ESPECTROS DE DISEÑO

Como se comentó en los antecedentes el espectro de diseño utilizado en las Normas Técnicas Complementarias corresponde a un espectro reducido por factores de comportamiento sísmico y de sobre resistencia. Ahora bien, los espectros de riesgo y resiliencia proporcionan un valor del daño aceptado y de resiliencia esperada, en determinado periodo de retorno, respectivamente.

En el caso de estudio se propuso un daño del 10% con un periodo de retorno (TR) de 250 años para todos los espectros de diseño y así poder tener un análisis comparativo entre ellos. Los ERU se obtuvieron de Buendía (2016), mientras que los de resiliencia se obtuvieron de González y Niño (2022). Cabe mencionar que se utilizó un espectro de resiliencia del 99%.

En la Fig. 27 se presentan los tres espectros de diseño utilizados en donde se señala el periodo estructural (línea vertical punteada) y la aceleración de diseño. Los valores, con un periodo fundamental de 0.126s, para el método basado en resiliencia, normas técnicas complementarias y riesgo son; 3.052, 1.88 y 0.92 ( $m/s^2$ ) respectivamente.

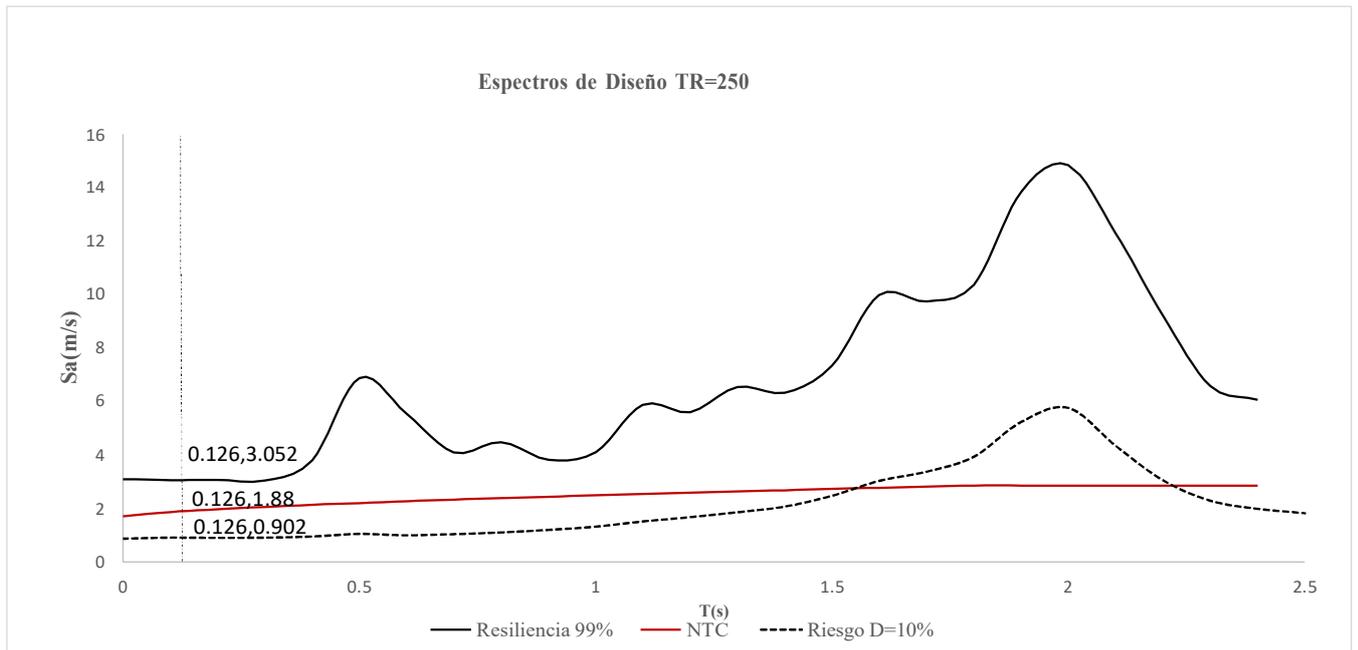


FIGURA. 20 ESPECTROS DE DISEÑO CON UN TR DE 250 AÑOS

## ELEMENTOS MECÁNICOS

La modelación se realizó en el software ETABS en donde se adjuntaron los espectros de diseño anteriores para poder obtener los elementos mecánicos que se presentan en la Tabla 4. Cabe mencionar que los momentos flexionantes se tomaron como los momentos resistentes para el armado de las secciones de cada estructura.

| Diseño  | Elemento | Extremo  | Momento Flexionante (T-m) | Cortante (T) | Fuerza Axial (ton) |
|---------|----------|----------|---------------------------|--------------|--------------------|
| FUERZAS | Viga     | -        | 0.2661                    | 0.1157       | 0.0                |
|         | Columna  | Inferior | 0.5148                    | 0.2297       | -0.1157            |

|             |         |          |        |        |         |
|-------------|---------|----------|--------|--------|---------|
|             |         | Superior | 0.1973 | 0.2297 | -0.1157 |
| RESILIENCIA | Viga    | -        | 0.4431 | 0.1926 | 0.0     |
|             |         | Inferior | 0.8574 | 0.3826 | -0.1926 |
|             | Columna | Superior | 0.3286 | 0.3826 | -0.196  |
| RIESGO      | Viga    | -        | 0.13   | 0.0565 | 0.0     |
|             |         | Inferior | 0.2516 | 0.1123 | -0.0565 |
|             | Columna | Superior | 0.0964 | 0.1123 | -0.0565 |

TABLA 6 ELEMENTOS MECÁNICOS MÁXIMOS POR CADA DISEÑO SÍSMICO

Aquí empezamos a notar las diferencias entre un diseño y otro; por un lado, el diseño inspirado en resiliencia considera una resistencia en sus elementos aproximadamente 3 y 1.6 veces mayor a los diseños de Riesgo y las NTC, respectivamente. Lo anterior concuerda con los espectros de diseño anteriores; y como era de esperarse, entre mayor sean las acciones sísmicas que afectan una estructura, en términos de aceleración del suelo, mayor resistencia será requerida por la estructura.

## DISEÑO Y ARMADO

Una vez obtenidos los momentos resistentes de diseño, se llevó a cabo el diseño de los elementos estructurales para cada caso en cuestión. Las siguientes figuras proponen el armado de las secciones según el caso; Normas Técnicas Complementarias (2017), Riesgo y Resiliencia.

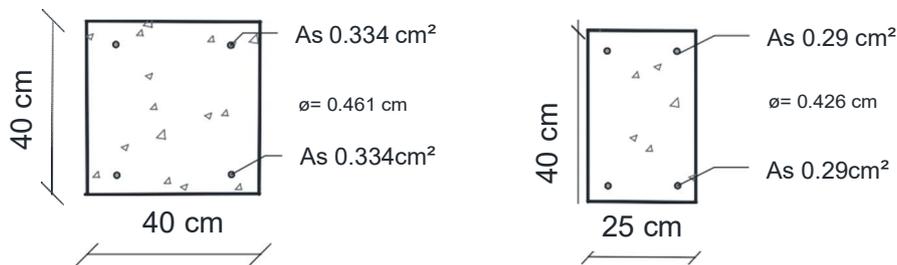


FIGURA. 21 ARMADO NTC

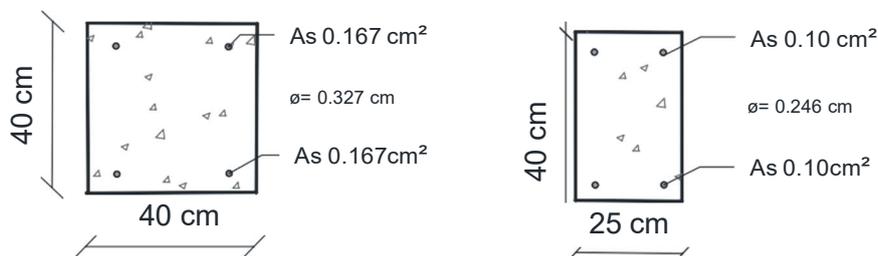
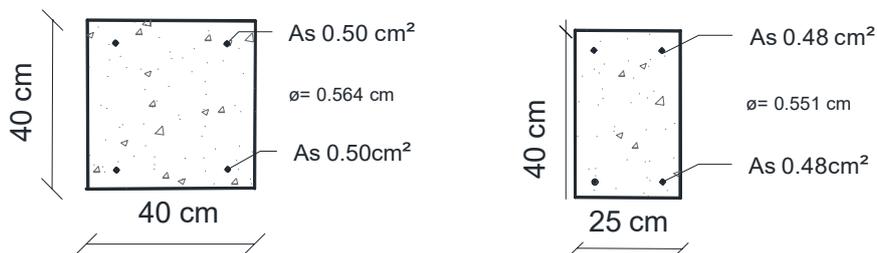


FIGURA. 22 ARMADO RIESGO



**FIGURA. 30 ARMADO RESILIENCIA**

De las figuras anteriores se puede concluir que el diseño que demanda más refuerzo longitudinal es el diseño considerando resiliencia, seguido por el diseño por las NTC y por último el diseño considerando riesgo.

#### MODELO DE COMPORTAMIENTO HISTÉRICO

Una vez definido el diseño, es de interés obtener las características para definir la no linealidad de los elementos y posteriormente poder realizar análisis dinámicos incrementales (IDA). En esta investigación, se representa el comportamiento no lineal por medio de modelos de comportamiento histerético, utilizándose en particular el de Ibarra-Medina-Krawinkler *pinching*, el cual se compone de tres curvas las cuales presentan; una rama elástica, una inelástica y una rama de degradación después de las deformaciones excedentes a un punto llamado *capping*. La recarga se dirige hacia el "break point", el cual es una función de la deformación máxima permanente y de la fuerza máxima sometida en dirección de la carga y está definido por el parámetro  $k_f$  que modifica la máxima fuerza (puntos 4 y 9 Fig. 31) y  $k_d$  modifica el máximo desplazamiento de dicho "break point" (puntos 4' y 8' Fig. 31). La primera parte de la recarga se define por  $K_{r_{el,a}}$  y una vez llegado el "break point" el camino se direcciona hacia una deformación máxima en dirección de la carga  $K_{r_{el,b}}$  (Ibarra; Medina; Krawinkler, 2005).

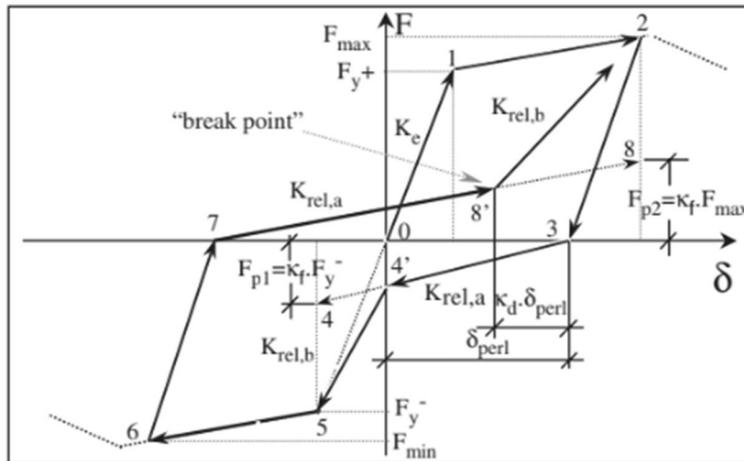
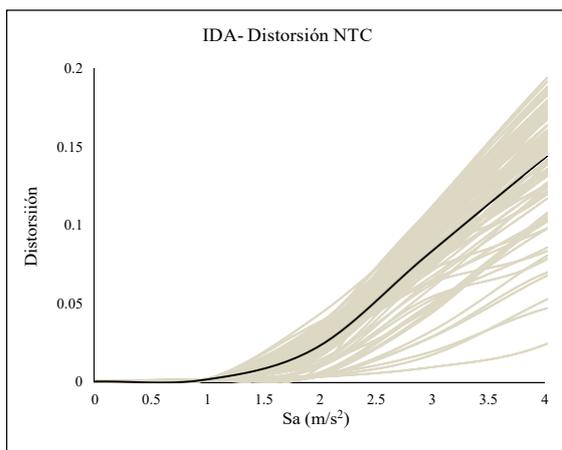


FIGURA. 23 MODELO HISTERETICO PINCHING

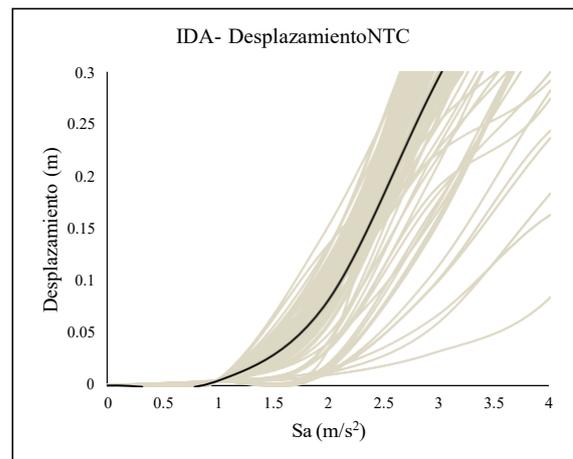
La razón por la cual se incorpora este modelo es porque toma en cuenta el punto de agrietamiento del concreto, el punto de fluencia del acero y el punto de la resistencia ultima. Este enfoque ayuda a aproximar de manera más precisa el comportamiento del concreto reforzado.

#### ANÁLISIS DINÁMICOS INCREMENTALES

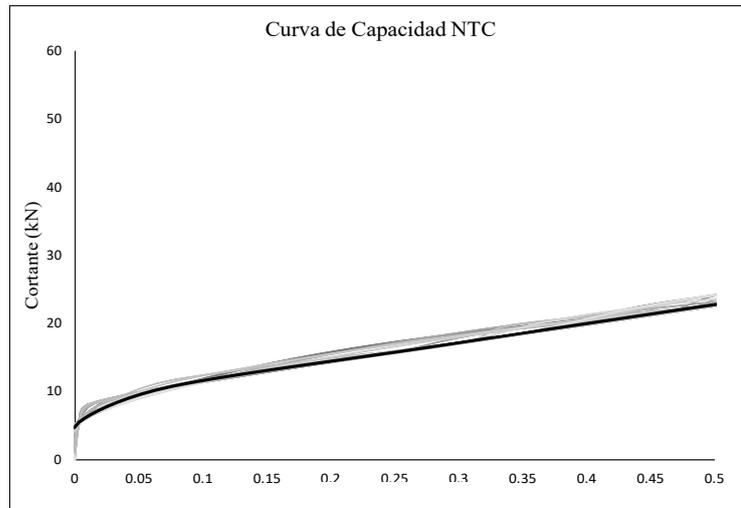
Utilizando 100 registros sísmicos de eventos reales (Ver sección de Anexos), para la ubicación del modelo, se procedió a calcular la vulnerabilidad estructural a través análisis dinámicos incrementales modelados en el programa OpenSees. Los resultados de dichos análisis en términos de distorsiones, desplazamientos y capacidad dinámica se muestran en las Fig. 32 a Fig. 34. Con ayuda de las curvas de distorsión de entrepiso vs pseudo-aceleración es posible obtener los estados de daño, mientras que las curvas de desplazamiento permiten estimar las curvas de capacidad dinámica.



A)

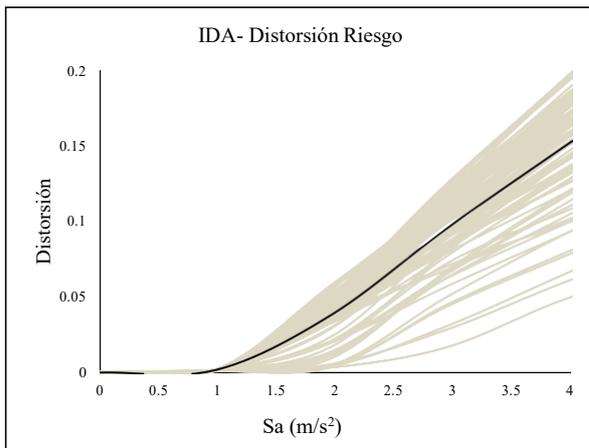


B)

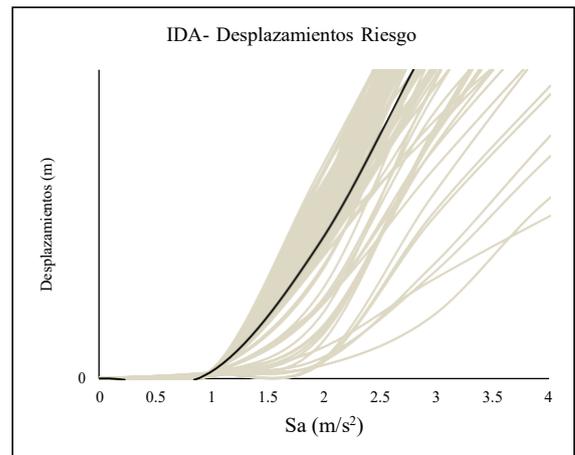


c)

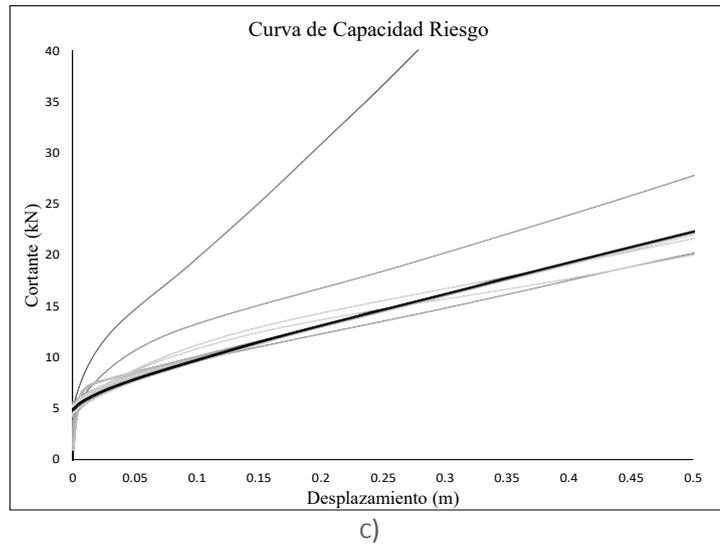
**FIGURA. 24 RESULTADOS IDA PARA DISEÑO POR NTC A) IDA DISTORSIÓN VS SA, B) IDA DESPLAZAMIENTO VS SA C) CURVA DE CAPACIDAD DINÁMICA**



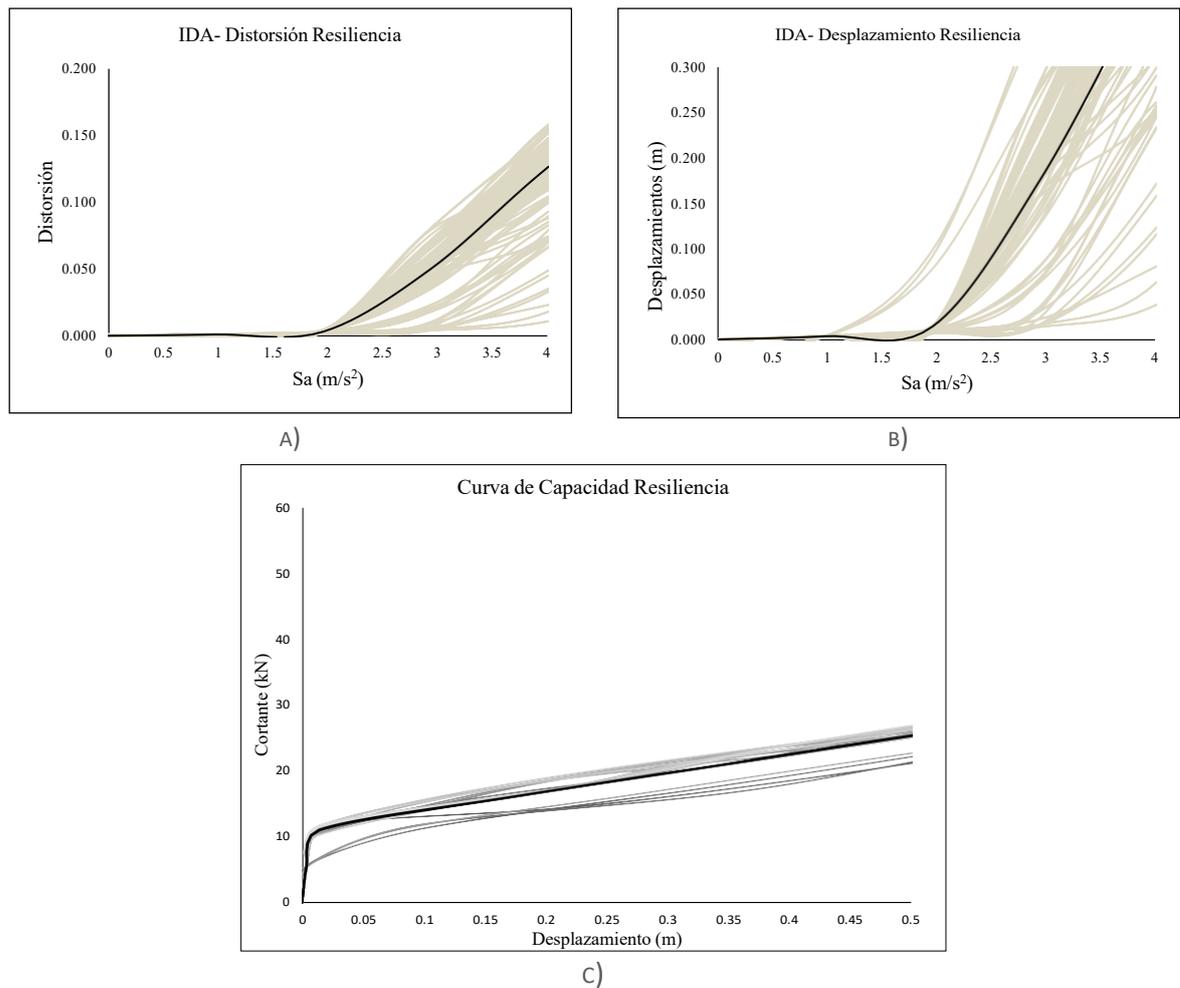
A)



B)



**FIGURA. 25 RESULTADOS IDA PARA DISEÑO POR RIESGO A) IDA DISTORSIÓN VS SA, B) IDA DESPLAZAMIENTO C) CURVA DE CAPACIDAD DINÁMICA**



**FIGURA. 26 RESULTADOS IDA PARA DISEÑO POR RESILIENCIA A) IDA DISTORSIÓN VS SA, B) IDA DESPLAZAMIENTO VS SA C) CURVA DE CAPACIDAD DINÁMICA**

De lo anterior se aprecia la diferencia en los valores de desplazamiento y distorsión de los diseños de NTC y Riesgo respecto al de Resiliencia, ya que son mayores a medida que el valor de la intensidad sísmica ( $S_a$ ) incrementa, lo cual es indicativo de estructuras más flexibles. Las curvas de capacidad dinámica presentan valores mayores de cortante para el diseño resiliente. Estos resultados son consistentes con la premisa de que la estructura tiene una mayor capacidad de resistencia según el aumento de su rigidez. De las curvas dinámicas anteriores se permitió estimar la relación de rigidez de post fluencia para modelar que se usó para la estimación de la pérdida

Columna

|             | Relación de rigidez de post-fluencia | Momento de Agrietamiento | de Rotación de Agrietamiento | de Momento de Fluencia | de Rotación de Fluencia |
|-------------|--------------------------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------|-------------------------|
|             | $\alpha$                             | kN*m                     | $\Theta$                     | kN*m                   | $\Theta$                |
| NTC         | 0.0162                               | 6.9264                   | 5.5798 E-05                  | 9.8948                 | 0.00153                 |
| RIESGO      | 0.0163                               | 3.4528                   | 5.5801 E-05                  | 4.9325                 | 0.00151                 |
| RESILIENCIA | 0.0160                               | 10.352                   | 5.5791 E-05                  | 14.788                 | 0.00154                 |

**TABLA 7 TABLA DE MOMENTOS, ROTACIONES Y RIGIDEZ DE POST FLUENCIA PARA LA COLUMNA**

| Viga        |                                      |                          |                              |                        |                         |
|-------------|--------------------------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------|-------------------------|
|             | Relación de rigidez de post-fluencia | Momento de Agrietamiento | de Rotación de Agrietamiento | de Momento de Fluencia | de Rotación de Fluencia |
|             | $\alpha$                             | kN*m                     | $\Theta$                     | kN*m                   | $\Theta$                |
| NTC         | 0.01533                              | 9.4303                   | 5.5787 E-05                  | 13.472                 | 0.00161                 |
| RIESGO      | 0.01596                              | 1.9110                   | 5.5798 E-05                  | 2.7300                 | 0.00157                 |
| RESILIENCIA | 0.01533                              | 9.5167                   | 5.5777 E-05                  | 13.5953                | 0.00161                 |

**TABLA 8 TABLA DE MOMENTOS, ROTACIONES Y RIGIDEZ DE POST FLUENCIA PARA LA VIGA**

Lo que se puede observar en las tablas 7 y 8, es que, para ambos elementos estructurales, el diseño considerando resiliencia tuvo valores en los momentos resistentes mayores que los otros dos diseños, lo que concuerda con los espectros de diseño y el armado de ellos. Así mismo el diseño que consideró riesgo obtuvo los valores menores de los tres.

#### CURVAS DE VULNERABILIDAD

Gracias a los datos proporcionados por los análisis dinámicos incrementales, fue posible proceder al cálculo de la vulnerabilidad estructural para cada diseño sismorresistente. Para estimar el daño a partir de la respuesta de los IDA se utilizó la ecuación siguiente propuesta por Ordaz (2005)

$$E \beta \gamma_i = 1 - \exp\left(\ln 0.5 \left(\frac{\gamma_i}{\gamma_0}\right)^s\right) \quad \text{Ec. (23)}$$

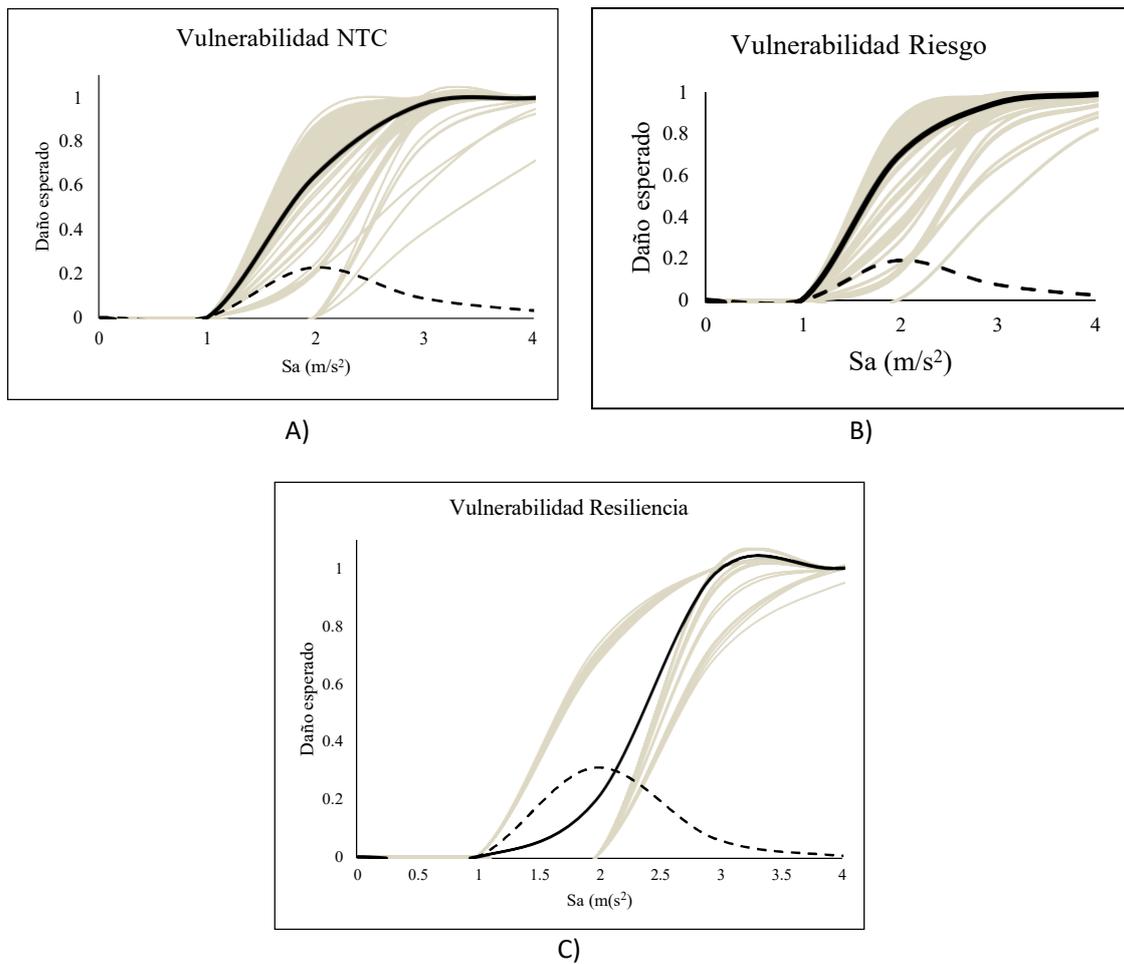
Donde:

$\beta$ = Daño esperado

$\gamma_i$ = distorsión observada

La función de vulnerabilidad especifica una relación probabilística entre la intensidad del fenómeno y los daños producidos por este. Cada estructura tiene su propia función de vulnerabilidad donde se especifican curvas que relacionen un valor de daño o pérdida esperada y la desviación estándar del daño con la intensidad del fenómeno.

Las siguientes imágenes muestran las curvas que relacionan el daño esperado y la intensidad sísmica para cada diseño sismorresistente. El promedio de cada curva será expresado por la línea continua en negro para cada caso Fig. 35.



**FIGURA. 27 CURVAS DE VULNERABILIDAD A) NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS B) DISEÑO POR RIESGO C) DISEÑO CONSIDERANDO RESILIENCIA**

Para todos los casos, según la Fig. 35, todas las estructuras son vulnerables a cierto daño a partir de la unidad de intensidad sísmica. Entre mayor es la intensidad mayor es la probabilidad de pérdidas en el sistema. Los primeros dos diseños (NTC Y RIESGO) tienen menor capacidad así que la etapa de fluencia ocurre primero para estos dos modelos. Respectivamente el percentil mayor de daño ocurre después de este estado.

## RIESGO

Para llevar a cabo el estudio de riesgo sísmico, se utilizó como amenaza sísmica, aquella definida por Jaimes y Niño (2017) formada por una serie de eventos mutuamente excluyentes con influencia en la Ciudad de México, de manera particular en una zona lacustre. Por otro lado, para definir la exposición, se seleccionó, un punto con suelo blando, cuya ubicación está dada por las siguientes coordenadas: longitud  $-99^{\circ} 8' 51''$ , latitud:  $19^{\circ} 23' 37''$ . Así mismo, el daño esperado dada una

intensidad sísmica se caracterizó por medio de la vulnerabilidad, obtenida como se ha descrito anteriormente.

Finalmente, con la información anterior, fue posible llevar a cabo el estudio de riesgo, utilizando en este caso la herramienta para el estudio probabilista y determinista del riesgo sísmico, CAPRA (Ordaz et al, 2013).

Los resultados de los diez escenarios más críticos en términos de pérdidas se recopilan en la Tabla (9).

| Escenario | Frecuencia de ocurrencia | Pérdida esperada (%) |            |                    |
|-----------|--------------------------|----------------------|------------|--------------------|
|           |                          | Diseño EPU (NTC)     | Diseño ERU | Diseño Resiliencia |
| 1         | 0.0000197932             | 99.99                | 100        | 99.93              |
| 2         | 0.000256789              | 99.99                | 100        | 99.90              |
| 3         | 0.000299852              | 99.99                | 100        | 99.90              |
| 4         | 0.0000394936             | 99.94                | 100        | 99.32              |
| 5         | 0.000256789              | 99.85                | 100        | 98.41              |
| 6         | 0.0000788019             | 98.08                | 100        | 89.75              |
| 7         | 0.0000197932             | 97.85                | 100        | 88.69              |
| 8         | 0.000299852              | 96.09                | 100        | 80.54              |
| 9         | 0.000287448              | 94.19                | 100        | 71.73              |
| 10        | 0.000256789              | 93.09                | 100        | 66.63              |

**TABLA 9 RESULTADOS PERDIDA ESPERADA PARA 10 ESCENARIOS**

Los resultados que se muestran a partir de los diez escenarios más críticos son consistentes con las características de cada diseño utilizado. Las pérdidas esperadas se reducen considerablemente cuando se utiliza los espectros de resiliencia, lo cual es particularmente notorio para los escenarios 9 y 10, en donde las reducciones de pérdidas son de alrededor de 30%. Para este caso no conviene utilizar el ERU desde el punto de vista de las pérdidas pues para todos los escenarios se presentan pérdidas del 100%.

## RESILIENCIA

Para llevar a cabo la cuantificación de la resiliencia sísmica, se estimaron los tiempos de recuperación, a partir del modelo de la Fig. 36, en donde se muestra la relación entre los tiempos de reparación para una estructura de concreto reforzado en relación con su daño global. Dicho modelo se obtuvo directamente de González (2019). Los resultados en términos de tiempos de recuperación se muestran en la Tabla 11 para los 10 escenarios críticos.

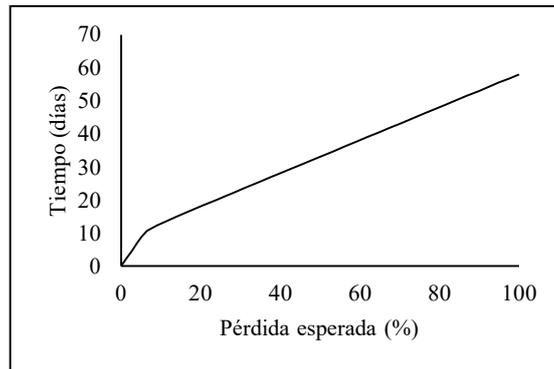


Tabla 36 Modelo de tiempos de reparación para estructuras de concreto reforzado (GONZALES, 2019)

| Escenario | Frecuencia de ocurrencia | Tiempo de recuperación (días) |            |                    |
|-----------|--------------------------|-------------------------------|------------|--------------------|
|           |                          | Diseño EPU (NTC)              | Diseño ERU | Diseño Resiliencia |
| 1         | 0.0000197932             | 58.00                         | 58.00      | 57.97              |
| 2         | 0.000256789              | 58.00                         | 58.00      | 57.95              |
| 3         | 0.000299852              | 58.00                         | 58.00      | 57.95              |
| 4         | 0.0000394936             | 57.97                         | 58.00      | 57.66              |
| 5         | 0.000256789              | 57.93                         | 58.00      | 57.21              |
| 6         | 0.0000788019             | 57.04                         | 58.00      | 52.88              |
| 7         | 0.0000197932             | 56.93                         | 58.00      | 52.34              |
| 8         | 0.000299852              | 56.05                         | 58.00      | 48.26              |
| 9         | 0.000287448              | 55.10                         | 58.00      | 43.86              |
| 10        | 0.000256789              | 54.55                         | 58.00      | 41.31              |

TABLA 10 TIEMPO DE RECUPERACIÓN

En cuanto a los tiempos de recuperación, el análisis sugiere que para el diseño de resiliencia el tiempo de recuperación es menor en comparación a los otros dos diseños, los cuales presentaron una mayor pérdida esperada en los diez escenarios críticos. Es importante recordar que menores tiempos de recuperación indican estructuras más resilientes.

La cuantificación de la resiliencia por escenario se llevó a cabo utilizando la Ec. (1), mostrándose en la Tabla 12 algo similar a lo presentado en la Tabla 10, pero ahora en términos de resiliencia sísmica.

| Escenario | Frecuencia de ocurrencia | Resiliencia (%)  |            |                    |
|-----------|--------------------------|------------------|------------|--------------------|
|           |                          | Diseño EPU (NTC) | Diseño ERU | Diseño Resiliencia |
| 1         | 0.0000197932             | 50.00            | 50         | 50.06              |
| 2         | 0.000256789              | 50.00            | 50         | 50.09              |
| 3         | 0.000299852              | 50.00            | 50         | 50.09              |
| 4         | 0.0000394936             | 50.05            | 50         | 50.64              |
| 5         | 0.000256789              | 50.13            | 50         | 51.5               |
| 6         | 0.0000788019             | 51.80            | 50         | 59.26              |
| 7         | 0.0000197932             | 52.02            | 50         | 60.17              |

|    |             |       |    |       |
|----|-------------|-------|----|-------|
| 8  | 0.000299852 | 53.64 | 50 | 66.79 |
| 9  | 0.000287448 | 55.37 | 50 | 73.27 |
| 10 | 0.000256789 | 56.35 | 50 | 76.7  |

**TABLA 11 RESILIENCIA OBTENIDA**

El diseño que presenta menor resiliencia es el diseño con ERU, lo cual hace sentido con lo que se ha venido presentado hasta ahora. Los cinco primeros eventos resultan ser para todos los casos, los eventos que suceden pueden apreciarse que tanto el diseño con las NTC como el diseño considerando la resiliencia tienen una recuperación similar entre ellos. Por otro lado, a partir del sexto evento los resultados muestran una ventaja clara para el diseño considerando resiliencia siendo así el diseño que se con mayor resiliencia en comparación a los otros diseños.

## 4. Análisis de Resultados

Después de realizar la metodología de estudio, se ha podido estimar los valores de resiliencia para los tres diseños propuestos. Se comparó así mismo, las curvas de capacidad dinámica, la vulnerabilidad, la pérdida anual esperada y la pérdida máxima esperada. A continuación, se detallan los resultados obtenidos.

### 4.1. Curvas de Capacidad

La curva de capacidad dinámica caracteriza el desempeño sísmico de una estructura ante cierta demanda sísmica creciente y esta solo puede representar la no linealidad y la disipación de energía debido a histéresis.

En la siguiente gráfica se muestra las curvas de capacidad dinámica resultado de los IDA's. Cabe mencionar que se realizó el promedio para los 100 registros sísmicos de cada diseño.

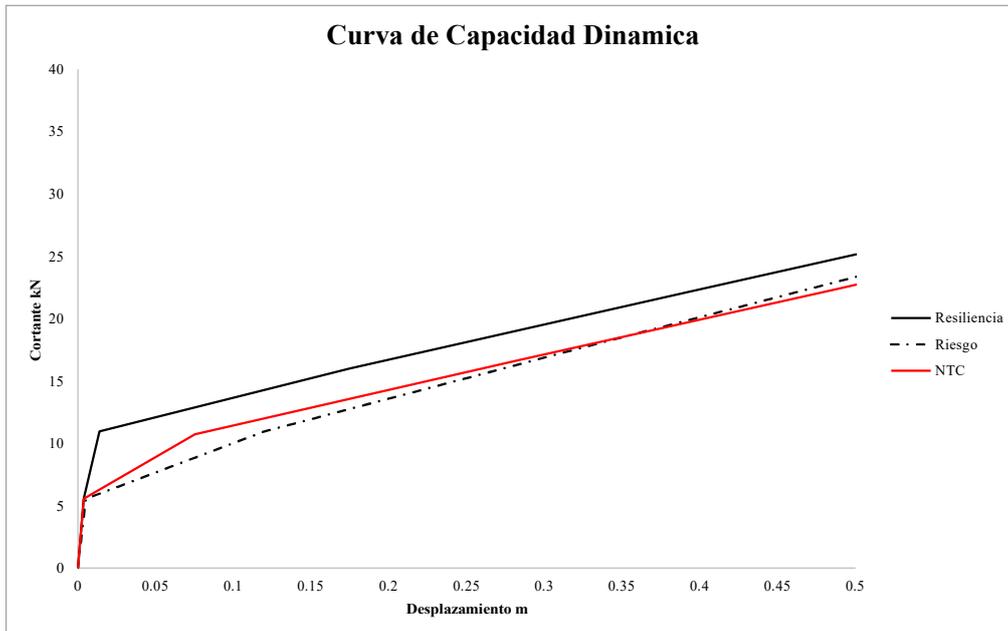


FIGURA. 28 CURVAS DE CAPACIDAD DINÁMICA

Comparando la respuesta de las tres estructuras (Fig. 37) es posible decir que en los tres casos el punto de agrietamiento del concreto es el mismo, que es consistente con el hecho de que las secciones tienen la misma geometría y el mismo material que es concreto. El punto de fluencia para cada uno varía para todos los casos, siendo el método por resiliencia el que presenta mayor resistencia, después le sigue las NTC y por último el diseño por riesgo. Lo anterior deja en evidencia que, la estructura diseñada por resiliencia es la más rígida de todas, seguida por la diseñada con demandas de las NTC y siendo la más flexible la estructura diseñada por riesgo.

El decremento de la rigidez post agrietamiento en las estructuras asociadas a EPU y ERU era de esperarse, pues se trata de estructuras con menor cuantía de refuerzo longitudinal y consecuentemente menor resistencia a flexión. Tal como lo demostró Priestley (1992), la rigidez de los elementos de concreto reforzado, y más aún de los marcos de concreto, es proporcional a la resistencia de estos, lo cual es consistente con los resultados obtenidos.

## 4.2. Vulnerabilidad

Las funciones de vulnerabilidad que se obtuvieron fueron resultado del análisis estadístico de los resultados para la muestra seleccionada, y se obtuvieron los respectivos valores de variación y desviación estándar como se muestra a continuación en la Fig. (38).

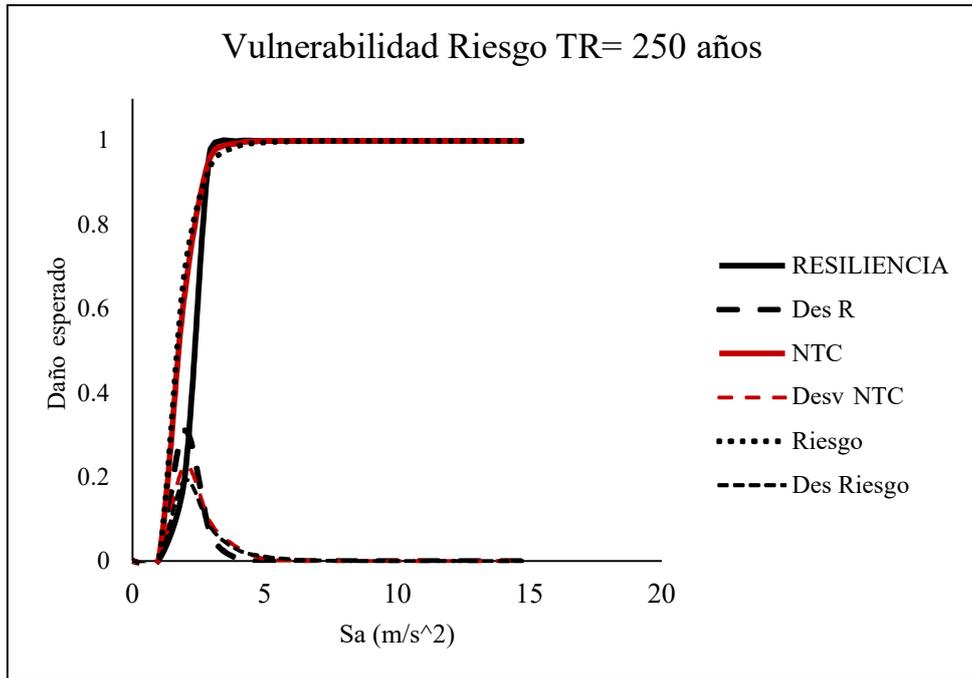


FIGURA. 29 CURVAS DE VULNERABILIDAD

Mediante este gráfico es posible comparar los tres diseños de lo cual se puede expresar que a pesar de que el diseño por riesgo es el más vulnerable, la curva para las normas técnicas complementarias no resulta estar tan alejada una de otra, por lo que ambos son diseños a los que se esperaría un daño significativo con una intensidad sísmica no muy grande. El diseño que considera resiliencia es pues el diseño menos vulnerable de los tres con una curva más recorrida hacia la derecha.

### 4.3. Riesgo

En este apartado se presentan los resultados del análisis de riesgo de la pérdida anual esperada y pérdida máxima.

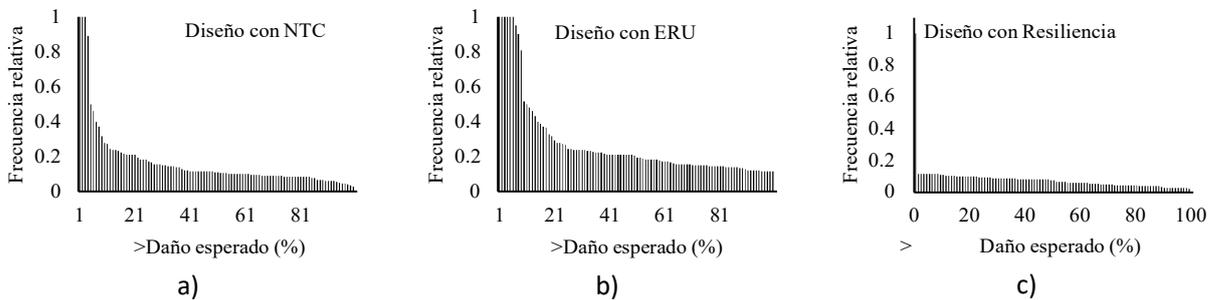


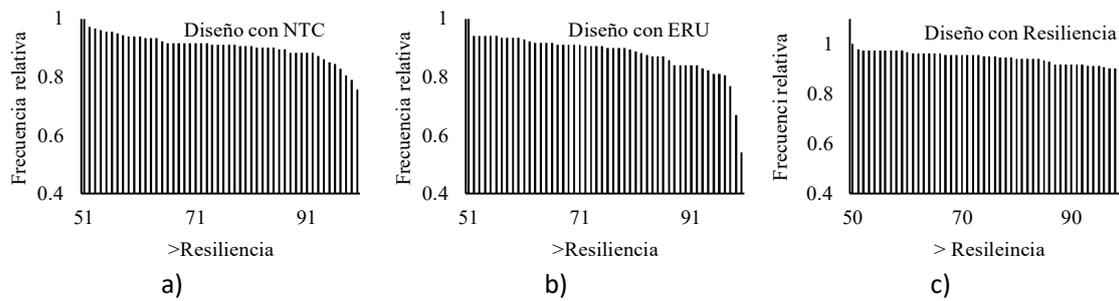
FIGURA. 30 RESULTADOS DAÑO ESPERADO A) DISEÑO CON NTC B) DISEÑO CON ERU Y C) DISEÑO CON RESILIENCIA

La FIG. (39) muestra los resultados obtenidos de daño esperado, en donde se puede observar que para el diseño con resiliencia la frecuencia con la que se espera daño es considerablemente menor

a comparación de los otros dos diseños. Por ejemplo, dado un nivel de daño esperado del 40% la frecuencia con la que se presenta es tan solo de un 0.15 aproximadamente. En comparación los otros dos diseños tienen una frecuencia mayor del 0.15 para este mismo nivel de daño esperado.

#### 4.4. Resiliencia obtenida

En las Fig. 40 se presenta la frecuencia relativa con la que las estructuras podrán recuperarse



**FIGURA. 40 FRECUENCIA DE OCURRENCIA A) DISEÑO CON NTC B) DISEÑO CON ERU Y C) DISEÑO CON RESILIENCIA**

Para un diseño resiliente se obtuvo una frecuencia mayor en comparación de los diseños por reglamento y por espectro de riesgo uniforme. La Fig. 40. Indica que habrá una recuperación del 90% con menos frecuencia para el diseño NTC en comparación con el diseño de resiliencia.

Finalmente, la Tabla 13 muestra los valores de resiliencia anual esperada obtenidos de aplicar la Ec. 22

| Enfoque de demandas sísmicas | Diseño EPU (NTC) | Diseño ERU | Diseño Resiliencia |
|------------------------------|------------------|------------|--------------------|
| Resiliencia (%)              | 87.46            | 83.16      | 94.69              |

**TABLA 12 RESILIENCIA ANUAL ESPERADA**

Como se puede observar, los resultados son consistentes con las previas estimaciones ya que la resiliencia en términos de % obtenida para el diseño que considera resiliencia es mayor que el diseño NTC y ERU en un 7% y 11% respectivamente. Por tanto, el diseño por resiliencia tendrá una mayor recuperación de pérdidas.

En la Tabla 13 se muestra que el valor de resiliencia estimado en una estructura diseñada con un espectro basado en resiliencia es del 94.69%, mientras que un espectro de resiliencia uniforme está asociado con un valor objetivo del 99%. El error relativo entre ambos números es del 4.5%. La pequeña diferencia entre el valor esperado y el obtenido se debe a que las demandas sísmicas utilizadas para calcular la resiliencia se basaron en un enfoque integral que considera varios factores, como los tiempos de inspección y reparación, la movilización a la obra y la burocracia, que no se incluyeron en este estudio de investigación. Además, hay diferencias entre el modelo utilizado para los análisis no lineales y las consideraciones en la elaboración de los espectros de resiliencia, siendo la más importante la representación de la no linealidad con diferentes modelos de histéresis. Es posible que la adopción de un modelo histerético más refinado pueda cerrar la brecha entre la resiliencia esperada y la obtenida.

## 5. Conclusiones

En la presente tesis se presentó la comparación entre los diseños estructurales realizados con tres enfoques; el primero por métodos convencionales que utilizan peligro uniforme, el segundo con un enfoque considerando riesgo uniforme y por último, con un enfoque considerando resiliencia. En general bajo varios criterios de desempeño se observó que el diseño enfocado a la resiliencia tiene un mejor comportamiento respecto a los otros dos. De manera puntual se obtienen las siguientes conclusiones

- Al utilizar un diseño con espectros que consideran la resiliencia se obtienen valores de resiliencia anual esperada de 94.69 % que son un 11 % mayores a los obtenidos con un diseño basado en Riesgo y un 7% mayores a los obtenidos a los diseños convencionales, los cuales usan peligro uniforme.
- En cuestión de las pérdidas esperadas, los tres diseños presentan daños esperados distintos bajo la misma amenaza sísmica, siendo el diseño considerando resiliencia el método con menos daños esperados, siguiendo el diseño por los códigos y por último el método de riesgo presenta un porcentaje mayor de daños.
- El diseño que considera resiliencia es el diseño menos vulnerable de los tres, que concuerda con el enunciado anterior, ya que dada una aceleración del suelo del  $1.5(m/s^2)$  el diseño presentara un daño del 10% mientras que el diseño por NTC presenta un daño esperado del 35% y el ERU un daño del 38%.
- En términos de la cuantía de acero, el método ERU considera secciones de acero longitudinal 2 y 3 veces menores en comparación del diseño por NTC y Resiliente respectivamente. El diseño resiliente tiene entonces el porcentaje de acero mayor de los tres enfoques. Cabe mencionar que la configuración del armado es la misma.
- Para la curva de capacidad dinámica, es posible concluir que el punto de agrietamiento del concreto en cada caso es el mismo porque las secciones comparten la misma geometría. El punto de fluencia de cada uno varía en cada caso, siendo el método resiliente el que presenta mayor resistencia seguido del NTC y finalmente el diseño basado en riesgo. Lo anterior muestra que la estructura diseñada para resiliencia es la más rígida de todas, seguida de la estructura diseñada para atender las demandas de NTC, siendo la estructura diseñada para riesgo la más flexible.

De lo discutido anteriormente se puede concluir que, aunque hay diferencias entre las consideraciones hechas en este estudio de investigación y las incluidas en los espectros de resiliencia uniforme, las diferencias en los resultados no son significativas. Estas diferencias pueden reducirse mediante un análisis más detallado de los tiempos de recuperación. Esto valida tanto el proceso de diseño como los espectros utilizados, ya que el error relativo es relativamente bajo y razonable.

## 6. Referencias

- Arroyo Espinoza, D., & Terán Gilmore, Amador. (2002). Factores de Reducción de Fuerzas Sísmicas para el Diseño de Estructuras con Sistemas Pasivos de Disipación de Energía. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 73-93.
- ASCE41-13. (2013). Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. *ASCE 41\_13*.
- ATC40. (1996). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*. California: Seismic Safety Commission.
- Ayala, G., & Barradas, J. (2014). Procedimiento de diseño sísmico multinivel basado en desplazamiento para estructuras a base de marcos de concreto reforzado. *Instituto de Ingeniería*.
- Bañuelos Garcia, F. H. (2013). *La curva de capacidad dinamica y su aplicacion a la evaluacion sismica de estructuras*. Ciudad de Mexico: Universidad Nacional Autonoma de Mexico.
- Bono Godoy, V. (2011). *Evaluación del comportamiento sísmico de edificios altos diseñados mediante el metodo de diseño de desplazamientos*.
- Botas, G., & Espinosa. (2011). Diseño por Desempeño. *Al México*, 28.
- Bruneau, M. e. (2003). A framework to Quantitatively Asses and Enhance the Seismic Resilience of Communities.
- Buendía Sanchez, L. M. (2016). *Estimación de Espectros de vulnerabilidad uniforme para el Diseño sísmico de Estructuras*. Mexico.
- CAPRA. (20185). User Manual Software FUNVUL-components V1.0.0. *CAPRA Probabilistic Risk Assesment Platform*.
- Carrillo, Julián, Hernandez-Barrios, Hugo, & Rubiano-Fonseca, Astrid. (2014). Analysis of the Earthquake- Resistant Design Approach for Buildings in Mexico. *Ingenieria. Investigación y Tecnología*, 151-162.
- Chacon, Paz. (2016). Analisis de desempeño sísmico de los edificios escolares tipicos 780 post 97 de la costa peruana. *M. Sc. Thesis*.
- Cimellaro, G. P. (2013). Correlation in spectral acceleration for earthquakes in eroope. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*.
- CONAGUA. (2002). *Determinacion de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de Mexcio*. Mexico: Sbudireccion General Tecnica.
- Cornell, C. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin Seismological Society of America*, págs. 1583-1606.

- Crisafuilli, V. (2002). *Espectros de Respuesta y de Diseño*. Universidad Nacional de Cuyo .
- Esteva ( 1968), Cornell (1969), & McGuire (2007). (s.f.). *Criterios para la construccion de espectros para diseño sismico; Progress and challenges in seismic performance assessment; Probabilistic seismic hazard analysis*; .
- FEMA273. (1997). NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of buildings. *Building Seismic Safety Council* .
- FEMAP58. (2012). Development of Next Generation Performance-Based Seismic Design Procedures for New and Existing Buildings. *FEMA P-58*.
- Garcia Reyes, L. E. (1998). *Dinamica Estructural Aplicada al Diseño Sismico*. Bogota, Colombia: Universidad de los Andes.
- GLOSI, T. G. (2019). Fragility and Vulnerability Assessment Guide. *GPPS Global Program for Safer Schools*, 90.
- Gómez Sánchez, F. (2012). Diseño Directo Basado en Desplazamientos Aplicado a Pilas de Puentes. *Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C*, 40-62.
- González Calva, C. E. (2019). Estimacion de la resiliencia sismica en escuelas del sector Público. *Universidad Nacional Autonoma de Mexico*, 87.
- Gonzalez Calva, C. E. (2022). *Definicion de demandas sismicas para el diseño de estructuras considerando conceptos de resiliencia*. Ciudad de Mexico .
- González N. M. (2020). Event-based assessment of seismic resilience in Mexican school buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*.
- Ibarra, L. (2005). Global collapse of frame structures under seismic excitation. *Ph.D. Dissertation, Dept. of Civil and Engineering, Stanford University, CA*.
- Ibarra, Luis; Medina, Ricardo; Krawinkler, Helmut. (2005). Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*.
- Jaimés, M y Niño, M. (2017). Cost-Benefit analysis to assess seismic mitigation options in Mexican public school buildings. *Bull Earthquake Engineering*.
- López, S., & Ayala, G. (2013). Método de Diseño Sísmico Basado en Desplazamientos para Marcos de Concreto Reforzado. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 21.
- Mahini, S. (2015). Performance vs Resilience-based Earthquake Design for Low and Medium-rise retrofitted RC Buildings. *PCEE*.
- Maraboto, L. E. (2001). Diseño Sísmico basado en desempeño: Tendencias y retos. *Revista de Ingeniería Sísmica No. 63* 35-54.
- Morales, A. (2012). Diseño Basado en desplazamientos DDBD aplicado a sistemas mixtos de hormigón armado.

- NTC-2020. (2020). Normas Tecnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras e Concreto. En A. C. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, *NTC Diseño de Concero* .
- NTC-CA. (2017). Normas Tecnicas Complementarias Sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones.
- NTC-S. (2017). *Normas Técnicas complementarias Para Diseño por Sismo*. Ciudad de México.
- Otani, S. (1981). Hysteresis models of reinforce concrete for earthquake response analysis. *Journal of Faculty of Engineering* , 407-441.
- Otazzi Pasino, G. (2004). *Material de Apoyo para la Enseñanza de los Cursos de Diseño y Comportamiento del Concreto Armado*. Lima, Peru.
- Oxford. (1984). *Resiliencia*.
- Park;Ang y Wen. (1985). Seismic damage analysis of reinforced concrete buildings. *Journal of Structural Engineering*, págs. 740-757.
- Pierino, L., & Badoux, M. (2011). Analyse sismique des batiments. En *Génie Parasismique, conception et dimensionnement des batiments* (págs. 120-130).
- Porter, K. (2018). *A Beginner's Guide to Fragility, Vulnerability and Risk*. Denver CO USA: University of Colorado Boulder and Spa Risk.
- Priestley, M., Calvi, G., & Kowalsky, M. (2007). Displacement-Based Seismic Design of Structures. *Structures IUSS Press*, 2.
- R.Park, T. P. (1975). *Reinforced Concrete Structures* .
- RCDF. (2020). Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal 2004-2020.
- SEAOC. (1995). *Vision 2000*. California.
- Takeda. (1970). Reinforced concrete response to simulated earthquakes. *Journal of the Structural Division*, 2573.
- Vamvaticos, Cornell. (2002). Incremental Dynamics Analysis. *Department of Civil Environmental Engineering* . Stanford University.
- Vinces, B. F. (2021). Modal Analysis. *Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne* .
- Yamin. (2019). Funciones de Vulnerabilidad Sismica para Mamposteria no Reforzada. *Ingeniería Sismica*.

