



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Metodología Aplicable en la Evaluación de  
la Planta Baja Débil en Edificios de  
Vivienda Vertical en la Ciudad de México**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Civil**

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

Aldo Neri Adán Díaz

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Eduardo Reinoso Angulo



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023**

*A mi madre, Araceli Díaz Agüero, mi más grande apoyo...*

## **RESUMEN**

La planta baja débil (PBD) es un mal común en las estructuras de la Ciudad de México (CDMX), debido a que los requerimientos geométricos y de funcionalidad demandan optimizar las áreas destinadas para estacionamientos y/o comercios en edificios. Esta patología es un efecto generado por la ausencia de elementos resistentes en la planta baja de una edificación con respecto a los niveles superiores. Esta tesis muestra un análisis de los daños en edificios asociados a esta patología en sismos anteriores tomando en cuenta características de la configuración estructural que agravan los efectos adversos en términos de desempeño. Adicionalmente, se presenta una propuesta para evaluar la PBD en edificios pre-1985 de baja altura estructurados a base de marcos de concreto y muros de mampostería no desligados a la estructura en la zona de lago de la CDMX de acuerdo con las Normas Técnicas Complementaras para Diseño por Sismo (NTCDS-2020). Se hace una comparación con los criterios del manual de Cargas mínimas de diseño y criterios asociados para edificios y otras estructuras (ASCE/SEI 7-16). Derivado de las distintas evaluaciones se determina el porcentaje de muros de mampostería necesarios en la dirección donde se observa la discontinuidad vertical de estos elementos con el fin de obtener una resistencia a cortante y una rigidez de entrepiso semejantes en planta baja y los entrepisos superiores, y así, dejar de ser considerado como un edificio con PBD. Finalmente, se concluye que la principal característica que favorece a la PBD es la cantidad de entrepisos que posee un edificio ya que, entre más alto, el contraste en la capacidad a cortante debida a la diferencia de muros de mampostería afecta de manera significativa la concentración de esfuerzos en la planta baja.

## **ABSTRACT**

Ground soft-story condition is common in Mexico City structures, due to geometrical and functional requirements demanded to optimize spaces for parking lots or shops in buildings. This pathology is a generated effect caused by the absence of resistant elements at the ground floor of a building compared with upper stories. This thesis shows a damage analysis in buildings related to this pathology observed during previous earthquakes taking into account structural configuration characteristics that may aggravate the negative effects in terms of building performance. Moreover, a methodology was developed to evaluate ground soft-story condition in buildings constructed in the so-called Lake Zone of Mexico City according to the NTCDS-2020. A comparison between the criteria from NTCDS and the Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-16) is exposed. Derived from different evaluations, the percentage of masonry shear necessary to fix the vertical discontinuity is determined, in order to obtain a similar shear capacity and stiffness on the ground floor and the upper floors, and thus, stop being considered as a building with the aforementioned condition. Finally, it is concluded that the main characteristic that favors soft-story condition is the number of stories that a building has; hence, the higher the structure, the more difficult it is to reach out a contrast regarding story-shear capacity that concentrates demands on the ground.



## Índice:

CAPÍTULO 1 .....	1
INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 JUSTIFICACIÓN.....	2
1.2 OBJETIVO PRINCIPAL .....	2
1.2.1 Objetivos Secundarios.....	2
1.3 RESULTADOS ESPERADOS .....	2
1.4 HIPÓTESIS .....	2
2 CAPÍTULO 2 .....	5
MARCO TEÓRICO .....	5
2.1 SISMICIDAD .....	5
2.1.1 Sismicidad en la Ciudad de México .....	7
2.1.2 Contexto Histórico .....	8
2.2 LA CIUDAD DE MÉXICO EN ZONAS .....	10
2.2.1 Zonas con bajo riesgo sísmico – Lomas.....	10
2.2.2 Zonas con mediano riesgo sísmico – Transición.....	11
2.2.3 Zonas con alto riesgo sísmico – Lacustre.....	11
2.3 VIVIENDA VERTICAL.....	14
2.3.1 Asentamientos verticales en la Ciudad de México – Contexto Histórico .....	14
2.3.2 Época Actual .....	14
2.4 IDENTIFICACIÓN Y DELIMITACIÓN DE VIVIENDA VERTICAL EN ZONAS DE RIESGO .....	16
2.4.1 Vulnerabilidad Sísmica .....	17
2.5 PLANTA BAJA DÉBIL .....	17
2.5.1 Definición.....	17
2.5.2 Ejemplos en la Ciudad de México.....	19
2.6 ESTUDIOS PREVIOS DE PLANTA BAJA DÉBIL .....	22
2.6.1 Estudios en el mundo .....	22
2.6.2 Estudios en la Ciudad de México .....	24
3 CAPÍTULO 3 .....	28
DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA .....	28
3.1 MODELADO DE EDIFICIOS TIPO.....	28
3.1.1 Diseño Arquitectónico.....	28
3.1.2 Diseño de Edificios con Reglamento de Construcciones del Distrito Federal de 1976 .	31
3.2 EVALUACIÓN DE REGULARIDAD SEGÚN NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO POR SISMO .....	36
3.3 EVALUACIÓN DE LA PLANTA BAJA DÉBIL.....	39
3.3.1 Selección de Espectros SASID.....	39
3.3.2 Descripción del Método Utilizado para Evaluar la PBD.....	41
3.3.3 Descripción del Método Utilizado para Evaluar el Entrepiso Flexible .....	44
3.3.4 Resultados Obtenidos .....	45

3.4	METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN RÁPIDA DE LA PLANTA BAJA DÉBIL	46
3.4.1	Propuesta de Metodología.....	46
4	CAPÍTULO 4.....	53
	REFORZAMIENTO SÍSMICO EN ESTRUCTURAS CON PBD .....	53
4.1	ENCAMISADOS DE VIGAS, COLUMNAS O NUDOS CON CONCRETO REFORZADO	53
4.1.1	Deficiencia por Corregir.....	53
4.1.2	Encamisado de Columnas .....	56
4.1.3	Encamisado de Nudos .....	57
4.2	ADICIÓN DE MUROS DE CONCRETO.....	58
4.2.1	Deficiencia por Corregir.....	58
4.3	ADICIÓN DE CONTRAVENTEOS DE ACERO .....	59
4.3.1	Deficiencia por Corregir.....	59
4.3.2	Descripción de la Técnica .....	59
4.3.3	Disposición de Contraventeos .....	60
4.4	MÉTODO DEL MARCO EXTERIOR DE concreto PRETENSADO PREFABRICADO....	61
4.4.1	Transferencia de Cortante .....	62
4.5	PARALLEL UNIT FRAME METHOD .....	65
4.5.1	CONSTRUCCIÓN.....	65
4.5.2	VENTAJAS.....	66
4.6	REFORZAMIENTO MEDIANTE ARRIOSTRAMIENTOS PREFABRICADOS .....	66
4.6.1	Sistema de arriostramiento con concreto prefabricado .....	66
4.6.2	Construcción.....	67
4.6.3	Problemas de Diseño.....	68
4.7	ELEMENTO PREFABRICADO, PRETENSADO EN ARMADURA DE PARED cruzada	69
4.7.1	Marco Estructural.....	71
5	CONCLUSIONES .....	73
6	APÉNDICE A .....	75
	BIBLIOGRAFÍA.....	79

## Índice de tablas:

Tabla 2.1 Ejemplo de estadísticas de los sismos reportados por el SSN (Servicio Sismológico Nacional, 2020) .....	7
Tabla 2.2 Edificaciones de 5 a 10 y de 10 a 15 pisos en zona III de la CDMX.....	16
Tabla 3.1 Cargas generales consideradas (planta tipo) .....	32
Tabla 3.2 Cargas asignadas por reglamento (planta tipo) .....	32
Tabla 3.3 Sumatoria de cargas (planta tipo).....	32
Tabla 3.4 Cargas generales consideradas (azotea) .....	32
Tabla 3.5 Cargas asignadas por reglamento (azotea) .....	33
Tabla 3.6 Sumatoria de cargas (azotea).....	33
Tabla 3.7 Componentes del espectro (1976).....	33
Tabla 3.8 Materiales de los modelos .....	34
Tabla 3.9 Dimensiones de los elementos estructurales (edificio 5 pisos) .....	34
Tabla 3.10 Dimensiones de los elementos estructurales (edificio 10 pisos) .....	34
Tabla 3.11 Dimensiones de los elementos estructurales (edificio 15 pisos) .....	34
Tabla 3.12 Relación altura-dimensión de los 3 modelos.....	37
Tabla 3.13 Relación largo a ancho de los 3 modelos .....	37
Tabla 3.14 Condiciones para evaluar la pbd, piso débil y piso débil extremo .....	42
Tabla 3.15 Cálculo de la resistencia a cortante del concreto en columnas.....	43
Tabla 3.16 Cálculo de la resistencia a cortante en muros .....	43
Tabla 3.17 Resistencia a cortante del acero en muros.....	43
Tabla 3.18 Obtención del cociente de evaluación .....	43
Tabla 3.19 Rigideces obtenidas para distintos porcentajes de muro diafragma en modelo de 5 pisos ..	45
Tabla 3.20 Porcentaje de rigidez de la planta baja con respecto a las plantas superiores .....	45
Tabla 4.1 Características generales del encamisado en columnas .....	56

## Índice de figuras:

Figura 2.1 Ejemplo de mapas de sismicidad anual de la República Mexicana. (Servicio Sismológico Nacional, 2020).....	6
Figura 2.2 Tipos de Sismo que Afectan a la Ciudad de México (Reinoso, 2007) .....	8
Figura 2.3 Sismógrafo del Inicio del Siglo XX (B LopezCotelo, 2011).....	9
Figura 2.4 Características del suelo en cada zona sísmica de la CDMX (BYOARQ, 2018).....	11
Figura 2.5 Zonificación de la CDMX - Zonas de mayor afectación e inmuebles colapsados por el sismo de 1985 (SGIRPC, 2017) .....	12
Figura 2.6 Zonificación de la CDMX - Zonas de mayor afectación e inmuebles colapsados por el sismo de 2017 (SGIRPC, 2017) .....	13
Figura 2.7 Línea del Tiempo del Desarrollo de Vivienda Vertical en México .....	15
Figura 2.8 Distribución de las Delegaciones en Zonas Sísmicas de la CDMX (National Geographic, 2018) .....	16
Figura 2.9 Condición de PBD (PAOT, 2019) .....	18
Figura 2.10 Planta Baja Débil "Alta"(ASCE, 2017) .....	18
Figura 2.11 Ejemplos conceptuales de los casos más comunes donde se puede presentar un entrepiso débil en la planta baja (FEMA, 2015). .....	19
Figura 2.12 Comparación de edificaciones con planta baja débil, afectadas por los sismos de 1985 y 2017 .....	20
Figura 2.13 Edificaciones de más de 3 niveles inspeccionadas con posible con posible planta baja débil inspeccionadas.....	21
Figura 2.14 Edificio con PBD en CDMX (OBRAS, 2017) .....	21
Figura 2.15 a) Edificio con muros no estructurales en toda su estructuración b) Edificio sin muros no estructurales en la planta baja(Agha Beigi et al., 2015).....	23
Figura 2.16 Determinación del porcentaje del espacio abierto (ATC, 2010).....	24
Figura 2.17 Muros de Mampostería Confinada (Jara-Guerrero et al., 2020).....	25
Figura 3.1 Planta de departamentos tipo, cotas en metros .....	29
Figura 3.2 Planta baja tipo.....	30
Figura 3.3 Vistas arquitectónicas de la edificación.....	31
Figura 3.4 Espectro de diseño (1976).....	34
Figura 3.5 Plantas estructurales de los 3 modelos diseñados .....	36
Figura 3.6 Ubicaciones de edificaciones con PBD .....	39
Figura 3.7 Espectros SASID (zona III) .....	40
Figura 3.8 Espectros de diseño (percentiles 84 , 50 y 16).....	41
Figura 3.9 Evaluación de la PBD ( <i>Gobierno de la Ciudad de México, 2017</i> ) .....	42
Figura 3.10 Cálculo del porcentaje de muro diafragma del edificio de 5 pisos .....	44
Figura 3.11 Llenado de datos de la edificación.....	46
Figura 3.12 Llenado de datos del dueño.....	47
Figura 3.13 Llenado de evaluación .....	48
Figura 3.14 Llenado de la evaluación inicial .....	48
Figura 3.15 Llenado de evaluación de PBD en edificios de 3-5 pisos .....	49
Figura 3.16 Ejemplo de cálculo del porcentaje de muro.....	50
Figura 3.17 Rúbrica de evaluación (edificio 5 pisos).....	50
Figura 3.18 Recomendaciones generales .....	51
Figura 3.19 Rúbricas para la evaluación de los edificios de 10 y 15 pisos .....	51
Figura 4.1 Viga encamisada con refuerzo longitudinal no continuo a través del nudo con la columna. Fuente: coreandcut.com .....	54
Figura 4.2 Viga encamisada con refuerzo longitudinal continuo a través del nudo con la columna (Tetta et al., 2015).....	54



Figura 4.3 Posibles configuraciones de encamisado de vigas con concreto: a) encamisado sobre nivel superior de losa; b) encamisado al nivel del piso; c) encamisado por debajo de la losa (Alcocer & Murià, 2020) .....	55
Figura 4.4 Columna encamisada con refuerzo longitudinal discontinuo en la altura del edificio. Nótese que la cuantía de estribos no es muy alta (ESG, 2020) .....	56
Figura 4.5 Columna encamisada con concreto de forma continua a través de las losas (Alcocer & Murià, 2020) .....	56
Figura 4.6 Posibles configuraciones de acero transversal en columnas encamisadas: a) estribos de varias piezas; b) estribos sobrepuestos (Alcocer & Murià, 2020) .....	57
Figura 4.7 Armadura metálica hecha a base de ángulos verticales en las esquinas del nudo y de soleras horizontales arriba de la losa y por debajo de las vigas (Alcocer & Murià, 2020) .....	57
Figura 4.8 Encamisado de nudo, de columna y de viga (Eurolosa, 2018) .....	58
Figura 4.9 Contraventeos en “X” y “K” permitidos para la rehabilitación de estructuras (Alcocer & Murià, 2020).....	60
Figura 4.10 Contraventeos en V y V invertida permitidos para la rehabilitación de estructuras (Alcocer & Murià, 2020).....	61
Figura 4.11 Contraventeo tipo “K” en un nivel no permitido en la rehabilitación de edificios existentes (Alcocer & Murià, 2020).....	61
Figura 4.12 Representación esquemática de marcos exteriores de concreto pretensado (basado en Venkataramana, 1995) .....	62
Figura 4.13 Representación esquemática de la transferencia de cortante por barras pretensadas. (basado en Venkataramana, 1995).....	63
Figura 4.14 Transferencia de cortante mediante losas de concreto (basado en Venkataramana, 1995) .....	64
Figura 4.15 Detalles de conexión del parallel unit frame (basado en Venkataramana, 1995) .....	65
Figura 4.16 Arriostramiento de concreto prefabricado adherido a una estructura (Venkataramana, 1995) .....	67
Figura 4.17 Arriostramiento de concreto prefabricado (basado en Venkataramana, 1995).....	68
Figura 4.18 Dispositivo FSSP (Venkataramana, 1995) .....	68
Figura 4.20 Problemas de diseño de arriostramientos prefabricados (basado en Venkataramana, 1995) .....	69
Figura 4.20 Ejemplo del sistema Dhajji Dewari (Venkataramana, 1995).....	70
Figura 4.21 Construcción con armadura en muro cruzado en un piso superior (Venkataramana, 1995) .....	70
Figura 4.22 Armadura de muro cruzado utilizando elementos de concreto pre-tensado (Venkataramana, 1995) .....	71

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

Vivienda es el término comúnmente utilizado para referirse al lugar donde una familia habita y desarrolla parte de sus actividades cotidianas, a lo largo de la historia se han desarrollado diversos tipos de vivienda como lo son; las viviendas unifamiliares, plurifamiliares, aisladas, pareadas, adosadas, etc. Todas estas hechas con materiales, procedimientos, reglamentación y presupuestos distintos, pero siempre con el mismo objetivo: ofrecer un refugio seguro ante los distintos peligros que existen fuera de ella. Pero, ¿qué sucede cuando los peligros están dentro de la vivienda o son la vivienda misma? Es decir, que fueron construidas en zonas con alto riesgo sísmico, carecen de calidad constructiva, su diseño no es apto para resistir fuerzas externas, se encuentran hechas con materiales poco confiables y demás razones. Pues lo que principalmente puede llegar a suceder son tragedias donde se pierdan vidas o donde los hogares se vuelven estructuralmente riesgosos e inhabitables.

Por otro lado, existe un término denominado “Patología Estructural”, este se presenta cuando una edificación se encuentra “enferma”, es decir, cuando cumple con una serie de requisitos específicos que representan un riesgo directo para la misma durante un sismo (Buendía & Reinoso, 2019). Entre las patologías estructurales más comunes se encuentran: la planta baja débil (PBD), irregularidad en planta, irregularidad en elevación, efecto de esquina, entre otras. En el capítulo 2 se tratará más a fondo la patología de PBD.

La Ciudad de México es uno de los mayores exponentes de las patologías estructurales en la República Mexicana, al construir estructuras irregulares no siempre bien planeadas desde su concepción; con diseños arquitectónicos “interesantes” visualmente, pero riesgosos estructuralmente. Incontables son los sismos que se registran en la capital mexicana, pero son perfectamente identificables aquellos cuya intensidad fue devastadora para los mexicanos, entre ellos se encuentran; el sismo del ángel (28/07/1957), el sismo de 1985 (19/09/1985) y el más reciente, el sismo de 2017 (19/09/2017). A partir de hechos históricos como los ya mencionados, se evidenciaron las patologías estructurales que atañían a las edificaciones que colapsaron y a las que se mantuvieron en pie con severos daños.

En este documento se hará especial énfasis en la patología de planta baja débil, sus causas, características, prevención, rehabilitación y en una metodología propuesta para evaluar el riesgo existente provocado por esta patología en edificaciones destinadas a vivienda multifamiliar -edificaciones del grupo B- (PAOT, 2019). A largo del capítulo 3 se muestra el desarrollo de modelos de edificaciones tipo propuestas, en las cuales se evalúa mediante software especializado en estructuras las posibles combinaciones de la PBD y de esta manera se obtiene una base de datos que, mediante un análisis detallado sirve para proponer la metodología mencionada anteriormente. Posteriormente, en el capítulo 4 se muestra una recopilación de las posibles soluciones estructurales que, el dueño de un edificio con PBD -asesorado por un especialista- podría tomar en cuenta para solucionar este problema. Finalmente, en el último capítulo de esta tesis se muestran una serie de recomendaciones generales para personas que desean construir edificios de departamentos y que desconocen totalmente cuanto podría afectarles el edificar con PBD, esto con el fin de prevenir que -desde la concepción del proyecto- el edificio se encuentre “enfermo”.

## **1.1 JUSTIFICACIÓN**

La Ciudad de México (CDMX) es una de las ciudades más pobladas en el mundo, en el año 2015 había un total de 8 918 653 habitantes (INEGI, 2015), mismos que se encontraban aglomerados en viviendas de diversos tipos. Además de ser la ciudad más poblada de la República Mexicana, la CDMX ha sido también foco de diversas tragedias relacionadas con sismos, después de ocurrido un sismo de magnitud considerable se ha visto expuesta la baja calidad constructiva y de diseño en las viviendas verticales – esto, a pesar de existir un reglamento de construcción- es por eso que se considera necesario realizar un trabajo donde la planta baja débil de algunas de las estructuras más típicas sea expuesta y revisada para poder evitarla durante la construcción de nuevas edificaciones o en su defecto -cuando la edificación ya se encuentra construida- ofrecer una metodología capaz –en casos específicos- de detectar esta patología así como ofrecer una estimación de peligro existente y de las posibles soluciones de rehabilitación.

## **1.2 OBJETIVO PRINCIPAL**

Crear una metodología capaz de determinar y subcategorizar la condición de PBD en términos de resistencia/demanda, así como el nivel de riesgo existente evaluando el porcentaje libre de muros de mampostería en el nivel de acceso a los edificios.

### **1.2.1 Objetivos Secundarios**

- Recopilar información de afectaciones a vivienda vertical por sismos pasados para poder prevenir la PBD en edificaciones existentes.
- Ofrecer posibles soluciones de rehabilitación a edificios con la condición de PBD

## **1.3 RESULTADOS ESPERADOS**

- Se pretende obtener una metodología de aplicación rápida en edificaciones destinadas a vivienda vertical.
- Con ayuda de la metodología obtenida se espera prevenir el colapso por sismo, de edificaciones existentes y en proceso de desarrollo.
- Ofrecer opciones de rehabilitación de la planta baja débil.

## **1.4 HIPÓTESIS**

La PBD es una de las principales patologías estructurales en la Ciudad de México. La falta de una metodología de aplicación rápida para identificarla y determinar el riesgo que representa para edificios de vivienda, son esenciales para garantizar la seguridad de la ciudadanía.

## **1.6 Limitaciones**

Este trabajo no pretende ser una solución a todos los posibles casos de PBD existente en los diversos tipos de estructuraciones, sino que, busca ofrecer una evaluación rápida para detectar la posible PBD en edificios de la CDMX con características que se definirán en el capítulo 3 de esta tesis. De igual manera, las soluciones propuestas –son soluciones generales y no particulares- es decir, estas soluciones no serán las únicas aplicables en los edificios que puedan llegar a detectarse con PBD, ya que, para cada caso en particular pueden existir diversas soluciones y se podrá implementar cualquiera que –de acuerdo con un especialista- resulte más conveniente para el dueño de la edificación.



## CAPÍTULO 2

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 SISMICIDAD

Se denomina sismicidad al análisis del número de sismos que ocurren en una determinada región geográfica. A partir de la recopilación histórica de datos, se elaboran mapas con los diversos epicentros<sup>1</sup> existentes tal y como se muestra en la Figura 2.1, además se toma en cuenta la frecuencia con que suceden estos fenómenos (ver Tabla 2.1 ) (Duarte, 2010).

La sismología instrumental ha tenido grandes avances y gracias a ello ha sido posible elaborar catálogos cada vez más completos, que incluyen datos como magnitud, duración, coordenadas exactas del foco, dirección de propagación, profundidad, etc. En los nuevos estudios de sismicidad se relaciona la actividad sísmica con su distribución espacial y temporal, e incluso se correlaciona con la características fisiográficas y geológicas de cada región (Udías & Mezcuca, 1986).

El riesgo sísmico en una zona no puede ser medido a partir de la actividad sísmica reciente. Por ejemplo; en el año 1990 la Agencia Meteorológica del Japón (JMA) incluyó a la ciudad de Kobe como una de las 18 regiones de Japón de baja sismicidad, debido a que en los últimos 30 años no se produjeron terremotos fuertes en dicha zona. Después del terremoto ocurrido en Kobe en 1995, un estudio considera dicha zona como una de las más peligrosas, precisamente por esa falta de energía liberada. Este es un argumento para afirmar que las zonas de mayor riesgo, es decir, de mayores pérdidas, son las de aparentemente moderada sismicidad, donde el período que transcurre entre los terremotos fuertes es largo (Bozzo & Barbat, 2000).

Los sismos se concentran en franjas que coinciden con los límites de las placas tectónicas. Esto se debe a que el mecanismo de generación de los sismos tiene que ver con la acumulación de energía elástica en los bordes de una falla. Reid, estudiando cuidadosamente las deformaciones permanentes generadas durante el sismo de 1906 en San Francisco, California, formula su teoría del rebote elástico de los sismos, que identifica de manera clara a las fallas geológicas como uno de los mecanismos de generación de los sismos.

Los bordes de las placas tectónicas son básicamente de tres tipos: de convergencia, de divergencia y de transformación. El límite de convergencia entre dos placas implica que una de ellas se mete por debajo de la otra en un movimiento que se denomina subducción. El límite de divergencia se encuentra donde dos placas se separan y se genera nueva corteza, generalmente oceánica. En el límite de transformación, las dos placas se deslizan una al lado de la otra sin que haya destrucción o creación de corteza. El deslizamiento entre las dos placas involucradas no ocurre de manera suave; por el contrario, la superficie de contacto entre las placas se parece más a una zona rugosa que impide el deslizamiento. Este atoramiento entre las placas va acumulando energía elástica que eventualmente se libera en forma súbita, con lo cual se producen sismos (Pérez et al., 2018).

---

<sup>1</sup> Epicentro: lugar ubicado en la superficie de la Tierra a partir del cual surge un fenómeno tal como un terremoto o maremoto, o cualquier otro movimiento sísmico. (B., Cecilia)

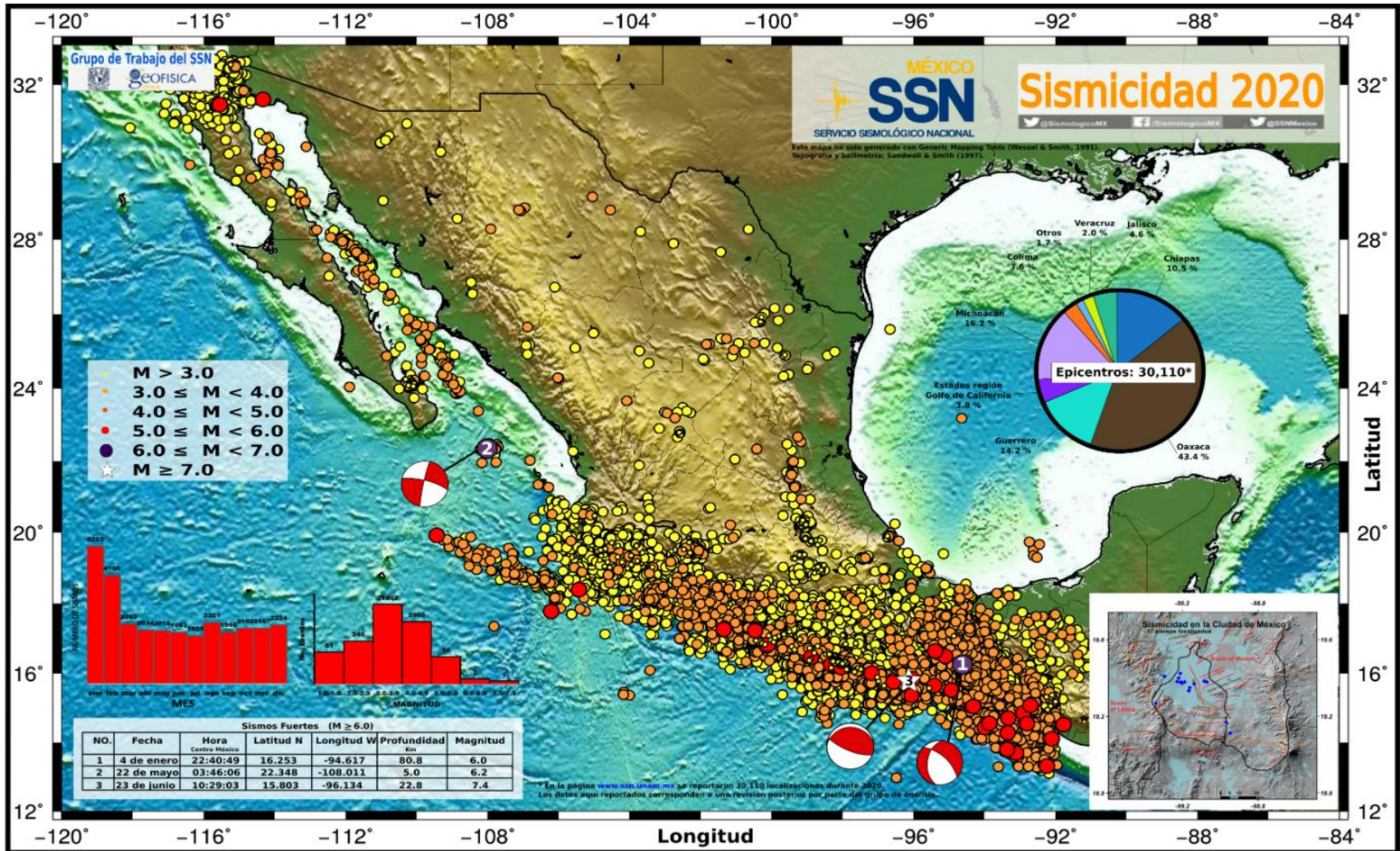


Figura 2.1 Ejemplo de mapas de sismicidad anual de la República Mexicana. (Servicio Sismológico Nacional, 2020)

**Tabla 2.1 Ejemplo de estadísticas de los sismos reportados por el SSN (Servicio Sismológico Nacional, 2020)**

AÑO	TOTAL DE SISMOS	NO CALCULABLE*	MAGNITUD						
			0-2.9	3-3.9	4-4.9	5-5.9	6-6.9	7-7.9	8-8.9
1990	796	1	12	247	510	24	2	0	0
1991	728	4	2	183	509	29	1	0	0
1992	614	1	4	184	398	27	0	0	0
1993	916	1	47	274	548	40	5	1	0
1994	622	0	20	192	383	24	3	0	0
1995	678	0	17	188	438	26	6	2	1
1996	789	0	8	203	543	32	2	1	0
1997	1019	13	44	388	533	84	6	1	0
1998	1024	2	11	453	532	21	5	0	0
1999	1099	1	12	542	527	11	4	2	0
2000	1052	9	28	463	531	18	2	1	0
2001	1344	9	8	704	585	32	6	0	0
2002	1688	0	4	880	760	40	4	0	0
2003	1323	0	5	728	568	18	3	1	0
2004	1346	0	2	669	639	33	3	0	0
2005	1210	0	1	678	514	17	0	0	0
2006	1356	0	0	792	544	19	1	0	0
2007	1528	0	1	728	764	33	2	0	0
2008	1958	0	7	1154	780	15	2	0	0
2009	2301	0	5	1648	610	37	1	0	0
2010	3462	0	23	2454	954	27	0	1	0
2011	4272	0	44	3357	839	27	5	0	0
2012	5244	1	21	4106	1054	50	10	2	0
2013	5361	0	57	4221	1046	33	4	0	0
2014	7608	1	238	6365	954	42	7	1	0
2015	10946	1	251	9056	1605	30	8	0	0
2016	15547	0	557	13501	1453	29	7	0	0
2017	26564	0	470	21628	4383	79	2	1	1
2018	30407	0	1584	25657	3122	41	2	1	0
2019	26444	0	308	23004	3087	40	2	0	0

\*Magnitud no calculable: en algunos eventos sísmicos localizados (en general, de magnitud pequeña), no es posible establecer con precisión la magnitud con los datos disponibles hasta el momento

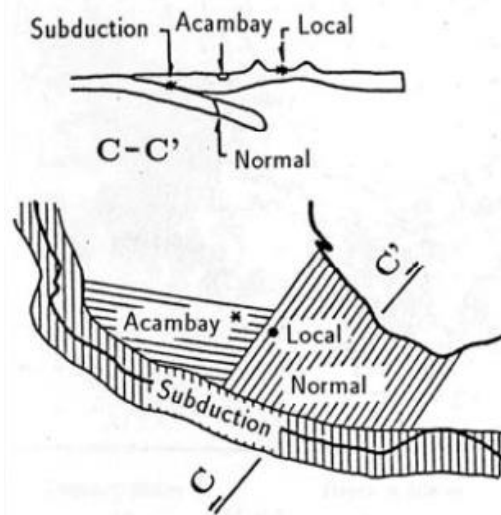
### 2.1.1 Sismicidad en la Ciudad de México

México se encuentra en una zona privilegiada en el planeta que le ha dado una gran biodiversidad, pero su posición geográfica lo coloca en una zona sísmica de mucho movimiento, razón por la que tiembla tanto. Según el Servicio Sismológico Nacional, en esta parte del mundo interactúan cinco placas tectónicas en total: la de Norteamérica, Cocos, Pacífico, Rivera y Caribe (Servicio Sismológico Nacional, 2020).

La CDMX ha sido afectada por sismos de muchos tipos e intensidades diversas. Las principales fuentes sísmicas que la afectan pueden clasificarse en cuatro grupos (véase Figura 2.2) (Rosenblueth et al., 1987):



1. Temblores locales ( $M \leq 5.5$ ), originados dentro o cerca de la cuenca
2. Temblores tipo Acambay ( $M \leq 7.0$ ), que se originan en el resto de la placa de Norteamérica
3. Temblores de profundidad intermedia de falla normal, causados por rompimientos de la placa de Cocos ya subducida, pudiendo llegar hasta  $M=6.5$  debajo del valle de México y,
4. Temblores de subducción ( $M \leq 8.2$ ).



**Figura 2.2 Tipos de Sismo que Afectan a la Ciudad de México (Reinoso, 2007)**

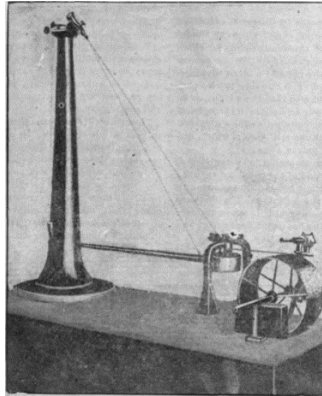
Pese a su gran distancia epicentral (280 a 600 km), la ciudad es particularmente vulnerable ante sismos de subducción porque el tipo de ondas que llegan son ricas en periodos largos que sufren menos atenuación y experimentan gran amplificación al atravesar las arcillas del lago. Por ello, prácticamente cualquier sismo grande que ocurra en la zona de subducción, desde Jalisco hasta Oaxaca, representa un peligro para las estructuras erigidas en la zona lacustre de la ciudad. Aunque estos sismos sean más conocidos y estudiados, debemos estar preparados para cualquier tipo de terremoto ya que, por ejemplo, un sismo local podría provocar daños en la zona de lomas y no en la zona de lago (Reinoso, 2007).

### 2.1.2 Contexto Histórico

Durante la época prehispánica las principales fuentes de información fueron los códices. El sismo más relevante reportado para esta época ocurrió en 1475 (año 9 ácatl) aparentemente de origen local en donde "los cerros se desgajaron y las casas quedaron aplastadas". Durante la época colonial el número de fuentes aumenta con las crónicas y los periódicos. Se tiene evidencia histórica de fuertes sismos ocurridos en las costas de Jalisco y Colima (1611), en Oaxaca (1768) y en Guerrero (1776 y 1787). Ya para el siglo XIX las referencias a sismos son muchas y detalladas, lo que ha permitido ubicar la zona epicentral y el origen de al menos 23 sismos severos de  $M \geq 7.0$  (Singh y Suárez, 1987). Algunos de estos sismos ocurren en Oaxaca (1800), norte de Michoacán de falla normal (1858,  $M=7.5$ ) y de subducción en Guerrero (1845,  $M=7.9$ ).

El surgimiento de los sismógrafos en el siglo XX permite calcular con mejor precisión los epicentros de los temblores (véase Figura 2.3). En este siglo han ocurrido más de 40 sismos de  $7.0 \geq M \geq 7.9$ , y seis con  $M \geq 8.0$  (Singh y Suárez, 1987) la mayor parte de ellos originados en las costas del pacífico y en algún grado se han sentido en la Ciudad de México. A principios de siglo la ciudad se ve afectada por varios sismos de subducción como los de Guerrero (1907,  $M=7.9$ ; 1909,  $M=7.5$ ), que causan daños en el centro

de la ciudad. En 1912 ocurre el temblor de Acambay ( $M=7.0$ ) que no provoca daños importantes, pero deja el precedente de que puede haber sismos grandes a distancias epicentrales pequeñas (80 km). En 1932 se registra el sismo más grande del siglo en México ( $M=8.2$ ), originándose en las costas de Jalisco sin producir grandes daños a la capital del país.



**Figura 2.3 Sismógrafo del Inicio del Siglo XX (B LopezCotelo, 2011)**

A consecuencia de los daños provocados por el sismo de Michoacán de 1941 ( $M=7.7$ ), en el reglamento de 1942 se incluye el diseño sísmico de estructuras. Los edificios en la ciudad habían resistido con éxito el gran temblor de 1932 pero entonces se contaba con inmuebles de menos de cuatro niveles con estructuración conservadora.

El sismo de Guerrero de 1957 ( $M=7.5$ ) es el que impulsa los estudios sobre el comportamiento sísmico del valle por los daños que causó. Las estructuras que surgieron a partir del sismo de 1941 requerían mejores diseños y conocimientos sobre las propiedades de los materiales y los suelos. Por ello, en el nuevo reglamento se incluye, entre otras innovaciones, la microzonación de la ciudad atendiendo a las características del subsuelo. Esta microzonación tuvo sus orígenes en el estudio del problema de hundimientos y se incorpora al problema sísmico al observarse la estrecha correlación entre daño estructural y composición del subsuelo.

En 1979 ocurre otro sismo en las costas de Guerrero (Petatlán,  $M=7.6$ ) que produce algunos daños en la colonia Roma y derriba la Universidad Iberoamericana. Este último colapso se atribuyó, en ese momento, a fallas en el diseño y construcción, y nunca se pensó que los efectos de sitio hubieran provocado fuerzas tales que se sobrepasaran las normas de diseño. Pero son los sismos de 1985 ( $M=8.1$  y  $7.6$ ) originados en las costas de Michoacán los que provocan daño y destrucción sin precedente. Mueren más de cinco mil personas y se dañan más de dos mil edificios.

El último sismo que causó daños considerables fue el de 19 de septiembre de 2017 ( $M=7.1$ ) cuyo epicentro fue en el límite de Puebla y Morelos, doce kilómetros al sureste de Axochiapan, y a 120 kilómetros de la Ciudad de México. Debido a este sismo se evidenció la baja calidad constructiva y la falta de aplicación del reglamento en varias estructuras de la ciudad.

Estos sismos dejan grandes lecciones sobre diseño de cimentaciones y edificios y sobre amplificación sísmica en depósitos lacustres (Reinoso, 2007).

## 2.2 LA CIUDAD DE MÉXICO EN ZONAS

Después del gran terremoto de 1985 ( $M=8.1$ ), se publicaron trabajos donde se estimaron periodos dominantes del suelo ( $T_s$ ) para la Ciudad de México, usando registros de microtremores<sup>2</sup> y movimientos fuertes. Estos datos fueron la base para generar el mapa de isoperiodos contenido en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTC-DS) del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF, 2004).

Una de las características de los suelos es su periodo dominante que no varía con el tiempo, por ello, es importante incluir los mapas de estos periodos dentro de las NTC-DS.

En las normas de 2004 aparece el primer mapa de isoperiodos para la CDMX, también conocido como el mapa de zonificación sísmica. La importancia de estos mapas radica en la prevención para que los periodos de las estructuras no coincidan con los periodos dominantes del suelo, evitando así la resonancia y el daño de las construcciones.

El mapa de 2004 está dividido en tres zonas: La primera (llamada zona de lomas) presenta periodos menores a 0.5s, la segunda (llamada zona de transición) se encuentra entre los periodos de 0.5 a 1.0s, y la tercera (llamada zona de lago) corresponde a periodos mayores a 1.0s. La zona del lago está dividida en otras 4 subzonas (IIIa, IIIb, IIIc, IIId) (ver Figura 2.4).

En 2012, a solicitud de la Coordinación Técnica de la Secretaría de Obras y Servicios del Gobierno del DF, se desarrolló una actualización del mapa de isoperiodos, dichos estudios se incorporaron a las Nuevas Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México (RCCDMX) publicado el 15 de diciembre de 2017. Esta publicación tiene antecedentes en la norma de 2004 donde se presenta, además, un mapa de zonificación geotécnica que no tuvo cambios notables comparándolo con el de 2017 (Lermo et al., 2019).

### 2.2.1 Zonas con bajo riesgo sísmico – Lomas

Formadas por rocas o suelos generalmente firmes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre, pero en los que pueden existir, superficialmente o intercalados, depósitos arenosos en estado suelto o cohesivos relativamente blandos. En esta zona, es frecuente la presencia de oquedades en rocas, de cavernas y túneles excavados en suelos para explotar minas de arena y de rellenos artificiales no controlados (Gobierno de la Ciudad de México, 2017). En la Figura 2.5 puede notarse como el sismo del año 1985 afectó mínimamente a la Zona I y a su vez muy poca infraestructura resultó dañada por el mismo. De igual manera en la Figura 2.6 se puede observar como el sismo del 19 de septiembre de 2017 causó afectaciones mínimas en esta zona y los inmuebles colapsados fueron nulos, sin embargo en algunos casos donde sí hubo colapsos, estos inmuebles resultaron estar entra la zona de lomas y de transición.

---

<sup>2</sup> Microtremor: vibraciones en la superficie debidas a la incidencia oblicua de ondas de cuerpo que se propagan en todas direcciones con la misma energía (Flores-Estrella et al., 2004)

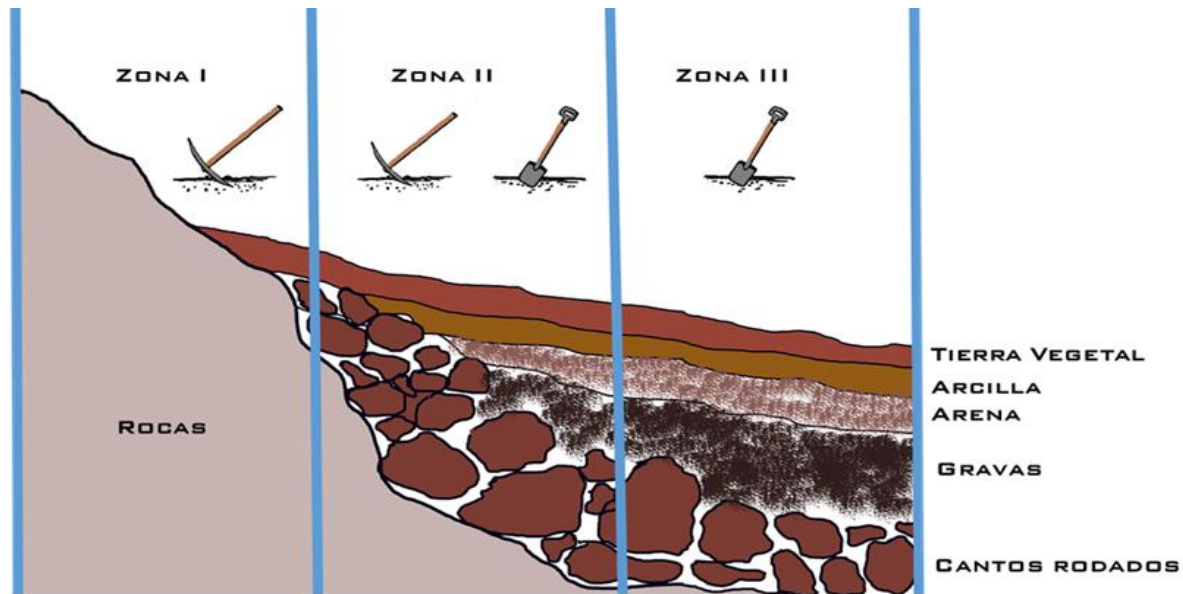


Figura 2.4 Características del suelo en cada zona sísmica de la CDMX (BYOARQ, 2018)

### 2.2.2 Zonas con mediano riesgo sísmico – Transición

En esta zona los depósitos profundos se encuentran a 20 m de profundidad, o menos, y que está constituida predominantemente por estratos arenosos y limo arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre; el espesor de éstas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros (Gobierno de la Ciudad de México, 2017). En la Figura 2.5 puede observarse como la Zona II perteneció -durante el sismo de 1985- a una de las zonas que resultaron mayormente afectadas y, a su vez, que una parte considerable de la infraestructura dañada durante este sismo se encontraba en esta. Por otro lado en la Figura 2.6 se vuelve a observar que la Zona II -nuevamente- resultó ser durante el sismo del 19 de septiembre de 2017 una de las zonas con mayor afectación y de igual manera que en el caso de 1985, en esta zona se concentraron varios de los inmuebles colapsados durante este evento.

### 2.2.3 Zonas con alto riesgo sísmico – Lacustre

Esta zona se encuentra integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son en general medianamente compactas a muy compactas y de espesor variable de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50 m (Gobierno de la Ciudad de México, 2017). En la Figura 2.5 se muestra una evidente peculiaridad de la zona, al ser esta, la zona donde hubo mayor afectación por el sismo de 1985 y, de igual manera, la zona con la mayor cantidad de infraestructura dañada. Del mismo modo y como puede observarse en la Figura 2.6 se repitió que la Zona III fue la más afectada y con más inmuebles colapsados durante el sismo de 2019.

Por las razones descritas en los anteriores 3 apartados y debido a la relevancia sísmica que tiene la Zona III respecto al resto de las zonas, se optó por enfocar la presente tesis a estudios y modelación en la zona

lacustre con el fin de brindar más herramientas de seguridad estructural y prevención de riesgos en esta parte de la Ciudad.

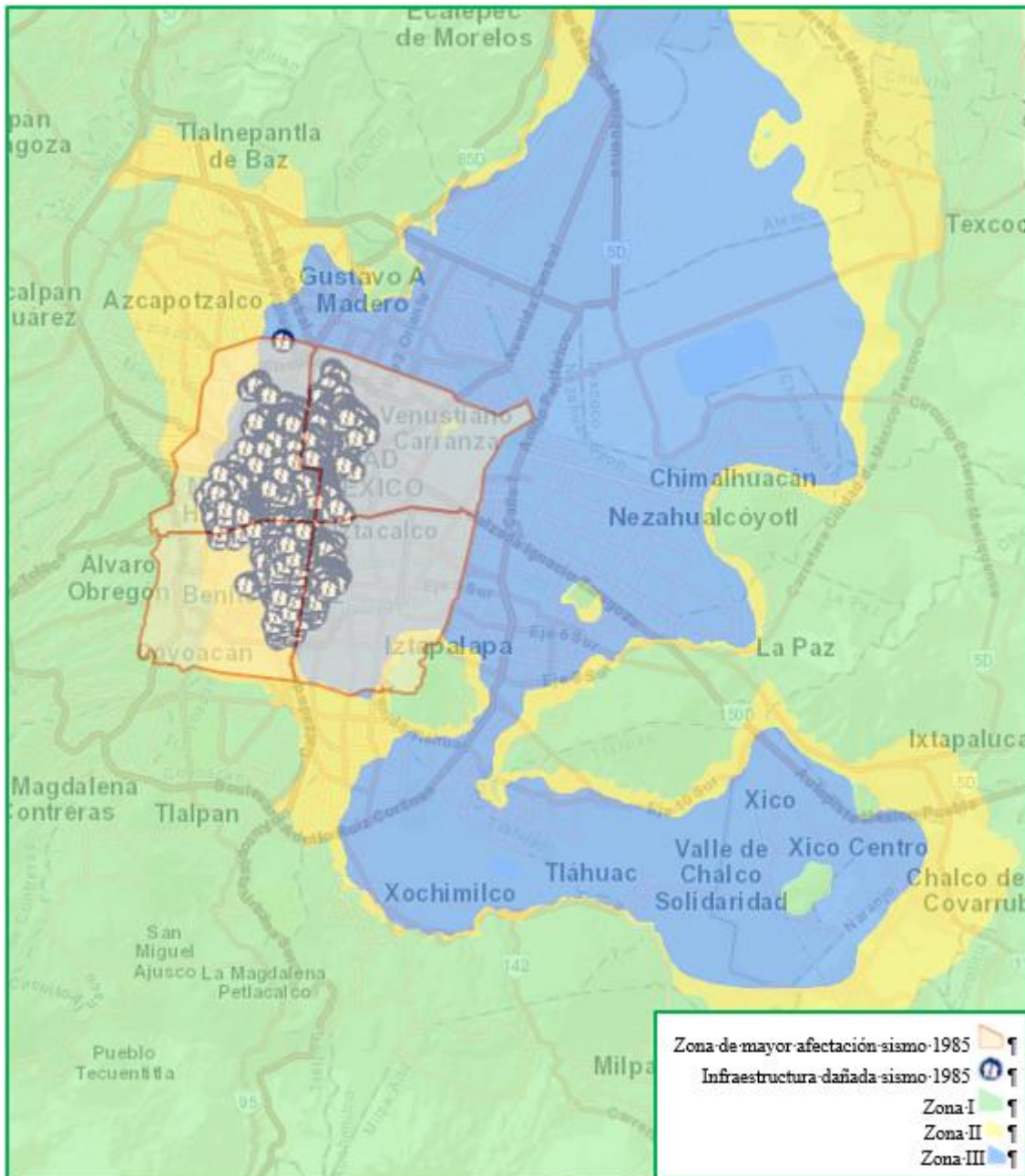


Figura 2.5 Zonificación de la CDMX - Zonas de mayor afectación e inmuebles colapsados por el sismo de 1985 (SGIRPC, 2017)

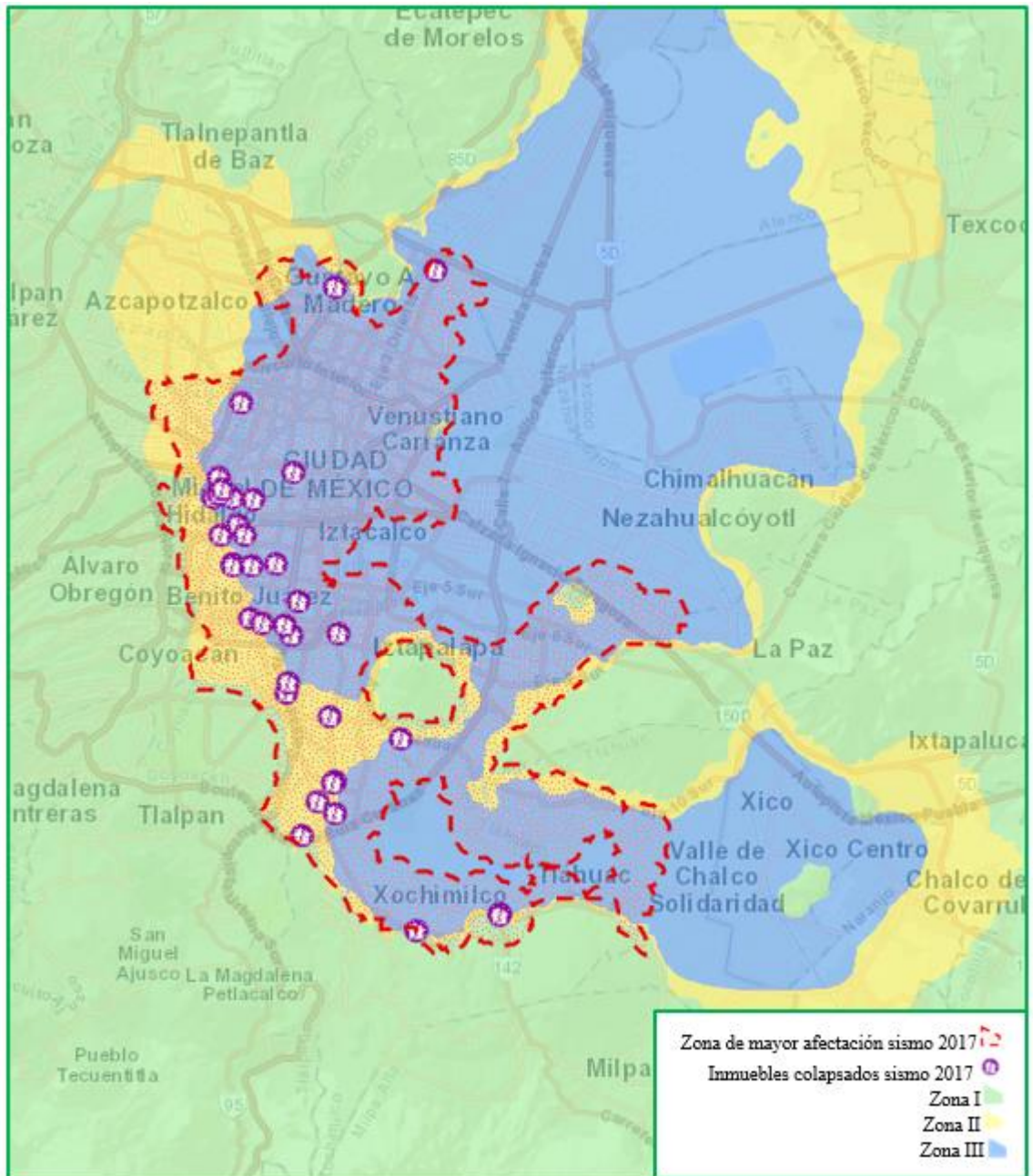


Figura 2.6 Zonificación de la CDMX - Zonas de mayor afectación e inmuebles colapsados por el sismo de 2017 (SGIRPC, 2017)

## 2.3 VIVIENDA VERTICAL

La reestructuración urbana en la Ciudad de México desde fines de la década de 1980 ha dado lugar a diversos procesos asociados con la gentrificación, apoyada en la gestión urbana empresarialista, la cual ha facilitado la realización de megaproyectos inmobiliarios, la revitalización de barrios urbanos, la fragmentación del tejido social y el desplazamiento de población residente, trabajadora y de algunas actividades tradicionales en aquellos espacios urbanos que han sido revalorizados (Olivera & Delgadillo, 2014). Uno de los principales proyectos de construcción ha sido la vivienda vertical, logrando alojar a los diversos tipos de familia existentes en un área de  $30 m^2$  en adelante. Debido a su notable presencia dentro de la ciudad, resultan ser demasiados los edificios destinados a vivienda los cuales generalmente son afectados por sismos.

### 2.3.1 Asentamientos verticales en la Ciudad de México – Contexto Histórico

La manera de vivir en la CDMX ha cambiado de generación en generación después de la revolución – aproximadamente durante los años 20´s- la sociedad mexicana buscaba progresar y una de las principales vertientes de este progreso fue la vivienda. Conforme transcurrieron los años, distintos fueron los detonadores que provocaron el rápido crecimiento de la población en México y debido a este crecimiento fue necesaria la implementación de vivienda más compacta, donde se pudiera albergar muchas familias, es por eso que se considera importante enlistar a los acontecimientos más importantes que detonaron el desarrollo de la vivienda vertical en la Ciudad de México, en la Figura 2.7 **Error! Reference source not found.** se ilustran estos hechos.

### 2.3.2 Época Actual

En los últimos años de la década pasada el desarrollo de la vivienda vertical se ha visto concentrado en apenas seis delegaciones: Álvaro Obregón, Benito Juárez, Cuauhtémoc, Miguel Hidalgo, Azcapotzalco e Iztacalco. En conjunto, concentran el 64% de la construcción de vivienda entre 2013 y 2017, lo cual ha incrementado su nivel de actividad económica (CANADEVI & Analítica Inmobiliaria, 2019). Sin embargo, debido al acelerado crecimiento de la ciudad, esto resulta ser insuficiente, por lo cual se esperaría un desarrollo aún mayor de vivienda vertical en los próximos años.

Se desarrollan las bases del estados posrevolucionario mexicano, se busca llevar a cabo las aspiraciones de una sociedad con deseos de progreso y la atención a las necesidades más elementales (vivienda) entre los sectores populares.(Sánchez, 2009)



**Mural de José Clemente Orozco(Clemente Orozco, 1926)**

1920-1930

1938

La Unión de Arquitectos Socialistas "La Ciudad Obrera" localizada al noroestes de la CDMX entre Azcapotzalco y Peralvillo. Concibiéndose como un conjunto que se iría construyendo a abase de cuarteles modulares en hilera y paralelo a una zona de cultivos. (Sánchez, 2009)



**Proyecto de Planificación de las Zonas de Habitación y Cívica de la Ciudad Obrera(INFONAVIT, 1988)**

Hannes Meyer colabora en el diseño y desarrollo de la Colonia Obrera de las Lomas de Becerra, para ser ubicado en Santa Fe. (Sánchez, 2009)



**Plano de Conjunto Colonia Obrera(dearq, 2013)**

1942

1947-1949

Construcción del multifamiliar Miguel Alemán. Este conjunto fue el primero en aglutinar mil 080 departamentos. consolidar la densidad y diversidad habitacional, apostar por una supermanzana, impulsar mobiliario urbano moderno. incorporar arte plástico y configurar una nueva centralidad urbana. (Sánchez, 2009)



**Multifamiliar Miguel Alemán(Arau, 2017)**

Creación de la U.H. Esperanza y la U.V. Modelo. (Sánchez, 2009)



**Unidad Habitacional Esperanza(INFONAVIT, 1988)**

1949

1972

Creación del INFONAVIT.(INFONAVIT, 2019)



**Logo INFONAVIT (INFONAVIT, 2019)**

Los años setenta se caracterizaron por una crisis de legitimidad política debido a demandas del movimiento obrero en un entorno de altas tasas de crecimiento de la población urbana 58.7% y de desinterés privado por invertir en vivienda social. Ante estos hechos, la respuesta gubernamental consistió en fortalecer su papel promotor, al crear los fondos nacionales para la vivienda de los trabajadores.(INFONAVIT, 2019)

1973-1988

1989

Apogeo de las empresas desarrolladoras de vivienda a partir de 1989 (Sánchez, 2009).



**Casas Geo (Staff, 2019)**

Los créditos para adquirir una vivienda aumentaron considerablemente hasta alcanzar la cifra de 250,000. (INFONAVIT, 2019)



**Aumento de los Créditos Otorgados por el INFONAVIT (Broker, 2019)**

2000



**Figura 2.7 Línea del Tiempo del Desarrollo de Vivienda Vertical en México**



## 2.4 IDENTIFICACIÓN Y DELIMITACIÓN DE VIVIENDA VERTICAL EN ZONAS DE RIESGO

Para identificar la vivienda vertical existente en la CDMX se recurrió al mapa mostrado en la Figura 2.8 en donde se muestran las delegaciones que se encuentra dentro de la zona III de la Ciudad. Después se prosiguió a localizar estas delegaciones en el “Sistema Abierto de Información Geográfica (SIGCDMX)”. Derivado de esta investigación se realizó la Tabla 2.2 donde se muestran los edificios de 5 a 10 y de 10 a 15 pisos, existentes en la Ciudad de México.



**Figura 2.8 Distribución de las Delegaciones en Zonas Sísmicas de la CDMX (National Geographic, 2018)**

**Tabla 2.2 Edificaciones de 5 a 10 y de 10 a 15 pisos en zona III de la CDMX**

DELEGACIÓN	PISOS		TOTALES
	5-10	10-15	
Cuauhtémoc	46,774	46,113	92,887
Gustavo A. Madero	8,130	1,028	9,158
Iztacalco	17,661	11,528	29,189
Tláhuac	15,684	461	16,145
Venustiano Carranza	11,654	8,055	19,709
Xochimilco	7,125	60	7,185

De la Tabla 2.2 puede observarse como los edificios entre 5-10 y 10-15 pisos representan un gran porcentaje de los edificios destinados a uso habitacional y habitacional/comercial en Zona III de la CDMX, por lo tanto, para los análisis que se realizarán a lo largo de esta tesis se utilizarán edificaciones con características similares.

### 2.4.1 Vulnerabilidad Sísmica

La vulnerabilidad sísmica de una estructura, grupo de estructuras o de una zona urbana completa, se define como su predisposición intrínseca a sufrir daño ante la ocurrencia de un movimiento sísmico y está asociada directamente con sus características físicas y estructurales de diseño (Bozzo & Barbat, 2000).

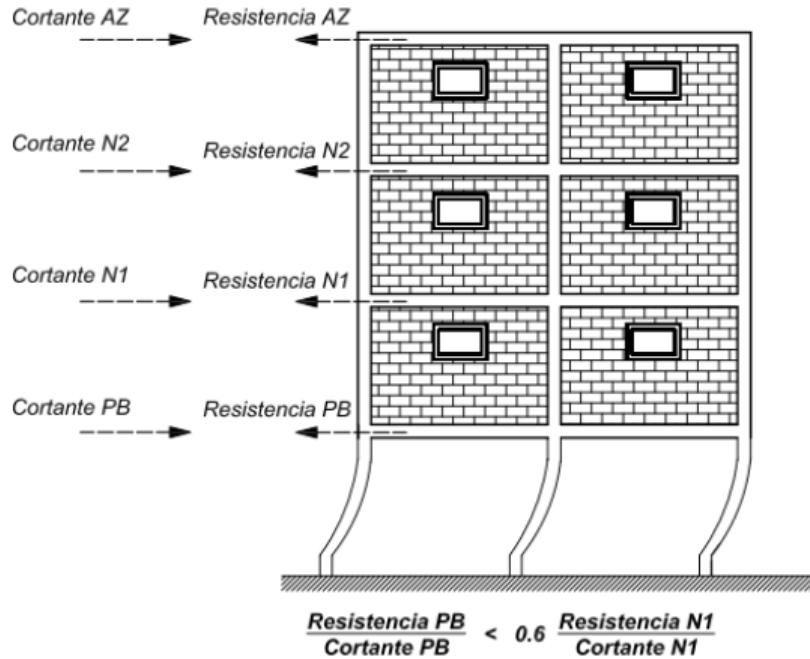
El concepto de vulnerabilidad sísmica es indispensable en estudios sobre riesgo sísmico y para la mitigación de desastres por terremotos. Se entiende por riesgo sísmico, el grado de pérdidas esperadas que sufren las estructuras durante el lapso que permanecen expuestas a la acción sísmica. A dicho lapso se le denomina período de exposición o período de vida útil de la estructura. Por otra parte, la mitigación de los desastres, en el ámbito de la ingeniería, corresponde a la totalidad de las acciones que tienen como objetivo la mejora del comportamiento sísmico de los edificios de una zona, a fin de reducir los costes de los daños esperados durante el terremoto (Bozzo & Barbat, 2000). Así, es evidente que, para mitigar el riesgo sísmico de una zona, es necesario disminuir la amenaza, la vulnerabilidad y el costo de reparación de las estructuras afectadas. El conocimiento adecuado de la amenaza sísmica existente permite definir tanto la acción que debe considerarse en el diseño de nuevas estructuras como el sitio donde pueden ser construidas, de tal forma que las condiciones de los emplazamientos sean óptimas, esto es: alejados de las fallas, evitando los rellenos, los lugares con posibles asentamientos o deslizamientos y los de alto potencial de licuefacción. Sin embargo, poco puede hacerse para reducir la amenaza a la que están expuestas las estructuras existentes, por lo tanto, si se desea disminuir el riesgo, se requiere una intervención directa sobre la vulnerabilidad. El conocimiento del comportamiento sísmico de las estructuras permite definir los mecanismos y acciones de refuerzo requeridos para la reducción de los efectos provocados por los movimientos del terreno.

## 2.5 PLANTA BAJA DÉBIL

### 2.5.1 Definición

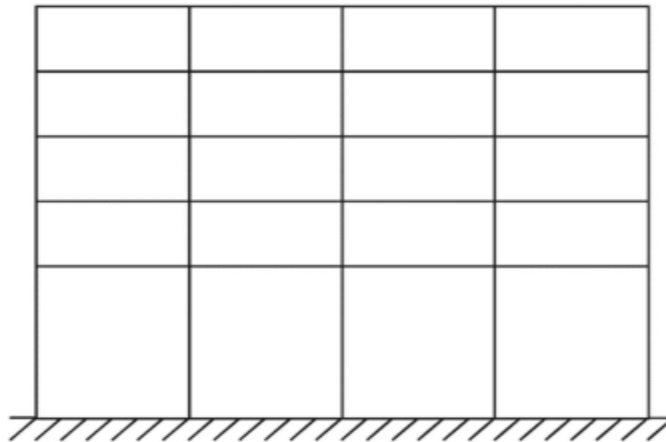
De acuerdo con diversas fuentes la PBD puede definirse de la siguiente manera:

- I. Si en un edificio el cociente de la capacidad resistente entre la fuerza cortante de diseño para el primer entrepiso es menor que 60 por ciento del mismo cociente para el segundo entrepiso y para más de la mitad de los entrepisos restantes, se considerará que el edificio cae en el caso denominado “de planta baja débil”. Dado que, durante la acción de un sismo, el piso más débil será el más dañado estructuralmente, comprometiendo la estabilidad de los pisos superiores a este. Cuando esto sucede en la planta baja, ésta toma la mayoría de la deformación y por lo tanto del daño que presentaría todo el edificio (Figura 2.9), ya que, al ser menos rígida y/o resistente, se desplaza mucho más de lo que fue considerado en el análisis, modificando totalmente la forma en que se deforma el edificio, comprometiendo la seguridad de todo edificio (PAOT, 2019).



**Figura 2.9 Condición de PBD (PAOT, 2019)**

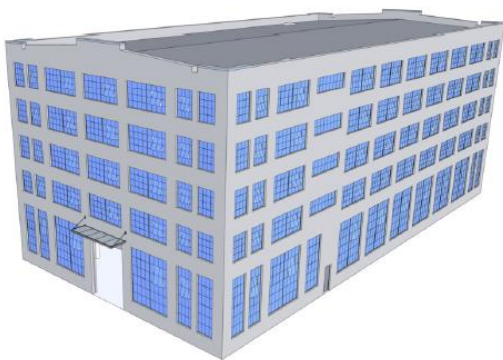
- II. La rigidez del sistema de resistencia sísmica en cualquier piso no es menor al 70% de la rigidez del sistema de resistencia sísmica del piso posterior o, no es menor al 80% del promedio de la rigidez del sistema de resistencia sísmica de los tres pisos posteriores. Comúnmente esta condición se presenta en edificios cuyo uso -en la planta baja- es comercial ya que cuentan con grandes exhibidores en lugar de muros. También puede presentarse en hoteles u oficinas con una planta baja particularmente alta. En la Figura 2.10 se presenta un ejemplo de una planta baja alta (ASCE, 2017).



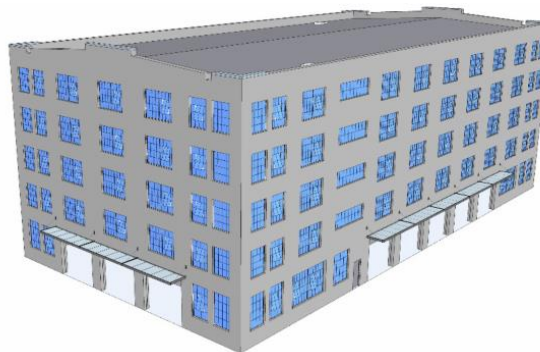
**Figura 2.10 Planta Baja Débil "Alta"(ASCE, 2017)**

- III. La planta baja débil (PBD) es un mal muy común en las estructuras de la Ciudad de México, dado que arquitectos e ingenieros buscan optimizar el espacio destinado para estacionamientos

en los edificios. Esta patología es un efecto generado por la ausencia de muros en la planta baja de una edificación en relación con los pisos superiores. También puede presentarse cuando la planta baja tiene una altura mayor que el resto de los pisos superiores debido al uso comercial (véase **Error! Reference source not found.**) cuando una estructura presenta esta patología, se espera que ante fuerzas laterales los desplazamientos que deberían ser distribuidos en toda la altura del edificio sean únicamente absorbidos por la planta baja, misma que se dañará en exceso y compromete la estabilidad de toda la edificación (Buendía & Reinoso, 2019).



a) Ilustración de edificio con PBD debido a variación en la altura de entrespiso



b) Ilustración de edificio con PBD por grandes aberturas

**Figura 2.11 Ejemplos conceptuales de los casos más comunes donde se puede presentar un entrespiso débil en la planta baja (FEMA, 2015).**

### 2.5.2 Ejemplos en la Ciudad de México

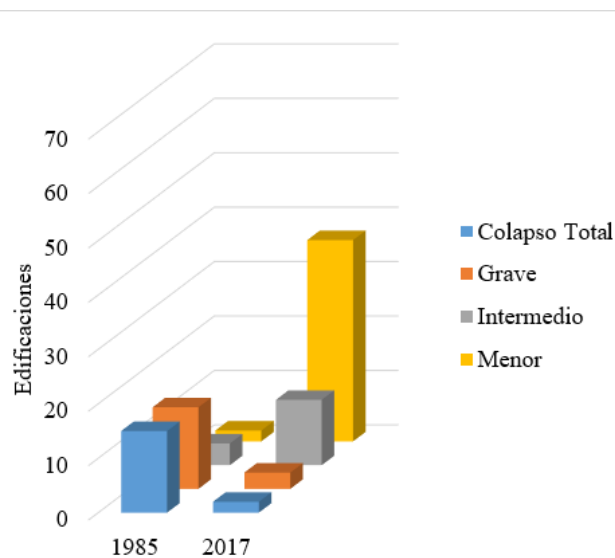
En el año de 2019, la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica A.C realizó el informe llamado “Análisis de los Daños en Viviendas y Edificios Comerciales Durante la Ocurrencia del Sismo del 19 de septiembre de 2017”. De acuerdo con este informe, se determinó que las edificaciones de destinadas a vivienda, con la condición de PBD, resultaron ser las más afectadas durante el sismo en cuestión También se determinó que este sismo afectó principalmente a las edificaciones de baja a mediana altura (1 a 10 niveles).

Por otro lado, encontraron que los tipos estructurales que resultaron con daños fueron los que se encontraban compuestos con muros, debido a la poca ductilidad con la que cuentan estas estructuras. Sin embargo, se pudo observar que, desde el punto de vista de los colapsos, estructuras construidas con losas planas en la CDMX y estructuras de mampostería sin confinar, fueron las más afectadas.

Finalmente, y una de las principales razones por las cuales en el capítulo 3 se definirán estructuras tipo con características similares a las de las edificaciones construidas antes del año 1985 es que -de acuerdo con el informe- para el caso de la CDMX la mayoría de las estructuras dañadas fueron construidas entre los años 60's y 80's, siendo las de los años 70's las que presentaron un mayor número de estructuras dañadas. Se pudo observar además que existieron algunos casos en que las estructuras fueron construidas después del sismo de 1985, y aun así resultaron dañadas lo que podría indicar errores durante su diseño y/o construcción (Buendía Sánchez & Reinoso Angulo, 2019).

El Instituto de Ingeniería de la UNAM elaboró una base de datos georreferenciada para los sismos más recientes y los de la última mitad del siglo pasado, esta base fue construida a partir de la consulta de diversas fuentes e instituciones, entre ellas, el Instituto de Seguridad de las Construcciones (ISC). Dentro de los campos de interés de esta base de datos se cuenta con la ubicación (coordenadas geográficas), la alcaldía, el año de construcción, número de niveles construidos, uso de suelo, tipo estructural, nivel de daño presentado durante el sismo, la existencia de patologías estructurales, las características dinámicas (las cuales definen la respuesta sísmica de la estructura) y la aceleración de diseño vigente durante la ocurrencia del sismo. En cuanto al número de registros, esta base cuenta con 2700 coordenadas correspondientes a edificios con variable nivel de daño. De estos, 74 corresponden al sismo de 1957, 71 al sismo de 1979, 344 al sismo de 1985 y 2232 al de 2017, siendo este último el mejor documentado. La diferencia en el número de registros para cada evento se debe a la intensidad de cada sismo, a la disponibilidad y acceso a la información durante y después de la ocurrencia del sismo. Espacialmente, la mayor cantidad de registros y también los de mayor daño, se concentra en las alcaldías Cuauhtémoc, Benito Juárez, Iztapalapa, Venustiano Carranza y Coyoacán. Otras alcaldías con registros de daños importantes son Miguel Hidalgo, Azcapotzalco, Gustavo A. Madero, Iztacalco, Tláhuac, Milpa Alta y Tlalpan. La mayor parte de las estructuras dañadas se encuentran en la Zona III (lacustre). Sin embargo, también existen registros aislados en la Zona I (lomas), aunque estos últimos corresponden principalmente a daños no estructurales.

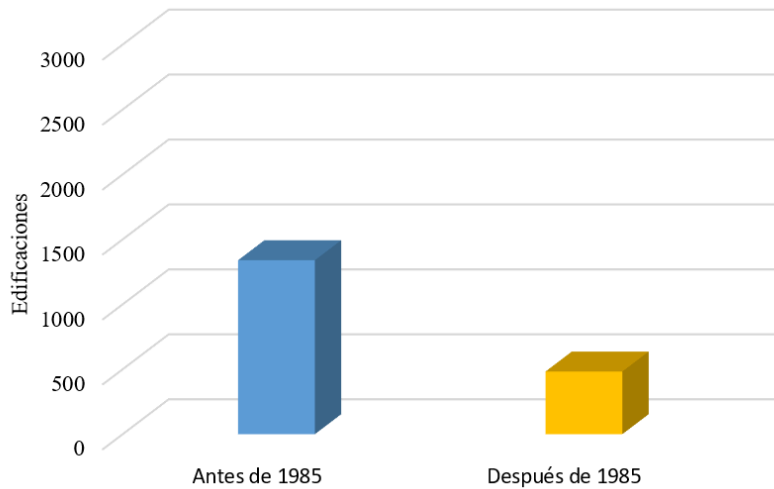
Con apoyo de esta base de datos fue posible realizar la Figura 2.12 donde se muestra el número de edificios que colapsaron o presentaron daños, de los cuales, se reportaron 17 casos de colapso, 15 en 1985 y 2 en 2017. A su vez, 15 y 3 edificios presentaron daños graves en orden cronológico de eventos. Si bien los daños graves/colapsos asociados a la PBD fueron más notorios en el evento más antiguo, los daños intermedios y menores fueron en 2017 con 49 de los 55 casos totales.



**Figura 2.12 Comparación de edificaciones con planta baja débil, afectadas por los sismos de 1985 y 2017**

Por otra parte, y con ayuda de una segunda base de datos elaborada por el Instituto de Ingeniería similar a la anterior donde se realizaron inspecciones piloto en el año 2018 a 3900 edificaciones que sufrieron distintos tipos de daño a causa del sismo del 19 de septiembre de 2017 fue posible realizar la siguiente figura donde se muestra el resultado de la inspección de edificaciones con posible PBD, obteniendo un

total de 1 821 estructuras, de las cuales 1 339 fueron construidas antes de 1985 y el resto de ellas después. Y donde, las edificaciones construidas pre y post- 1985 representan 17% y 6% respectivamente del total de edificaciones analizadas (véase Figura 2.13). Con lo cual, el modelar edificaciones con características de antes de 1985 resulta ser lo óptimo para poder analizar su posible comportamiento ya que son las que se encuentran en mayor riesgo.



**Figura 2.13 Edificaciones de más de 3 niveles inspeccionadas con posible con posible planta baja débil inspeccionadas**

Un ejemplo obvio de la PBD en la CDMX se muestra en la Figura 2.14. Esta edificación resultó gravemente dañada durante el sismo de 19 de septiembre de 2017 y por supuesto se volvió inhabitable. Así como esta, existieron muchas otras con el mismo destino y todo causado debido a la patología que atañe a esta tesis.



**Figura 2.14 Edificio con PBD en CDMX (OBRAS, 2017)**

Cabe mencionar que después de ocurrido el sismo que devastó una buena parte de la Ciudad, entraron en vigor en la Ciudad de México las Normas para la Rehabilitación Sísmica de Edificios de Concreto Dañados por el terremoto del 19 de septiembre de 2017 las cuales dictan que los edificios identificados

como de planta baja débil deberán ser corregidos, incluso los que no hayan sufrido daños estructurales graves.

## **2.6 ESTUDIOS PREVIOS DE PLANTA BAJA DÉBIL**

### **2.6.1 Estudios en el mundo**

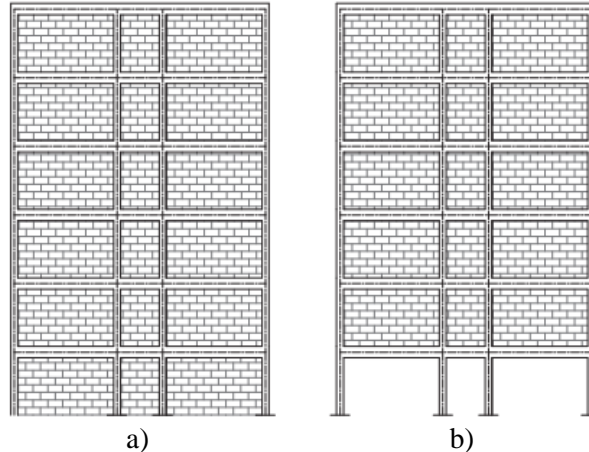
#### ***2.6.1.1 Efecto de los Muros no Estructurales en el Comportamiento de la PBD de Edificios Medianos de Concreto Reforzado***

Este estudio investiga el comportamiento de la PBD debido al aumento de altura en las plantas, a la falta de muros en el primer piso y a la existencia de ambos casos utilizando un análisis estático y dinámico no lineal para edificios medianos de concreto reforzado. Se evalúan las capacidades de desplazamiento a corto plazo, seguridad y la prevención de colapso debida a la respuesta y demandas de cada piso mediante modelos con características regulares con la condición de PBD. La PBD es evaluada de acuerdo con el cambio en la altura de las plantas y/o a la ausencia de muros en función de la capacidad de desplazamiento, al desplazamiento relativo y al comportamiento estructural.

De este estudio se concluye que, aunque se coloque acero de refuerzo en las edificaciones medianas este tiene un efecto limitado para resistir esfuerzos laterales. También que implementar muros no estructurales en la planta baja resulta ser más efectivo para resistir los esfuerzos laterales en edificios con un menor número de pisos y que en edificios con elementos estructurales con dimensiones más largas y reforzadas en edificios con mayor número de pisos disminuyen el efecto que podían llegar a tener los muros no estructurales en ellos. En general, el esfuerzo lateral de los edificios aumenta, y la capacidad de desplazamiento disminuye cuando los muros son colocados como muros de carga (Inel & Ozmen, 2008).

#### ***2.6.1.2 Factores que Influyen en el Costo de Reparación de Piso Débil en Edificaciones con Marcos de Concreto Reforzados y las Implicaciones de su Reacondicionamiento Sísmico***

En este estudio se examinan los factores que afectan los costos de reparación -después de la ocurrencia de grandes sismos- de edificaciones con marcos de concreto reforzado sin el típico detalle dúctil de las prácticas comunes de la construcción en Italia y otros lugares en el mundo durante los años 1950 y 1960. Dos configuraciones estructurales de marcos de concreto reforzado. Una con muros no estructurales y otra sin muros no estructurales en la planta baja del edificio fueron estudiadas numéricamente (Figura 2.15). Los resultados del análisis dinámico incremental (IDA- por sus siglas en inglés) confirmaron que las estructuras con muros no estructurales en todo el edificio, principalmente en la planta baja son más propensas a colapsar. Sin embargo, al realizar un estudio de estimación de pérdidas para diferentes escenarios, se demostró que las pérdidas más bajas esperadas fueron debidas a la reducción del daño en los componentes no estructurales de los niveles superiores, lo cual podría ser una ventaja de los edificios con pisos blandos siempre que la propensión al colapso sea reducida en el primer nivel.



**Figura 2.15 a) Edificio con muros no estructurales en toda su estructuración b) Edificio sin muros no estructurales en la planta baja (Agha Beigi et al., 2015)**

Además, se muestra que las pérdidas en edificios de pisos blandos se verán fuertemente afectadas por el valor de reparación de los componentes estructurales y no de los estructurales en el nivel de piso suave en relación a otros niveles y a la magnitud de los efectos P-Delta. Estas observaciones indican que una estrategia efectiva de reforzamiento, reduciría tanto las pérdidas monetarias como la probabilidad de colapso, y esto podría lograrse aumentando la capacidad de deformación al nivel del piso suave sin alterar el efecto aislante que el mecanismo de piso suave proporciona a los niveles superiores y sin ninguna otra intervención en los pisos superiores (Agha Beigi et al., 2015).

### **2.6.1.3 Programa Obligatorio de Reforzamiento Sísmico (San Francisco)**

Este programa consistió en realizar reforzamiento estructural a todas las edificaciones con entrepisos blandos para garantizar su uso después de un terremoto. Para su desarrollo, el gobierno de la ciudad de San Francisco se basó en el reporte emitido por el Departamento para la Inspección de Edificios (BDI por sus siglas en inglés) en el que se describe a los edificios que debían ser reforzados (edificios construidos con marcos de madera que cuenten con tres o más niveles, o bien que cuenten con dos niveles y un sótano o estén a desnivel, que posean cinco o más viviendas y cuya licencia de construcción se haya obtenido antes del primero de enero de 1978, año en que se reformó el código de construcción de la ciudad).

Derivado del análisis dirigido por el BDI se tomó del total de 4,400 edificios encontrados con piso blando a un subconjunto de ellos y se desarrolló el proyecto CAPPS (Plan de Acción Comunitaria para la Seguridad Sísmica) (ATC, 2010). El criterio de selección fue el porcentaje de espacio abierto en la primera planta de los edificios estructuralmente vulnerables (entrepisos blandos), se puede observar en la Figura 2.16 que se considera como espacio abierto a puertas, ventanas, portones para entradas y salida de autos, cortinas de negocios, entre otros.

De esta manera, se contabilizaron en el estudio los edificios que contaban con un porcentaje de espacio abierto mayor al 80% de un lado o mayor a 50% en dos. Dando un subconjunto de 2,800 edificios.





**Figura 2.16 Determinación del porcentaje del espacio abierto (ATC, 2010)**

## 2.6.2 Estudios en la Ciudad de México

### 2.6.2.1 *Condiciones de Irregularidad Estructural. Relaciones con los Daños Observados por el Terremoto en la Ciudad de México en 2017*

En este artículo, el autor documenta el comportamiento sísmico de estructuras irregulares – principalmente estructuras con pisos blandos y planta baja débil- con base en un universo de 2458 estructuras que sufrieron desde daños moderados hasta colapsos en la Ciudad de México durante el terremoto del 19 de septiembre de 2017. Este estudio está orientado conforme a los requisitos de diseño del código para irregularidades establecidas en el código sísmico de la Ciudad de México desde 1987 y las consideraciones especiales de diseño establecidas desde entonces y ligeramente modificadas en el código de 2004, el código vigente en el momento que el terremoto golpeó fue el de 2017. Con base en esta información actualizada, se confirma que el procedimiento establecido desde 1987 es útil para reducir la severidad de los daños en estructuras irregulares proyectadas según los códigos. Además, se hacen algunas recomendaciones para mejorar las definiciones de regularidad y fuertes irregularidades disponibles en los códigos sísmicos mexicanos en general (Tena-Colunga, 2021).

### 2.6.2.2 *El terremoto de México del 19 de septiembre de 1985: el comportamiento sísmico de los edificios con un primer piso débil*

Durante el terremoto de Michoacán del 19 de septiembre de 1985, el 8 por ciento de las edificaciones dañadas en el área de la Ciudad de México se caracterizaron por un primer piso mucho más débil que los superiores. Aunque se reconoce que estas fallas pudieron haber resultado de la combinación de varias características, en este artículo se estudia la posible influencia de la discontinuidad de resistencia lateral en la demanda de ductilidad en el primer piso, y se trata de comprender el comportamiento de este tipo de estructuras bajo las acciones del componente este-oeste del récord de aceleración más alto obtenido en suelo blando de la Ciudad de México durante el terremoto de 1985. En este artículo se presenta un estudio paramétrico para edificios de cinco y doce pisos con un primer piso débil. Las paredes de relleno en los pisos superiores eran frágiles en algunos casos y dúctiles en otros. Para ciertos casos, los resultados mostraron la existencia de un rango de valores en la relación de la resistencia lateral sísmica de los pisos superiores a la del piso más bajo para la cual, las demandas de ductilidad en el piso más bajo pueden ser considerablemente más altas que para otros intervalos. Además, muestra que la capacidad de absorción

de las paredes dúctiles juega un papel importante en las demandas de ductilidad de desplazamiento del primer piso (Ruiz & Diederich, 1989).

### 2.6.2.3 Modelos Numéricos de Edificios con PBD

Los modelos numéricos de edificios típicos fueron desarrollados Basados en diversas estadísticas. Las características de las estructuras fueron regidas por las geometrías más comunes de los edificios colapsados en México; marcos rígidos en ambas direcciones de análisis conformaron la planta baja y las fachadas posteriores fueron diseñadas con muros de mampostería confinados (veáse Figura 2.17).

Los marcos rígidos exteriores (perpendiculares a la calle) incluyeron muros de mampostería interna en todas las crujías para separar al edificio de la propiedad de los vecinos.

Finalmente, después de analizar la información de los edificios colapsados con PBD, fue evidente que la mayoría de los edificios afectados se tenían entre 4 y 8 pisos (Jara-Guerrero et al., 2020).



Figura 2.17 Muros de Mampostería Confinada (Jara-Guerrero et al., 2020)

### 2.6.2.4 Interpretación de los daños y colapsos en edificaciones observados en la Ciudad de México en el terremoto del 19 de septiembre 2017

En este trabajo se interpretan los daños y colapsos de edificaciones observados en el terremoto del 19 de septiembre 2017 en la Ciudad de México, los que ocurrieron en su mayoría en edificaciones a base de marcos que experimentaron el terremoto de 1985. Se encontró que las demandas espectrales para registros obtenidos en 1985 y 2017 son comparables, lo que sugiere explicar por qué llegaron a colapsos o daños severos en 2017 y no en 1985. Se calculan valores de un índice de daño propuesto,  $Id^3$ , para edificaciones considerando registros de 1985 y registros de 2017, así como para el efecto combinado de estos registros. Los resultados indican que los colapsos y daños observados en marcos en 2017, se explican considerando el efecto de daño por sismo acumulado. Y además se muestra la conveniencia del empleo de edificaciones con muros estructurales para reducir el potencial de daños o colapsos ante terremotos fuertes. Finalmente se dan recomendaciones de cambios en normativas de construcción en la Ciudad de México y en el país (Rodríguez, 2019).

En este trabajo se logró dar respuesta a las siguientes preguntas:

¿Por qué en el terremoto de 2017 ocurrieron colapsos o daños severos en edificaciones que ya habían experimentado daños durante el terremoto de 1985?

<sup>3</sup> Rodríguez (2015) ha propuesto el índice de daño,  $Id$ , donde  $Id = 1$  en el colapso y  $Id = 0$  para el caso sin daños.

Los resultados mostrados por Rodríguez (2019) indican que para una mejor interpretación de la vulnerabilidad de estructuras se debe considerar el efecto de daño acumulado cuando las estructuras experimentan más de un terremoto fuerte, como fue el caso de las edificaciones con colapsos o daños severos observados en la Ciudad de México en el terremoto de 2017. El Id empleado en este estudio, toma en cuenta el daño acumulado, y sus resultados son congruentes con los daños y colapsos observados en edificaciones que experimentaron en la Ciudad de México los terremotos de 1985 y 2017. Se debe tener en cuenta que el problema de la inseguridad de estas edificaciones se agrava con la insuficiente rigidez lateral que caracteriza a los sistemas estructurales a base de marcos, también por la existencia de irregularidades en ellas, como fueron los numerosos casos observados de edificaciones a base de marcos con “planta baja débil”, así como con el detallado de refuerzo en estas estructuras, el cual está por debajo de estándares internacionales de diseño en zonas sísmicas.

¿Son adecuadas las normativas para el diseño sísmico de nuevos edificios en la Ciudad de México y/o para la rehabilitación por sismo de edificios existentes?

Si consideramos que el terremoto del 19 de septiembre de 2017 tuvo una intensidad por debajo del sismo de diseño, los resultados encontrados en este trabajo indica la necesidad de cambios en la práctica de diseño por sismo en México para lograr un comportamiento aceptable de edificaciones en terremotos que ocurran en el futuro, así como para definir estrategias de rehabilitación sísmica de edificaciones. Es deseable que las normativas de diseño por sismo consideren el efecto de daño acumulado en edificaciones debido a terremotos; sin embargo, esto implica posibles modificaciones importantes en la práctica convencional de diseño sísmico que podrían requerir un tiempo considerable, por lo que al menos se debe considerar los siguientes cambios en el diseño sísmico en México, tanto para edificaciones nuevas, como para la rehabilitación de edificaciones dañadas en el terremoto de 2017.

Las edificaciones de concreto reforzado en zonas de mayor sismicidad tanto en la Ciudad de México, como en otras zonas sísmicas del país, se deberían diseñar con los requisitos de diseño por sismo correspondientes a elementos estructurales especiales especificados en el ACI 318. Esto implica que normativas de construcción, en la Ciudad de México y en el país, no deberían permitir en zonas sísmicas el empleo de estructuras con ductilidad limitada, como es el caso de estructuras diseñadas con  $Q=2$ , valor que típicamente se considera para el diseño sismorresistente de la mayoría de las edificaciones en México. Además, la normativa de diseño por sismo en la Ciudad de México debería limitar el empleo de edificaciones a base de marcos de concreto reforzado, y también esta normativa debería reconocer las ventajas del empleo de edificaciones con muros estructurales de concreto reforzado, como ocurre por ejemplo en la práctica de países con alta actividad sísmica, como son los casos de Japón y Chile (Rodríguez, 2019).



## CAPÍTULO 3

### DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

El presente capítulo muestra el proceso de diseño y elaboración de tres modelos de edificio tipo destinados a vivienda para familias de cuatro integrantes. A lo largo de este capítulo se determina cómo fue diseñada la planta arquitectónica de cada modelo, la planta estructural, las características de los elementos estructurales y la norma o manuales utilizados para su diseño. Posteriormente se explican los pasos de la evaluación de la planta baja débil en cada uno de estos modelos y los ordenamientos utilizados. También, se muestra la metodología desarrollada para la evaluación rápida de la planta baja débil en edificios de la Ciudad de México y cómo se utiliza la misma. Finalmente se muestra una propuesta de sello de peligro de colapso, mismo que será utilizado si se determina que la edificación evaluada con la metodología resultó tener planta baja débil.

#### 3.1 MODELADO DE EDIFICIOS TIPO

El desarrollo de la metodología para la evaluación rápida de la planta baja débil en la Ciudad de México se basa en el modelado de tres estructuras con una planta arquitectónica tipo, estas son de 5, 10 y 15 pisos, con el fin de abarcar un rango amplio del tipo de edificaciones existentes en la Ciudad de México y, que son destinadas a vivienda multifamiliar. Todas las estructuras modeladas cuentan con la misma planta arquitectónica tipo, la única diferencia entre cada edificio es el diseño de sus elementos estructurales, ya que el distinto número de pisos entre uno y otro, demanda un diseño en específico.

La principal característica de los 3 edificios modelados fue que todos ellos contarán con PBD en la dirección “X”, esto con el fin de evaluar su comportamiento sísmico y posteriormente conocer el comportamiento de ellos cuando no tuvieran PBD.

El primer paso del modelado consistió en la elaboración de un diseño arquitectónico, donde se definió la distribución de espacios, es decir, la ubicación de las diferentes habitaciones que un departamento comúnmente tiene. El segundo paso fue diseñar cada edificio con base en el reglamento de construcciones del Distrito Federal de 1976, esto incluye la obtención de las cargas y espectro de diseño del mismo reglamento, ya que los edificios para los cuales podrá ser funcional la metodología, serán aquellos construidos con este mismo ordenamiento y que a su vez tengan una estructuración a base de marcos y muros diafragma. Finalmente, el último paso fue el diseño de los elementos estructurales mediante el software ETABS. Conforme se avance dentro de este capítulo se explicará más a fondo, cómo fue desarrollado cada uno de estos pasos.

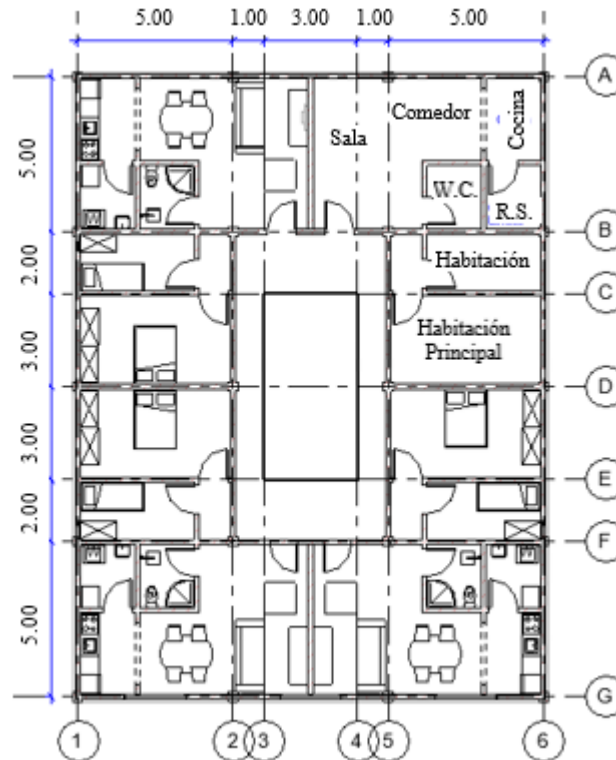
##### 3.1.1 Diseño Arquitectónico

Se desarrollaron dos plantas arquitectónicas, la de planta baja y la planta tipo de los departamentos. La principal condición para la distribución de espacios en los departamentos fue que estuvieran destinados a familias conformadas por aproximadamente cuatro integrantes, por lo tanto, se definieron las siguientes áreas:

- Sala
- Comedor

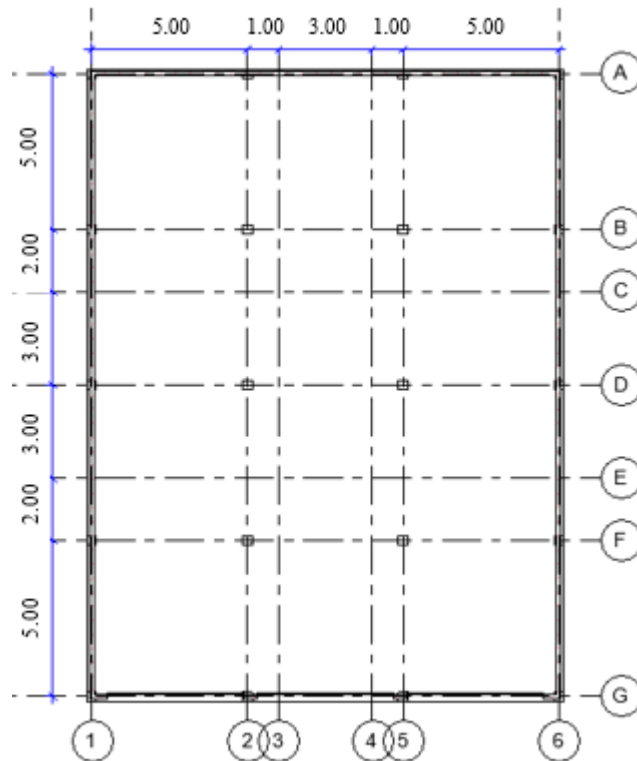
- Cocina
- Habitación principal
- Habitación secundaria
- Baño completo y,
- Cuarto de lavado

Con estas características, se obtuvo que cada departamento tendría un área total de 62.5 m<sup>2</sup> y que la distribución de espacios sería como se muestra en la Figura 3.1:



**Figura 3.1 Planta de departamentos tipo, cotas en metros**

Puede observarse en la Figura 3.1 que la planta tipo para departamentos cuenta con un total de 4 departamentos por piso, los cuales en conjunto miden un total de 15 m de frente por 20 m de fondo, entonces con estas características se procedió a diseñar la planta baja como se muestra en la Figura 3.2:



**Figura 3.2 Planta baja tipo**

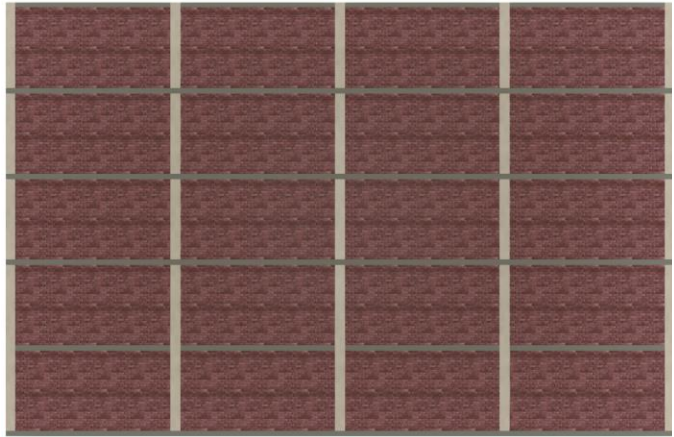
De acuerdo a la Figura 3.2, la planta baja tiene capacidad para albergar hasta 16 vehículos al mismo tiempo, sin embargo, esto puede cambiar conforme las dimensiones estructurales de las columnas varíen, ya que, por el momento, sólo se muestra una planta arquitectónica con columnas de 30 por 30 cm, posteriormente, cuando se diseñaron detalladamente estos elementos, el espacio disponible en planta baja se vio reducido en cada edificio.

#### **En la**

Figura 3.3 se muestra a la edificación desde distintos ángulos, donde puede observarse una planta baja débil muy desfavorable, al no contar con muros en la dirección “X” y en su reemplazo, sólo tener 3 portones de acceso y salida a la edificación. Cabe mencionar que en las figuras sólo se muestra al edificio de 5 pisos ya que el resto de edificios que se diseñaron son muy semejantes a este –arquitectónicamente hablando- la diferencia se encontrará en el número de pisos que hay entre ellos.



a) Vista frontal de la edificación



b) Vista lateral de la edificación



c) Vista 3D de la edificación

Figura 3.3 Vistas arquitectónicas de la edificación

### 3.1.2 Diseño de Edificios con Reglamento de Construcciones del Distrito Federal de 1976

Para la elaboración de los tres modelos se consideró inicialmente que fueran construcciones para uso habitacional, esta primera consideración resulta ser importante ya que a partir de ella es que se buscó dentro del reglamento de construcciones del Distrito Federal 1976 las cargas que se utilizaron en el



diseño. Se supuso una distribución homogénea de muros y de pendiente en azotea. La planta de cada edificio mide 15 (m) de frente por 20 (m) de largo como se mostró en la Figura 3.1. Cada edificación contó con dos tipos de espesor, el de la planta tipo y el de la azotea, cada uno de 15 y 12 (cm) respectivamente.

### 3.1.2.1 Cargas de Diseño

Para la obtención de este apartado, se recurrió a la tabla de “cargas vivas unitarias de diseño” que se encuentra dentro del reglamento de construcciones del Distrito Federal de 1976. Con base en ella fue posible realizar lo siguiente donde, las tablas Tabla 3.1, Tabla 3.2 y Tabla 3.3 forman parte del análisis de cargas para la planta tipo y las tablas Tabla 3.4, Tabla 3.5 y Tabla 3.6 forman parte del análisis de cargas para la azotea:

**Tabla 3.1 Cargas generales consideradas (planta tipo)**

Descripción	Carga (kg/m <sup>2</sup> )
Losa Maciza (h= 15cm)	360
Firme de Mortero (3cm)	63
Azulejo	15
Plafón de Yeso	30
Instalaciones	40
Adicional (Losa) por Reglamento	20
Adicional (Firme) por Reglamento	20
<b>CM TOTAL=</b>	<b>548</b>
<b>CM TOTAL (ETABS)=</b>	<b>188</b>

**Tabla 3.2 Cargas asignadas por reglamento (planta tipo)**

Descripción	Carga (kg/m <sup>2</sup> )
Carva Viva Media (W)	70
Carga Viva Instantánea (Wa)	90
Carga Viva Máxima (Wm)	151

**Tabla 3.3 Sumatoria de cargas (planta tipo)**

Descripción	Carga (kg/m <sup>2</sup> )
Pp + W	258
Pp + Wa	278
Pp + Wm	339.30

**Tabla 3.4 Cargas generales consideradas (azotea)**

Descripción	Carga (kg/m <sup>2</sup> )
Losa Maciza (h= 12cm)	288
Relleno para pendiente (2%)	150
Plafón de yeso	30
Instalaciones	10
Impermeabilizante	10
Tinaco	12.5
Adicional por Reglamento	20
<b>CM TOTAL=</b>	<b>520.50</b>
<b>CM TOTAL (ETABS)=</b>	<b>232.50</b>

**Tabla 3.5 Cargas asignadas por reglamento (azotea)**

Descripción	Carga (kg/m <sup>2</sup> )
Carva Viva Media (W)	15
Carga Viva Instantánea (Wa)	70
Carga Viva Máxima (Wm)	100

**Tabla 3.6 Sumatoria de cargas (azotea)**

Descripción	Carga (kg/m <sup>2</sup> )
Pp + W	247.5
Pp + Wa	302.5
Pp + Wm	332.5

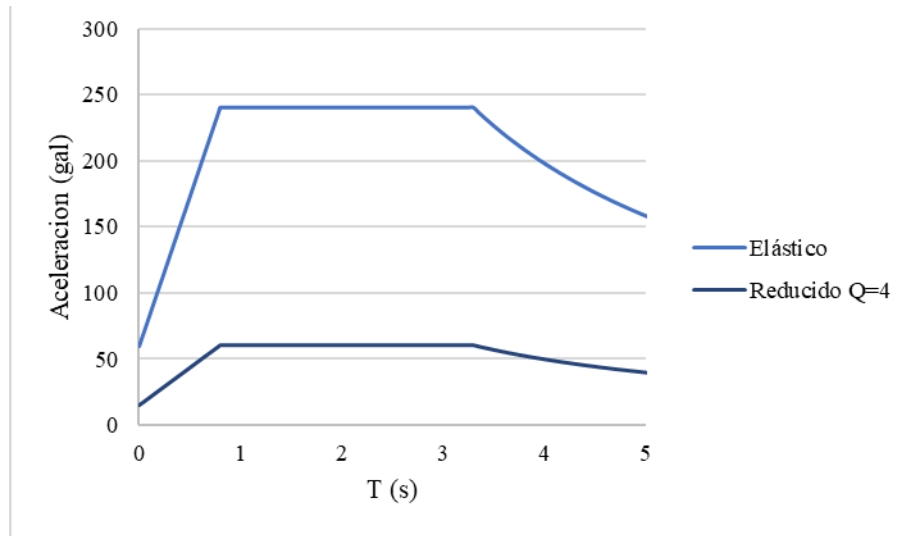
### 3.1.2.2 Espectro de Diseño

La elaboración del espectro de diseño consistió en ubicar dentro del reglamento de construcciones del Distrito Federal de 1976 los artículos **Error! Reference source not found.**, **Error! Reference source not found.** y **Error! Reference source not found.** dentro de los cuales se describen los elementos y ecuaciones necesarias. Una vez analizados estos artículos, se procedió a elaborar el espectro para diseño sísmico, mismo que dadas las consideraciones iniciales, fue diseñado en zona III de la CDMX antes denominada Distrito Federal. En la Tabla 3.7 se muestran los parámetros iniciales utilizados:

**Tabla 3.7 Componentes del espectro (1976)**

Componente	Valor
a <sub>o</sub>	0.06
T <sub>1</sub>	0.8
T <sub>2</sub>	3.3
r	1
c	0.24

El espectro de diseño utilizado para el diseño de los modelos (ver Figura 3.4) posee un factor de ductilidad Q=4 ya que según (Jara-Guerrero et al., 2020) este era el más común en edificios de aquella época.



**Figura 3.4 Espectro de diseño (1976)**

**3.1.2.3 Características Generales de los Modelos**

La determinación de las características estructurales de los modelos se realizó mediante el software ETABS donde; con ayuda del espectro y cargas de diseño se propusieron medidas de secciones de concreto armado para después evaluar las mismas e iterar hasta obtener secciones que resistan a las sollicitaciones iniciales. Las características de los modelos son las siguientes (ver tablas Tabla 3.8 Tabla 3.9, Tabla 3.10 y Tabla 3.11):

**Tabla 3.8 Materiales de los modelos**

Materiales	
Concreto	$f'c=250$ [kg/cm <sup>2</sup> ]
Acero	$f_y=4200$ [kg/cm <sup>2</sup> ]

**Tabla 3.9 Dimensiones de los elementos estructurales (edificio 5 pisos)**

Sección	b (mm)	h (mm)
Columna	400	400
Viga	200	300

**Tabla 3.10 Dimensiones de los elementos estructurales (edificio 10 pisos)**

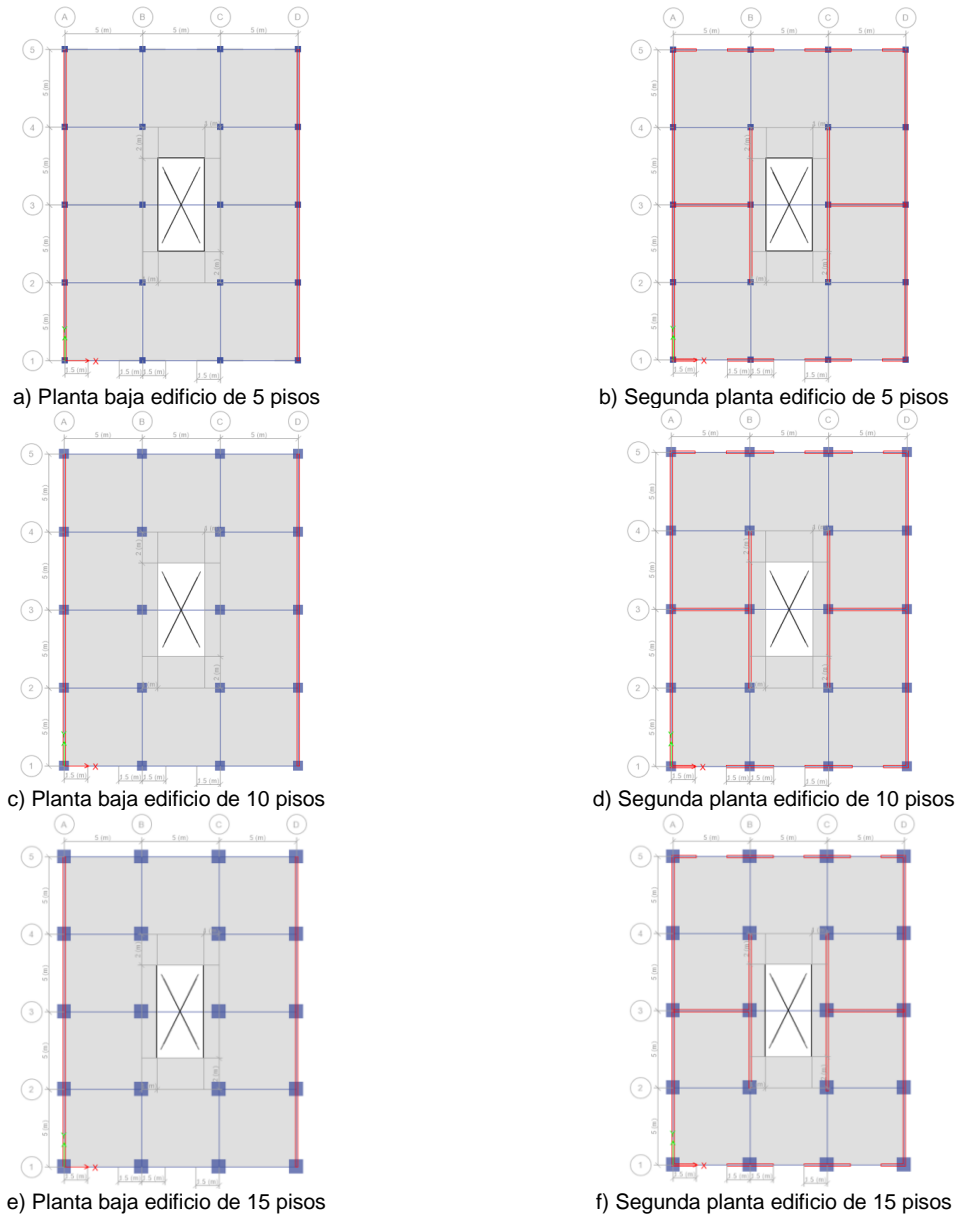
Sección	b (mm)	h (mm)
Columna	650	650
Viga	300	400

**Tabla 3.11 Dimensiones de los elementos estructurales (edificio 15 pisos)**

Sección	b (mm)	h (mm)
Columna	900	900
Viga	400	500

Cabe destacar que el porcentaje de acero en cada edificio se mantuvo dentro del rango 1 a 6% como lo indica el reglamento de construcciones.

Finalmente se muestra en la Figura 3.5 las distintas plantas estructurales de cada modelo diseñado con las características de las tablas Tabla 3.8, Tabla 3.9, Tabla 3.10 y Tabla 3.11. La planta baja y la planta superior de los 3 modelos elaborados cuenta con 3 crujiás de frente por 4 crujiás de fondo y un espacio libre en el centro destinado a escaleras. Como puede verse en la Figura 3.5 la planta baja de cada modelo cuenta únicamente con muros diafragma en el eje “y” y sin muros en el eje “x”. Por otro lado, en la segunda planta de cada modelo se cuenta con muros diafragma en ambas direcciones lo cual provoca que la resistencia a fuerza cortante y la rigidez de esta planta se vean aumentadas en comparación con la planta baja:



**Figura 3.5 Plantas estructurales de los 3 modelos diseñados**

### 3.2 EVALUACIÓN DE REGULARIDAD SEGÚN NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO POR SISMO

Debido a las experiencias pasadas en sismos como el de 1985, donde los edificios irregulares resultaban ser más dañados que los regulares, se implementaron en el apartado 5.1 de la Norma Técnica Complementaria de Diseño por Sismo, los requisitos de regularidad, mismos que se buscó cumplir en el modelado de las edificaciones a evaluar en la presente tesis, esto con el fin de disminuir las posibilidades de que los modelos fueran concebidos con más de una patología estructural. En los siguientes 13 puntos se justifica la evaluación de regularidad de los modelos:

1) *Los diferentes muros, marcos y demás sistemas sismo-resistentes verticales son sensiblemente paralelos a los ejes ortogonales principales del edificio. Se considera que un plano o elemento sismo-resistente es sensiblemente paralelo a uno de los ejes ortogonales cuando el ángulo que forma en planta con respecto a dicho eje no excede 15 grados.*

La edificación cumple con esta condición de acuerdo a la figura Figura 3.5 ya que en ella se puede observar como son paralelas en ambas direcciones.

2) *La relación de su altura a la dimensión menor de su base no es mayor que cuatro.*

En la Tabla 3.12 se muestra que el límite de la relación indicado en el inciso 2) no es rebasado

**Tabla 3.12 Relación altura-dimensión de los 3 modelos**

Edificio	Altura (m)	Base (m)	Relación [Altura/Base] (adimensional)
5 Pisos	13	15	0.86
10 Pisos	26	15	1.73
15 Pisos	39	15	2.6

3) *La relación de largo a ancho de la base no es mayor que cuatro.*

En la Tabla 3.13 se muestra la relación largo a ancho de los tres modelos y se puede observar que no se rebasa el límite de cuatro:

**Tabla 3.13 Relación largo a ancho de los 3 modelos**

Edificio	Largo (m)	Ancho (m)	Relación [Largo/Ancho] (adimensional)
5, 10 y 15 pisos	20	15	1.33

4) *En planta no tiene entrantes ni salientes de dimensiones mayores que 20 por ciento de la dimensión de la planta medida paralelamente a la dirección en que se considera el entrante o saliente.*

Ninguno de los tres modelos tiene entrantes ni salientes de acuerdo a la figura Figura 3.5.

6) *El sistema de piso no tiene aberturas que en algún nivel excedan 20 por ciento de su área en planta en dicho nivel, y las áreas huecas no difieren en posición de un piso a otro. Se exime de este requisito la azotea de la construcción.*

La abertura que se repite en todos los niveles del edificio (ver figura Figura 3.5) tiene un área de 18 m<sup>2</sup> y, el área de cada planta de la edificación es igual a 300 m<sup>2</sup>, es decir que, la abertura sólo representa un 6% del total de la planta.

Por otro lado, se evaluó el punto 6) antes que el punto 5) ya que era necesario hacerlo para poder cumplir con el punto 5). A continuación, se muestra la evaluación de este inciso.

5) *Cada nivel tiene un sistema de piso cuya rigidez y resistencia en su plano satisfacen lo especificado en la sección 2.7 para un diafragma rígido.*

De acuerdo con la sección 2.7, se considerará que se satisface la condición de diafragma rígido en aquellos sistemas estructurales cuyo sistema de piso esté estructurado con base en losas de concreto. Lo cual se cumple en los tres edificios analizados. Además, deben cumplirse los requisitos 4 y 6 de la sección 5.1, mismos que, como puede verse en los puntos anteriores, se cumplieron.

7) *El peso de cada nivel, incluyendo la carga viva que debe considerarse para diseño sísmico, no es mayor que 120 por ciento del correspondiente al piso inmediato inferior.*

Los pesos considerados para el diseño de la estructura fueron obtenidos del reglamento de construcciones del año 1976 y además se repitió la misma planta en cada nivel, por lo cual, el peso en cada nivel es el mismo.

8) *En cada dirección, ningún piso tiene una dimensión en planta mayor que 110 por ciento de la del piso inmediato inferior. Además, ningún piso tiene una dimensión en planta mayor que 125 por ciento de la menor de las dimensiones de los pisos inferiores en la misma dirección.*

Las dimensiones en todos los niveles del edificio son las mismas, por lo cual, este criterio no aplica (véase figura Figura 3.5).

9) *Todas las columnas están restringidas en todos los pisos en las dos direcciones de análisis por diafragmas horizontales o por vigas. Por consiguiente, ninguna columna pasa a través de un piso sin estar ligada con él.*

Se cumple con este punto ya que todas las columnas están restringidas por vigas.

10) *Todas las columnas de cada entrepiso tienen la misma altura, aunque esta pueda variar de un piso a otro. Se exime de este requisito al último entrepiso de la construcción.*

**Todas las columnas en cada entre piso poseen la misma altura, por lo tanto, se cumple con este requisito (véase**

Figura 3.3) .

11) *La rigidez lateral de ningún entrepiso difiere en más de 20 por ciento de la del entrepiso inmediatamente inferior. El último entrepiso queda excluido de este requisito.*

La rigidez lateral en ningún entrepiso difiere en más de 20 por ciento.

12) *En ningún entrepiso el desplazamiento lateral de algún punto de la planta excede en más de 20 por ciento el desplazamiento lateral promedio de los extremos de la misma.*

Se cumple con este apartado ya que ningún entrepiso tiene más desplazamiento del permitido.

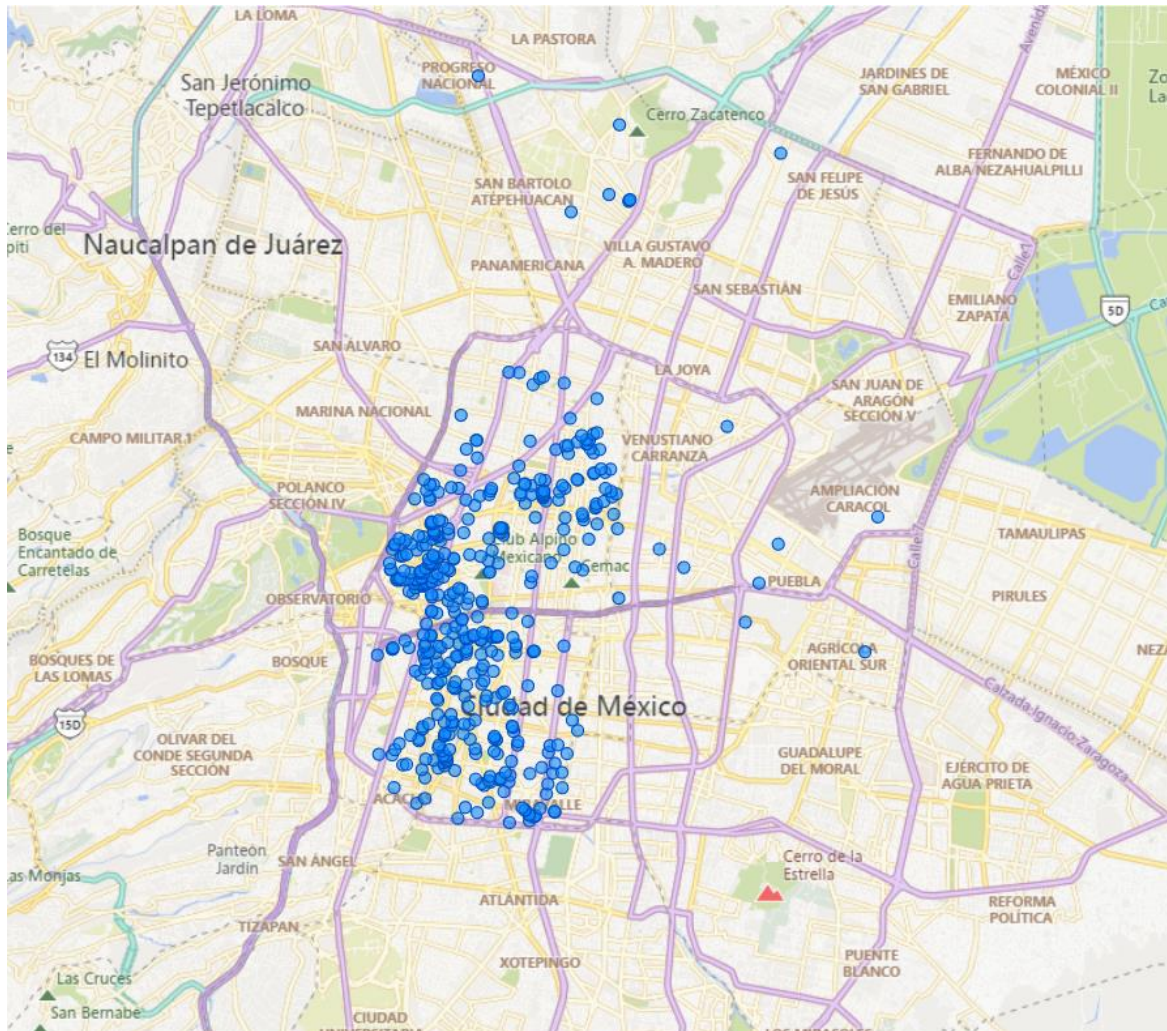
13) *En sistemas diseñados para  $Q$  de 4, en ningún entrepiso el cociente de la capacidad resistente a carga lateral entre la acción de diseño debe ser menor que el 85 por ciento del promedio de dichos cocientes para todos los entrepisos. En sistemas diseñados para  $Q$  igual o menor que 3, en ningún entrepiso el cociente antes indicado debe ser menor que 75 por ciento del promedio de dichos cocientes para todos los entrepisos. Para verificar el cumplimiento de este requisito, se calculará la capacidad resistente de cada entrepiso teniendo en cuenta todos los elementos que puedan contribuir apreciablemente a ella. Queda excluido de este requisito el último entrepiso.*

No se cumple en ninguno de los tres modelos ya que inicialmente se busca obtener PBD, y por lo tanto la capacidad resistente de la planta baja es distinta a la de las plantas posteriores al carecer de muros, sin embargo, cuando se implemente la condición sin PBD, se espera cumplir con este punto.

### 3.3 EVALUACIÓN DE LA PLANTA BAJA DÉBIL

#### 3.3.1 Selección de Espectros SASID

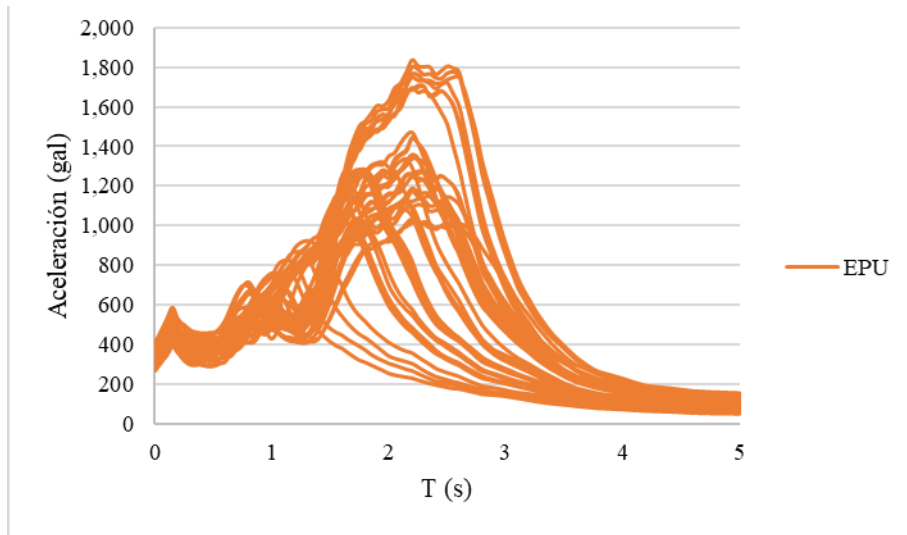
Según la base de datos elaborada por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, de la cual se habló en capítulos anteriores, en la Ciudad de México se registraron 451 casos de edificaciones en zona III que presentaron PBD (véase Figura 3.6)



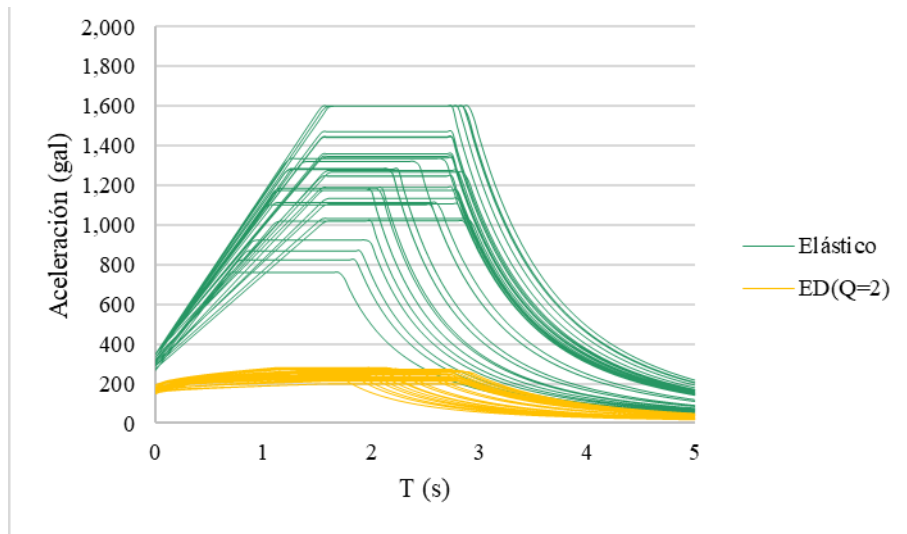
**Figura 3.6 Ubicaciones de edificaciones con PBD**

A partir de las ubicaciones de estos casos, se seleccionaron 50 espectros de la plataforma SASID, para una ductilidad  $Q=2$ , la razón por la cual fue elegido este último parámetro es porque al ser edificios antiguos, no se pueden suponer de ductilidad alta. A partir de estos espectros se buscó obtener los percentiles 84, 50 y 16 de los espectros y con ellos evaluar la PBD en los diferentes modelos diseñados ya que, estadísticamente entre los valores de 84 y 16 se encuentra el “promedio” de espectros necesarios para las evaluaciones y el percentil 50 indica los espectros similares entre sí que se encuentran en este rango o por arriba de él. En la Figura 3.8 se muestran los espectros de diseño obtenidos



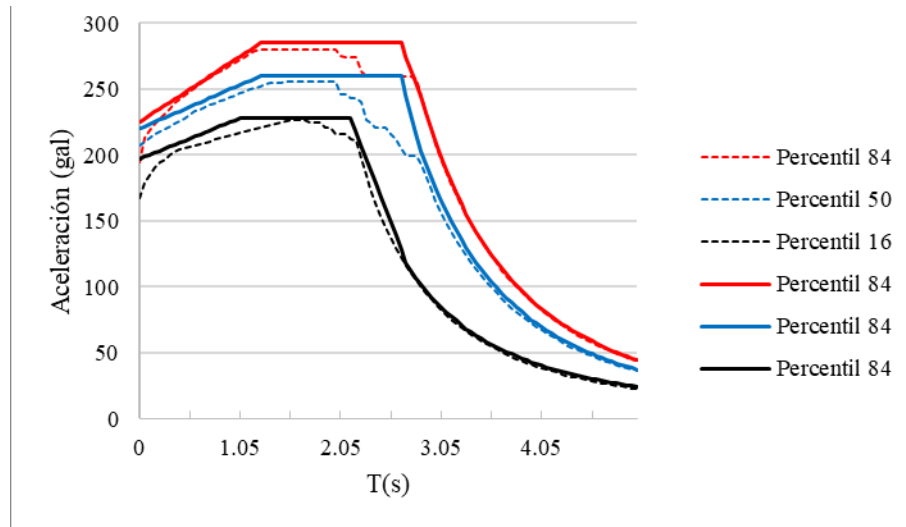


**a) Espectro de Peligro uniforme**



**b) Espectros elástico y de diseño**

**Figura 3.7 Espectros SASID (zona III)**

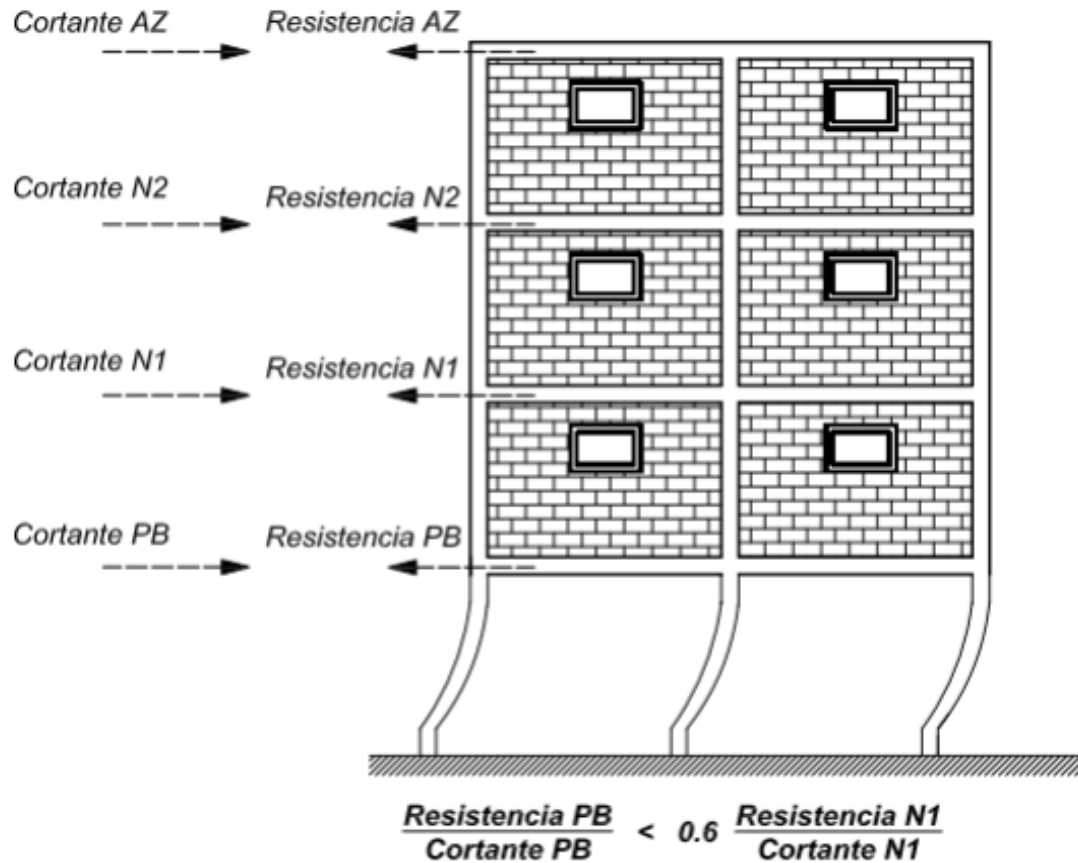


**Figura 3.8 Espectros de diseño (percentiles 84 , 50 y 16)**

Mediante la realización de diversos análisis modales espectrales se determinó que los percentiles 84, 50 y 16 para el caso de los espectros seleccionados resultaban ser muy similares entre sí, por lo cual se decidió utilizar únicamente el percentil 84, dado que es el mayor de los tres.

### 3.3.2 Descripción del Método Utilizado para Evaluar la PBD

La Planta Baja Débil fue evaluada comparando los cocientes de la resistencia a cortante en la planta baja sobre la fuerza cortante debida a sismo en la misma planta contra la resistencia a cortante en la planta posterior sobre la fuerza cortante debida a sismo en la misma planta, este último cociente multiplicado por un factor de reducción. Cabe mencionar que el factor de reducción depende de la norma, reglamento o manual que se esté utilizando y además debe destacarse que no en todos ellos se define a la PBD con ese mismo nombre, sino que puede llamarse también piso débil y será equivalente a la PBD siempre y cuando el piso débil sea evaluado en la planta baja. Para ejemplificar de mejor manera lo descrito en este párrafo, se muestra la Figura 3.9 obtenida de la norma técnica de diseño por sismo 2020 (NTCDS2020).



**Figura 3.9 Evaluación de la PBD (Gobierno de la Ciudad de México, 2017)**

En la Tabla 3.14 se muestran los criterios de evaluación para determinar la condición de PBD según las NTCDS2020 de diseño por sismo y el piso débil y piso débil extremo según la Asociación Americana de Ingenieros Civiles (ASCE/SEI 7-16):

**Tabla 3.14 Condiciones para evaluar la pbd, piso débil y piso débil extremo**

Planta Baja Débil (NTCDS2020)	Entrepiso Débil (ASCE/SEI 7-16)	Entrepiso Débil Extremo (ASCE/SEI 7-16)
$V_n < 0.6 * V_{n+1}$	$V_n < 0.8 * V_{n+1}$	$V_n < 0.65 * V_{n+1}$
$V_n < 0.6 * V_{n+2}$		
$V_n < 0.6 * V_{n+3}$		
⋮		
$V_n < 0.6 * V_{n+0.5*\text{número de pisos}}$		

El proceso de evaluación de la PBD en esta tesis consistió en la obtención de la resistencia a cortante de los elementos estructurales de cada modelo diseñado mediante las ecuaciones descritas en las NTC de diseño por sismo (ver tablas Tabla 3.15, Tabla 3.16 y Tabla 3.17) y de la fuerza cortante debida al sismo, generada con el espectro de diseño del percentil 84 (calculado con ETABS). Posteriormente, se obtuvo un cociente de evaluación para cada piso del edificio (ver Tabla 3.18) estos cocientes de evaluación son los mismos que se indican en la Figura 3.9 y con cada uno de ellos se realizó una distinta comparación para determinar la PBD (según NTC de diseño por sismo), piso débil (ASCEI/SEI 7-16), piso débil extremo (ASCEI/SEI 7-16).

**Tabla 3.15 Cálculo de la resistencia a cortante del concreto en columnas**

ETABS	Concreto									
Sismo	Cálculo de la Resistencia a Cortante en Columnas									
Vu (ton)	Base (cm)	Altura (cm)	d (cm)	As (cm <sup>2</sup> )	Ag (cm <sup>2</sup> )	Fr	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )	P	VcR (ton)	
PB	74.00	40	40	37	29.86	1600	0.75	250	0.0093	8.61
Piso 1	64.94	40	40	37	29.86	1600	0.75	250	0.0093	8.61
Piso 2	51.49	40	40	37	29.86	1600	0.75	250	0.0093	8.61
Piso 3	35.19	40	40	37	29.86	1600	0.75	250	0.0093	8.61
Piso 4	16.58	40	40	37	29.86	1600	0.75	250	0.0093	8.61

**Tabla 3.16 Cálculo de la resistencia a cortante en muros**

Muro de Tabique Rojo Recocido (Espesor 15 cm)									
Vm* (kg/cm <sup>2</sup> )	FR	Espesor de muro (cm)	Altura de Muro (cm)	AT (cm <sup>2</sup> )	%Muro Diafragma	Muros Diafragma	VmR (ton) de un muro	VmR (ton) Total	
PB	2	0.7	15	260	3900	0%	0	2.73	0
Piso 1	2	0.7	15	260	3900	100%	12.6	2.73	34.398
Piso 2	2	0.7	15	260	3900	100%	12.6	2.73	34.398
Piso 3	2	0.7	15	260	3900	100%	12.6	2.73	34.398
Piso 4	2	0.7	15	260	3900	100%	12.6	2.73	34.398

**Tabla 3.17 Resistencia a cortante del acero en muros**

Muro de Tabique Rojo Recocido (Espesor 15 cm)				
	h	Ph	fyh	VsR (ton)
PB	0.2	0.015	4200	0.00
Piso 2	0.2	0.015	4200	433.41
Piso3	0.2	0.015	4200	433.41
Piso 4	0.2	0.015	4200	433.41
Piso 5	0.2	0.015	4200	433.41

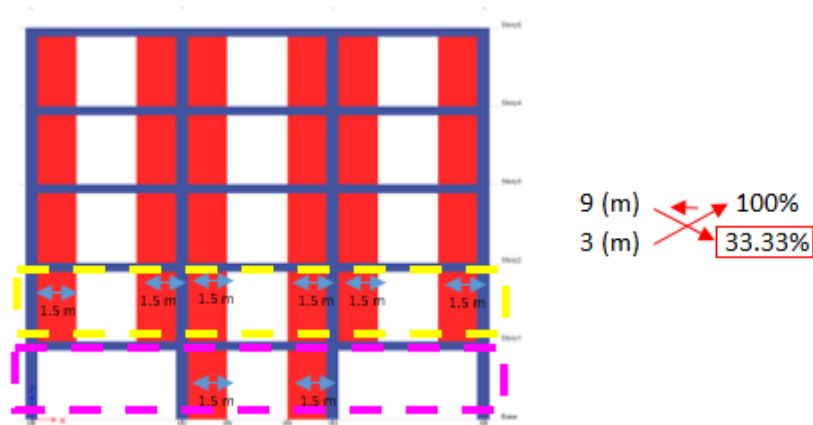
**Tabla 3.18 Obtención del cociente de evaluación**

	Vu (ton)	C.R. (ton)=VcR+VmR+VsR	C.E. (C.R./Vu)
PB	74.0074	34.46	0.47
Piso 1	64.9405	502.27	7.73
Piso 2	51.4939	502.27	9.75
Piso 3	35.1963	502.27	14.27
Piso 4	16.5815	502.27	30.29

**Vu:** fuerza cortante debida al sismo en x  
**C.R.:** capacidad resistente  
**C.E.:** cociente de evaluación

A continuación, se ejemplifica cómo se calcula el porcentaje de muro diafragma de la Tabla 3.16:

**Ejemplo:** Los muros en el piso 1 del edificio de 5 pisos (ver Figura 3.10) miden 1.5 (m) cada uno, entonces al sumar la longitud de los 6 muros se obtiene un total de 9 (m) lo cual representaría el 100% de muros en ese piso. Los muros en la planta baja también miden 1.5, entonces al sumar la longitud de los 2 muros existentes se obtiene un total de 3 (m). Para encontrar el % de muros en planta baja, respecto al piso uno se realiza una proporción directa como se muestra en la Figura 3.10:



**Figura 3.10** Cálculo del porcentaje de muro diafragma del edificio de 5 pisos

Una vez determinado el procedimiento para obtener el porcentaje de muro diafragma, se procedió a ir aumentando ese porcentaje con un delta de 1%, cada vez que este porcentaje era aumentado, se realizaba nuevamente todo el procedimiento de obtención de la resistencia a cortante de la planta baja ya que, al aumentar el porcentaje de muro, esta aumentaría su resistencia, y a su vez se volvían a realizar las comparaciones de la Tabla 3.14 Condiciones para evaluar la pbd, piso débil y piso débil extremo. Esto con el fin de determinar la cantidad de muro diafragma necesario para evitar la planta baja débil en el edificio modelado.

Por otra parte, el procedimiento de evaluación de la PBD, piso débil y piso débil extremo de los modelos de 10 y 15 pisos se realizó de la misma manera que en el edificio de 5 pisos, la única diferencia entre estos fue que conforme se iban aumentando niveles a los modelos, se requería de menor cantidad de muro para que las estructuras dejarán de tener PBD, piso débil y piso débil extremo. Los resultados de estas evaluaciones se encuentran graficados dentro de la metodología propuesta en esta tesis (ver apartado 3.4.1)

### 3.3.3 Descripción del Método Utilizado para Evaluar el Entrepiso Flexible

El entrepiso flexible es aquel en donde la rigidez lateral de una planta es menor al 70% de la rigidez lateral del piso superior o también cuando la rigidez lateral del piso en cuestión se encuentra por debajo del 80% del promedio de la rigidez lateral de los tres pisos posteriores al evaluado y el entrepiso flexible extremo es aquel donde la rigidez lateral de una planta es menor al 60% de la rigidez lateral del piso superior o también cuando la rigidez lateral del piso en cuestión se encuentra por debajo del 70% del promedio de la rigidez lateral de los tres pisos posteriores al evaluado. Para la presente tesis, la rigidez evaluada será la del primer piso y la de los 3 pisos posteriores a este.

El método utilizado para la evaluación, fue realizado con los tres modelos de edificios y obteniendo mediante el software ETABS, la rigidez de entrepiso de cada nivel. La evaluación del entrepiso flexible es semejante a la de la PBD, piso débil y piso débil extremo, ya que la primera rigidez obtenida en cada

modelo fue cuando el porcentaje de muro diafragma en la planta baja era de 0%, después la segunda rigidez obtenida fue cuando a cada modelo le fue agregado 10% de muro en planta baja y de esta manera se continuó obteniendo rigideces aumentando el porcentaje de muro de 10% en 10% hasta llegar a un porcentaje de muro igual al 100%. Por otro lado, se obtuvieron las rigideces de entrepiso de los niveles 1, 2 y 3 solamente una vez, ya que estas no cambiarían aun si el porcentaje de muro en la planta baja variara (ver Tabla 3.19).

**Tabla 3.19 Rigideces obtenidas para distintos porcentajes de muro diafragma en modelo de 5 pisos**

Porcentaje de Muro Diafragma	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Piso 4	13	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75
Piso 3	10.4	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75
Piso 2	7.8	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75
Piso 1	5.2	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75
PB	2.6	5.00	5.71	6.45	7.25	8.00	8.70	9.45	10.20	10.87	12.35

Posteriormente se procedió a realizar la comparación de rigideces como lo indica la ASCE/SEI 7-16 y en la tabla se muestra como bastó con tan sólo aumentar el porcentaje de muro hasta un 20% para que dejara de existir el entrepiso flexible en el modelo de 5 niveles.

**Tabla 3.20 Porcentaje de rigidez de la planta baja con respecto a las plantas superiores**

Porcentaje de Muro Diafragma		0%	10%	20%
Evaluación Entrepiso Flexible	Condición 70%	65%	74%	83%
	Condición 80%	65%	74%	83%
Evaluación Entrepiso Flexible Extremo	Condición 60%	65%	74%	83%
	Condición 70%	65%	74%	83%

Cabe mencionar que, el procedimiento para evaluar el entrepiso flexible y el entrepiso flexible extremo en los modelos de 10 y 15 pisos fue exactamente el mismo. Los resultados de estas evaluaciones al igual que los del modelo de 5 pisos se verán reflejados en la propuesta de la metodología para la evaluación rápida de la planta baja débil (ver apartado 3.4.1).

### 3.3.4 Resultados Obtenidos

Los resultados obtenidos de los diferentes análisis y evaluaciones realizadas en los apartados anteriores se encuentran plasmados y condensados en una metodología de fácil aplicación. La misma se encuentra organizada en los siguientes apartados:

1. Datos de la edificación
2. Información administrativa
3. Evaluación
  - a. Evaluación inicial
  - b. Evaluación de PBD en Edificios de 3 - 5 pisos
4. Rúbricas de Evaluación
  - a. Rúbrica para la Evaluación de la PBD en Edificios de 3 - 5 pisos
  - b. Rúbrica para la Evaluación de la PBD en Edificios de 6 - 10 pisos
  - c. Rúbrica para la Evaluación de la PBD en Edificios de 11 - 15 pisos


### 3.4 METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN RÁPIDA DE LA PLANTA BAJA DÉBIL

#### 3.4.1 Propuesta de Metodología

A lo largo de este apartado se muestra el resultado del proceso descrito en los puntos anteriores, condensado en la metodología para la evaluación de la planta baja débil en la CDMX propuesta y a su vez, cómo debe de ser llenada. Por otro lado, si el lector desea consultar la plantilla para imprimir y llenar la metodología, podrá encontrarla en el APÉNDICE A.

En la Figura 3.11 se muestra el inicio de la metodología propuesta, en este primer apartado se solicitará al evaluador la información general de la edificación que se encuentra analizando, estos datos son importantes ya que servirán para registrar y clasificar la evaluación posteriormente. Estos datos son; su ubicación (dirección y referencias), el año de construcción (ya que esta metodología sólo es aplicable en construcciones construidas después de haber sido publicado el reglamento de construcciones del año 1976), el uso de suelo (esto debido a que si el uso de suelo es comercial o de algún otro tipo distinto al de vivienda, probablemente la metodología no será del todo aplicable porque fue diseñada con edificios destinados a vivienda), número de pisos (es necesario conocer este dato ya que la metodología solo es aplicable en edificios de hasta 15 pisos, por lo que si el edificio evaluado es de más pisos, entonces no será posible evaluarlo), zona sísmica (este dato puede ser consultado en cualquier mapa que ubique a las delegaciones de la CDMX dentro de las tres zonas sísmicas de la ciudad) y patologías estructurales visibles (este último apartado es para evitar que alguna otra patología estructural visible, diferente a la PBD, como lo son el efecto de esquina y/o la irregularidad en planta y/o la irregularidad en elevación distorsionen los parámetros de esta evaluación).

En este primer apartado se colocará toda la información recabada del edificio a evaluar



EVALUACIÓN RÁPIDA DE LA PLANTA BAJA DÉBIL (PBD) - CDMX		
Datos de la edificación		
Dirección de la edificación: Saratoga714 Colonia Portales del Sur Delegación B.J		
Referencias: entre calles General Emiliano Zapata y Av. Repúblicas		
Año de construcción: 1977    Uso de Suelo: vivienda    Fecha de Evaluación: 05/jul/2021		
No. De Pisos: 5	Área Total por Piso (m2): 480m2	
Reglamento Utilizado para su Diseño: Reglamento de construcciones 1976		
Construcciones adicionales: ninguna		
Tipo de Uso: Montaje	Comercial	Escuela
Industrial	Oficina	Residencial #Departamentos: 10
Servicios	Depósito	
Zona Sísmica:	I <input type="checkbox"/>	II <input type="checkbox"/> III <input checked="" type="checkbox"/>
Patologías Estructurales Visibles: PBD		
Comentarios: la evaluación fue realizada con apoyo de información histórica e imágenes satelitales de google maps		

Los comentarios pueden ser generales respecto a las herramientas e inconvenientes para realizar la evaluación.

El área total puede ser medida desde google maps

Figura 3.11 Llenado de datos de la edificación

En la Figura 3.12 se solicitan los datos del dueño o dueños del inmueble ya que se considera necesario tener una comunicación directa con él o ellos para que, una vez que la evaluación haya sido realizada a su inmueble, ellos sean los primeros en enterarse de los riesgos ante los cuales podrían estar expuestos. Como puede verse, hay dos apartados, en el primero se pregunta el nombre del dueño, suponiendo que solamente hay uno, de no ser así, entonces se tendrán que llenar los demás campos mostrados para los dueños 1, 2, 3, etc... y de ser necesario, se insertarán más campos, hasta que todos los dueños del inmueble hayan sido registrados.

Aquí será colocada la información del o de los dueños del edificio.

Este primer apartado será llenado solamente si hay un solo dueño, en caso contrario, se dejará en blanco.

INFORMACIÓN ADMINISTRATIVA			
Datos del dueño			
Nombre del dueño:	Ramón Cortez Amezcua		
Dirección del dueño:	Saratoga 714, Colonia Portales del Sur, Delegación Benito Juárez		
Teléfono del dueño:	55-18-70-78-98	e-mail del dueño:	<a href="mailto:ramoncortez@gmail.com">ramoncortez@gmail.com</a>
(si los dueños de la edificación son más de uno, anotar sus datos en los siguientes espacios)			
Nombre del dueño 1:	Sandra Ortiz López		
Dirección del dueño 1:	Saratoga 714, Colonia Portales del Sur, Delegación Benito Juárez		
Teléfono del dueño 1:	55-18-70-78-99	e-mail del dueño 1:	<a href="mailto:sandraO@hotmail.com">sandraO@hotmail.com</a>
Nombre del dueño 2:	Josefina Ramirez Tellez		
Dirección del dueño 2:	Saratoga 714, Colonia Portales del Sur, Delegación Benito Juárez		
Teléfono del dueño 2:	55-95-70-78-88	e-mail del dueño 2:	<a href="mailto:jramirez@hotmail.com">jramirez@hotmail.com</a>
Nombre del dueño 3:	Ramon Perez Rodriguez		
Dirección del dueño 3:	Saratoga 714, Colonia Portales del Sur, Delegación Benito Juárez		
Teléfono del dueño 3:	55-95-55-78-88	e-mail del dueño 3:	<a href="mailto:Rrodriguez@gmail.com">Rrodriguez@gmail.com</a>

Estos apartados serán llenados con los nombres de los dueños del edificio, mismos que por lo general viven en el mismo.  
Se acrearán tantos apartados como sean necesarios de los datos de los dueños.

**Figura 3.12 Llenado de datos del dueño**

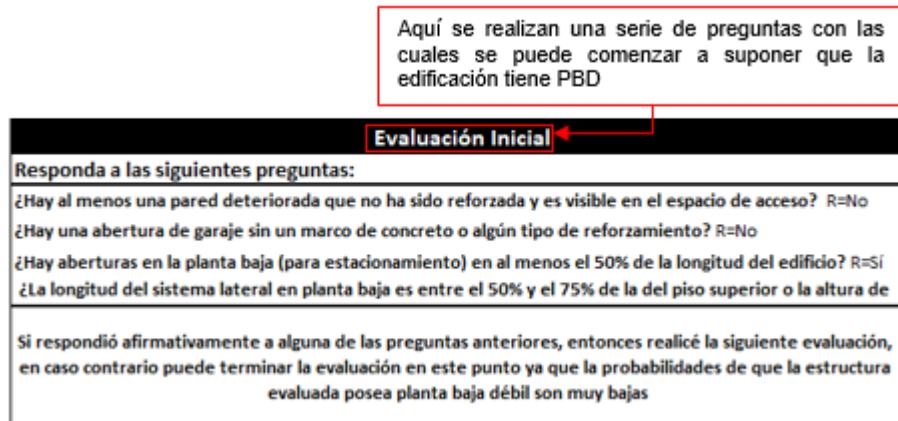
En la Figura 3.13 en el primer recuadro se solicita al evaluador colocar una imagen del edificio que se encuentra analizando, esto con el fin de tener un registro más detallado del inmueble evaluado. La imagen puede ser obtenida con la herramienta google maps o ser tomada a pie de calle y en ella debe aparecer el edificio por completo (niveles y límites izquierdo y derecho de la estructura). En el segundo recuadro, se pide colocar una breve descripción del inmueble, esto servirá para tomar en cuenta anomalías (grietas, falta de elementos resistentes, posibles daños previos, etc...) o rasgos característicos (uso de suelo distinto al declarado, modificaciones a la estructura original) que el evaluador haya notado al momento de hacer la inspección del inmueble. En este recuadro, lo mejor será describir de manera detallada todo aquello que sea apreciable desde el pie de calle y si es posible ingresar a la edificación, entonces también describir lo observado.





**Figura 3.13 Llenado de evaluación**

La Figura 3.14 muestra el comienzo de la evaluación técnica como tal, en este se realiza una serie de preguntas que encaminan al evaluador a intuir que la edificación posee la patología de PBD, por cual, si alguna de estas preguntas es contestada positivamente, entonces podría comenzar a pensarse que la edificación posee esta patología. Si se contestó negativamente a todas las preguntas, no es necesario continuar realizando la evaluación, sin embargo, si se optó por continuar con esta, y resultó que la edificación sí tiene PBD, entonces lo recomendable será consultar con un especialista y hacer una evaluación mucho más detallada del inmueble ya que las razones por las cuales se tiene esta patología podrían ser variadas, como por ejemplo, una distribución de muros fuera de lo normal en los entrepisos superiores.



**Figura 3.14 Llenado de la evaluación inicial**

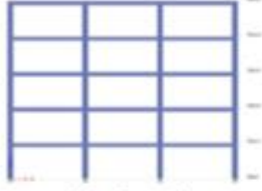
En la Figura 3.15 se muestran dos ejemplos de medición de entrepiso. El primero de cómo luciría una edificación con columnas de altura igual a lo largo de sus diferentes entrepisos y el segundo de cómo luciría una edificación con columnas más largas en planta baja en comparación con las del resto de sus entrepisos. Si la edificación resulta ser como el segundo ejemplo, entonces el evaluador podrá encaminarse más a considerar una PBD. Cabe mencionar que, según las NTCDS-2020, se exime de este requisito al último entrepiso, por lo cual no se considerará y mucho menos se comparará su altura de entrepiso con el del resto de los entrepisos.

**Evaluación de PBD en Edificios de 3 - 5 pisos**

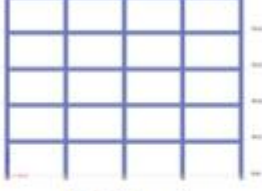
1. ¿Las columnas de la edificación -en planta baja- son iguales a las de los pisos posteriores (ancho, largo, altura)? SI  NO

---

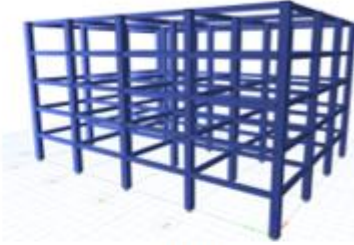
**Ejemplo de edificio con columnas iguales en planta baja y plantas posteriores**



Vista Frontal



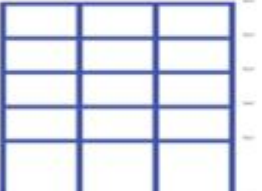
Vista Lateral



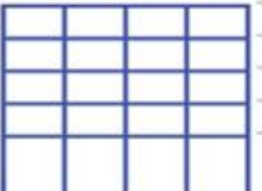
Vista 3D

---


**Ejemplo de edificio con columnas diferentes en planta baja respecto a pisos posteriores**




Vista Frontal



Vista Lateral



Vista 3D



En este apartado se muestra el ejemplo de cómo evaluar si las columnas de planta baja son del mismo tamaño que las de las plantas superiores

**Figura 3.15** Llenado de evaluación de PBD en edificios de 3-5 pisos

En la Figura 3.16 se cuestiona al evaluador acerca del porcentaje de muro existente en la planta baja con respecto a la planta posterior, esto con el fin de poder utilizar este dato e ingresar en alguna de las rúbricas elaboradas para las estructuras de 5, 10 y 15 pisos (ver figuras Figura 3.17 y Figura 3.19), sin embargo para poder conocer este valor, se consideró necesario mostrar un ejemplo de cómo se realiza el cálculo.

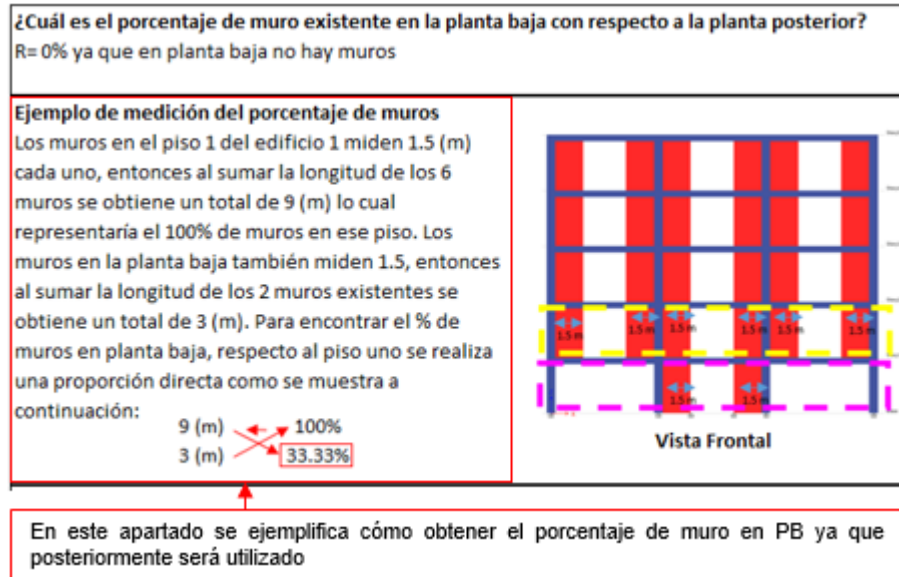


Figura 3.16 Ejemplo de cálculo del porcentaje de muro

Posteriormente la Figura 3.17 muestra la rúbrica con la cual se determina el porcentaje de muro necesario para poder dejar tener la patología de PBD, entre piso débil y/o entre piso flexible, esta rúbrica corresponde a edificios de 3 a 5 pisos. En color rojo se muestran los casos extremos de la patología, en color amarillo los casos “normales” y en color verde se muestra cuando la edificación cuenta con la suficiente cantidad de muro en su planta baja, tanto así que evita la aparición de la patología.

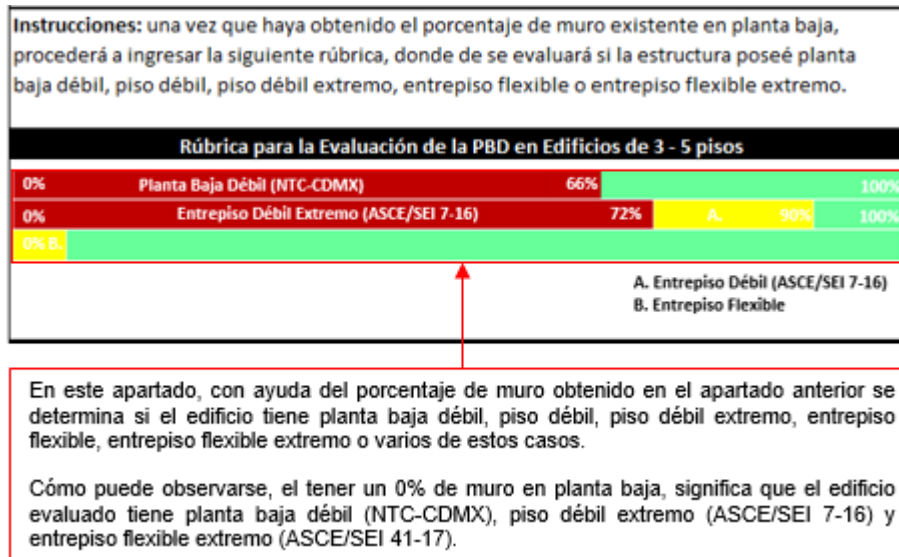
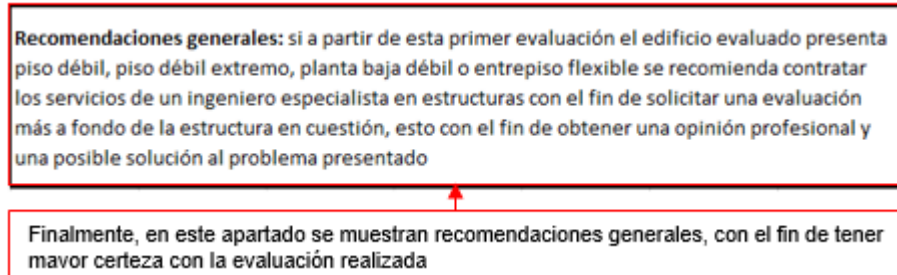


Figura 3.17 Rúbrica de evaluación (edificio 5 pisos)

En la Figura 3.18 se muestran las recomendaciones generales que, en caso de haber encontrado que el edificio evaluado tiene PBD, el evaluador deberá presentar en un informe al o a los dueños del inmueble para conocer el estado de su propiedad y a su vez permitir una evaluación más detallada de esta patología.



**Figura 3.18 Recomendaciones generales**

Finalmente el procedimiento para obtener la PBD y/o entrepiso débil y/o entrepiso débil extremo y/o entrepiso flexible y/o entrepiso flexible extremo en los edificios de 10 y 15 pisos será el mismo procedimiento que el utilizado para determinar esta patología en el edificio de 5 pisos, por lo cual no se describirá nuevamente en este capítulo, sin embargo, se adjuntan las rúbricas para la evaluación de estos Figura 3.19:

Rúbrica para la Evaluación de la PBD en Edificios de 6 - 10 pisos			
0%	Planta Baja Débil (NTC-CDMX)	56%	100%
0%	Entrepiso Débil Extremo (ASCE/SEI 7-16)	64%	75%
0%	B.		100%
A. Entrepiso Débil (ASCE/SEI 7-16) B. Entrepiso Flexible			
Rúbrica para la Evaluación de la PBD en Edificios de 11 - 15 pisos			
0%	Planta Baja Débil (NTC-CDMX)	51%	
0%	Entrepiso Débil Extremo (ASCE/SEI 7-16)	55%	74%
A. Entrepiso Débil (ASCE/SEI 7-16)			

**Figura 3.19 Rúbricas para la evaluación de los edificios de 10 y 15 pisos**



## CAPÍTULO 4.

### REFORZAMIENTO SÍSMICO EN ESTRUCTURAS CON PBD

En el presente apartado se pretende brindar de manera general una serie de posibles soluciones a la patología de planta baja débil (PBD). Estas soluciones fueron recopiladas de distintas fuentes bibliográficas reconocidas tanto en México como en el resto del mundo. Cabe destacar que la decisión de utilizar o no, alguna solución para la PBD dependerá del ingeniero encargado de la rehabilitación y de la experiencia en cada método.

#### 4.1 ENCAMISADOS DE VIGAS, COLUMNAS O NUDOS CON CONCRETO REFORZADO

La técnica de encamisado consiste en añadir una capa extra de concreto alrededor del elemento estructural ya sea viga, columna o nudo. Si se rodea al elemento por completo, se dice que es un encamisado total, en caso contrario, donde sólo se rodee una parte del elemento, se denominará encamisado parcial. Adicionalmente, esta capa deberá ser reforzada con barras corrugadas longitudinales y transversales, o con malla de alambre soldado. Es recomendable que en columnas el encamisado sea total (RAIGOSA, 2010).

##### 4.1.1 Deficiencia por Corregir

La decisión de rehabilitar un edificio con algún método en específico dependerá, en primera instancia, del comportamiento de los marcos con los que este cuente. El método por utilizar deberá ser definido una vez que se haya realizado la evaluación estructural correspondiente.

Las características de los edificios que pueden ser rehabilitados mediante encamisados de vigas, columnas o nudos con concreto reforzado son las siguientes:

- a) Estructuras cuyo comportamiento en columnas sea definido por fuerza cortante y cuya falla afecte directamente a su resistencia sísmica.
- b) Estructuras elaboradas con marcos resistentes a momento, con resistencia y/o rigidez lateral insuficiente ante las demandas sísmicas para las cuales fue diseñado.
- c) Edificios con vigas y/o columnas cuyos traslapes del refuerzo existente son escasos.
- d) Edificios con PBD.

Para incrementar la resistencia a flexión, flexocompresión, fuerza cortante, la capacidad de deformación o la combinación de estas, es recomendable realizar un encamisado de vigas, columnas o nudos.

Según el Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa (INIFED) específicamente, con el encamisado de las columnas se puede lograr a) o b); y dependiendo de las dimensiones del encamisado usado en b), se puede lograr c):

- a) Incrementar la capacidad de deformación y la resistencia a fuerza cortante.
- b) Incrementar la resistencia a flexocompresión, cortante, la capacidad de deformación inelástica y el confinamiento en zonas de traslapes con longitudes deficientes.
- c) Aumentar la rigidez de elementos y del sistema estructural.

#### 4.1.1.1 Encamisado de Vigas

El encamisado de vigas puede cumplir dos funciones distintas; la primera es incrementar la capacidad de deformación y resistencia a la fuerza cortante y la segunda es para incrementar la resistencia a flexión, cortante y la capacidad de deformación inelástica. En el primer caso el refuerzo longitudinal no debe ser continuo a través de los nudos, el encamisado estará separado del nudo por una junta con un espesor mínimo de 30 mm y el refuerzo transversal adicional estará compuesto por estribos hechos de dos piezas. En la Figura 4.1 se muestra el armado de una viga encamisada cuyo acero termina en la columna. Nótese que el doblaje del lecho inferior se ha orientado hacia abajo, de manera errónea. Para el segundo caso, el refuerzo longitudinal de las vigas encamisadas debe ser continuo a través de los nudos y debe anclarse en las columnas exteriores (de fachada), hasta la cara posterior de la columna (cara más alejada de la zona crítica para calcular la longitud de desarrollo o de anclaje) Figura 4.2. El refuerzo longitudinal de la viga se podrá doblar en un plano horizontal para rodear la columna y anclar el refuerzo; en este caso, se deberá diseñar refuerzo transversal en la viga encamisada que resista la componente de la fuerza generada por las barras dobladas considerando  $1.25 f_y$ , que corresponde al valor esperado del esfuerzo de fluencia (Alcocer & Murià, 2020).



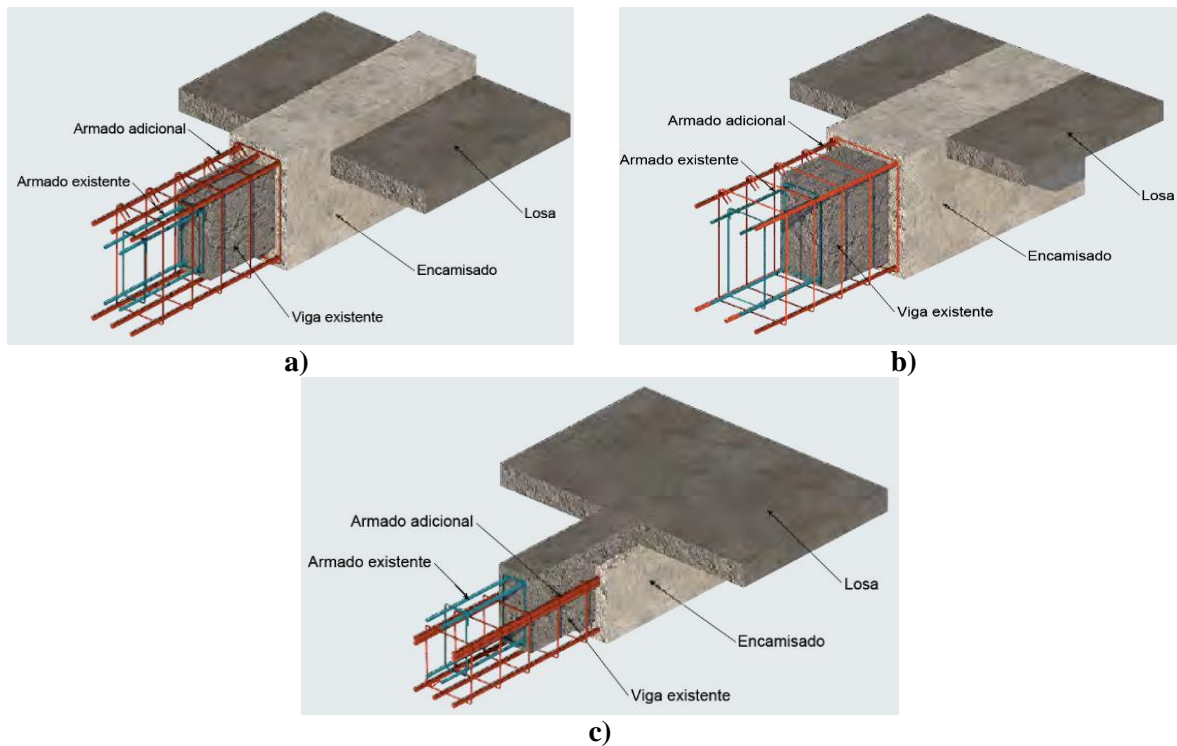
**Figura 4.1** Viga encamisada con refuerzo longitudinal no continuo a través del nudo con la columna. Fuente: coreandcut.com



**Figura 4.2** Viga encamisada con refuerzo longitudinal continuo a través del nudo con la columna (Tetta et al., 2015)

En la Figura 4.3 se presentan, de manera conceptual, las posibles configuraciones de encamisado en vigas de concreto:

- Configuración a): Hace necesario incrementar el espesor de la losa o colocar un piso falso, de no hacerse, esto podría causar accidentes a los usuarios (como tropezos) además de ser poco atractivo visualmente.
- Configuración b): Se requiere cortar una sección de la losa para poder colocar los estribos y el concreto, puede notarse que en este caso no sería necesario realizar los pasos extra de la configuración a)
- Configuración c): Se requiere perforar la viga transversalmente para colocar la grapa del estribo. La colocación del concreto se hace igualmente a través de ranuras que se practican en la losa.



**Figura 4.3** Posibles configuraciones de encamisado de vigas con concreto: a) encamisado sobre nivel superior de losa; b) encamisado al nivel del piso; c) encamisado por debajo de la losa (Alcocer & Murià, 2020)



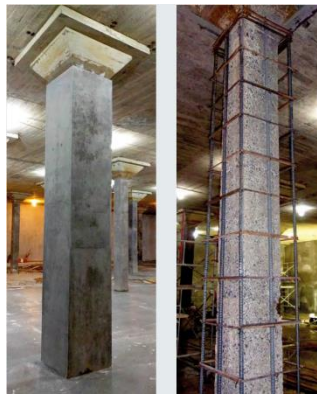
#### 4.1.2 Encamisado de Columnas

El encamisado de columnas puede ser utilizado para incrementar la capacidad de deformación y la resistencia a fuerza cortante o para incrementar la resistencia a flexocompresión, cortante y la capacidad de deformación inelástica, las características necesarias para lograr cualquiera de las dos opciones anteriores son las mostradas en la **Error! Reference source not found.**

*Tabla 4.1 Características generales del encamisado en columnas*

Requerimiento	Refuerzo longitudinal	Separación
Incrementar la capacidad de deformación y la resistencia a fuerza cortante.	No debe ser continuo en la altura del edificio (ver Figura 4.4).	30mm del piso y del techo por medio de una junta.
Incrementar la resistencia a flexocompresión, cortante y la capacidad de deformación inelástica.	Debe ser continuo.	Ninguna. Generalmente se coloca en todo el edificio). (ver Figura 4.5).

Por otro lado, si un muro se encuentra en contacto con la columna existente, se deberá demoler parcialmente para permitir el encamisado de la columna (CALDAS, 2018).



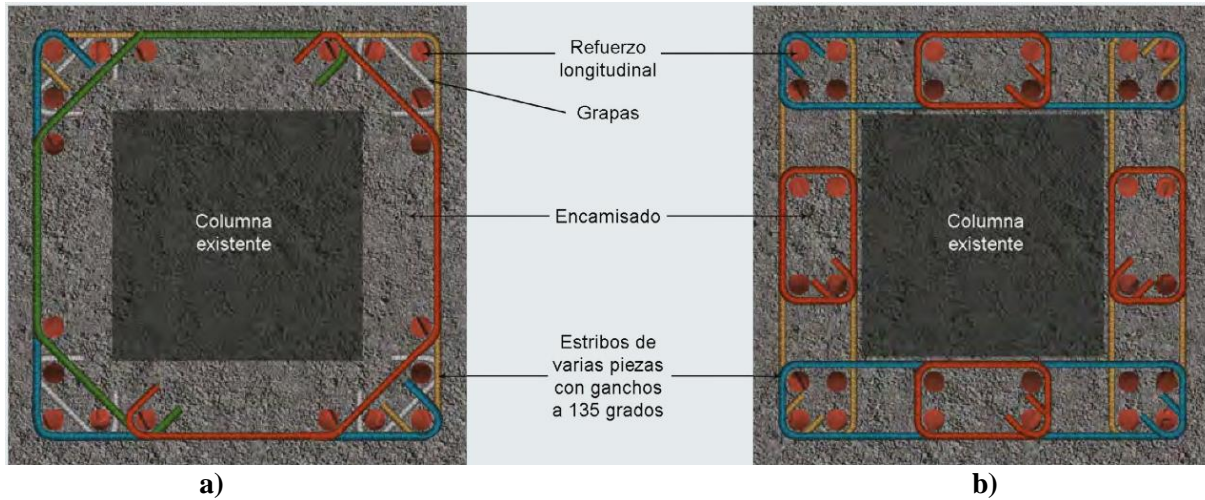
**Figura 4.4** Columna encamisada con refuerzo longitudinal discontinuo en la altura del edificio. Nótese que la cuantía de estribos no es muy alta (ESG, 2020)



**Figura 4.5** Columna encamisada con concreto de forma continua a través de las losas (Alcocer & Murià, 2020)

En la Figura 4.6 se muestran algunas de las diferentes configuraciones de encamisado en columnas de concreto. En la Figura 4.6 a) puede verse como el estribo octogonal comprende dos piezas cuyos dobleces

terminales, a 135 grados, se traslapan alrededor de barras longitudinales de la columna en lados opuestos de ella. En la Figura 4.6 b), los estribos están hechos a base de estribos sobrepuestos.



**Figura 4.6** Posibles configuraciones de acero transversal en columnas encamisadas: a) estribos de varias piezas; b) estribos sobrepuestos (Alcocer & Murià, 2020)

#### 4.1.3 Encamisado de Nudos

- a) Si se realiza un encamisado de columna para incrementar la resistencia a flexocompresión, el cortante y la capacidad de deformación inelástica, entonces también deberá realizarse un encamisado de la unión viga-columna. Para realizar este tipo de encamisado el concreto que se coloque en el nudo deberá ser confinado con estribos o por medio de una armadura metálica hecha a base de ángulos verticales en las esquinas del nudo y soleras horizontales arriba de la losa y por debajo de las vigas Figura 4.7. En la Figura 4.8 se muestra el armado del encamisado de columnas y vigas, con la armadura de confinamiento en el nudo. Esta técnica puede ser aplicada en cualquiera de los tres modelos elaborados en esta tesis de manera que, mediante un análisis más avanzado, se logre incrementar la resistencia a cortante de la planta baja, con el fin de disminuir la patología de PBD.



**Figura 4.7** Armadura metálica hecha a base de ángulos verticales en las esquinas del nudo y de soleras horizontales arriba de la losa y por debajo de las vigas (Alcocer & Murià, 2020)



**Figura 4.8 Encamisado de nudo, de columna y de viga (Eurolosa, 2018)**

## **4.2 ADICIÓN DE MUROS DE CONCRETO**

### **4.2.1 Deficiencia por Corregir**

De igual manera que en el método de encamisado, la rehabilitación del edificio mediante el método de adición de muros de concreto dependerá del modo de comportamiento de la estructura existente que se haya identificado como resultado de la evaluación estructural ante sismo.

Los edificios que pueden ser rehabilitados mediante esta técnica son:

- a) Edificaciones con poca rigidez y/o resistencia lateral.
- b) Edificaciones con entrepiso suave o flexible.
- c) Edificaciones con muros de concreto que deben ser reforzados.
- d) Edificaciones con asimetrías en la distribución de elementos resistentes y que pueden exhibir vibraciones de torsión

Con la adición de muros de concreto se puede:

- a) Incrementar la resistencia y la rigidez lateral.
- b) Reducir excentricidad, en especial en la planta del edificio.
- c) Mitigar cambios bruscos de distribución de rigidez y resistencia en la altura.

### 4.3 ADICIÓN DE CONTRAVENTEOS DE ACERO

#### 4.3.1 Deficiencia por Corregir

Así como en los métodos de rehabilitación anteriores, para poder aplicar el método de adición de contraventeos de acero se deberá evaluar el comportamiento que la estructura haya tenido durante el sismo que pudo haberle causado daños.

Los edificios que pueden ser rehabilitados con la adición de diagonales de acero son:

- a) Edificios con columnas cuyo comportamiento está controlado por fuerza cortante y cuya falla puede afectar el desempeño sísmico de todo el edificio
- b) Edificios a base de marcos resistentes a momento con insuficiente resistencia y/o rigidez lateral.
- c) Edificios con pisos débiles, usualmente en la planta baja

A lo largo de esta tesis se abordó el desarrollo de tres modelos de edificios que cumplen con los tres incisos anteriores, por lo cual, un ejercicio interesante podría ser implementar contraventeos, especialmente en la planta baja de cada uno de ellos, variando diversas características como la ubicación y la cantidad de contraventeos en cada edificio, es decir, qué tantos más necesitaría un edificio de 15 pisos en comparación con uno de 10 o 5 pisos, esto con el fin de determinar dónde y cómo ayudarían más a disminuir o eliminar por completo la patología de PBD ya que en todos los casos se lograría rigidizar en mayor medida a la planta que recibe las fuerzas cortantes más grandes, pero analizando las distintas configuraciones posibles de contraventeos podría optimizarse en mejor manera el uso de este método.

La adición de contraventeos metálicos permite:

- a) Incrementar la resistencia global de la estructura ante cargas laterales como las inducidas por sismo.
- b) Aumentar la rigidez lateral global de la estructura y, consecuentemente, disminuir las demandas de desplazamiento lateral
- c) Colocar dispositivos de protección sísmica (disipadores de energía). Véase sección 6.15 de (Alcocer & Murià, 2020)

#### 4.3.2 Descripción de la Técnica

Esta técnica aumenta la rigidez y resistencia lateral de la estructura. Esta técnica consiste en colocar elementos metálicos laminados en caliente dentro de algunos marcos de la estructura o exterior a ellos. Los contraventeos tienen la ventaja de que no incrementan el peso de la estructura de manera significativa.

No es recomendable combinar este tipo de rehabilitación con otras que aumenten la rigidez considerablemente, como lo pueden ser; agregar muros de concreto o marcos con muros diafragma de mampostería.

### 4.3.3 Disposición de Contraventeos

Los contraventeos se pueden clasificar según su geometría, su disposición en el edificio y su empleo para colocar sistemas de control de la respuesta.

#### 4.3.3.1 Contraventeos Según su Geometría

En la Figura 4.9 y en la Figura 4.10 se muestran los diferentes tipos de contraventeos metálicos permitidos en la rehabilitación de estructuras.

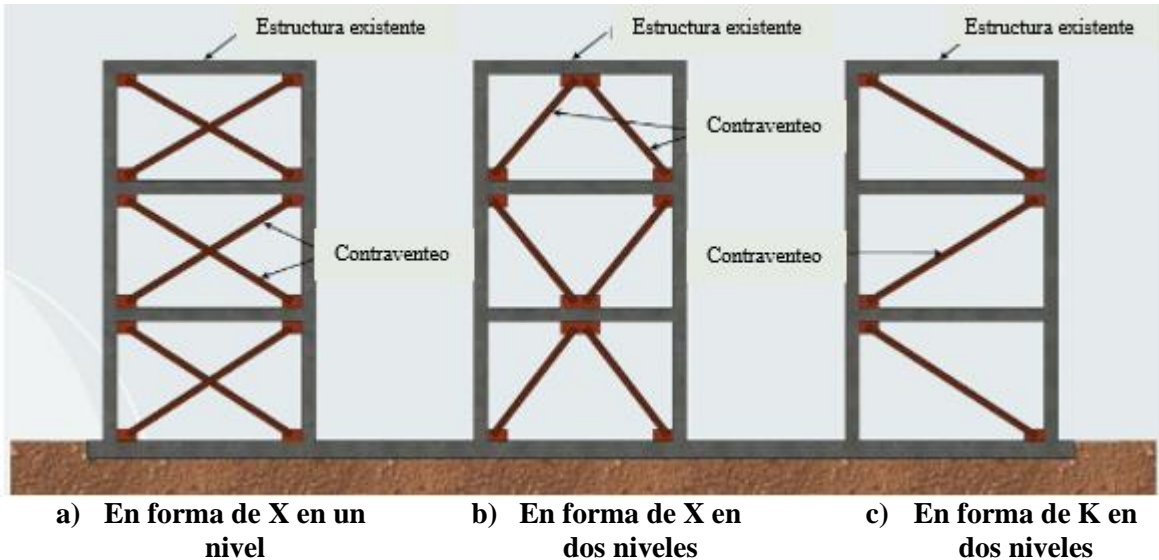
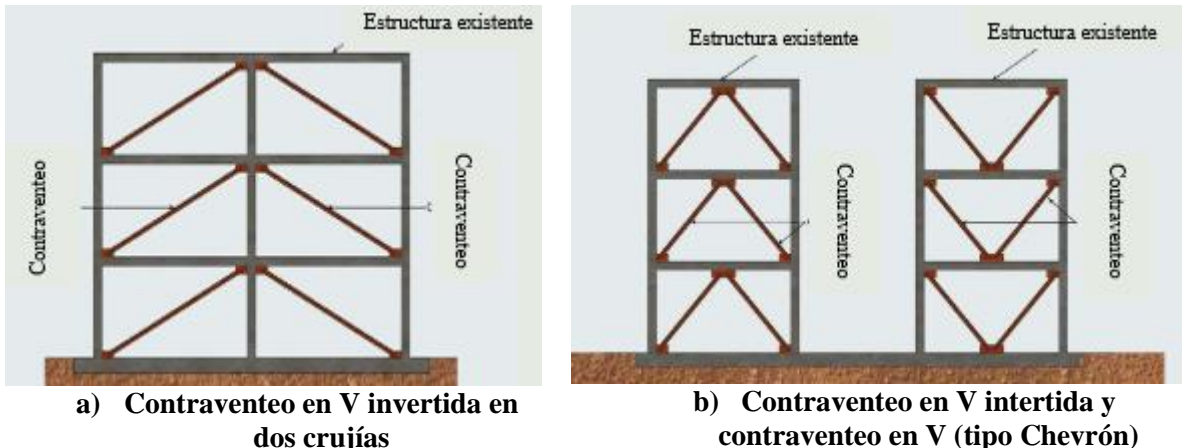


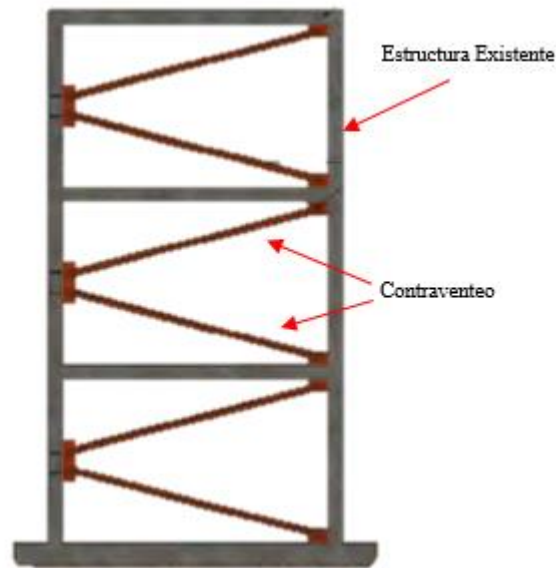
Figura 4.9 Contraventeos en “X” y “K” permitidos para la rehabilitación de estructuras (Alcocer & Murià, 2020)

En las siguientes geometrías de contraventeo se hace hincapié en que, si la estructura tiene claros largos, es conveniente emplear el tipo “V” o “V invertida” porque se reduce la longitud no arriostrada de contraventeos requeridos y demandan una sección de acero más pequeña. Esta solución debe ser consistente en cada piso del edificio.



**Figura 4.10 Contraventeos en V y V invertida permitidos para la rehabilitación de estructuras (Alcocer & Murià, 2020)**

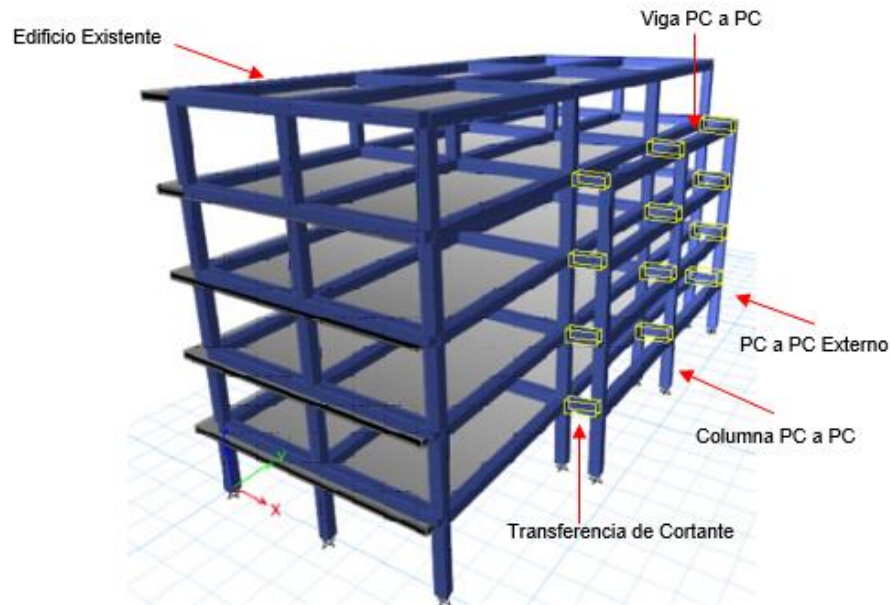
En la Figura 4.11 se muestra un esquema de una estructura con contraventeos tipo K de un nivel. Este tipo de contraventeos no es permitido en la rehabilitación de edificios. Las fuerzas de compresión y tensión que se desarrollan probablemente produzcan daños por cortante severos y el acortamiento de la columna.



**Figura 4.11 Contraventeo tipo “K” en un nivel no permitido en la rehabilitación de edificios existentes (Alcocer & Murià, 2020)**

#### **4.4 MÉTODO DEL MARCO EXTERIOR DE CONCRETO PRETENSADO PREFABRICADO**

La capacidad de carga lateral del edificio aumenta al agregar un marco exterior de concreto pretensado. Los marcos exteriores pueden ser instalados en la cimentación actual o puede integrarse una nueva cimentación a la existente. Los empalmes de columna y las uniones de columna a cimentación se componen de conectores. Las juntas viga-columna están postensadas.(Venkataramana, 1995). Para el caso de la PBD, el agregar un marco exterior de concreto en la o las caras del edificio que cuenta con esta patología funciona en gran medida ya que se rigidizan las zonas más débiles de la estructura (las que provocan que exista la patología), logrando una disminución o completa eliminación de la PBD. Como puede verse en la figura Figura 4.12 Representación esquemática de marcos exteriores de concreto pretensado (basado en Venkataramana, 1995) se adicionó un marco exterior del lado donde las fuerzas cortantes causadas por sismo pueden ser mayores y dañar a la estructura, al adicionar este marco se logra soportar en mejor medida estas fuerzas y disminuir o evitar por completo los daños a la estructura principal.



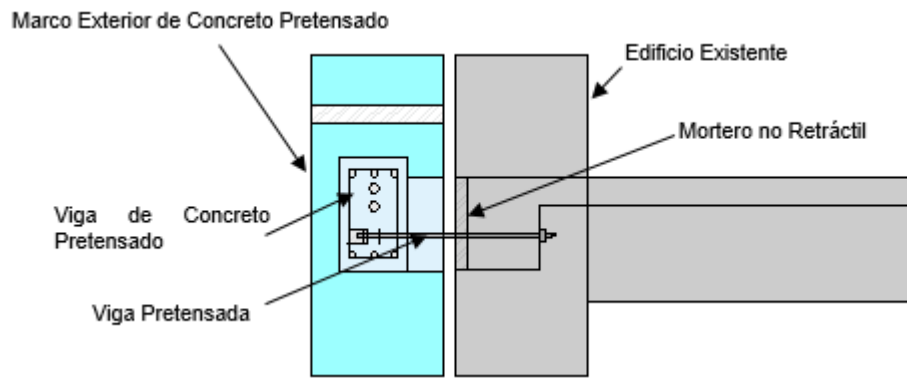
**Figura 4.12 Representación esquemática de marcos exteriores de concreto pretensado (basado en Venkataramana, 1995)**

#### **4.4.1 Transferencia de Cortante**

La fuerza cortante del edificio es transferida a los marcos externos al conectarlos ya sea a través de una barra de acero pretensado o mediante una losa de piso de concreto colado en el lugar. (Venkataramana, 1995)

##### **4.4.1.1 Transferencia de Cortante mediante barras de acero pretensado**

En este método el cortante es transmitido por fricción entre las columnas existentes y los marcos externos ( $\mu = 0.7$ ). Se requiere taladrar en la viga para así poder instalar las barras pretensadas. Este método es utilizado cuando el espacio es limitado y la capacidad de carga también es limitada debido a la cimentación que comparten ambas estructuras. (Venkataramana, 1995)

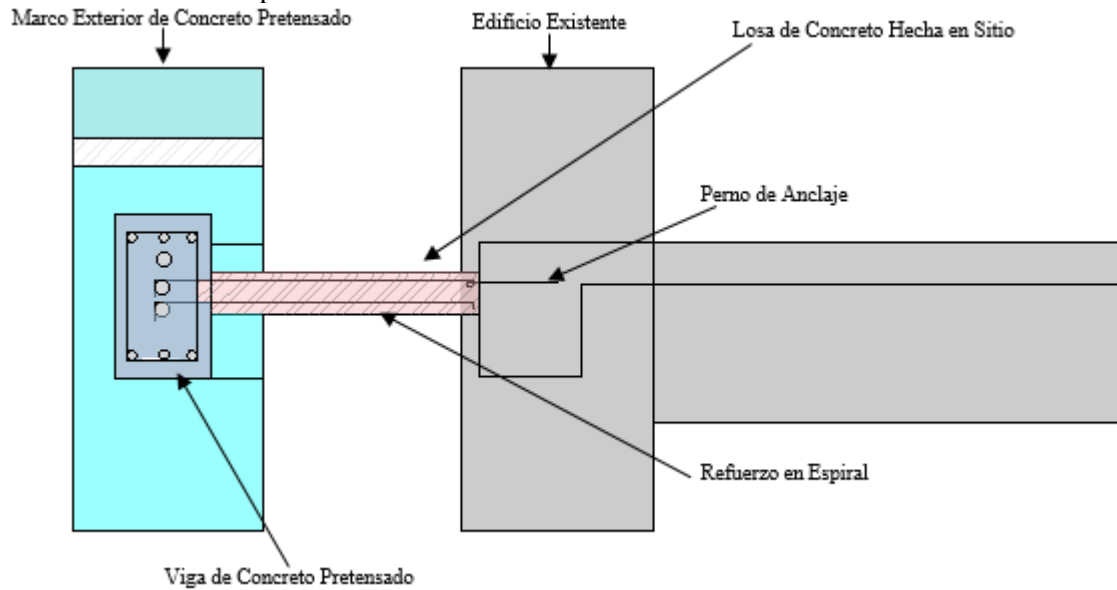


**Figura 4.13** Representación esquemática de la transferencia de cortante por barras pretensadas. (basado en Venkataramana, 1995)



#### 4.4.1.2 *Transferencia de Cortante Mediante Losas*

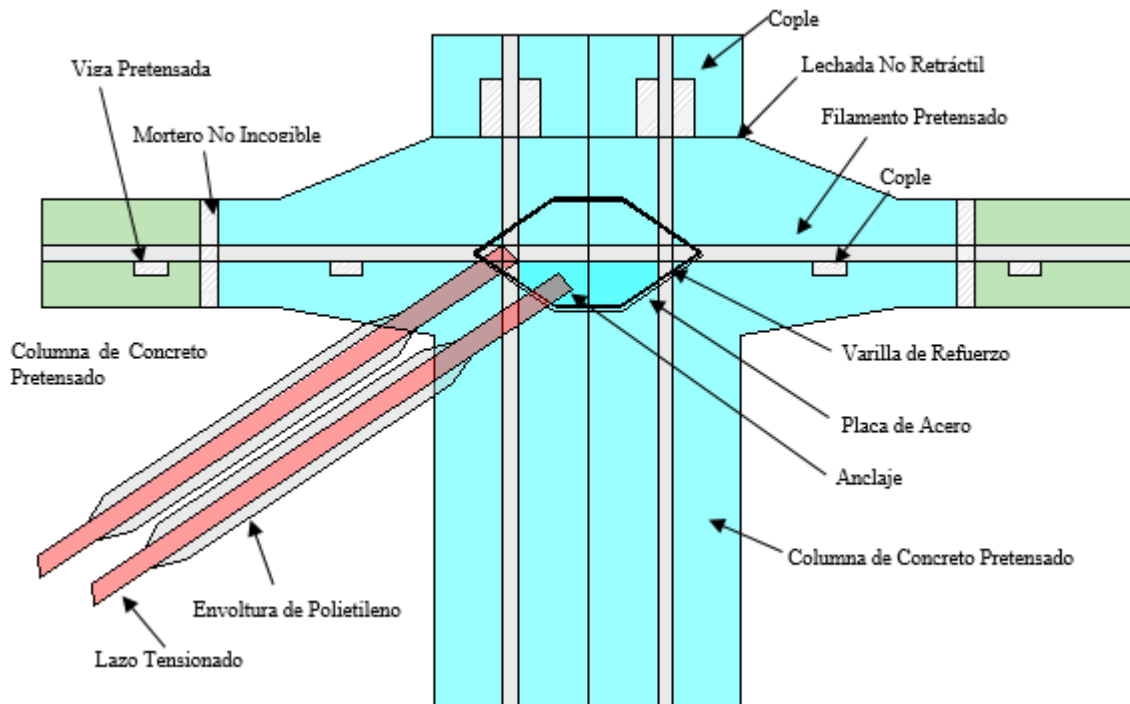
Este método es utilizado en edificios con balcones. La transmisión de la fuerza cortante se logra a través de la losa colada in situ, el edificio existente, los marcos exteriores, los pernos anclados en el edificio y las barras de refuerzo empotradas en el marco exterior.



**Figura 4.14** Transferencia de cortante mediante losas de concreto (basado en Venkataramana, 1995)

#### 4.5 PARALLEL UNIT FRAME METHOD

En el *parallel unit frame method* la capacidad de carga lateral se ve aumentada al agregar un marco pretensado exterior a la estructura, así como el método del marco exterior de concreto pretensado prefabricado descrito anteriormente, pero con la diferencia de que en este tendrá un enlazamiento diagonal a tensión en cada esquina del marco. Los empalmes de columnas son realizados mediante (*coples*) y uniones viga-columna que se encuentran diagonalmente conectadas con enlazamientos diagonales. Los enlazamientos a tensión son conectados a sí mismos con acopladores durante el pre y post-tensado. (Venkataramana, 1995)



**Figura 4.15 Detalles de conexión del parallel unit frame (basado en Venkataramana, 1995)**

El “parallel unit frame (PUF)” puede ser integrado al edificio existente sin importar si el edificio tiene un balcón o si se requiere una nueva cimentación para el mismo.

##### 4.5.1 CONSTRUCCIÓN

Cualquiera de los métodos del marco exterior de concreto pretensado prefabricado y el PUF method sigue los siguientes pasos:

1. Evaluación del edificio por demanda y capacidad sísmica
2. Selección del método de reforzamiento
3. Excavación del suelo existente para extender la cimentación actual o construir una nueva cimentación
4. Levantamiento de las columnas de concreto prefabricadas
5. Colocación de las vigas de concreto prefabricadas

6. Relleno de juntas con mortero no encogible para miembros horizontales y de alta resistencia y lechada no retráctil para miembros verticales
7. Post-tensionar las uniones viga-columna
8. Colocar y postensionar el enlazamiento diagonal de cada esquina del marco para el caso del parallel unit frame method
9. Instalación de losas de concreto armado/varillas pretensadas
10. Enlazar los nuevos marcos al edificio existente

#### **4.5.2 VENTAJAS**

El reforzamiento por el método del marco exterior de concreto pretensado prefabricado y el PUF tienen las siguientes ventajas:

1. Menos o ningún trabajo en el interior requerido
2. Ventilación e iluminación después del reforzamiento se mantiene casi igual que antes
3. La distribución de los espacios en el edificio se mantiene igual
4. En comparación con otros métodos de reforzamiento es más rápido de realizarse

Como dato interesante, un total de 59 edificios fueron reforzados utilizando alguno de estos dos métodos en zonas de Tohoju y Kanto en Japón. Todos ellos soportaron el terremoto de Tohoku el 11 de marzo de 2011 el cual tuvo una magnitud de 9.0 y sorprendentemente todos estos edificios se mantuvieron estructuralmente sanos.

#### **4.6 REFORZAMIENTO MEDIANTE ARRIOSTRAMIENTOS PREFABRICADOS**

##### **4.6.1 Sistema de arriostramiento con concreto prefabricado**

El sistema de arriostramientos de concreto prefabricado tiene las siguientes características: (Venkataramana, 1995)

1. El sistema de arriostramientos consiste en dos elementos diagonales de concreto prefabricado para construir rápido y fácilmente
2. Estos elementos diagonales son colocados al exterior del edificio mediante uniones con el fin de reducir el trabajo desde el interior del edificio
3. El sistema tiene juntas de control de fricción que disipan la energía sísmica y controlan las fuerzas axiales en los elementos diagonales reduciendo la fuerza de corte en la viga.
4. Los elementos diagonales son post-tensados para aumentar la fuerza del agrietamiento por tensión
5. No se requieren varillas de refuerzo ni anclajes de pernos entre los arriostramientos y el edificio existente.



**Figura 4.16 Arriostramiento de concreto prefabricado adherido a una estructura (Venkataramana, 1995)**

#### **4.6.2 Construcción**

El tipo de arriostramiento generalmente utilizado es el de cinco unidades ensambladas el cual consiste en cuatro piernas y una unidad central como el mostrado en la Figura 4.17. Las unidades son ensambladas in-situ y el pre-esfuerzo es aplicado de manera externa mediante cable en las dos direcciones diagonales. El espacio entre los extremos de los arriostramientos y las es llenado con mortero de alta resistencia que no encoge. Una vez que el mortero fragua, se libera la fuerza de pretensado y el arriostre se ajusta al marco por sí solo. Cuando es sometido a carga sísmica solo una de las diagonales trabaja a compresión. Con el fin de mantener la conexión entre la tensión diagonal y la estructura, ambas diagonales son adheridas con resortes planos y tubería de acero (FSSP-por sus siglas en ingles) en ambos extremos del arriostramiento. (ver Figura 4.18)

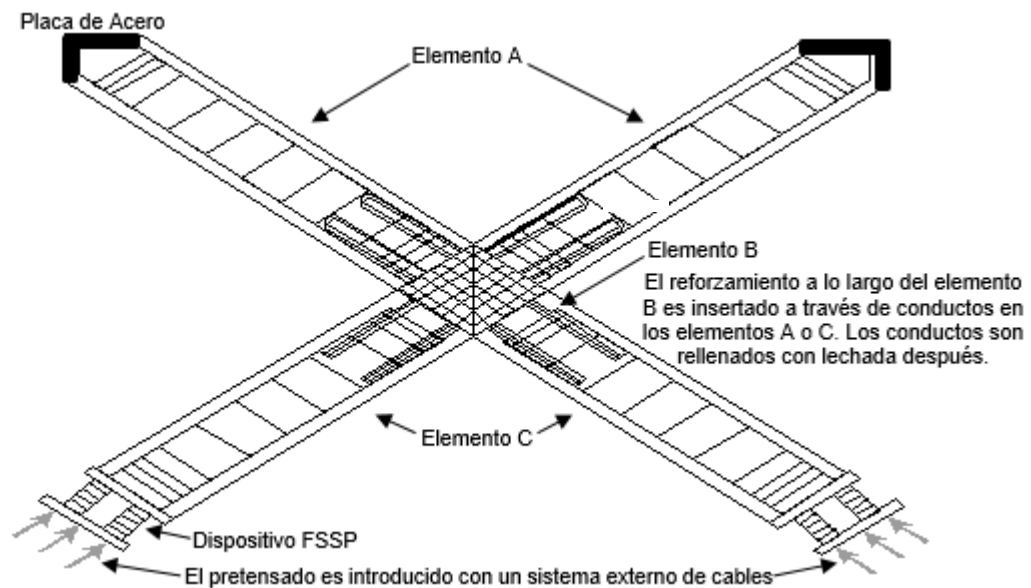


Figura 4.17 Arriostramiento de concreto prefabricado (basado en Venkataramana, 1995)

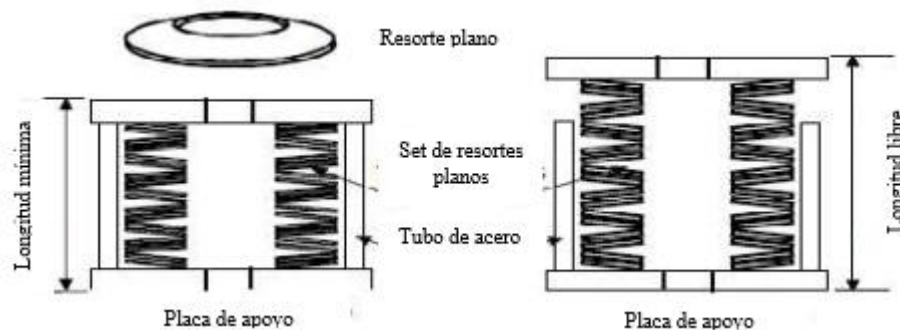


Figura 4.18 Dispositivo FSSP (Venkataramana, 1995)

#### 4.6.3 Problemas de Diseño

Los mayores problemas debido a este sistema de reforzamiento sísmico son:

1. Debe evaluarse la resistencia a cortante de la junta adyacente viga-columna y la resistencia a cortante directo de la viga y columna adyacentes.
2. Debe evaluarse la deformación por tracción de las vigas.
3. El dispositivo FSSP debe ser diseñado tanto para esfuerzo como para deformación
4. El pre-esfuerzo inicial aplicado en los elementos diagonales debe ser más que suficiente para que trabajen incluso después de las pérdidas debidas a cambio por efectos volumétricos y fluencia
5. Es necesario evaluar la resistencia a pandeo del elemento diagonal.

Todos estos problemas se encuentran representados en la Figura 4.19 **Error! Reference source not found.**

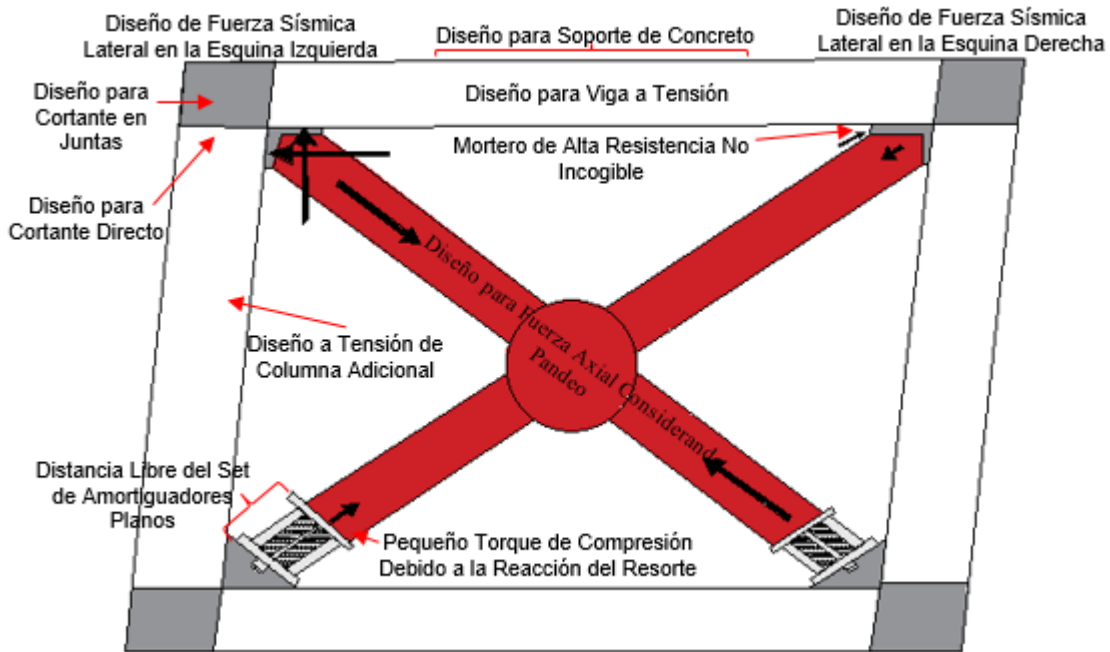


Figura 4.19 Problemas de diseño de arriostramientos prefabricados (basado en Venkataramana, 1995)

#### 4.7 ELEMENTO PREFABRICADO, PRETENSADO EN ARMADURA DE PARED CRUZADA

Se ha demostrado que la construcción tradicional, a pesar de la falta de conocimientos técnicos, tiene éxito en regiones de alta demanda sísmica como India, Turquía, Japón e Italia. Estos métodos apenas se siguen en la actualidad debido a la escasez de materiales de construcción tradicionales, las estrictas cláusulas de capacidad de servicio y el aumento en la magnitud de cada proyecto. De las muchas metodologías tradicionales, el sistema de pared transversal de armadura es uno de los más eficientes, por ejemplo; el sistema Dhajji Dewari en Cachemira. La siguiente figura muestra un piso superior con armadura en paredes cruzadas de un edificio ileso mientras que los pisos inferiores resultaron dañados en el terremoto de Cachemira de 2005. (Venkataramana, 1995)



**Figura 4.20** Ejemplo del sistema Dhajji Dewari (Venkataramana, 1995)

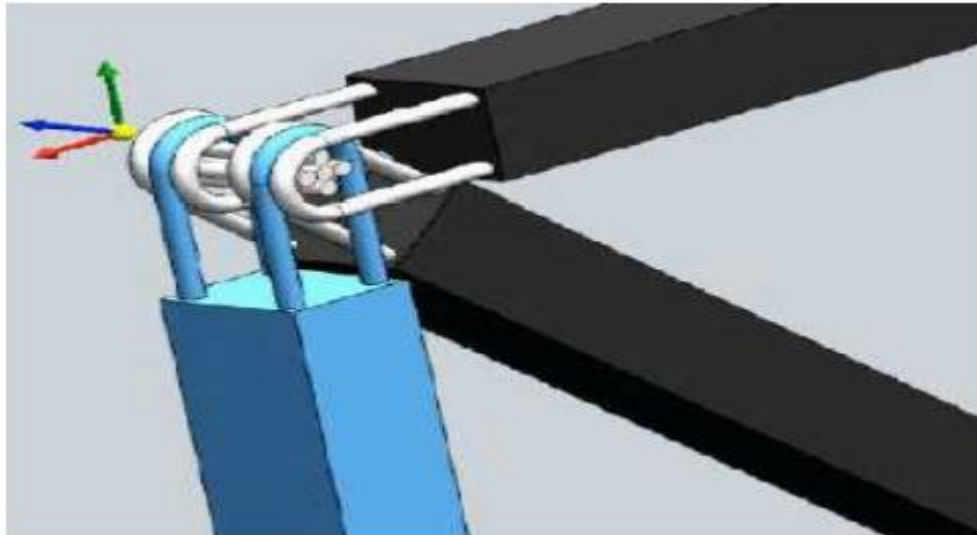


**Figura 4.21** Construcción con armadura en muro cruzado en un piso superior (Venkataramana, 1995)

En un esfuerzo por revivir las metodologías de construcción tradicional, elementos de concreto pretensados están siendo utilizados en lugar elementos de madera (Venkataramana, 1995).

#### 4.7.1 Marco Estructural

El arreglo propuesto por Wani Ahmad y Javed Ahmad Bhat sustituye los elementos de madera por elementos prefabricados pretensados fijados en las juntas donde los refuerzos se cruzarían entre sí, seguidos de una ligera lechada en las juntas que simula el sistema de pared transversal de la armadura. Un pasador de chaveta atraviesa los refuerzos en la junta y el espesor y la pared para lograr un contacto completo. La disposición de la armadura moviliza una resistencia adicional a la tensión y el pre-esfuerzo moviliza una resistencia adicional a la flexión. La Figura 4.22 muestra una unión del elemento y la pared transversal. (Venkataramana, 1995)



**Figura 4.22 Armadura de muro cruzado utilizando elementos de concreto pre-tensado (Venkataramana, 1995)**





## CONCLUSIONES

A lo largo de esta tesis se hizo notar cómo la planta baja débil en las viviendas multifamiliares de la Ciudad de México ha sido un problema de suma importancia siempre que ocurre un sismo de magnitud considerable y cómo, conforme los años que han transcurrido se han ido modificando las normas y ordenamientos respectivos, con el fin de disminuir la existencia de esta misma. Según la información recabada en el capítulo II, se determinó en inspecciones que 1821 estructuras de la Ciudad de México, poseían la patología de PBD, representando un 46.6% del total de las evaluaciones realizadas. Y de las cuales aproximadamente el 17% de ellas fueron construidas antes del sismo de 1985. Es por esta razón que se elaboraron tres modelos de “edificio tipo” con el reglamento de construcciones del Distrito Federal del año 1976, uno de 5, otro de 10 y un último de 15 niveles, todos ellos diseñados mediante un sistema de marcos de concreto y muros diafragma que posteriormente, mediante distintos ordenamientos de la época actual, entre ellos las NTCDS-2020 y a través de un análisis dinámico modal espectral fueron evaluados para determinar la PBD, entrepiso débil y/o entrepiso flexible debido al porcentaje de muro diafragma existente en el eje “X” de la planta baja.

Según los resultados obtenidos en estos análisis, una edificación alta es mucho menos susceptible a presentar la condición en comparación con aquella que tiene pocos niveles de altura cuando de PBD se habla. Esto puede afirmarse ya que, de los tres edificios diseñados y evaluados, en el modelo de 5 pisos (13 m) se presentaron más problemas de PBD, entrepiso débil, entrepiso débil extremo, entrepiso flexible y/o entrepiso flexible extremo cuando no se tenía muros en la planta baja en comparación con los edificios más altos. Entre estos problemas se destaca que el modelo de 5 niveles requería más del 66% de muro diafragma en su planta baja para poder dejar de presentar esta patología, en cambio, los edificios de 10 y 15 niveles requirieron del 56% y 51% de muro diafragma respectivamente.

El edificio de 10 niveles (26 m), presentó menores problemas con relación a la patología mencionada y el edificio de 15 niveles (39 m), fue el que resultó ser el más seguro de los tres ya que en este, no se presentaron rigideces de entrepiso en planta baja, considerablemente distintas a las de los pisos superiores, a pesar de no tener muros diafragma en el eje “X” de esa misma planta. Algo muy importante a destacar, es que el edificio de quince pisos requirió –durante las evaluaciones- de una cantidad menor de muros para poder dejar de estar dentro de las categorías de PBD, entrepiso débil y/o entrepiso débil extremo, en comparación con los edificios de 10 y 5 pisos, debido a que, entre más alto es un edificio, se requiere de elementos estructurales más robustos en la planta baja que soporten de mejor manera el peso que aportan los pisos superiores. El ser diseñados de esta manera garantiza una capacidad de resistencia a cortante y rigidez de entrepiso mayores, entonces al momento de comparar estas dos características de la planta baja con las de las plantas superiores, resulta no haber demasiada diferencia entre ellas.

Como se vio en el capítulo IV, corregir la PBD en una edificación es una tarea difícil. A pesar de que actualmente, la normativa de la CDMX se encuentra actualizada de tal manera que busca evitar esta patología en las nuevas construcciones, ya existen muchas otras estructuras creadas antes de que las normas fueran más específicas respecto a este tema. Es por esto que se considera necesario que el gobierno de la ciudad, a través de un programa de reforzamiento sísmico incentive a los dueños de construcciones con PBD a repararlas mediante distintos apoyos económicos.

Se considera que, los alcances de la metodología elaborada en esta tesis son reducidos ya que habría sido muy interesante haber podido realizar análisis con distintas zonas de la República Mexicana con el fin de obtener rúbricas de evaluación de la PBD para cada estado y sus respectivas ciudades, así, de esta manera apoyar a un sector mucho más grande de la población. Además de esto, también habría sido interesante conocer cómo se comportan los edificios sin muros en planta baja cuando tienen más crujías

en el eje “X” o “Y” o, en lugar de haber variado el porcentaje de muro, haberlo hecho con el de altura de las columnas en la planta baja y de esta manera obtener mayores parámetros de evaluación que acerquen al usuario a una mejor determinación de esta patología.

Por otro lado, se recomienda que, para trabajos futuros, si se desea hacer una investigación similar a la propuesta en esta tesis, en lugar de utilizar un análisis dinámico modal espectral podría realizarse mediante un análisis no lineal paso a paso en el software ETABS, teniendo en cuenta que se requiere de un ordenador muy potente, ya que este tipo de análisis requiere de muchos recursos computacionales con los cuales, al momento de escribir esta tesis no se contaba.

Finalmente se considera que el objetivo principal de esta tesis fue cumplido ya que se logró crear una metodología sencilla de fácil aplicación capaz de determinar si una edificación tiene la patología de planta baja débil y en qué medida la posee, además que, esta metodología puede ser utilizada estando a pie de calle y evaluando lo que es visible. Sin embargo, en caso de que la metodología indique que sí existe PBD, se deberán utilizar herramientas más completas de evaluación estructural para tomar diagnósticos más certeros y definitivos.

## APÉNDICE A

En este apartado se presenta la metodología aplicable en la evaluación para la PBD en edificios de la CDMX



EVALUACIÓN RÁPIDA DE LA PLANTA BAJA DÉBIL (PBD) - CDMX			
Datos de la edificación			
Dirección de la edificación:			
Referencias:			
Año de construcción:		Uso de Suelo: vivienda	
Fecha de Evaluación:			
No. De Pisos:		Área Total por Piso (m2):	
Reglamento Utilizado para su Diseño:			
Construcciones adicionales:			
Tipo de Uso Montaje		Comercial Escuela	
Industrial		Oficina Residencial #Departamentos:	
Servicios		Depósito	
Zona Sísmica:	I <input type="checkbox"/>	II <input type="checkbox"/>	III <input type="checkbox"/>
Patologías Estructurales Visibles:			
Comentarios:			
INFORMACIÓN ADMINISTRATIVA			
Datos del dueño			
Nombre del dueño:			
Dirección del dueño:			
Teléfono del dueño:		e-mail del dueño:	
(si los dueños de la edificación son más de uno, anotar sus datos en los siguientes espacios)			
Nombre del dueño 1:			
Dirección del dueño 1:			
Teléfono del dueño 1:		e-mail del dueño 1:	
Nombre del dueño 2:			
Dirección del dueño 2:			
Teléfono del dueño 2:		e-mail del dueño 2:	
Nombre del dueño 3:			
Dirección del dueño 3:			
Teléfono del dueño 3:		e-mail del dueño 3:	

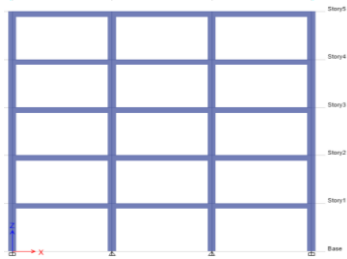
Datos del evaluador			
Nombre:			
Cargo:			
Teléfono:		e-mail :	
EVALUACIÓN			
<p><b>Anexar fotografía de la fachada de la edificación</b></p>		<p><b>Agregar breve descripción de la edificación:</b></p>	
Evaluación Inicial			
<b>Responda a las siguientes preguntas:</b>			
¿Hay al menos una pared deteriorada que no ha sido reforzada y es visible en el espacio de acceso? R=			
¿Hay una abertura de garaje sin un marco de concreto o algún tipo de reforzamiento? R=			
¿Hay aberturas en la planta baja (para estacionamiento) en al menos el 50% de la longitud del edificio?			
¿La longitud del sistema lateral en planta baja es entre el 50% y el 75% de la del piso superior o la			
<p>Si respondió afirmativamente a alguna de las preguntas anteriores, entonces realicé la siguiente evaluación, en caso contrario puede terminar la evaluación en este punto ya que la probabilidades de que la estructura evaluada posea planta baja débil son muy bajas</p>			

## Evaluación de PBD en Edificios de 3 - 5 pisos

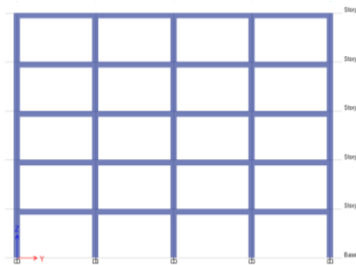
1. ¿Las columnas de la edificación -en planta baja- son iguales a las de los pisos posteriores (ancho, largo, altura)?

SÍ  NO

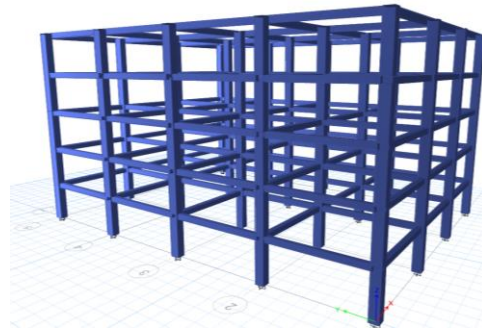
Ejemplo de edificio con columnas iguales en planta baja y plantas posteriores



Vista Frontal

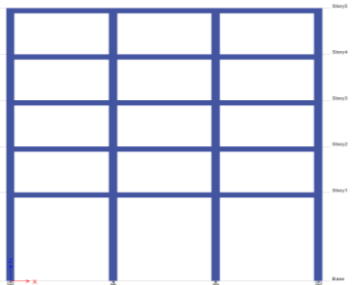


Vista Lateral

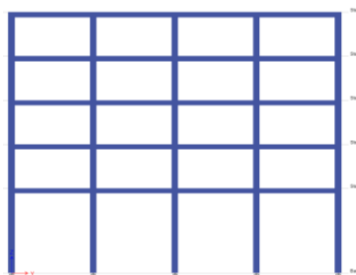


Vista 3D

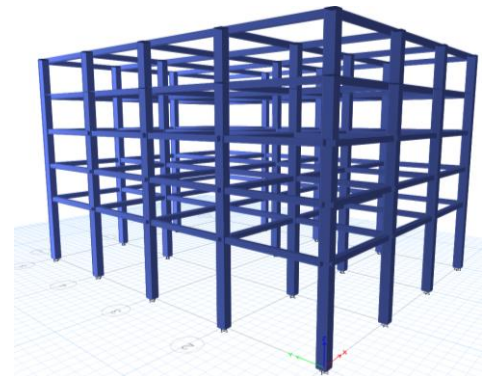
Ejemplo de edificio con columnas diferentes en planta baja respecto a pisos posteriores



Vista Frontal



Vista Lateral



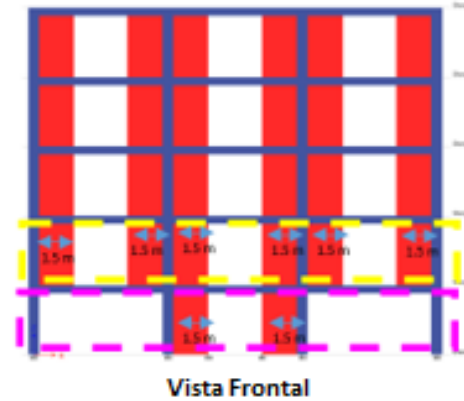
Vista 3D

¿Cuál es el porcentaje de muro existente en la planta baja con respecto a la planta posterior? R=

**Ejemplo de medición del porcentaje de muros**

Los muros en el piso 1 del edificio 1 miden 1.5 (m) cada uno, entonces al sumar la longitud de los 6 muros se obtiene un total de 9 (m) lo cual representaría el 100% de muros en ese piso. Los muros en la planta baja también miden 1.5, entonces al sumar la longitud de los 2 muros existentes se obtiene un total de 3 (m). Para encontrar el % de muros en planta baja, respecto al piso uno se realiza una proporción directa como se muestra a continuación:

$$\begin{array}{l} 9 \text{ (m)} \rightarrow 100\% \\ 3 \text{ (m)} \rightarrow \boxed{33.33\%} \end{array}$$



**Instrucciones:** una vez que haya obtenido el porcentaje de muro existente en planta baja, procederá a ingresar la siguiente rúbrica, donde se evaluará si la estructura posee planta baja débil, piso débil, piso débil extremo, entrepiso flexible o entrepiso flexible extremo.

**Rúbrica para la Evaluación de la PBD en Edificios de 3 - 5 pisos**

0%	Planta Baja Débil (NTC-CDMX)	66%	100%
0%	Entrepiso Débil Extremo (ASCE/SEI 7-16)	72%	A. 90% 100%
0% B.			

A. Entrepiso Débil (ASCE/SEI 7-16)  
B. Entrepiso Flexible

**Rúbrica para la Evaluación de la PBD en Edificios de 6 - 10 pisos**

0%	Planta Baja Débil (NTC-CDMX)	56%	100%
0%	Entrepiso Débil Extremo (ASCE/SEI 7-16)	64%	A. 75% 100%
0% B.			100%

A. Entrepiso Débil (ASCE/SEI 7-16)  
B. Entrepiso Flexible

**Rúbrica para la Evaluación de la PBD en Edificios de 11 - 15 pisos**

0%	Planta Baja Débil (NTC-CDMX)	51%	100%
0%	Entrepiso Débil Extremo (ASCE/SEI 7-16)	55%	A. 74% 100%

A. Entrepiso Débil (ASCE/SEI 7-16)

**Recomendaciones generales:** si a partir de esta primer evaluación el edificio evaluado presenta piso débil, piso débil extremo, planta baja débil o entrepiso flexible se recomienda contratar los servicios de un ingeniero especialista en estructuras con el fin de solicitar una evaluación más a fondo de la estructura en cuestión, esto con el fin de obtener una opinión profesional y una posible solución al problema presentado

## BIBLIOGRAFÍA

- Agha Beigi, H., Sullivan, T. J., Christopoulos, C., & Calvi, G. M. (2015). Factors influencing the repair costs of soft-story RC frame buildings and implications for their seismic retrofit. *Engineering Structures*, *101*, 233–245. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.06.045>
- Alcocer, S. M., & Murià, D. (2020). Rehabilitación sísmica de la infraestructura física educativa de México. Guía técnica. In *INIFED* (Vol. 1).
- Applied Technology Council. (2010). Here Today—Here Tomorrow: The Road to Earthquake Resilience in San Francisco (ATC 52-2). In *Applied Technology Council*.
- ASCE. (2017). Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. In *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. <https://doi.org/10.1061/9780784414859>
- B LopezCotelo. (2011). *Sismógrafo*. Sismógrafo.
- Bozzo, L., & Barbat, A. (2000). *Diseño sismorresistente de edificios*. Reverté.
- Buendía, L., & Reinoso, E. (2019). Patologías Estructurales. *Patologías Estructurales*, 50–58. [https://issuu.com/helios\\_comunicacion/docs/rmc\\_637](https://issuu.com/helios_comunicacion/docs/rmc_637)
- Buendía Sánchez, L. M., & Reinoso Angulo, E. (2019). ANÁLISIS DE LOS DAÑOS EN VIVIENDAS Y EDIFICIOS COMERCIALES DURANTE LA OCURRENCIA DEL SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 2017. *Revista de Ingeniería Sísmica*, *101*(101), 19–35. <https://doi.org/10.18867/ris.101.508>
- BYOARQ. (2018). *Identificación del suelo*. <http://www.byoarq.com/manual-autoproduccion/como-construir/identificacion-del-suelo-2/>
- CALDAS, U. D. F. J. DE. (2018). *ENCAMISADO EN CONCRETO ARMADO PARA EL REFUERZO DE VIGAS Y COLUMNAS DE UNA EDIFICACIÓN*.
- CANADEVÍ, & Analítica Inmobiliaria. (2019). *No Title*.
- Duarte, G. (2010). *Definición de Sismicidad*. <https://www.definicionabc.com/ciencia/sismicidad.php#:~:text=Se denomina sismicidad al análisis,que se suceden estos fenómenos.>
- ESG. (2020). *No Title*. <https://esemag.com/>
- Eurolosa. (2018). *No Title*. Refuerzo y Ampliación de Estructura En Hotel PORTAL PALACE (MALLORCA). <https://www.eurolosa.com/project/elements/>
- Flores-Estrella, H. C., Lomnitz-Aronsfrau, C., & Yussim-Guarneros, S. (2004). Estimación de velocidades de fase a partir del análisis de microtemores con el método SPAC. *Geos*, *24*(3), 438–445. <https://www.ugm.org.mx/publicaciones/geos/pdf/geos04-3/articulosinvestigacion/438-445.pdf>
- Gobierno de la Ciudad de México. (2017). *Normas Técnicas Complementarias-Ciudad de México*. 188.
- INEGI. (2015). *No Title*. Información Por Entidad. <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/df/poblacion/default.aspx?tema=me&e=09>
- Inel, M., & Ozmen, H. B. (2008). Effect Of Infill Walls On Soft Story Behavior In Mid-Rise Rc Buildings. *14th World Conference on Earthquake Engineering (14WCEE)*, 356(Fema 2000).
- Jara-Guerrero, J. M., Hernández-Mazariegos, E. J., Olmos-Navarrete, B. A., Martínez-Ruiz, G., & Roa-García, M. I. (2020). Seismic Vulnerability and Retrofit Alternatives for Typical Soft-story Buildings in Earthquake Prone Areas. *Structural Engineering International*, *30*(1), 33–42. <https://doi.org/10.1080/10168664.2019.1605865>
- Lermo, J., García, S., Sesma, F. J. S., Ramos, E., Álvarez, I., Luna, J., Machado, O., Zúñiga, Á., Jiménez, N., & Téllez, N. (2019). *Actualización de la zonificación geotécnica y sísmica de la CDMX y áreas aledañas- parte sur*. <http://www.ii.unam.mx/es-mx/AlmacenDigital/Gaceta/Gaceta-Noviembre-Diciembre-2019/Paginas/actualizacion-zonificacion-geotecni-sismica-cdmx.aspx>
- National Geographic. (2018). ¿Cuáles son las zonas de la Ciudad de México más riesgosas durante un sismo? *ECOSISTEMAS*.
- Olivera, P., & Delgadillo, V. (2014). *No Title*. Políticas Empresarialistas En Los Procesos de



Gentrificación En La Ciudad de México.

- PAOT. (2019). *Reforma publicada en la GOCDMX, el 29 de marzo de 2019* 1. 1–76.
- Pérez, J. J., Aguirre, J., & Ramírez, L. (2018). Sismicidad y seguridad estructural en las construcciones lecciones aprendidas en México. *Salud Publica Mex* 2018, 11.
- RAIGOSA, E. (2010). *Técnicas de reforzamiento de estructuras construidas de concreto que presentan deficiencias estructurales*.
- Reinoso, E. (2007). *Riesgo Sísmico de la Ciudad de México*.
- Rodriguez, M. E. (2019). INTERPRETACIÓN DE LOS DAÑOS Y COLAPSOS EN EDIFICACIONES OBSERVADOS EN LA CIUDAD DE MÉXICO EN EL TERREMOTO DEL 19 DE SEPTIEMBRE 2017. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 101(101), 1–18. <https://doi.org/10.18867/ris.101.528>
- Rosenblueth, E., Sánchez-Sesma, F. J., Ordaz, M., & Singh, S. K. (1987). Espectros de Diseño en el Reglamento para las Construcciones del Distrito Federal. *VII Congreso Nal. de Ingeniería Sísmica*, A1–A17.
- Ruiz, S. E., & Diederich, R. (1989). The Mexico Earthquake of September 19, 1985—The Seismic Performance of Buildings with Weak First Storey. *Earthquake Spectra*, 5(1), 89–102. <https://doi.org/10.1193/1.1585512>
- Servicio Sismológico Nacional. (2020). *Mapas de Sismicidad Anual*. <http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/mapas-de-sismicidad-anual/>
- SGIRPC. (2017). *ATLAS CDMX*. <http://www.atlas.cdmx.gob.mx/analisisn2/>
- Tena-Colunga, A. (2021). Conditions of structural irregularity. Relationships with observed earthquake damage in Mexico City in 2017. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 143, 106630. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106630>
- Tetta, Z. C., Koutas, L. N., & Bournas, D. A. (2015). Textile-reinforced mortar (TRM) versus fiber-reinforced polymers (FRP) in shear strengthening of concrete beams. *Composites Part B: Engineering*, 77, 338–348. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.055>
- Udías, A., & Mezcuca, J. (1986). *Fundamentos de Geofísica* (E. Alhambra (ed.)).
- Venkataramana, K. (1995). *Seismic Retrofitting Using Buckling-Restrained* (Issue March 2014). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2902.4802>