



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA EN EL
ÁREA DE ESTRUCTURAS**

**“VULNERABILIDAD SÍSMICA DE EDIFICIOS EN ESQUINA
DURANTE EL TEMBLOR DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE
2017“**

TESIS

**PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN INGENIERÍA EN EL ÁREA DE ESTRUCTURAS**

PRESENTA

ING. CLAUDIA MABEL CORTÉS MONDRAGÓN

ASESOR

DR. JOSÉ MANUEL JARA GUERRERO



Morelia, Michoacán agosto 2020

*"Tarde o temprano la disciplina
vencerá a la inteligencia"*

AGRADECIMIENTOS

Pon todo lo que hagas en manos del Señor, y tus planes tendrán éxito
Proverbios 16:3

A DIOS:

Hoy con gran alegría puedo decir que terminamos una etapa más en mi vida, a ti Dios te lo debo todo cuanto tengo mi familia, mi carrera, mi novio, mis amigos y mucho más. Me has dado la inteligencia, sabiduría y fuerzas para seguir aun en los momentos más difíciles. A ti Dios dedico este mi más grande logro hasta ahora, pues tu estuviste y estas en todo momento tomándome de la mano y guiándome.

Porque me has iluminado y guiado durante esta bonita etapa de mi vida, porque sin ti no hubiera podido salir adelante en los momentos difíciles y de prueba, no tengo palabras para agradecer lo mucho que me has dado, lo único que puedo decir es que te necesitaré en cada proyecto que emprenda en mi vida, por lo que nunca me apartaré de ti.

A mi asesor José Manuel Jara:

Doctor mis palabras no alcanzarían para expresarle lo agradecida que estoy con usted por permitirme realizar una vez más una investigación bajo su asesoría; también he de agradecerle en gran medida por apoyarme y alentarme a seguirme hasta el final.

A mis padres Vicente y Eva:

Hoy tengo la dicha de compartir y dedicar un logro más junto a ustedes, las personas que me lo han dado todo en este mundo. Solo Dios sabe lo mucho que los amo y lo agradecida que estoy por permitirme tener unos padres extraordinarios como lo son ustedes dos; los cuales con su ejemplo y valores me han sabido guiar y apoyar en cada etapa de mi vida. Son mis más grandes ejemplos a seguir, las personas a quienes más admiro, respeto y amo.

Me han mostrado como con ayuda de Dios, esfuerzo y dedicación se puede seguir adelante y alcanzar los sueños que pareciera son imposibles. Les agradezco por que la persona en la que me he convertido ha sido gracias a sus consejos, ánimos, y esfuerzo.

A mis hermanos Carlos y Betsy:

Por ser dos de los más grandes ejemplos a seguir en mi vida, con mi más grande respeto, profundo cariño y admiración, dedico este logro y estas palabras a mis hermanos, quienes este día pueden ver los frutos de una semilla sembrada con esfuerzo e ilusión, alimentada con ternura y amor; quienes en tiempos de tempestad supieron guiarme, apoyarme y dar consuelo. Pueden ver orgullosos hoy que he seguido cada uno de los pasos que me han marcado. A ustedes en esta la ocasión les agradezco de todo corazón por siempre apoyarme y alentarme, no podría desear a otros hermanos mejores que ustedes, los amo.

A mi novio José Luis:

Sin duda alguna eres el más grande regalo que Dios me concedió. Todos los días agradezco el que pusiera en mi vida a un extraordinario hombre como tú a mi lado. No tengo palabras para agradecer tu apoyo incondicional, respeto y amor. Así que te prometo siempre dar lo mejor de mí en todo aspecto y lograr cada día más que te sientas orgulloso.

Hoy compartimos la dicha de terminar esta gran etapa de nuestras vidas; este logro que después de toda adversidad podemos decir que es nuestro.

*“Si compartes las tristezas con la persona que amas estas se dividirán,
pero si compartes las alegrías con la persona que amas estas se multiplicarán”*

A mi cuñado Francisco:

Uno de los más grandes mentores, pastor y familia. Por tus consejos y ánimos; por apoyarme y ayudarme a lo largo de mi carrera y en los logros de mi vida como lo es la finalización de esta etapa; pero sobre todo por alentarme a seguir mis sueños gracias.

A mis amigos:

Somos un grupo de amigos que a pesar de nuestras diferencias hemos aprendido a compartir una amistad de verdad y a complementarnos a la perfección. Somos una gran familia Amirais, Naim, Vanessa y José Luis.

Gloria, Sergio y Lizbeth ustedes son los hermanos que tendré por y para siempre, gracias por siempre tener los brazos abiertos y siempre creer en mí.

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
RESUMEN	15
ABSTRACT	16
OBJETIVOS	17
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	18
1.1 CONSIDERACIÓN DEL EFECTO DE TORSIÓN	20
1.2 TORSIÓN	23
1.2.1 CENTROS DE MASA, CORTANTE Y RIGIDEZ	24
1.2.2 EXCENTRICIDAD ESTÁTICA, ACCIDENTAL Y DE DISEÑO	27
CAPÍTULO II CARACTERÍSTICAS DEL TEMBLOR DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 2017	32
2.1 SISMICIDAD HISTÓRICA DE LOS ESTADOS DE PUEBLA Y MORELOS	35
2.2 REGISTROS DEL SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 2017	37
2.3 DAÑOS CAUSADOS POR EL SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 2017	47
2.3.1 DAÑO EN LA CIUDAD DE MÉXICO	50
CAPÍTULO III ESTADÍSTICAS DE EDIFICIOS DAÑADOS POR EL EVENTO SÍSMICO	52
3.1 ESTADÍSTICAS DE LOS INMUEBLES EN ESQUINA	60
CAPÍTULO IV ACELEROGRAMAS REGISTRADOS EN TERRENO FLEXIBLE	66
4.1 ACELEROGRAMAS Y ESPECTROS DE RESPUESTA	70
4.1.1 ZONA TIPO II	70
4.1.2 ZONA TIPO III a	75
4.1.3 ZONA TIPO III b	80
CAPÍTULO V MODELOS NUMÉRICOS DE LOS EDIFICIOS A ESTUDIAR	85
5.1 CONFIGURACIÓN DE LOS MODELOS DE ESTUDIO	85
5.2 DISEÑO Y CARACTERÍSTICAS DE LOS ELEMENTOS	89
5.2.1 MATERIALES EMPLEADOS	89
5.2.2 ESPECTRO DE DISEÑO	90
5.2.3 SISTEMA DE PISO	92
5.2.4 COLUMNAS Y VIGAS	93
5.2.5 PUNTALES EQUIVALENTES	98

CAPÍTULO VI ANÁLISIS DINÁMICO LINEAL Y NO LINEAL DE LOS MODELOS ESTRUCTURALES	102
6.1 ANÁLISIS DINÁMICOS LINEALES	102
6.2 ANÁLISIS DINÁMICOS NO LINEALES	106
6.3 DEMANDA DE DISTORSIONES	107
6.4 ROTACIÓN EN COLUMNAS	118
6.5 ENERGIA DE ENTRADA DE LOS EDIFICIOS Y ENERGIA HISTERÉTICA DE LAS COLUMNAS	121
CAPÍTULO VII DISCUSIÓN DE RESULTADOS	143
CAPÍTULO VIII CONCLUSIONES	147
REFERENCIAS	148

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Registro histórico de eventos sísmicos de gran magnitud en el estado de Puebla	35
Tabla 2 Número de registros por estado del sismo del 19-Sep-2017	37
Tabla 3 Estaciones y aceleraciones máximas registradas en la Ciudad de México	39
Tabla 4 Estaciones y aceleraciones máximas registradas en el estado de Guerrero	43
Tabla 5 Estaciones y aceleraciones máximas registradas en el estado de Oaxaca	44
Tabla 6 Estaciones y aceleraciones máximas registradas en el estado de Puebla	45
Tabla 7 Estaciones y aceleraciones máximas registradas en los estados de Michoacán, Veracruz, Chiapas, Colima, México, Guanajuato y Jalisco	46
Tabla 8 Acelerogramas seleccionados para análisis no lineales de modelos de estudio	67
Tabla 9 Propiedades de los materiales empleados	89
Tabla 10 Parámetros para el espectro de diseño en zona III	90
Tabla 11 Cargas vivas consideradas para oficinas según el reglamento de 1976	93
Tabla 12 Cargas muertas para losa de azotea consideradas	93
Tabla 13 Cargas muertas para losas de entresijos consideradas	93
Tabla 14 Diseño de vigas para modelos estructurales	94
Tabla 15 Diseño de columnas de esquina, centrales y de borde para el modelo de tres niveles	94
Tabla 16 Diseño de columnas de esquina, centrales y de borde para el modelo de cinco niveles	95
Tabla 17 Diseño de columnas de esquina, centrales y de borde para el modelo de seis niveles	96
Tabla 18 Diseño de columnas de esquina, centrales y de borde para el modelo de nueve niveles	97
Tabla 19 Anchos de los puntales equivalentes de los modelos de estudio	100
Tabla 20 Formas modales para el modelo de tres niveles	103
Tabla 21 Formas modales para el modelo de cinco niveles	103
Tabla 22 Formas modales para el modelo de seis niveles	104
Tabla 23 Formas modales para el modelo de nueve niveles	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Placas tectónicas que conforman la tierra (ley del Congreso en 1879, 2019)	18
Figura 2 Clasificación de los sismos de acuerdo con su origen	19
Figura 3 Placas tectónicas que interactúan en territorio mexicano (SSN, 2017)	20
Figura 4 Edificio con daños graves en la CDMX. Dirección: Concepción Beistigui, esquina Yacatas, colonia Narvarte Poniente (Ruiz, 2017)	24
Figura 5 Movimiento de traslación que experimenta la edificación	25
Figura 6 Localización del epicentro del sismo del 19 septiembre y otros sismos de tipo intraplaca. Las pelotas de playa muestran la orientación de la falla y su dirección de deslizamiento (Cruz Atienza et al., 2017)	32
Figura 7 Áreas de ruptura de los sismos más importantes que han ocurrido en México. Además, el epicentro del sismo del 19 de septiembre de 2017 se representa con un punto color rojo (SSN, 2017).	33
Figura 8 Mapa de intensidades del sismo del 19-Sep-2017 (CENAPRED, 2019)	34
Figura 9 Epicentros de sismos históricos intraplaca en el estado de Puebla (SSN, 2017)	36
Figura 10 Ubicación de las estaciones de la Ciudad de México registraron el sismo del 19-Sep-2017 (https://www.google.com/maps/d/u/0/embed?mid=1d0JXBfIZIUZJebf3uFQAMz181D8&ll=19.398773827762305%2C-99.29162716572648&z=11)	38
Figura 11 Aceleraciones máximas registradas en la Ciudad de México	40
Figura 12 Aceleraciones máximas registradas en la Ciudad de México	41
Figura 13 Aceleraciones máximas registradas en la Ciudad de México	42
Figura 14 Aceleraciones máximas registradas en el estado de Guerrero	43
Figura 15 Aceleraciones máximas registradas en el estado de Oaxaca	44
Figura 16 Aceleraciones máximas registradas en el estado de Puebla	45
Figura 17 Aceleraciones máximas registradas en los estados de Chiapas, Colima, Guanajuato, Jalisco, México, Michoacán y Veracruz	46
Figura 18 Ubicación y estado de los establecimientos de salud después del sismo del 19 de septiembre de 2017 (CENAPRED, 2019)	48
Figura 19 Ubicación y estado de los centros educativos después del sismo del 19 de septiembre de 2017 (CENAPRED, 2019)	48
Figura 20 Ubicación y estado de la infraestructura cultural después del sismo del 19 de septiembre de 2017 (CENAPRED, 2019)	49
Figura 21 Ubicación y estado de las viviendas después del sismo del 19 de septiembre de 2017 (CENAPRED, 2019)	49
Figura 22 Ejemplo del análisis de uno de los inmuebles del “Inventario de daños de la CDMX” (Secretaría de Desarrollo Económico, 2017)	50
Figura 23 Número de inmuebles dañados ubicados en esquina	53
Figura 24 Clasificación de los daños de los inmuebles	54
Figura 25 Mapa interactivo de la Ciudad de México (https://www.google.com/maps/d/u/0/embed?mid=1d0JXBfIZIUZJebf3uFQAMz181D8&ll=19.398773827762305%2C-99.29162716572648&z=11)	55
Figura 26 Zonificación sísmica de la Ciudad de México (Gobierno 2004)	56
Figura 27 Localización de los inmuebles de estudio	57

Figura 28 Número de niveles de los inmuebles dañados	57
Figura 29 Estructuración de los inmuebles de estudio	58
Figura 30 Sistemas de piso de los inmuebles de estudio	59
Figura 31 Uso de los inmuebles de estudio	59
Figura 32 Porcentaje preliminar de edificios ubicados en esquina que sufrieron colapso (Galvis et al., 2017)	60
Figura 33 Daño estructural en inmuebles de esquina	61
Figura 34 Número de edificios en esquina que contaban con muros colindantes	62
Figura 35 Zonificación de los inmuebles de estudio en esquina	62
Figura 36 Número de niveles en inmuebles de esquina	63
Figura 37 Estructuración en inmuebles de esquina	64
Figura 38 Sistema de piso que presentaron los inmuebles de esquina	64
Figura 39 Uso de inmuebles en esquina	65
Figura 40 Registro de acelerograma A024. Ubicación: General Pedro María Anaya, Benito Juárez (Dirección N00E)	71
Figura 41 Registro de acelerograma A024. Ubicación: General Pedro María Anaya, Benito Juárez (Dirección N90W)	71
Figura 42 Registro de acelerograma AU46. Ubicación: Del Valle, Benito Juárez (Dirección N00E)	72
Figura 43 Registro de acelerograma AU46. Ubicación: Del Valle, Benito Juárez (Dirección N90W)	72
Figura 44 Registro de acelerograma DX37. Ubicación: Ciudad Jardín, Coyoacán (Dirección N00E)	73
Figura 45 Registro de acelerograma DX37. Ubicación: Ciudad Jardín, Coyoacán (Dirección N90W)	73
Figura 46 Espectros de respuesta en suelo tipo II correspondientes al sismo del 19 de septiembre de 2017 (Dirección N00E)	74
Figura 47 Espectros de respuesta en suelo tipo II correspondientes al sismo del 19 de septiembre de 2017 (Dirección N90W)	74
Figura 48 Registro de acelerograma IB22. Ubicación: Campestre, Coyoacán (Dirección N00E)	76
Figura 49 Registro de acelerograma IB22. Ubicación: Campestre, Coyoacán (Dirección N90W)	76
Figura 50 Registro de acelerograma LI33. Ubicación: Santa Catarina, Tláhuac (Dirección N00E)	77
Figura 51 Registro de acelerograma LI33. Ubicación: Santa Catarina, Tláhuac (Dirección N90W)	77
Figura 52 Registro de acelerograma MI15. Ubicación: San Bartolo Chico, Xochimilco (Dirección S00E)	78
Figura 53 Registro de acelerograma MI15. Ubicación: San Bartolo Chico, Xochimilco (Dirección N90W)	78
Figura 54 Espectros de respuesta en suelo tipo III a correspondientes al sismo del 19 de septiembre de 2017 (Dirección N00E)	79
Figura 55 Espectros de respuesta en suelo tipo III a correspondientes al sismo del 19 de septiembre de 2017 (Dirección N90W)	79
Figura 56 Registro de acelerograma CJ03. Ubicación: Roma, Cuauhtémoc (Dirección N00E)	81
Figura 57 Registro de acelerograma CJ03. Ubicación: Roma, Cuauhtémoc (Dirección N90W)	81

Figura 58 Registro de acelerograma CO56. Ubicación: Roma, Cuauhtémoc (Dirección N00E)	82
Figura 59 Registro de acelerograma CO56. Ubicación: Roma, Cuauhtémoc (Dirección N90W)	82
Figura 60 Registro de acelerograma PE10. Ubicación: Barrio San Pedro, Iztacalco (Dirección N00E)	83
Figura 61 Registro de acelerograma PE10. Ubicación: Barrio San Pedro, Iztacalco (Dirección N90W)	83
Figura 62 Espectros de respuesta en suelo tipo III b correspondientes al sismo del 19 de septiembre de 2017 (Dirección N00E)	84
Figura 63 Espectros de respuesta en suelo tipo III b correspondientes al sismo del 19 de septiembre de 2017 (Dirección N90W)	84
Figura 64 Croquis de planta tipo de los modelos de estudio	86
Figura 65 Configuración de las elevaciones en dirección X e Y para modelo de 9 niveles	87
Figura 66 Configuración de las elevaciones en dirección X e Y para modelo de 6 niveles	87
Figura 67 Configuración de las elevaciones en dirección X e Y para modelo de 5 niveles	88
Figura 68 Configuración de las elevaciones en dirección X e Y para modelo de 3 niveles	88
Figura 69 Espectro de diseño y espectro de diseño modificado o reducido de acuerdo con el reglamento de construcción de 1976	91
Figura 70 Croquis de planta tipo que presentan las losas de entrepiso y azotea de todos los modelos	92
Figura 71 Variables del puntal equivalente de acuerdo con reglamento FEMA 356 (ASCE, 2000)	99
Figura 72 Vista frontal y posterior del modelo de tres niveles con puntales equivalentes	100
Figura 73 Configuración de las elevaciones en dirección x e y para modelo de 9 niveles con puntales equivalentes	101
Figura 74 Espectro de diseño, espectro de diseño modificado y formas modales para el modelo de tres niveles	104
Figura 75 Espectro de diseño, espectro de diseño modificado y formas modales para el modelo de cinco niveles	105
Figura 76 Espectro de diseño, espectro de diseño modificado y formas modales para el modelo de seis niveles	105
Figura 77 Espectro de diseño, espectro de diseño modificado y formas modales para el modelo de nueve niveles	105
Figura 78 Modelos con degradación de rigidez (ASCE, 2000)	107
Figura 79 Demanda de distorsiones para columna libre en modelo de tres niveles	108
Figura 80 Demanda de distorsiones para columna con puntal a la derecha en modelo de tres niveles	109
Figura 81 Demanda de distorsiones para columna con puntal a la izquierda en modelo de tres niveles	109
Figura 82 Demanda de distorsiones para columna con dos puntales en modelo de tres niveles	110
Figura 83 Demanda de distorsiones para columna central en modelo de tres niveles	110

Figura 84 Demanda de distorsiones para columna libre en modelo de cinco niveles	111
Figura 85 Demanda de distorsiones para columna con puntal a la derecha en modelo de cinco niveles	111
Figura 86 Demanda de distorsiones para columna con puntal a la izquierda en modelo de cinco niveles	112
Figura 87 Demanda de distorsiones para columna con dos puntales en modelo de cinco niveles	112
Figura 88 Demanda de distorsiones para columna central en modelo de cinco niveles	113
Figura 89 Demanda de distorsiones para columna libre en modelo de seis niveles	113
Figura 90 Demanda de distorsiones para columna con puntal a la derecha en modelo de seis niveles	114
Figura 91 Demanda de distorsiones para columna con puntal a la izquierda en modelo de seis niveles	114
Figura 92 Demanda de distorsiones para columna con dos puntales en modelo de seis niveles	115
Figura 93 Demanda de distorsiones para columna central en modelo de seis niveles	115
Figura 94 Demanda de distorsiones para columna libre en modelo de nueve niveles	116
Figura 95 Demanda de distorsiones para columna con puntal a la derecha en modelo de nueve niveles	116
Figura 96 Demanda de distorsiones para columna con puntal a la izquierda en modelo de nueve niveles	117
Figura 97 Demanda de distorsiones para columna con dos puntales en modelo de nueve niveles	117
Figura 98 Demanda de distorsiones para columna central en modelo de nueve niveles	118
Figura 99 Rotación promedio para las cinco columnas de estudio del modelo de tres niveles	119
Figura 100 Rotación promedio para las cinco columnas de estudio del modelo de cinco niveles	119
Figura 101 Rotación promedio para las cinco columnas de estudio del modelo de seis niveles	120
Figura 102 Rotación promedio para las cinco columnas de estudio del modelo de nueve niveles	120
Figura 103 Curvas de balance de energía para modelo de tres niveles con registro de acelerograma AO24	122
Figura 104 Curvas de balance de energía para modelo de tres niveles con registro de acelerograma AU46	122
Figura 105 Curvas de balance de energía para modelo de tres niveles con registro de acelerogramaGC38	123
Figura 106 Curvas de balance de energía para modelo de tres niveles con registro de acelerograma IB22	123
Figura 107 Curvas de balance de energía para modelo de tres niveles con registro de acelerograma AL01	124
Figura 108 Curvas de balance de energía para modelo de tres niveles con registro de acelerograma CI05	124
Figura 109 Curvas de balance de energía para modelo de cinco niveles con registro de acelerograma AO24	125

Figura 110 Curvas de balance de energía para modelo de cinco niveles con registro de acelerograma AU46	125
Figura 111 Curvas de balance de energía para modelo de cinco niveles con registro de acelerograma GC38	126
Figura 112 Curvas de balance de energía para modelo de cinco niveles con registro de acelerograma IB22	126
Figura 113 Curvas de balance de energía para modelo de cinco niveles con registro de acelerograma AL01	127
Figura 114 Curvas de balance de energía para modelo de cinco niveles con registro de acelerograma CI05	127
Figura 115 Curvas de balance de energía para modelo de seis niveles con registro de acelerograma AO24	128
Figura 116 Curvas de balance de energía para modelo de seis niveles con registro de acelerograma AU46	128
Figura 117 Curvas de balance de energía para modelo de seis niveles con registro de acelerograma GC38	129
Figura 118 Curvas de balance de energía para modelo de seis niveles con registro de acelerograma IB22	129
Figura 119 Curvas de balance de energía para modelo de seis niveles con registro de acelerograma	130
Figura 120 Curvas de balance de energía para modelo de seis niveles con registro de acelerograma CI05	130
Figura 121 Curvas de balance de energía para modelo de nueve niveles con registro de acelerograma AO24	131
Figura 122 Curvas de balance de energía para modelo de nueve niveles con registro de acelerograma AU46	131
Figura 123 Curvas de balance de energía para modelo de nueve niveles con registro de acelerograma GC38	132
Figura 124 Curvas de balance de energía para modelo de nueve niveles con registro de acelerograma IB22	132
Figura 125 Curvas de balance de energía para modelo de nueve niveles con registro de acelerograma AL01	133
Figura 126 Curvas de balance de energía para modelo de nueve niveles con registro de acelerograma CI05	132
Figura 127 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 1 del modelo de tres niveles con registro de acelerograma AO24	134
Figura 128 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 2 del modelo de tres niveles con registro de acelerograma AO24	134
Figura 129 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 3 del modelo de tres niveles con registro de acelerograma AO24	134
Figura 130 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 1 del modelo de tres niveles con registro de acelerograma IB22	134
Figura 131 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 2 del modelo de tres niveles con registro de acelerograma IB22	135
Figura 132 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 3 del modelo de tres niveles con registro de acelerograma IB22	135
Figura 133 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 1 del modelo de tres niveles con registro de acelerograma AL01	135
Figura 134 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 2 del modelo de tres niveles con registro de acelerograma AL01	135

Figura 135 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 3 del modelo de tres niveles con registro de acelerograma AL01	136
Figura 136 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 1 del modelo de cinco niveles con registro de acelerograma AO24	136
Figura 137 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 2 del modelo de cinco niveles con registro de acelerograma AO24	136
Figura 138 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 3 del modelo de cinco niveles con registro de acelerograma AO24	136
Figura 139 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 4 del modelo de cinco niveles con registro de acelerograma AO24	137
Figura 140 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 5 del modelo de cinco niveles con registro de acelerograma AO24	137
Figura 141 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 1 del modelo de cinco niveles con registro de acelerograma IB22	137
Figura 142 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 2 del modelo de cinco niveles con registro de acelerograma IB22	137
Figura 143 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 3 del modelo de cinco niveles con registro de acelerograma IB22	138
Figura 144 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 4 del modelo de cinco niveles con registro de acelerograma IB22	138
Figura 145 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 5 del modelo de cinco niveles con registro de acelerograma IB22	138
Figura 146 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 1 del modelo de seis niveles con registro de acelerograma AO24	138
Figura 147 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 2 del modelo de seis niveles con registro de acelerograma AO24	139
Figura 148 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 3 del modelo de seis niveles con registro de acelerograma AO24	139
Figura 149 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 4 del modelo de seis niveles con registro de acelerograma AO24	139
Figura 150 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 5 del modelo de seis niveles con registro de acelerograma AO24	139
Figura 151 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 6 del modelo de seis niveles con registro de acelerograma AO24	140
Figura 152 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 1 del modelo de seis niveles con registro de acelerograma IB22	140
Figura 153 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 2 del modelo de seis niveles con registro de acelerograma IB22	140
Figura 154 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 3 del modelo de seis niveles con registro de acelerograma IB22	140
Figura 155 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 4 del modelo de seis niveles con registro de acelerograma IB22	141
Figura 156 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 5 del modelo de seis niveles con registro de acelerograma IB22	141
Figura 157 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 6 del modelo de seis niveles con registro de acelerograma IB22	141
Figura 158 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 1 a 9 del modelo de nueve niveles con registro de acelerograma A024	141
Figura 159 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 1 a 5 del modelo de nueve niveles con registro de acelerograma IB22	142

Figura 160 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 6 a 9 del modelo de nueve niveles con registro de acelerograma IB22	142
Figura 161 Distorsiones para las cinco columnas de estudio para modelo de tres niveles	144
Figura 162 Distorsiones para las cinco columnas de estudio para modelo de cinco niveles	144
Figura 163 Distorsiones para las cinco columnas de estudio para modelo de seis niveles	145
Figura 164 Distorsiones para las cinco columnas de estudio para modelo de nueve niveles	145

RESUMEN

En México una de las problemáticas más grandes a abordar sin duda alguna son los eventos sísmicos, ya que los eventos de gran magnitud no solo afectan a la construcción, sino que también ponen en peligro la vida de todos los habitantes. Durante muchos años los sismos han causado una gran cantidad de daños estructurales y pérdidas humanas; entre los daños estructurales más comunes se encuentran: colapso de edificios por planta baja flexible, columna corta, golpeteo, torsión, entre otros. La torsión produce daños que frecuentemente conducen al colapso a las estructuras.

El efecto de torsión es un término poco investigado y tomado en cuenta en cuanto a construcción se refiere, en el presente trabajo se enfoca en el estudio de la vulnerabilidad que sufren los edificios de esquina, ya que son estos los más propensos a sufrir daños a causa del efecto de torsión y una mala configuración.

Para llevar a cabo la investigación se comenzó por estudiar las estadísticas producto de los daños en edificaciones a causa del sismo del 19 de septiembre de 2017, para posteriormente formar cuatro casos de estudio, los cuales presentaban las cualidades con mayor frecuencia los edificios dañados ante dicho evento sísmico. Los modelos y análisis lineales se llevaron a cabo con ayuda del software en estructuras "SAP2000", mientras que los modelos y análisis no lineales fueron creados a partir del programa "PERFORM 3D". Los muros colindantes que se encontraron en el 98% de las edificaciones de esquina fueron modelados y considerados con las especificaciones marcadas en el FEMA 356, el cual nos permitió idealizar estos como puntales equivalentes conservando todas las características de los muros poseen.

Por último, se analizan los resultados que se obtienen de los análisis lineales y no lineales de los cuatro modelos numéricos de estudio, considerando 28 acelerogramas en terreno flexible seleccionados para el estudio. Es importante las medidas de tendencia central s, de donde se concluye que es una alternativa viable realizar análisis no lineales que permitan conocer el verdadero comportamiento que presentan las edificaciones ante los eventos sísmicos y con ello mejorar la respuesta sísmica de las edificaciones ante estos eventos.

Palabras Clave: Sismo del 19 de septiembre del 2017, edificios de esquina, Torsión, estadísticas, mala configuración estructural y vulnerabilidad.

ABSTRACT

In Mexico, one of the biggest problems to be addressed is undoubtedly seismic events, since large-scale events not only affect construction, but also endanger the lives of all inhabitants. Over many years earthquakes have caused a great deal of structural damage and human losses; among the most common structural damages are: collapse of buildings due to flexible ground floor, short column, knocking, torsion, among others. The torsion produces damage that frequently leads to the collapse of structures.

The torsion effect is a term little investigated and taken into account as far as construction is concerned, in this work it focuses on the study of the vulnerability suffered by corner buildings, since they are the most prone to damage to cause of twisting effect and bad configuration.

To carry out the research, we began by studying the statistics resulting from the damage to buildings due to the earthquake of September 19, 2017, to later form four case studies, which presented the qualities most frequently the buildings damaged before said seismic event. The linear models and analyzes were carried out with the help of the software on "SAP2000" structures, while the non-linear models and analyzes were created from the "PERFORM 3D" program. The adjoining walls that were found in 98% of the corner buildings were modeled and considered with the specifications marked in FEMA 356, which allowed us to idealize these as equivalent props while preserving all the characteristics of the walls they possess.

Finally, the results obtained from the linear and non-linear analyzes of the four numerical study models are analyzed, considering 28 accelerograms in flexible terrain selected for the study. It is important to measure central tendency s, from which it is concluded that it is a viable alternative to carry out non-linear analyzes that allow knowing the true behavior of buildings in the event of seismic events and thereby improve the seismic response of buildings to these events.

Key Words: Earthquake of September 19, 2017, corner buildings, Torsion, statistics, poor structural configuration and vulnerability.

OBJETIVOS

➤ **General:**

Evaluar la vulnerabilidad sísmica de edificios en esquina con tipología similar a los edificios dañados durante el temblor de Morelos del 19 de septiembre de 2017.

➤ **Particulares:**

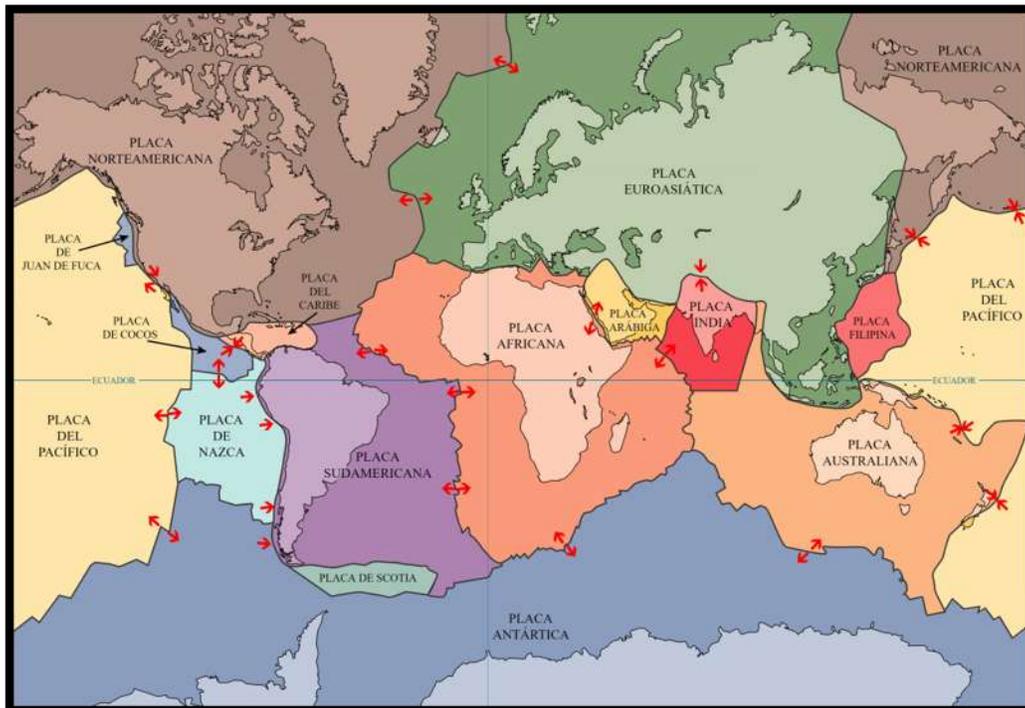
- I. Analizar la tipología de edificios dañados durante el temblor de Morelos del 19 de septiembre de 2017.
- II. Determinar las características dinámicas de los registros sísmicos cercanos a los edificios colapsados.
- III. Evaluar las demandas sísmicas en edificio de esquina con tipología común.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En México como en otras partes del mundo, las normas sísmicas buscan limitar los daños causados por sismos. El planeta tierra está conformado por un conjunto de 15 placas tectónicas (Africana, Antártica, Arábica, Cocos, Nazca, Caribe, Pacífico, Euroasiática, Filipina, India, Indoaustraliana, Norteamericana, Scotia, Sudamericana y Juan de Fuca), las cuales tienen un espesor variable en los continentes y océanos **Figura 1**.

Es en los límites de las placas tectónicas donde se generan fuerzas de fricción que restringen el movimiento unas con otras, sometiendo a los materiales que las componen a grandes esfuerzos; cuando la fuerza de fricción es vencida, se producen violentas liberaciones de energía acumula en forma de ondas, que son esparcidas en todas direcciones; y es así como se generan los sismos.



**Figura 1 Placas tectónicas que conforman la tierra
(ley del Congreso en 1879, 2019)**

Este fenómeno puede ser clasificado de muchas formas: por su origen, profundidad, tipo de falla, entre otras. Con respecto a su origen, los temblores se clasifican de acuerdo con lo que se muestra en la **Figura 2**.

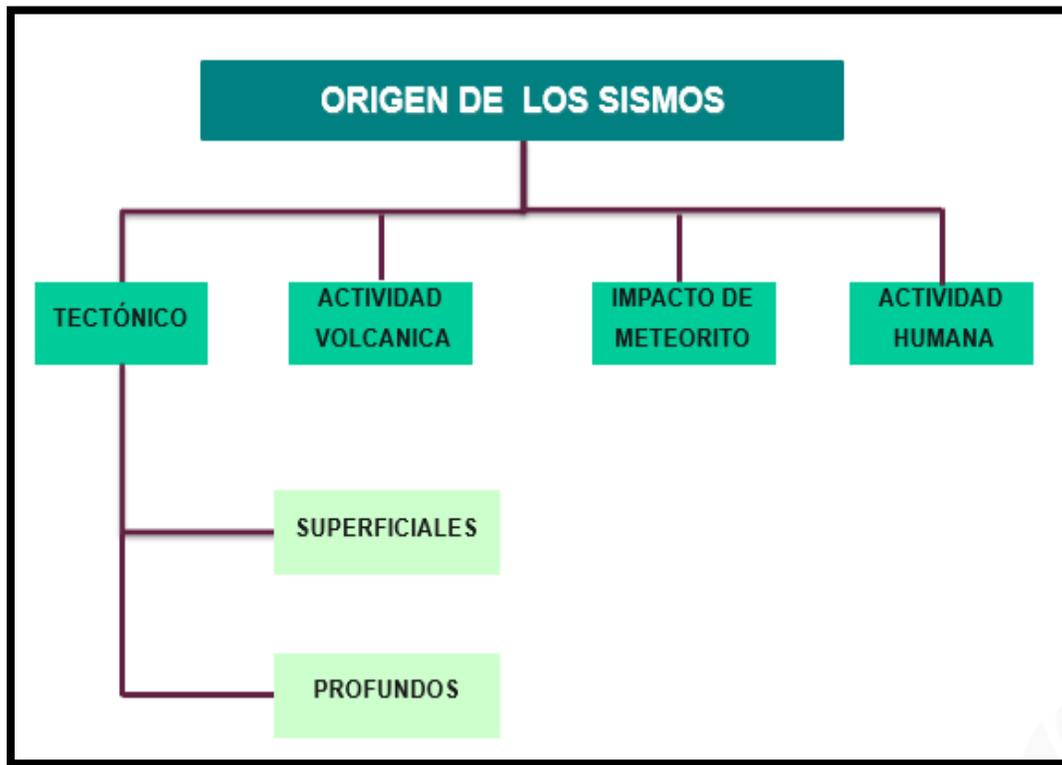


Figura 2 Clasificación de los sismos de acuerdo con su origen

México se encuentra situado en una de las zonas sísmicas más activas del mundo; y es debido a que se encuentra sobre cinco placas tectónicas (norteamericana, de cocos, pacífico, de rivera y del caribe) **Figura 3**. Es por ello que es común la presencia de sismos en el territorio mexicano; de acuerdo con el Servicio Sismológico Nacional se registran en promedio 40 sismos por día; en su mayoría estos presentan magnitudes poco permisibles para el ser humano.



Figura 3 Placas tectónicas que interactúan en territorio mexicano (SSN, 2017)

Durante muchos años los sismos han causado una gran cantidad de daños estructurales y pérdidas humanas; entre los daños estructurales más comunes se encuentran: colapso de edificios por planta baja flexible, columna corta, golpeteo, torsión, entre otros. La torsión produce daños que frecuentemente conducen al colapso a las estructuras.

Tan solo el 19 de septiembre de 2019, en la Ciudad de México más de 200 estructuras presentaron daño estructural importante: colapso total o parcial; muchos de estos daños fueron debidos a efectos de torsión. Esto demuestra que el efecto de torsión presente en las estructuras ante los movimientos del suelo durante un sismo aún es muy complejo y presenta gran incertidumbre.

1.1 CONSIDERACIÓN DEL EFECTO DE TORSIÓN

Fue hasta hace un par de décadas cuando el fenómeno de la torsión comenzó a ser estudiado debido a las preocupantes respuestas de las edificaciones ante sismos, a continuación, se enlistan a forma de resumen algunas de las investigaciones y contribuciones más importantes del estudio del efecto de torsión.

- En 1977 Kan y Chopra investigaron la respuesta torsional a través de un modelo asimétrico de un nivel; gracias a esto se descubrió que la relación de

frecuencias desacopladas entre la torsión y traslación afecta a la respuesta torsional: la afectación es mayor si la relación es uno o cercana.

- En 1980, Tso y Dempsey mostraron que, en edificios pequeños y excéntricos, si la relación de frecuencias se encuentra entre 0.75 y 1.25, estos son sensibles al efecto de torsión. Pero la relación de frecuencias se considera significativa cuando la excentricidad es grande.
- En 1986, Chandler y Hutchinson confirmaron los estudios realizados por Tso y Dempsey; adicionalmente, encontraron que la excentricidad no aumenta de manera lineal ante el efecto de torsión, y que una excentricidad grande puede incrementar los desplazamientos hasta un 50% en comparación con los de estructuras simétricas.

También en este mismo año Cheung y Tso fueron pioneros y decidieron aplicar el concepto de excentricidad en edificios de varios niveles; plantearon un método que permite encontrar la ubicación del centro de rigideces por nivel.

- En 1987, Damy y Alcocer plantearon un método que les permitía conocer las coordenadas del centro de torsión por nivel a través de la matriz de rigidez del edificio y de las distribuciones de las fuerzas sísmicas.
- En 1989, Hejal y Chopra realizaron el análisis de un modelo de cinco niveles y descubrieron que las respuestas del acoplamiento de torsión y traslación son semejantes a los de una estructura de un nivel. Al igual que en los análisis de un solo nivel, al presentar excentricidades grandes el efecto de torsión se intensifica. Es importante mencionar que el acoplamiento de la torsión dio paso a disminuciones importantes en el cortante basal y desplazamientos laterales del último nivel, pero aumentó el torque en la base.
- En 1990, Tso demostró mediante un análisis de un edificio, que las dos alternativas que se tenían hasta el momento para el cálculo de la excentricidad estática de base y entre pisos, dan como resultado el mismo momento torsional.
- En 1992, Goel y Chopra implementaron un método para analizar las fuerzas laterales presentes en un edificio asimétrico sin antes conocer el centro de rigideces.
- En 1993, Hutchinson estudio un edificio idealizado de 20 niveles y descubrió que el acoplamiento torsional no es uniforme a través de la altura del edificio; siendo el nivel superior el que presentó el mayor acoplamiento torsional.
- En 1995, De la Llera y Chopra crearon un procedimiento para considerar los efectos de la torsión accidental en el diseño sísmico; demostraron que tiene mejores resultados el analizar la torsión accidental de esta manera que con análisis estáticos y dinámicos.
- En 1977, Poole expuso paso a paso las correcciones a las previsiones estáticas del Reglamento de Construcción de Nueva Zelanda en el apartado de diseño por Torsión, además analizó el uso de un análisis modal.

- En 1998, Escobar y Ayala realizaron un estudio del comportamiento sísmico no lineal de estructuras asimétricas de un solo nivel. Los autores proponen.....

En ese mismo año Harasimowicz y Goel estudiaron la respuesta de tres modelos, el primero era un edificio torsionalmente rígido, el segundo era torsionalmente flexible y el tercero se consideró un punto medio entre los dos primeros modelos. Con estos modelos se investigaron las variaciones en los resultados al usar diversos marcos de referencia para el cálculo de la torsión y con esto poder conocer cuál de ellos permite obtener los resultados según el análisis dinámico.

Por su parte, Makarios y Anastasiadis lograron definir un eje elástico ficticio siguiendo los criterios de torsión óptima para edificios regulares.

- En 1999, De la Colina investigó los efectos de los factores de reducción (α y δ empleados en el cálculo de la excentricidad), el periodo lateral inicial y la excentricidad inicial, a través de un análisis no lineal de un sistema en el cual consideró que los elementos presentaban resistencias en ambas direcciones del plano horizontal.
- En 2001, Hsiung investigó la inclusión de la torsión accidental de edificios y para ello consideró 12 modelos de edificios con plantas simétricas que se vieron sometidos al sismo de Northridge.
- En 2002, Shakib y Tohidi llevaron a cabo la evaluación de los efectos del componente rotacional de un sismo en la excentricidad accidental; para ello utilizaron modelos de edificios simétricos y asimétricos.
- En 2003 Samali comprobó la efectividad de aisladores de neopreno con núcleo de plomo en estructuras excéntricas. Mediante un modelo de cinco niveles hecho a base de marcos, realizó investigaciones acerca de las características dinámicas y la respuesta. Para realizar esta investigación uso una mesa vibradora.

En este mismo año Zárate realizó una comparación entre las investigaciones de Goel y Chopra, Dany y Alcocer. Además de realizar una revisión del análisis sísmico estático para el efecto de torsión para analizar las características obtenidas (Excentricidad accidental).

- En 2004, De la Colina realizó un estudio probabilístico acerca de la torsión accidental, sometiendo a edificios de baja altura a movimientos bidireccionales del terreno.

En este mismo año Dhiman y Sudhir realizaron un estudio que les permitió extender el cálculo del centro de rigideces para edificios con diafragma de piso a edificios de pisos flexibles asimétricos.

Por otra parte, Escobar propuso un método para realizar el diseño por torsión estática para edificios con varios niveles con base en un menor número de cálculos. También evaluó cuatro diferentes propuestas para reducir los cálculos por computadora de modelos tridimensionales de edificios bajo el efecto de torsión, posteriormente aplicó estos métodos en una estructura de

un nivel y otra de cinco niveles para tener una comparación de la implementación de los métodos.

Mario y Rossi estudiaron un eje de referencia para edificios de varios pisos, el cual realiza la misma función que los centros de rigidez, torsión y cortante (al lugar donde coinciden estos tres centros se le conoce como centro elástico).

Shakib evaluar las recomendaciones que tenían los reglamentos de sismo a cerca de la obtención de la excentricidad dinámica, utilizando un análisis en la historia del tiempo en el cual consideró la interacción suelo-estructura aplicado a edificios asimétricos.

- En 2005 Marusic y Fajfar realizaron un estudio de la respuesta sísmica elástica e inelástica, considerando los movimientos bidireccionales del suelo en una estructura de acero asimétrica de varios niveles. También en ese año Stathopoulos y Anagnostopoulos realizaron estudios para comprobar la respuesta inelástica de edificios excéntricos de varios niveles.

1.2 TORSIÓN

La torsión es un efecto presente en las estructuras y es producido en parte por el propio movimiento irregular del terreno y en parte por efectos estructurales. De este último, se producen momentos torsionantes debido a: (a) la excentricidad del centro de masa con respecto al centro de rigidez en uno o varios niveles de la estructura, (b) irregularidades en la resistencia de los elementos del sistema ante la presencia de una fuerza sísmica. La torsión, sin importar su origen puede producir daños parciales o totales en las edificaciones.

Por ello, al realizar un análisis estructural es necesario considerar los efectos de torsión tanto natural como accidental. Algunos errores de concepción estructural que se cometen al construir y que llevan a tener presente este efecto son:

- Asimetría de las edificaciones
- Cambios drásticos de rigidez de los elementos
- Conexiones inadecuadas de los elementos



Figura 4 Edificio con daños graves en la CDMX. Dirección: Concepción Beistigui, esquina Yacatas, colonia Narvarte Poniente (Ruiz, 2017)

No obstante que los reglamentos mexicanos se encuentran entre los más avanzados, después de algún evento sísmico de importante magnitud se siguen presentando fallas por torsión, por lo que las pérdidas humanas y de infraestructura en estos casos siguen siendo alarmantes.

Muchos son los parámetros que se relacionan con la torsión, entre ellos: centro de masa, centro de torsión, centro de cortante, excentricidad estática (de piso, entrepiso), excentricidad accidental, excentricidad de diseño.

1.2.1 CENTROS DE MASA, CORTANTE Y RIGIDEZ

- **Centro de masa de un nivel (CM):** Se define como el centro de gravedad de las cargas verticales; en caso de que las cargas verticales presenten una distribución uniforme, el centro de masas coincidirá con el centroide geométrico de la planta del piso, y será el lugar donde se considera aplicada la fuerza sísmica horizontal que actúa en ese nivel (Mendoza Carvajal, 2007). Cuando la fuerza resistente coincide con la posición del CM, el movimiento que experimentará el nivel será únicamente de traslación como se muestra en la **Figura 5** (Giorgana Peralta, 2004).

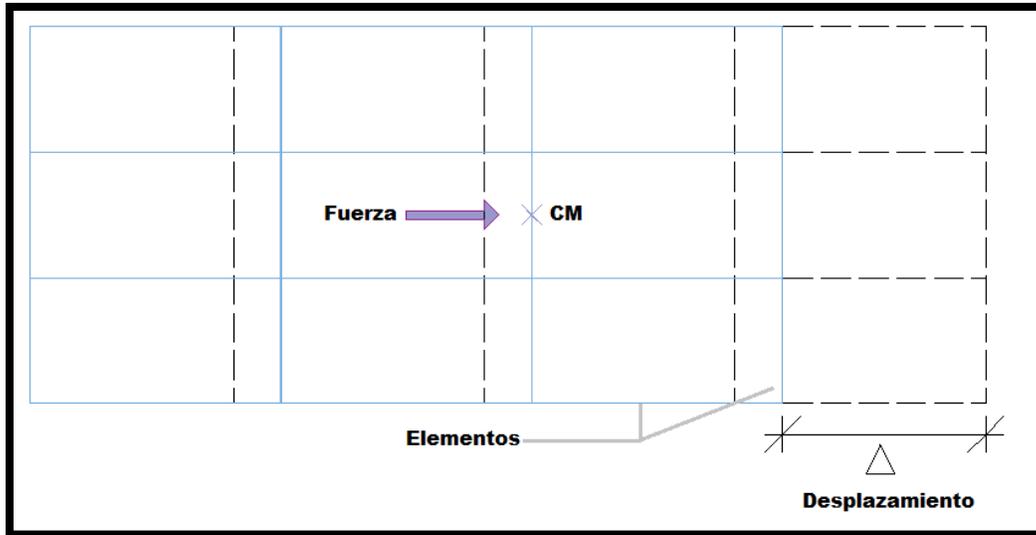


Figura 5 Movimiento de traslación que experimenta la edificación

Las coordenadas del CM del j -ésimo piso se calculan con **Ecuación 1** y **Ecuación 2** (Escobar Sánchez, Cisneros, & Roberto, 2004):

$$x_{CM} = \frac{\sum P_i y_i}{\sum P_i} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$y_{CM} = \frac{\sum P_i x_i}{\sum P_i} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

P_i Cargas verticales en el piso

x_i, y_i Coordenadas respecto a un punto de referencia en dirección x e y

- **Centro de torsión (CT):** Se define como el punto donde al aplicar la fuerza cortante sísmica de piso, solo produce desplazamientos relativos de traslación entre los niveles que comprenden a la edificación (Zapata Munera, 1993). Para calcular la posición del CT del piso se pueden utilizar los cortantes directos de los elementos resistentes. Estos se pueden obtener al aplicar las fuerzas sísmicas laterales F_{xj} y F_{yj} , calculadas con un análisis

sísmico estático o dinámico modal espectral, en los CM correspondientes, permitiendo únicamente la traslación de los pisos. Las coordenadas del CT se calculan con las **Ecuación 3** y **Ecuación 4** (Escobar Sánchez et al., 2004).

$$x_{CT} = \frac{\sum(Vdy_{ij}-Vdy_{ij-1})x_i}{Fy_j} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$y_{CT} = \frac{\sum(Vdx_{ij}-Vdx_{ij-1})y_i}{Fx_j} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

Vdx_{ij}, Vdy_{ij} Son los cortantes i-ésimo elemento resistente.

x_i, y_i Coordenadas respecto a un punto de referencia en las direcciones X e Y en el entrepiso j, respectivamente.

- **Centro de Cortante (CC):** Se define como el punto geométrico donde se considera que actúa el cortante total de entrepiso (Escobar Sánchez, 2011). El CC depende de la distribución de las fuerzas laterales en el edificio y sus coordenadas se calculan con las **Ecuación 5** y **Ecuación 6** (Escobar Sánchez et al., 2004).

$$x_{CC} = \frac{\sum Fy_j x_{CM}}{Vy_j} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$y_{CC} = \frac{\sum Fx_j y_{CM}}{Vx_j} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

Fx_j, Fy_j Son las fuerzas sísmicas laterales aplicadas en los CM permitiendo solamente la traslación de los pisos

Vx_j, Vy_j Son los cortantes del entrepiso en las direcciones x e y en el entrepiso j, respectivamente.

- **Centro de Rigidez (CR):** Es la posición o punto, en el cual se aplican la resultante de las rigideces de entrepiso; y en donde teóricamente debería pasar la línea de acción de la fuerza sísmica en el piso o la del cortante total de entrepiso para que no se presente la rotación de la planta (Escobar Sánchez, 2011). Las coordenadas del CR se pueden calcular utilizando los cortantes directos (**Ecuación 7** y **Ecuación 8**) (Escobar Sánchez et al., 2004).

$$x_{CR} = \frac{\sum(Vdy_i x_i)}{Vy_j} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$y_{CR} = \frac{\sum(Vdx_i y_i)}{Vx_j} \quad \text{Ecuación 8}$$

También se pueden calcular con las rigideces de los elementos resistentes (**Ecuación 9** y **Ecuación 10**) (Escobar Sánchez et al., 2004).

$$x_{CR} = \frac{\sum(k_i x_i)}{\sum k_i} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$y_{CR} = \frac{\sum(k_i y_i)}{\sum k_i} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

Vdx_i, Vdy_{ij} Son los cortantes i-ésimo elemento resistente.

1.2.2 EXCENTRICIDAD ESTÁTICA, ACCIDENTAL Y DE DISEÑO

- **Excentricidad estructural o estática e_s :** Esta es la distancia entre el punto de aplicación de la carga (centro de torsión) y aquel donde se concentra la fuerza resultante (centro de cortante). En cierta forma, la excentricidad estática señala que pueden existir efectos de acoplamiento entre la

respuesta lateral y torsional por la falta de simetría en planta de las estructuras. El concepto de excentricidad estática, originalmente se derivó de edificios de un solo piso con diafragma rígido, por ello, al aplicarlo a estructuras con varios pisos se genera confusión. En el sentido tradicional, la excentricidad es una medida de la asimetría de una estructura, por lo tanto, es una propiedad estructural y es independiente de la carga aplicada. Para estructuras de varios pisos esto cambia, ya que, para las dos definiciones de excentricidad estática, esta depende de la estructura y de la distribución lateral de cargas. Esta excentricidad se divide a su vez en excentricidad de piso y entrepiso las cuales permiten el cálculo del momento torsional (Mendoza Carvajal, 2007):

1. **Excentricidad de piso:** Es la distancia entre el CM, y el CT para cada una de las direcciones X e Y de la estructura, y esta se calcula con la **Ecuación 11** y **Ecuación 12** (Mendoza Carvajal, 2007):

$$e_s = x_{CM} - x_{CT} \quad \text{O} \quad e_s = x_{CT} - x_{CM} \quad \text{Ecuación 11}$$

$$e_s = y_{CM} - y_{CT} \quad \text{O} \quad e_s = y_{CT} - y_{CM} \quad \text{Ecuación 12}$$

El momento de torsión del j-ésimo piso para cada una de las direcciones X e Y de la estructura se obtiene con **Ecuación 13** y **Ecuación 14** (Mendoza Carvajal, 2007):

$$T_j = F_{xj} * e_s \quad \text{Ecuación 13}$$

$$T_j = F_{yj} * e_s \quad \text{Ecuación 14}$$

El momento de torsión de entrepiso se obtiene sumando los momentos torsionantes de todos los pisos que se encuentran sobre éste. Así, el momento torsionante del j-ésimo entrepiso se obtiene con **Ecuación 15** (Mendoza Carvajal, 2007):

$$M_j = \sum_{m=j}^n T_m \quad \text{Ecuación 15}$$

2. Excentricidad de entrepiso: Es la distancia entre el CC, y el CR, de cada una de las direcciones X e Y de los entrepisos esto es **Ecuación 16** y **Ecuación 17**) (Mendoza Carvajal, 2007):

$$e_s = x_{CC} - x_{CR} \quad \text{O} \quad e_s = x_{CR} - x_{CC} \quad \text{Ecuación 16}$$

$$e_s = y_{CC} - y_{CR} \quad \text{O} \quad e_s = y_{CR} - y_{CC} \quad \text{Ecuación 17}$$

Con esta definición, el momento de torsión de entrepiso se obtiene directamente como el producto de la fuerza cortante y la excentricidad de entrepiso. Así, el momento torsionante del i-ésimo entrepiso para cada una de las direcciones ortogonales X e Y será **Ecuación 18** (Mendoza Carvajal, 2007):

$$M_j = V_j * e_s \quad \text{Ecuación 18}$$

- **Excentricidad accidental e_a :** La excentricidad accidental es un porcentaje de la dimensión máxima en planta perpendicular a la dirección de análisis que se estudie; esta puede variar de acuerdo con los reglamentos entre un 5% y el 10% (Giorgana Peralta, 2004).

En los reglamentos de diseño sísmico se toma como un incremento en los valores nominales de la excentricidad estática calculada, debido a la combinación de los siguientes efectos (Zapata Munera, 1993):

1. Efectos de propagación de ondas que provocan movimiento torsional del terreno.
2. Incertidumbre en la distribución en planta de rigideces, masas y resistencias.
3. Diferencias de acoplamiento entre la cimentación y el suelo de desplante.

- **Excentricidad de diseño:** La excentricidad de diseño, tiene un formato similar en los actuales códigos de diseño sísmico de diversos países. Involucra factores que modifican la excentricidad estructural para así resolver un problema dinámico mediante uno estático equivalente. La forma común de estas expresiones se muestra en **Ecuación 19** y **Ecuación 20** (Mendoza Carvajal, 2007):

$$e_d = \alpha e_s + \beta b \quad \text{Ecuación 19}$$

$$e_d = \delta e_s - \beta b \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde:

e_d = Excentricidad de diseño

α = Factor de amplificación dinámica

δ = Factor de amplificación dinámica

b = Dimensión máxima en planta de la estructura, perpendicular a la dirección de excitación sísmica

β = Factor de amplificación de la excentricidad de diseño cuyo valor se encuentra entre 0.05 y 0.1

Varias investigaciones demostraron que edificios que presentan excentricidades de fuerza muy pequeñas tienen mayor probabilidad de que el elemento más crítico de la edificación sea el que se sitúa en el borde más rígido, sin embargo, en muchos casos es poco probable que la excentricidad de fuerzas sea muy pequeña. También es importante mencionar que mientras más pequeñas sean las excentricidades que existan mayor será la respuesta torsional presente en las edificaciones. Es de vital importancia hacer que las edificaciones no se vean sometidas a fallas torsionales durante un sismo; de acuerdo con diversos investigadores este tipo de fallas no solo se presentan por las excentricidades de fuerzas y rigideces, sino que también pueden presentarse por otros parámetros más importantes que nos llevan a tener torsión los cuales son:

- Frecuencias de vibración desacopladas.
- Relación de amortiguamiento

Uno de los efectos de mayor preocupación ante el fenómeno de torsión es que este va en aumento ante la presencia de excentricidades pequeñas, y es entonces debido al acoplamiento torsional que se presentan aumentos significativos en los desplazamientos de los elementos resistentes de hasta un 50%.

Debido a la complejidad del efecto de torsión, es importante que siempre que se realice un análisis para la obtención de la respuesta sísmica de alguna estructura,

se considere dicho efecto. Ha sido en los últimos años cuando se ha puesto más interés en los análisis estáticos no lineales de las estructuras. En ocasiones los resultados de evaluar la torsión con un análisis estático lineal pueden llevar a conclusiones opuesta de lo obtenido con análisis estáticos no lineales. esto se debe a que los parámetros que gobiernan la torsión (rigidez, radio de giro, ubicación del

CAPÍTULO II

CARACTERÍSTICAS DEL TEMBLOR DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 2017

La Ciudad de México se ha visto afectada por dos grandes catástrofes sísmicas. El sismo del 19 de septiembre de 2017 (Intraplaca-Normal), ha sido el evento sísmico más devastador en la Ciudad de México después del gran sismo del 19 de septiembre de 1985 (Subducción).

En la **Figura 6**, se observa la zona donde ocurren los sismos intraplaca. Los sismos intraplaca, de profundidad intermedia, se producen por esfuerzos extensivos a lo largo de la placa de Cocos. Las fallas geológicas asociadas a estos sismos se conocen con el nombre de “fallas normales”. Es preciso mencionar que estudios realizados para sismos intraplaca en México muestran que, por año, la probabilidad de que la intensidad sísmica en la Ciudad de México debidas a este tipo de terremotos sea grande es muy similar a la de los sismos típicos de subducción (Cruz Atienza, Krishna Singh, & Ordaz Schroeder, 2017).

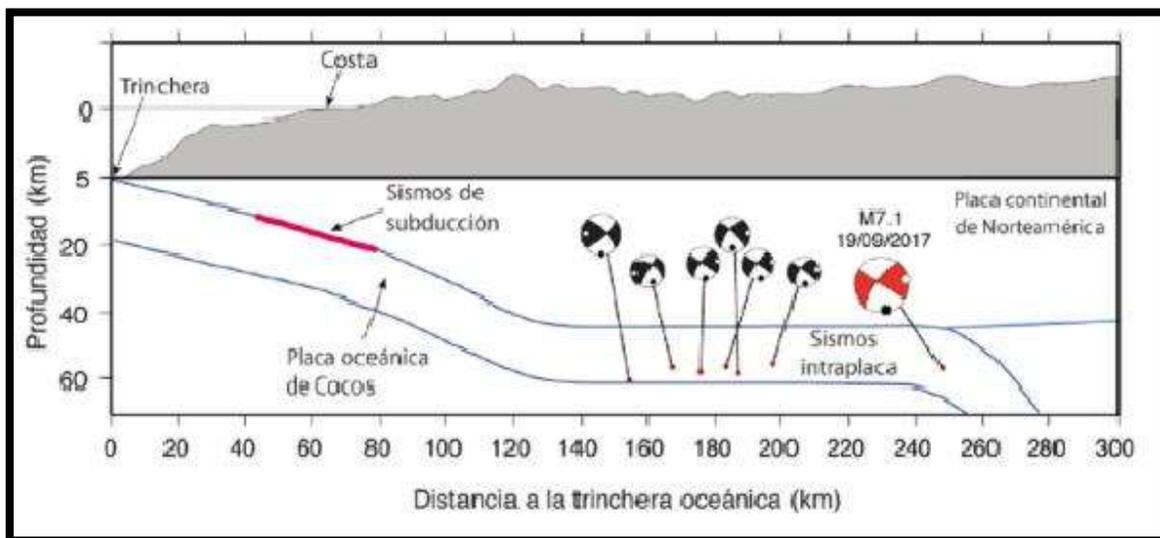


Figura 6 Localización del epicentro del sismo del 19 septiembre y otros sismos de tipo intraplaca. Las pelotas de playa muestran la orientación de la falla y su dirección de deslizamiento (Cruz Atienza et al., 2017)

En la **Figura 7**, se observan los sismos más importantes ocurridos en México en el periodo. El círculo rojo corresponde al epicentro del sismo del 19 de septiembre de 2017; las figuras ovaladas representan las áreas de ruptura de los sismos de tipo interplaca. Las estrellas de color rojo y azul nos muestran los sismos de tipo intraplaca, las estrellas de color rojo representan sismos normales y las estrellas azules representan sismos de tipo locales.

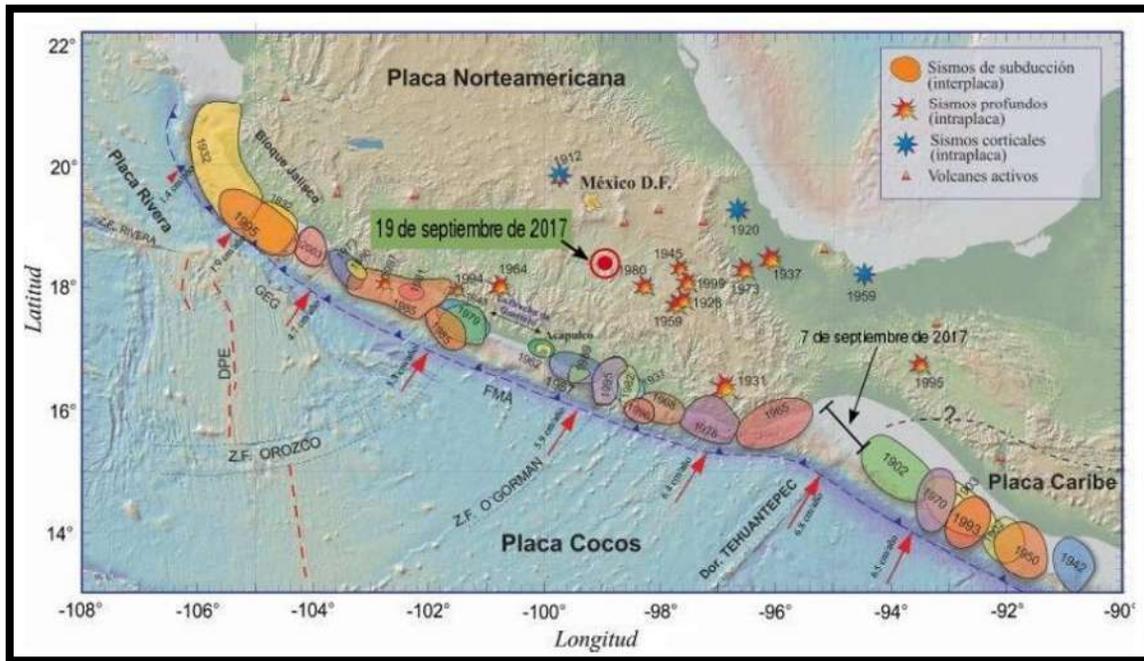


Figura 7 Áreas de ruptura de los sismos más importantes que han ocurrido en México. Además, el epicentro del sismo del 19 de septiembre de 2017 se representa con un punto color rojo (SSN, 2017)

A las 13:14:39, hora local, del 19 de septiembre de 2017, el Servicio Sismológico Nacional (SSN) con ayuda de la red sísmica regional de la UMAN (UNAM, 2019), reportó un sismo de magnitud 7.1 con profundidad de 57 Km, localizado a 8 km al Noroeste de Chiautla de Tapia, Puebla (entre los límites de los estados de Puebla y Morelos) y a 120 km de la Ciudad de México. Las coordenadas del epicentro de dicho sismo son: 18.40° latitud N y -98.72 longitud W. El temblor fue de tipo intraplaca-Normal, es decir, ocurrió en el interior de la placa tectónica Norteamericana. De los 32 estados de la República Mexicana, 8 fueron los más afectados por el evento sísmico en cuanto a número de damnificados, víctimas y daños en infraestructura. Es importante mencionar que la ubicación del epicentro de este sismo y la cercanía de este a la CDMX aunado al origen del sismo, generaron grandes aceleraciones del terreno inclusive en zonas de terreno firme y lomas.

El Atlas de Riesgo de CENAPRED ha dado a conocer un mapa con las intensidades máximas presentes en la región entre los estados de Puebla, Morelos y Guerrero correspondientes al evento sísmico del 19 de septiembre de 2017 (**Figura 8**).

De acuerdo con información de la Unidad de Instrumentación Sísmica (UIS) del Instituto de Ingeniería de la UNAM (IIUNAM), en la zona cercana al epicentro la intensidad del movimiento alcanzó aceleraciones de hasta 220 cm/s^2 . En el Valle de México, las aceleraciones máximas registradas en algunos sitios fueron: Tlaxiaco, Edo. Mex. (112 cm/s^2), Tlalpan (90 cm/s^2), Coyoacán (60 cm/s^2) y Ciudad Universitaria (54 cm/s^2). De acuerdo con el IIUNAM, la aceleración espectral para un periodo de 1 segundo fue de 138.39 cm/s^2 en el Valle de México (SMIS, 2017).

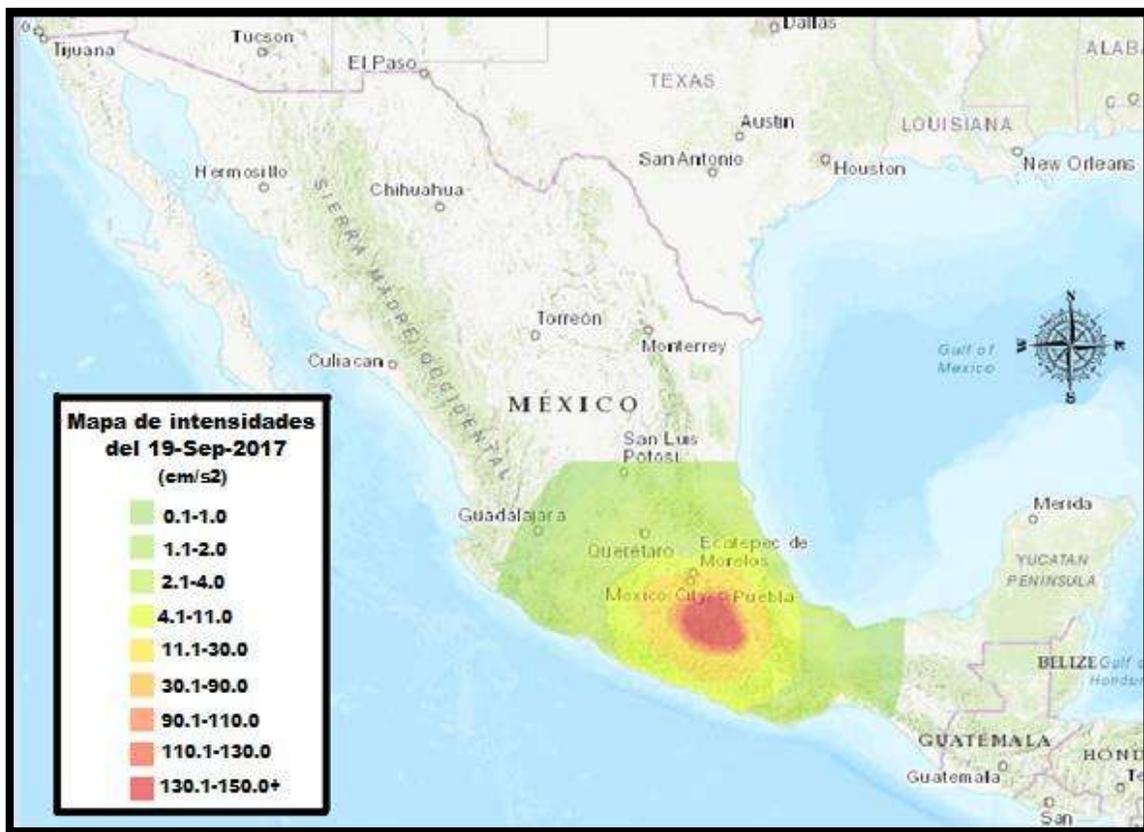


Figura 8 Mapa de intensidades del sismo del 19-Sep-2017 (CENAPRED, 2019)

2.1 SISMICIDAD HISTÓRICA DE LOS ESTADOS DE PUEBLA Y MORELOS

La República Mexicana es uno de los lugares con más sismicidad en el mundo; se registran diariamente muchos sismos de diferentes magnitudes, en su mayoría de intensidad leve. México tiene una gran historia de la ocurrencia de sismos intraplaca a lo largo de su territorio.

Puebla y Morelos han presentado eventos sísmicos de gran importancia de tipo intraplaca. A continuación, se muestran los registros de sismos importantes registrados en ambos estados.

- **Puebla**

De acuerdo con el SSN, son seis los registros que se tienen de sismos importantes en el estado de Puebla, cuyas magnitudes se encuentran entre 6 y 7.1 (**Tabla 1**). De acuerdo con el USGS (Earthquake Hazards Program, 2019), el sismo del 15 de junio de 1999 causó aproximadamente la muerte de 14 personas y otras 200 resultaron heridos.

Tabla 1 Registro histórico de eventos sísmicos de gran magnitud en el estado de Puebla

REGISTRO HISTÓRICO DE EVENTOS SÍSMICOS DE GRAN MAGNITUD EN PUEBLA						
FECHA	HORA	LOCALIZACIÓN	LATITUD (°)	LONGITUD (°)	PROFUNDIDAD (KM)	MAGNITUD
09/02/1928	22:39:37	9 km al Noroeste de Acatlan de Osorio, Puebla	18.26	-97.99	84	6.5
11/10/1945	10:53:02	31 km al Suroeste de Tehuacan, Puebla	18.32	-97.65	95	6.5
24/10/1980	08:53:36	19 km al Oeste de Acatlan de Osorio, Puebla	18.174	-98.222	65	7.1
15/06/1999	15:42:04	29 km al Suroeste de S Gabriel Chilac, Puebla	18.133	-97.539	63	7
21/07/2000	01:13:39	45 km al Suroeste de Chiautla de Tapia, Puebla	18.09	-98.97	48	6
19/09/2017	13:14:39	8 km al Noroeste de Chiautla de Tapia, Puebla	18.329	-98.671	51.1	7.1

En la **Figura 9**, se observan los epicentros de los eventos sísmicos históricos de gran magnitud registrados en el estado de Puebla del tipo intraplaca.

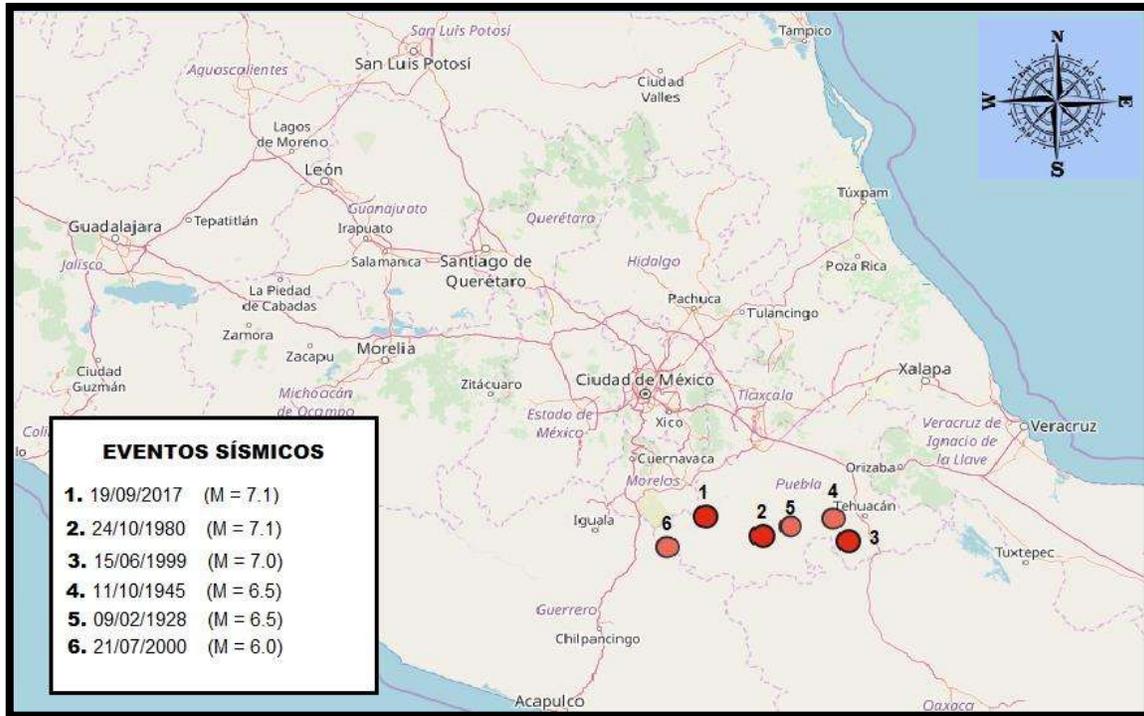


Figura 9 Epicentros de sismos históricos intraplaca en el estado de Puebla (SSN, 2017)

- **Morelos**

En el estado de Morelos no se tienen registros de sismos de magnitudes importantes antes del sismo del 19 de septiembre del 2017. Pero es importante mencionar que, a partir de este sismo, se desencadenó una serie de sismos en el estado; 62 para ser exactos los cuales registraron magnitudes de entre 2.4 y 3.8.

2.2 REGISTROS DEL SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 2017

La **Tabla 2** resume la información recopilada del número de estaciones en las cuales se tienen registros sísmicos del sismo del 19 de septiembre de 2017. Se tiene un total de 131 registros; 69 de los registros se obtuvieron del Servicio Sismológico Nacional (UNAM, 2019). Las estaciones se encuentran en los estados de Chiapas, Colima, Guanajuato, Guerrero, Jalisco, México, Michoacán, Oaxaca, Puebla y Veracruz. Los otros 62 registros se obtuvieron del Centro de Instrumentación y Registro Sísmico, a. c (CIRES); y son pertenecientes a la CDMX. En la **Figura 10** se observa un mapa con la ubicación de las estaciones correspondientes a la Ciudad de México.

Tabla 2 Número de registros por estado del sismo del 19-Sep-2017

REGISTRO DEL NÚMERO DE ESTACIONES POR ESTADO DEL SISMO		
No.	ESTADO	No. ESTACIONES
1	Ciudad de México	62
2	Guerrero	22
3	Oaxaca	19
4	Puebla	10
5	Michoacán	5
6	Veracruz	4
7	Chiapas	3
8	Colima	2
9	Estado de México	2
10	Guanajuato	1
11	Jalisco	1
TOTAL =		131

En las **Figura 11** a **Figura 17**, se muestran las aceleraciones máximas del suelo (cm/seg²) en los 11 estados antes mencionados. Es importante señalar que para fines de esta investigación se usarán los 20 registros con mayor aceleración de la Ciudad de México.

Tabla 3 Estaciones y aceleraciones máximas registradas en la Ciudad de México

REGISTRO DE ACELERACIONES MÁXIMAS			
No.	ESTADO	ESTACIÓN	ACELERACIÓN MAX (cm/s ²)
1	CDMX	Esc. Prim. "L. Portillo W."	225.6
2	CDMX	Parque Jardines de Coyoacán	220.27
3	CDMX	Miramontes	207.19
4	CDMX	Tláhuac	189.94
5	CDMX	Xotepingo	187.73
6	CDMX	San Simón	177.57
7	CDMX	Jardin de Niños "Xochimilco"	173.56
8	CDMX	Esc. Prim. R. López Velarde	168.3
9	CDMX	Esc. Sec. Tec. No. 95	160.88
10	CDMX	Nezahualcóyolt	145.69
11	CDMX	LICONSA	137.93
12	CDMX	Jardin de Niños "Juan B. de la Salle"	133.95
13	CDMX	Cerro del Peñon	133.44
14	CDMX	Jardin de Niños "Luz G. Campillo"	125.62
15	CDMX	Unidad Colonia-IMSS	125.32
16	CDMX	Esc. Prim. "P. Elías Calles"	124.56
17	CDMX	Multifamiliar Juárez II	123.93
18	CDMX	Lindavista	123.02
19	CDMX	Meyehualco	119.88
20	CDMX	Alberca Olímpica	119.65
21	CDMX	Granjas	119.63
22	CDMX	Granjas	119.63
23	CDMX	Valle Gómez	119.54
24	CDMX	Alameda	117.12
25	CDMX	Esc. Prim. "G. Garzón"	114.86
26	CDMX	Balderas	114.47
27	CDMX	Cibeles	114.24
28	CDMX	Esc. Sec. Tec. No. 18	113.99
29	CDMX	Buenos Aires	113.16
30	CDMX	Centro Urbano Juárez	111.99
31	CDMX	Nezahualcóyolt	110
32	CDMX	Jardin de Niños "Xochipilli"	108.19
33	CDMX	Jamaica	106.29
34	CDMX	Sector Popular	100.38
35	CDMX	Esc. Sec. Tec. No. 2	97.07
36	CDMX	Hospital Juárez	96.4
37	CDMX	Palacio de los Deportes	96.26
38	CDMX	Esc. Sec. Dna. No. 23	95.81
39	CDMX	Bondoquito	95.14
40	CDMX	Esc. Sec. Tec. No. 14	94.89
41	CDMX	Villa del Mar	94.83
42	CDMX	Coyoacán	93.96
43	CDMX	FJBS	92.16
44	CDMX	Deportivo Moctezuma	90.52
45	CDMX	Autódromo	90.45
46	CDMX	Candelaria	89.83
47	CDMX	Esc. Sec. No. 43	87.01
48	CDMX	Esc. Prim. "Álvaro Obregón"	85.56
49	CDMX	Escandón	83.91
50	CDMX	Deportivo "Antonio Caso"	82.85
51	CDMX	Tlatelóico	82.46
52	CDMX	Parque "Esparza Oteo"	82.13
53	CDMX	CETIS No. 57	80.39
54	CDMX	U. Iberoamericana	79.26
55	CDMX	Esc. Prim. "Rodolfo Menendez"	78.01
56	CDMX	Deportivo Reynosa, Azcapotzalco	77.17
57	CDMX	Esc. Prim. "Ramón E. Villanueva"	72.74
58	CDMX	República de Italia	72.66
59	CDMX	Esc. Sec. Tec. "Rafael Donde"	72.16
60	CDMX	Tlalpan	66.58
61	CDMX	CETIS	59.99
62	CDMX	Mariscal Tito	58.27

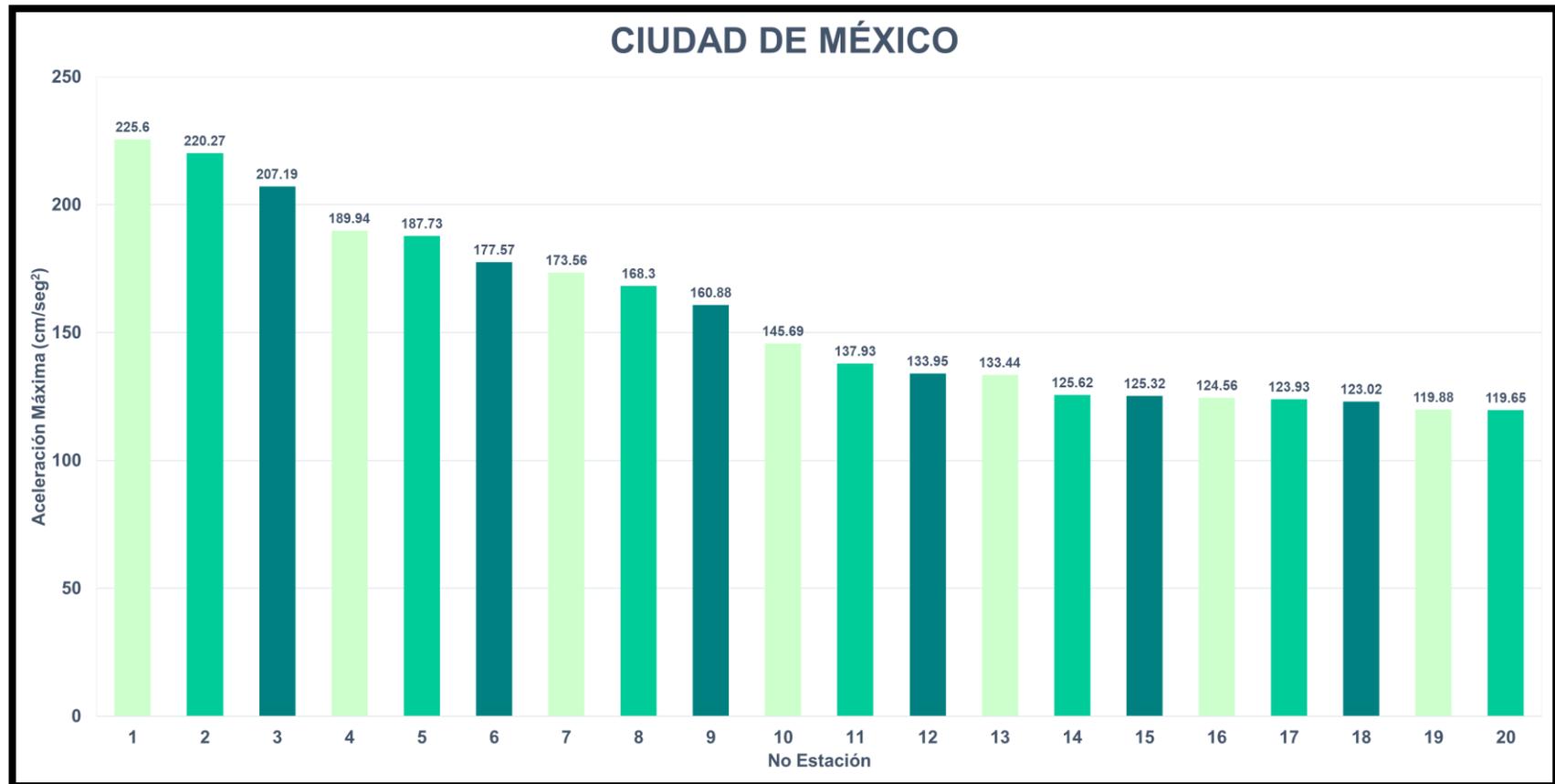


Figura 11 Aceleraciones máximas registradas en la Ciudad de México

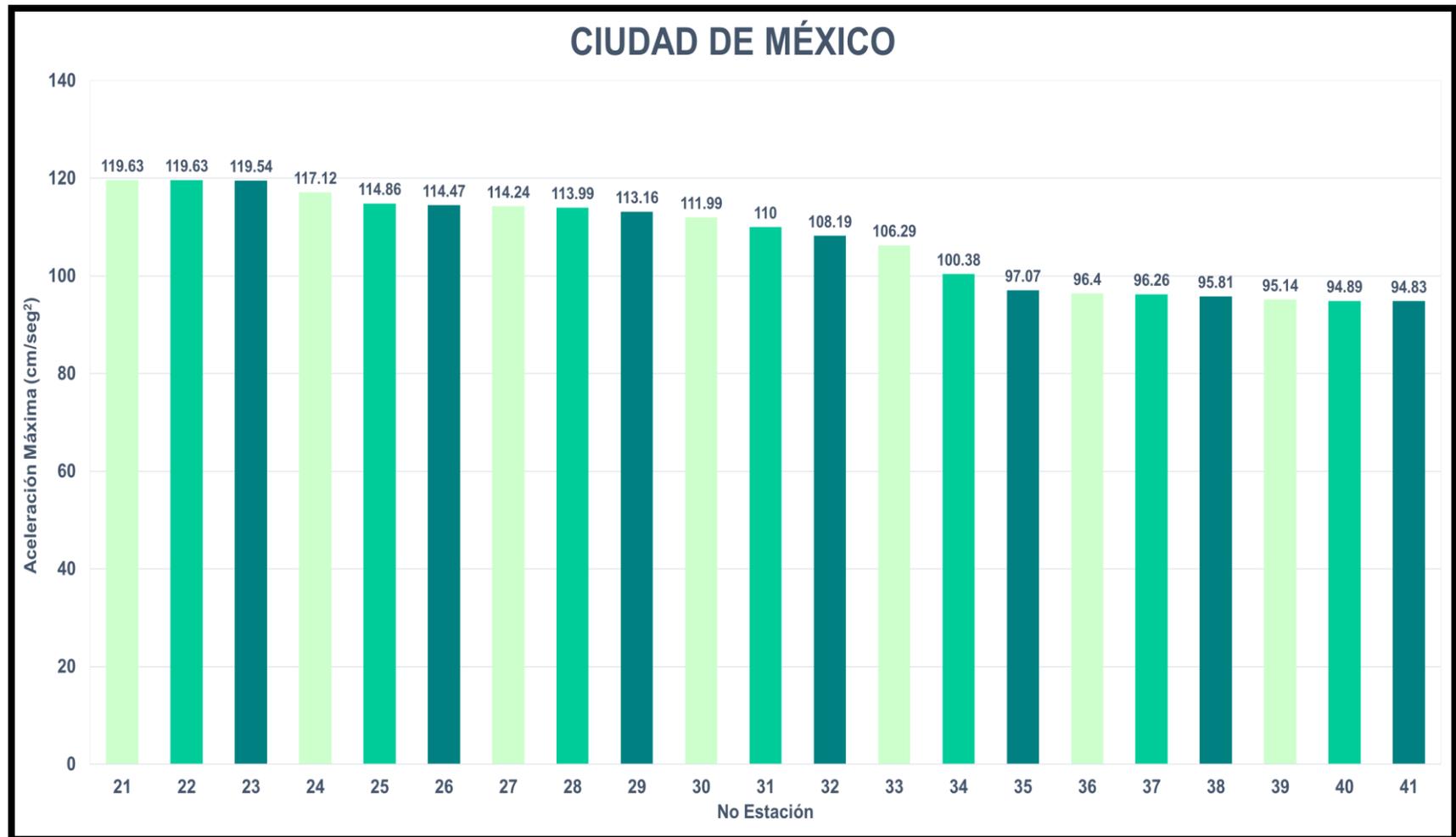


Figura 12 Aceleraciones máximas registradas en la Ciudad de México

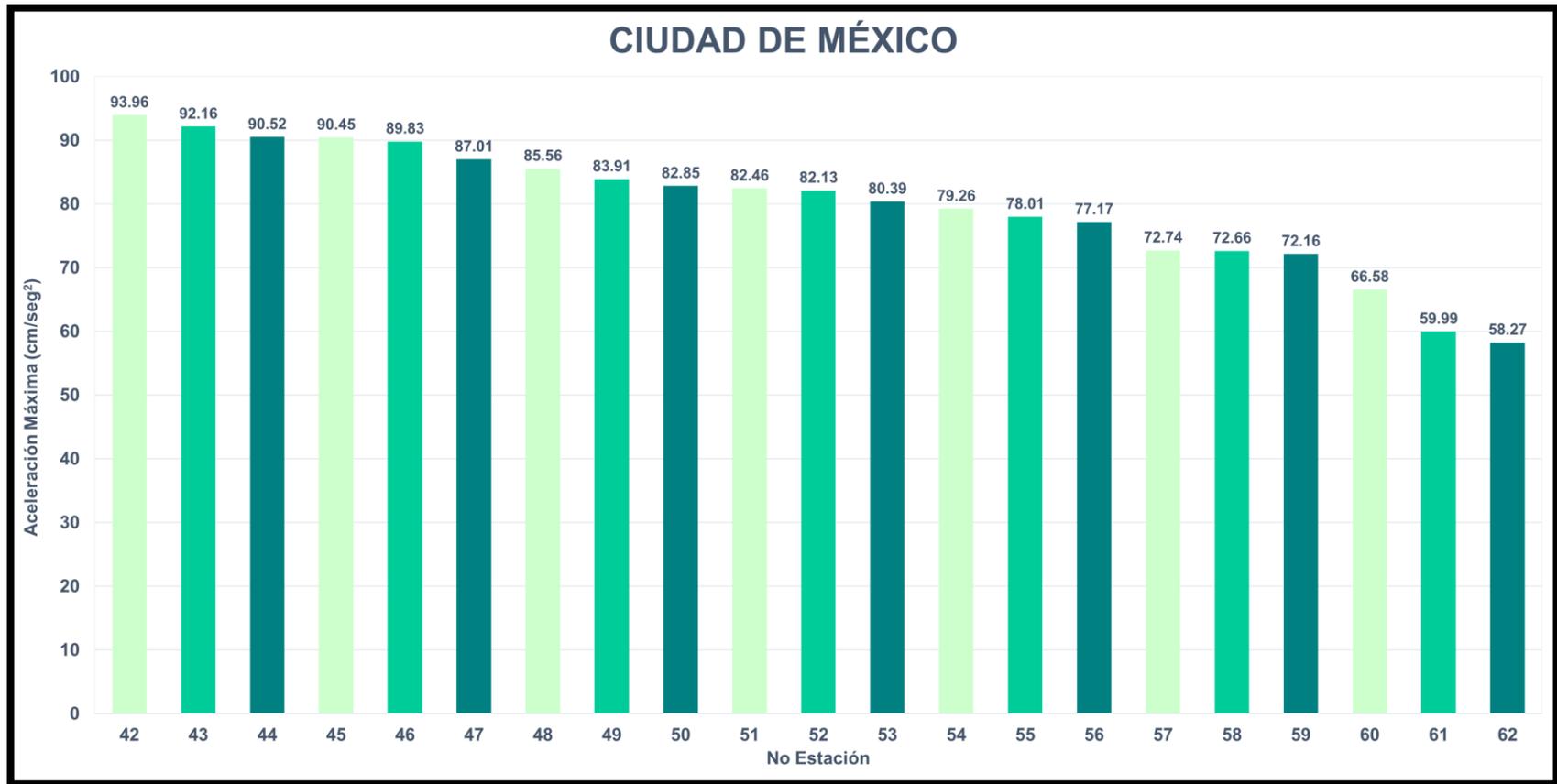


Figura 13 Aceleraciones máximas registradas en la Ciudad de México

Tabla 4 Estaciones y aceleraciones máximas registradas en el estado de Guerrero

REGISTRO DE ACELERACIONES MÁXIMAS			
No.	ESTADO	ESTACIÓN	ACELERACIÓN MAX (cm/s ²)
1	Guerrero	Huamuxtitlán	170.47
2	Guerrero	San Juan de los Llanos	105.81
3	Guerrero	Tonalapa del Sur	65.97
4	Guerrero	Acapulco Escuela Diana	60.82
5	Guerrero	Acapulco Centro Cultural	58.74
6	Guerrero	La Comunidad	54.52
7	Guerrero	Acapulco la Zanja	44.84
8	Guerrero	Las Vigas	36.64
9	Guerrero	Pozuelos	36.28
10	Guerrero	Acapulco Renacimiento	35.7
11	Guerrero	Acapulco Preparatoria 2	35.37
12	Guerrero	Ocotillo	21.31
13	Guerrero	Aguacaliente	20.68
14	Guerrero	Atoyac	18.68
15	Guerrero	Coyuca	18.36
16	Guerrero	La Venta	12.85
17	Guerrero	San Luis de la Loma 2	11.99
18	Guerrero	Copala	10.72
19	Guerrero	Petatlan II	10.05
20	Guerrero	Nuxco 2	9.05
21	Guerrero	El Suchil	6.65
22	Guerrero	La Unión	6.1

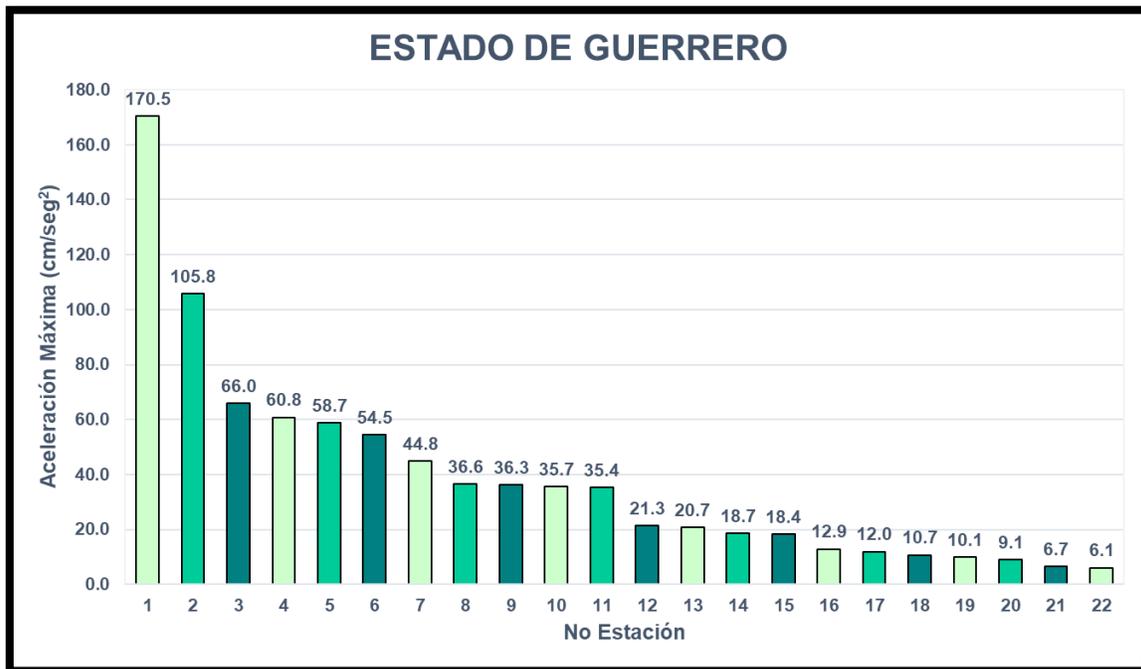


Figura 14 Aceleraciones máximas registradas en el estado de Guerrero

Tabla 5 Estaciones y aceleraciones máximas registradas en el estado de Oaxaca

REGISTRO DE ACELERACIONES MÁXIMAS			
No.	ESTADO	ESTACIÓN	ACELERACIÓN MAX (cm/s ²)
1	Oaxaca	Instituto Tecnológico de Oaxaca	97.5
2	Oaxaca	Las Canteras	79.52
3	Oaxaca	Salina Cruz	70.37
4	Oaxaca	Puerto Angel	65.09
5	Oaxaca	Las Negras	63.63
6	Oaxaca	Oaxaca Facultad de Medicina	62.12
7	Oaxaca	Esc. Prim. Benito Juárez	56.9
8	Oaxaca	Jalapa del Marques	51.33
9	Oaxaca	Huamelula	22.52
10	Oaxaca	Escuela Primaria Mugica	18.11
11	Oaxaca	Oaxaca Ciudad Universitaria	17.44
12	Oaxaca	Alameda de Leon	12.89
13	Oaxaca	Oaxaca Aeropuerto	10
14	Oaxaca	Niltepec	7.62
15	Oaxaca	Jamiltepec	7.53
16	Oaxaca	San Martin los Canseco	5.98
17	Oaxaca	Tamazulapan	5.83
18	Oaxaca	Oaxaca Protección Civil	4.69
19	Oaxaca	Xoxocotlán	4.18

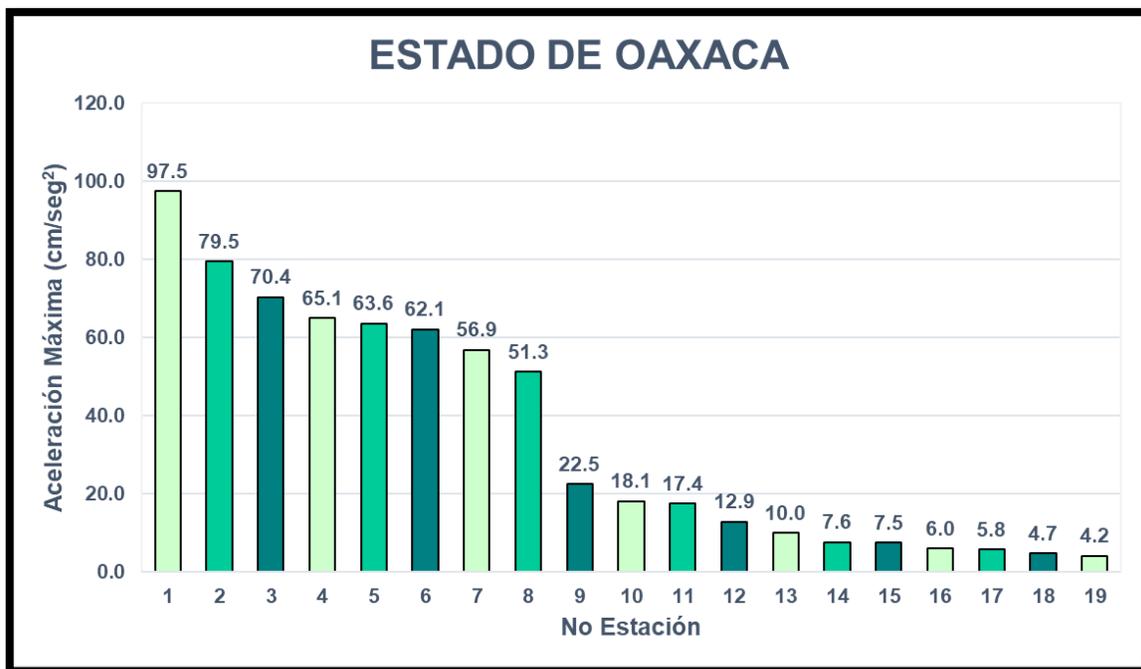


Figura 15 Aceleraciones máximas registradas en el estado de Oaxaca

Tabla 6 Estaciones y aceleraciones máximas registradas en el estado de Puebla

REGISTRO DE ACELERACIONES MÁXIMAS			
No.	ESTADO	ESTACIÓN	ACELERACIÓN MAX (cm/s ²)
1	Puebla	Sismex Puebla	205.97
2	Puebla	Tehuacan Esc. Pri. Emiliano Zapata	183.95
3	Puebla	San Alejandro, Puebla	166.5
4	Puebla	Cerro la Paz, Puebla	154.69
5	Puebla	Rio San Francisco, Puebla	141.71
6	Puebla	Parque Habana, Puebla	139.18
7	Puebla	Lomas del Marmol, Puebla	119.97
8	Puebla	Chila de las Flores	98.68
9	Puebla	Raboso	76.88
10	Puebla	Paseo Nicolas Bravo Puebla, S-2	39.78

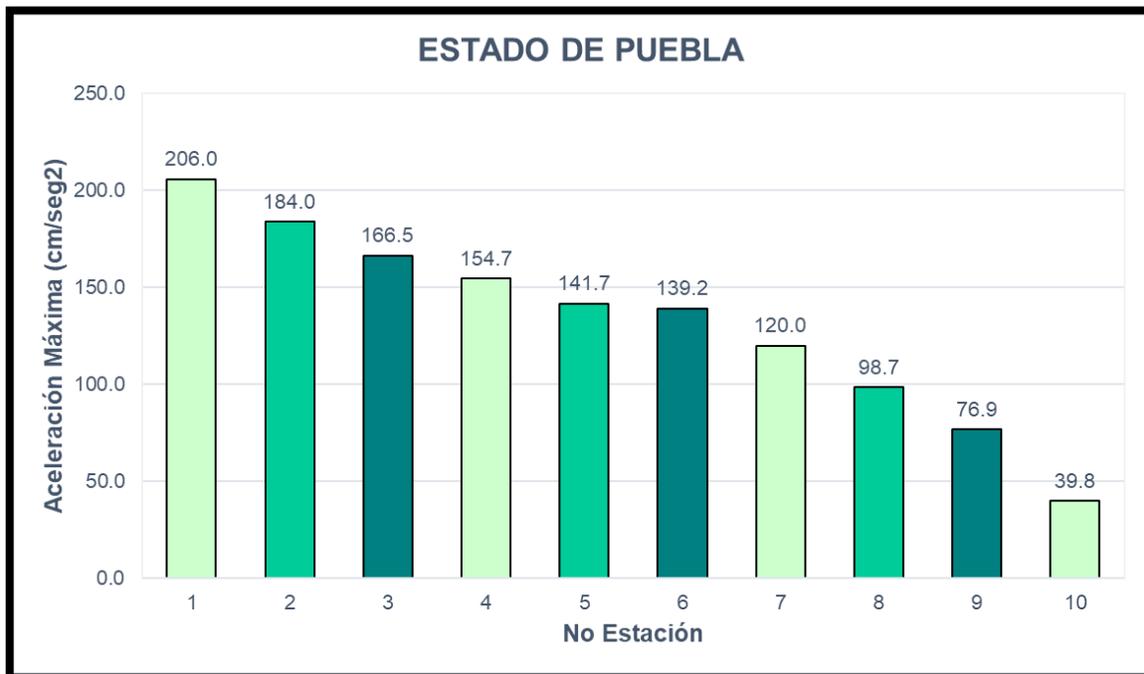


Figura 16 Aceleraciones máximas registradas en el estado de Puebla

Tabla 7 Estaciones y aceleraciones máximas registradas en los estados de Michoacán, Veracruz, Chiapas, Colima, México, Guanajuato y Jalisco

REGISTRO DE ACELERACIONES MÁXIMAS			
No.	ESTADO	ESTACIÓN	ACELERACIÓN MAX (cm/s ²)
1	Michoacán	San Juan de Alima	18.14
2	Michoacán	Nueva Italia	13.75
3	Michoacán	Uruapan	9.24
4	Michoacán	Las Canas	6.06
5	Michoacán	San Jeronimo	3.51
6	Veracruz	Xalapa	16.83
7	Veracruz	Orizaba Esc. Sec. Tec. No. 84	11.42
8	Veracruz	Minatitlan Escuela Hijos de Lerdo	8.32
9	Veracruz	Soledad de Doblado	5.21
10	Chiapas	Preparatoria Arriaga	2.14
11	Chiapas	Tapachula Jardin de Niños JM Villa.	1.23
12	Chiapas	Tuxtla Gutierrez CBTIS 144	0.93
13	Colima	Comala	2.23
14	Colima	Colimilla	1.39
15	Estado de México	Centro Cul. Uni. Tlatelolco Campo Libre	85.5
16	Estado de México	San Lucas Pathe	4.5
17	Guanajuato	Acambaro	4.5
18	Jalisco	Ciudad Guzman	2.1

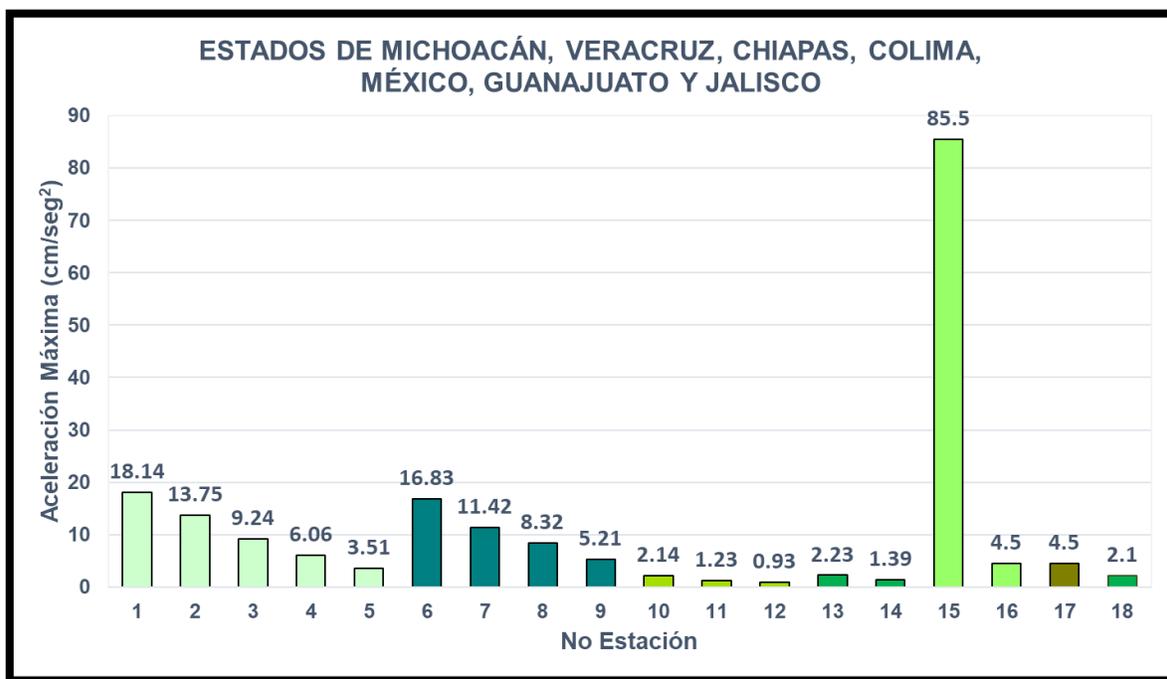


Figura 17 Aceleraciones máximas registradas en los estados de Chiapas, Colima, Guanajuato, Jalisco, México, Michoacán y Veracruz

2.3 DAÑOS CAUSADOS POR EL SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 2017

Sin duda alguna el sismo del 19 de septiembre del 2017 ha sido uno de los eventos más importantes en la República Mexicana, ya que 8 de los 32 estados se vieron afectados gravemente. De acuerdo con un reporte preliminar emitido por la Coordinación Nacional de Protección Civil, el 20 de septiembre de 2017 se reportaban un total de 230 personas fallecidas; de las cuales 100 correspondían a la Ciudad de México, 69 al estado de Morelos, otras 43 al estado de Puebla, 13 al Estado de México, 4 al estado de Guerrero y una más al estado de Oaxaca. Hasta ese momento el sector salud reportaba que se había brindado atención pre-hospitalaria a un total de 1372 personas. Para sobrellevar la crisis, se habilitaron refugios temporales en los estados con más afectaciones: 46 en la Ciudad de México, 76 en el estado de Morelos, 4 en el estado de Guerrero y 3 más en el estado de Puebla.

De acuerdo con el Atlas de Riesgo Nacional (CENAPRED, 2019), los mayores daños se presentaron en edificaciones con uso de centros médicos, centros educativos, culturales (museos, templos, bibliotecas, etc.) y viviendas. Tan solo en las cifras preliminares proporcionadas por la Coordinación Nacional de Protección Civil se reportaban 209 centros educativos con algún tipo de daño hasta el 20 de septiembre del 2017.

En las **Figura 18** a **Figura 21**, se observan los daños ocasionados por el evento sísmico. Se muestran los sitios con daños graves, medios y menores como función del uso de las edificaciones.



Figura 18 Ubicación y estado de los establecimientos de salud después del sismo del 19 de septiembre de 2017 (CENAPRED, 2019)

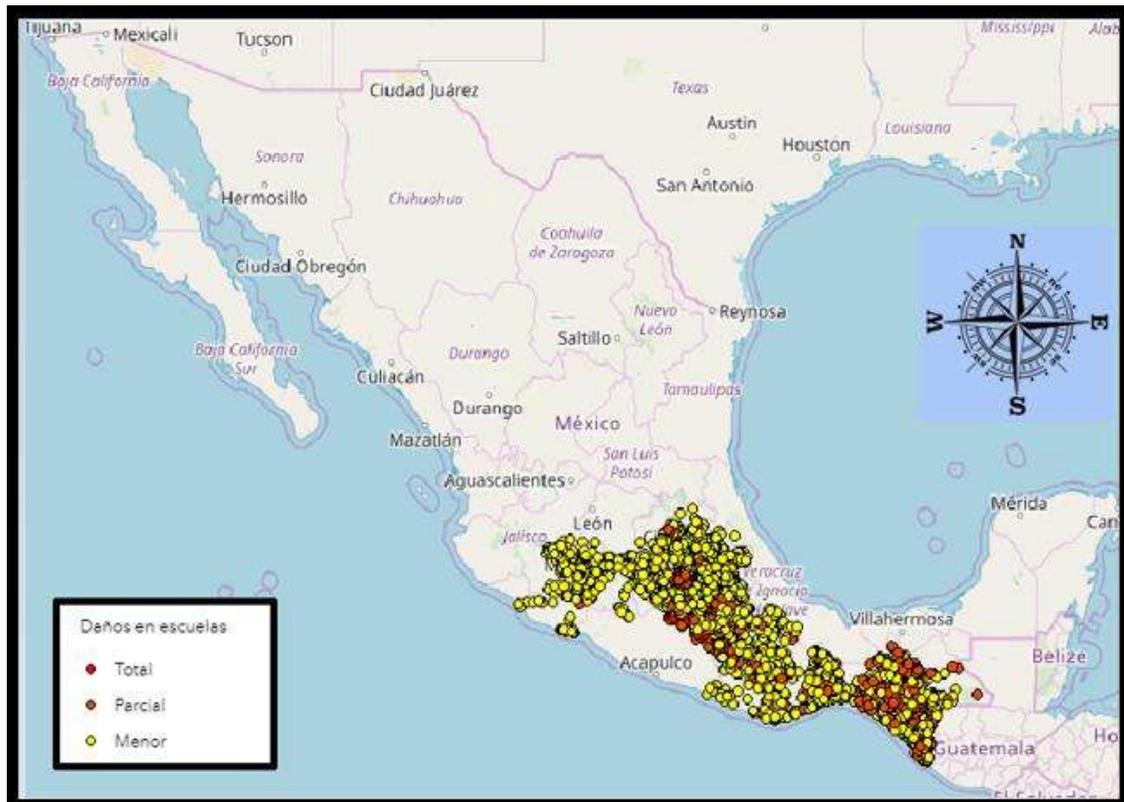


Figura 19 Ubicación y estado de los centros educativos después del sismo del 19 de septiembre de 2017 (CENAPRED, 2019)

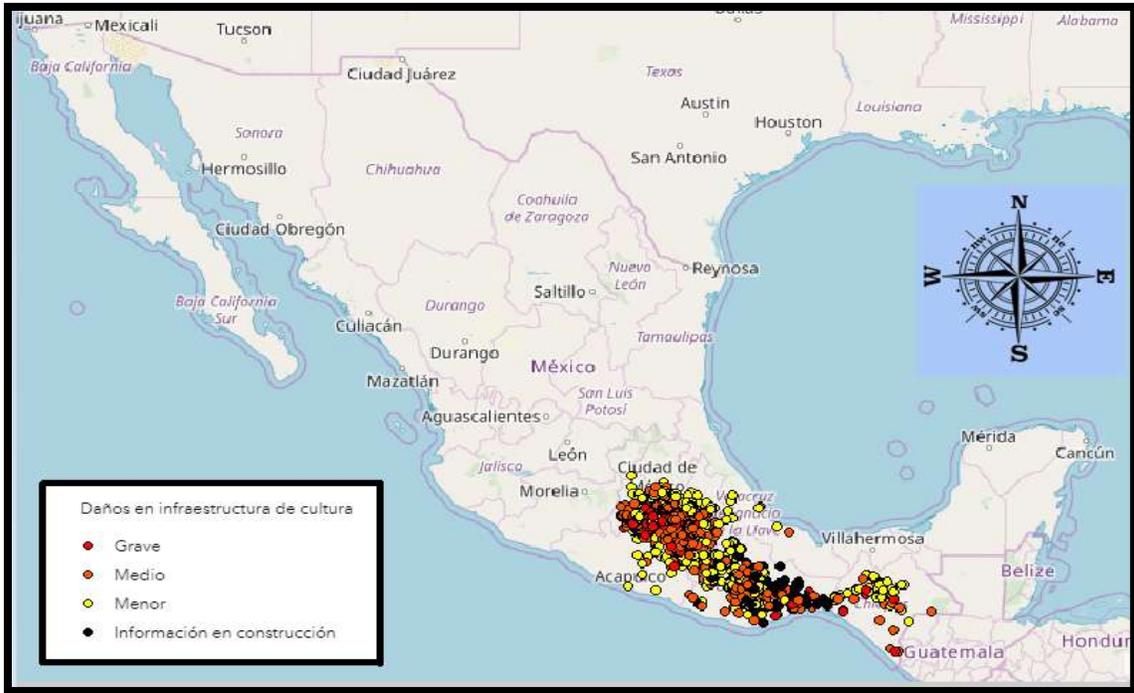


Figura 20 Ubicación y estado de la infraestructura cultural después del sismo del 19 de septiembre de 2017 (CENAPRED, 2019)



Figura 21 Ubicación y estado de las viviendas después del sismo del 19 de septiembre de 2017 (CENAPRED, 2019)

2.3.1 DAÑOS EN LA CIUDAD DE MÉXICO

Una zona de la Ciudad de México está edificada sobre los llamados suelos blandos (arcilla lacustre y limo) a causa de los antiguos lagos ahí existentes. Estos sitios suelen producir importantes amplificaciones en edificaciones de cierto intervalo de periodos, por la ocurrencia de eventos sísmicos.

De acuerdo con la Secretaría de Desarrollo Económico a través de los censos económicos del organismo INEGI del 2014, se estima que la Ciudad de México presentó daños económicos por más de 34 millones de pesos mexicanos. Con base en esta información se creó un “Inventario de daños en la CDMX” (Secretaría de Desarrollo Económico, 2017) que muestra un análisis de 38 edificaciones. La información proporciona daños estructurales, pérdidas económicas, dirección de los inmuebles y el uso del inmueble en el momento de ocurrencia del sismo **Figura 22**.



Figura 22 Ejemplo del análisis de uno de los inmuebles del “Inventario de daños de la CDMX” (Secretaría de Desarrollo Económico, 2017)

De acuerdo con la información preliminar recopilada con la ayuda de las brigadas, fue posible determinar que las causas más frecuentes de los daños severos y colapsos observados correspondieron a edificios con planta baja flexible, cambio drástico de rigideces, falta de confinamiento, estructuras irregulares en planta que originaron torsión, y en muchos casos problemas estructurales debido a la autoconstrucción de los inmuebles. Tan bien fue notoria la similitud que presentaron los edificios dañados en las colonias Condesa y del Valle con lo observado en los edificios dañados durante el sismo del 19 de septiembre de 1985.

CAPÍTULO III

ESTADÍSTICAS DE EDIFICIOS DAÑADOS POR EL EVENTO SÍSMICO

De acuerdo con estudios preliminares, 44 edificios colapsaron durante el 19 de septiembre de 2017 en Ciudad de México, además de un paso elevado peatonal y un puente peatonal. Las edificaciones tenían entre 5 y 10 niveles y se encontraban la mayoría de ellas en las zonas III a y III b; es importante mencionar que, de los 44 edificios colapsados, dos fueron producto de edificios aledaños que presentaron colapso.

Estudios preliminares formaron estadísticas de los datos de los reconocimientos in situ realizados, los cuales comenzaron el 19 de septiembre de 2017 y terminaron el 24 de septiembre de 2017. Poco después, el 27 de septiembre del mismo año, se complementó la información incluyendo reportes fotográficos.

Las estadísticas para esta investigación se realizaron a partir de 270 dictámenes obtenidos de la Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil de la Ciudad de México. Una variable importante en estas estadísticas fue identificar si edificios eran de esquina o no, y se identificó el número de niveles de los inmuebles, el uso de los inmuebles, los daños en los inmuebles, zonificación, estructuración y sistema de piso.

En la **Figura 23** se observa que, de los 270 dictámenes de estudio, 70 de los inmuebles están localizados en esquina lo que equivale a un 25.9%; los demás, 74.1%, pertenece a los 200 inmuebles restantes, no ubicados en esquina. Utilizando la herramienta de Google Maps (Google Maps, n.d.) se verificó que en su mayoría los edificios en esquina contaban con muros de mampostería en dos de sus lados perimetrales, lo que generó efectos de torsión en estos.

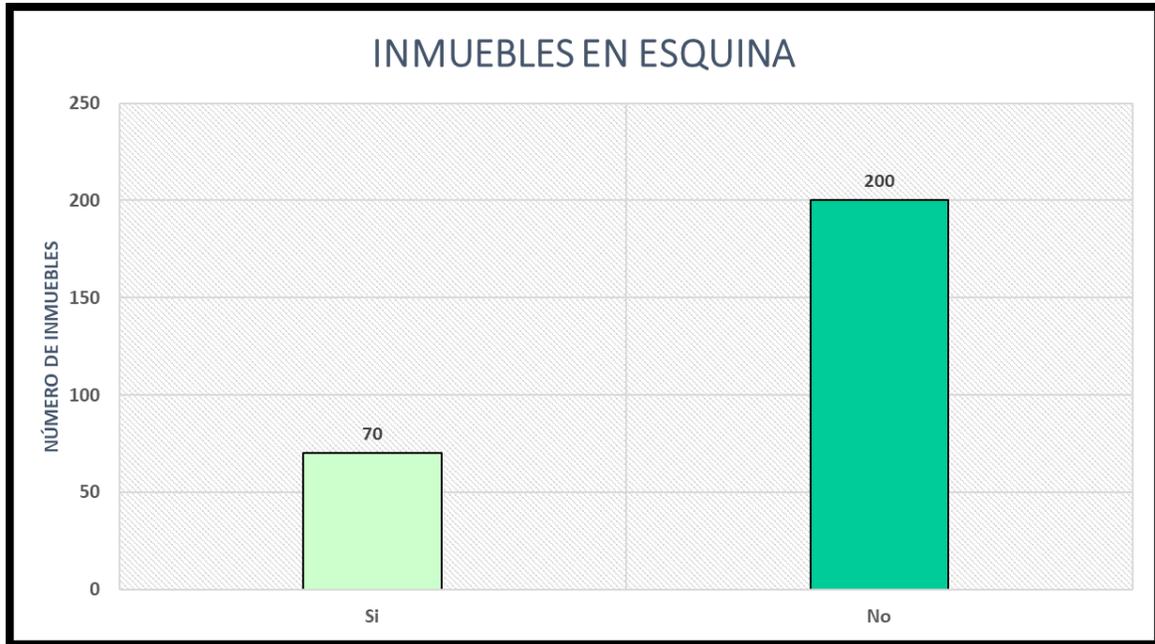


Figura 23 Número de inmuebles dañados ubicados en esquina

En la **Figura 24** se muestra el tipo de daño que presentaron los inmuebles a causa del evento sísmico; para esto se consideraron cuatro clasificaciones de acuerdo con lo descrito en los dictámenes:

- **Riesgo medio:** Son los inmuebles que presentaron daños en elementos no estructurales como vidrios, azulejos, etc.
- **Riesgo alto:** Son los inmuebles que, debido al grado de daño sufrido en los elementos estructurales, para que siga su funcionamiento, deben ser sometidos a un refuerzo o reconstrucción acreditada por algún especialista en seguridad estructural.
- **Demolición:** Son los inmuebles que son inestables y representan un riesgo para la vida de las personas que los habitan, así como para los peatones y vecinos.
- **Derrumbe:** Fueron los inmuebles que presentaron colapso parcial o total debido al evento sísmico.

Como se observa en la **Figura 24**, la mayoría de los inmuebles presentaron riesgo alto (173 de 270), que equivale a 64.1%.

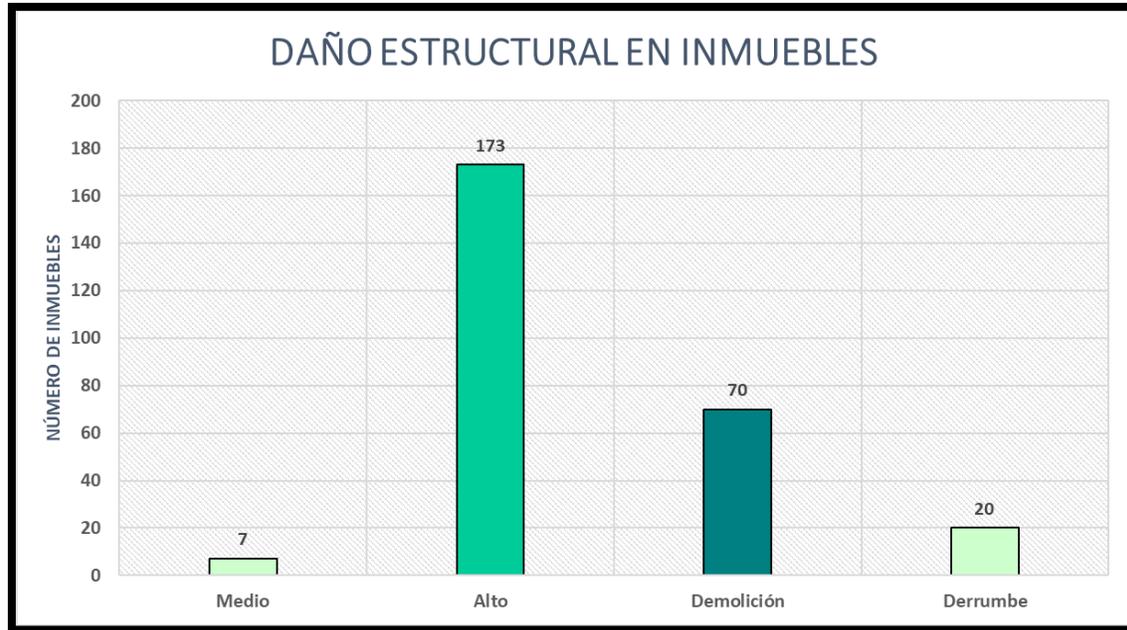


Figura 24 Clasificación de los daños de los inmuebles

La zona de ubicación de los inmuebles se determinó usando el “Mapa interactivo de la CDMX” (**Figura 25**), elaborado por Fernando Cueto gracias a la colaboración de las brigadas del Colegio de Ingenieros Civiles de México y la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural.

La zonificación geotécnica del mapa interactivo coincide con la presente en las Normas Técnicas Complementarias del 2004 (**Figura 26**). Por ello, en la **Figura 27** se observa la clasificación, que se consideró como:

- **Zona I:** Son 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 (Gobierno, 2004).
- **Zona II:** Transición, en la que los depósitos profundos se encuentran a 20 m de profundidad, o menos, y que está constituida predominantemente por estratos y limo arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre; el espesor de éstas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros (Gobierno, 2004)
- **Zona III:** Lacustre, integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son generalmente 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, 2004). Así mismo la zona III se divide en III a, III b, III c y III d.

Es importante señalar que, en las Normas Técnicas Complementarias del 2017, la subdivisión que presentaba la zona III desapareció y se observa con claridad en el mapa donde se tienen las zonas geotécnicas.

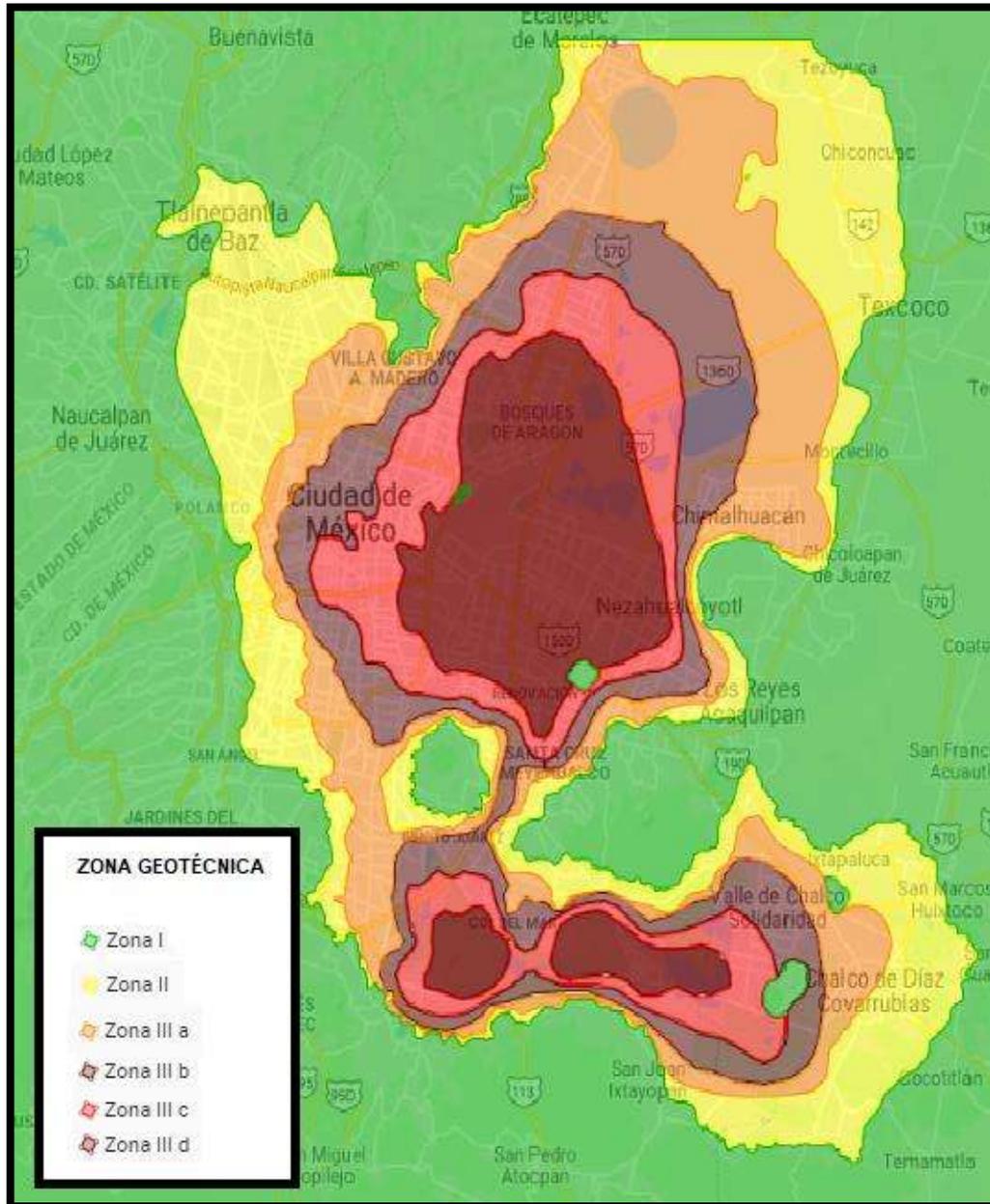


Figura 25 Mapa interactivo de la Ciudad de México
<https://www.google.com/maps/d/u/0/embed?mid=1d0JXBfIZIUZJebf3uFQAMz181D8&ll=19.398773827762305%2C-99.29162716572648&z=11>

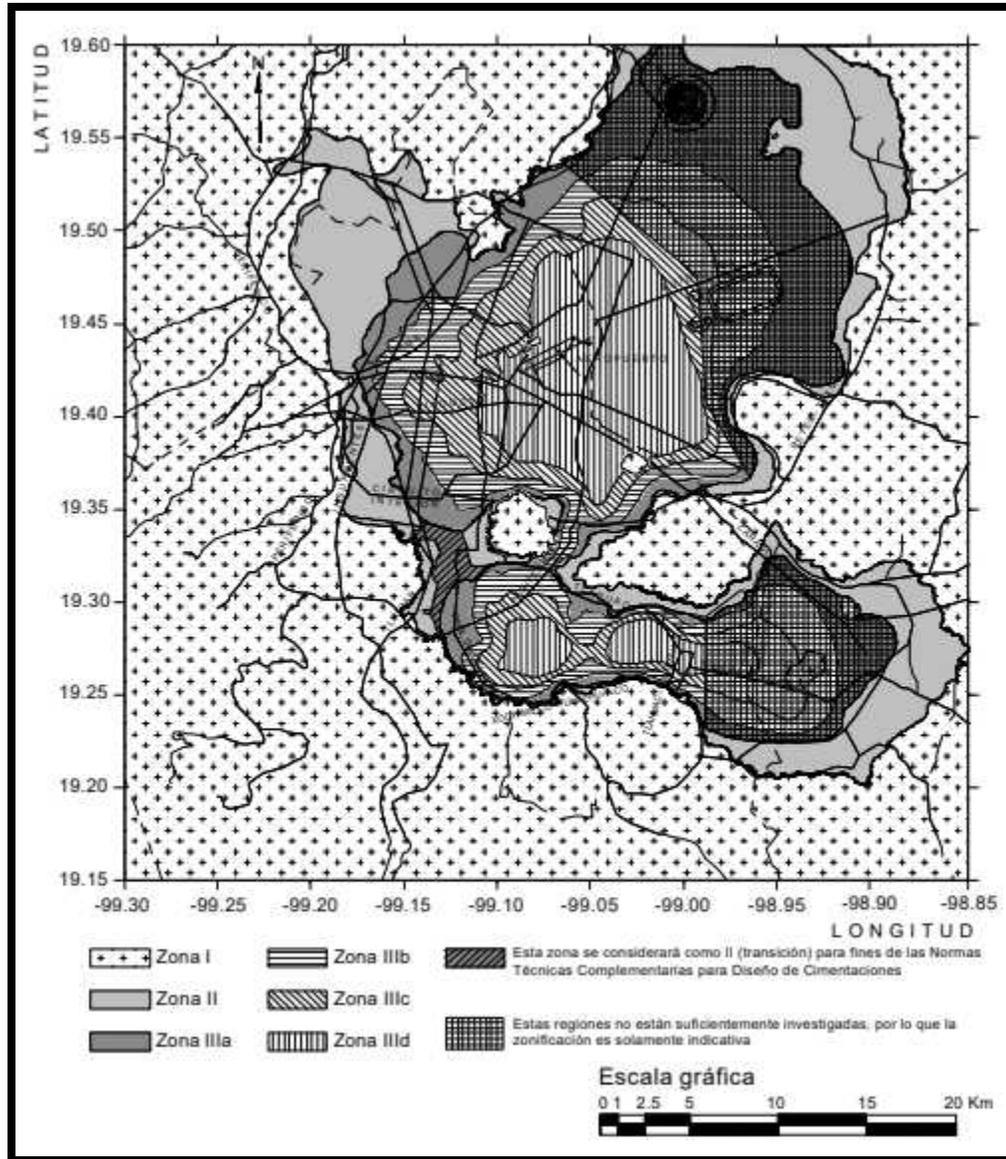


Figura 26 Zonificación sísmica de la Ciudad de México
(Gobierno, 2004)

La **Figura 27**, muestra que la mayoría de los inmuebles dañados se encuentran ubicados en la zona geotécnica III a y III b; 109 inmuebles se ubicaron en la zona IIIa y 83 en la zona IIIb (40.4% y 30.7%, respectivamente).

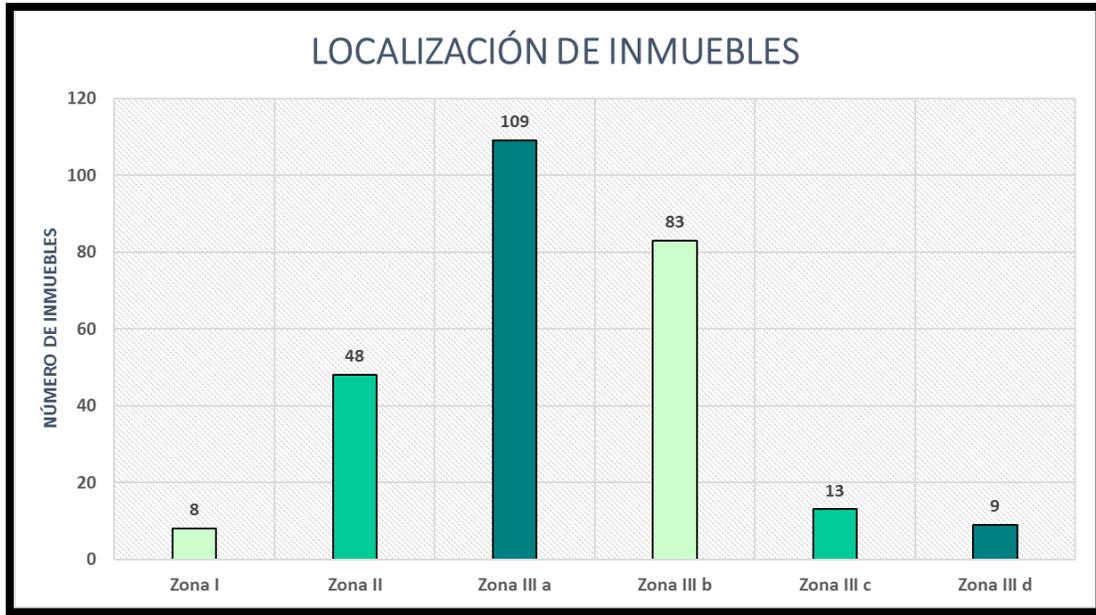


Figura 27 Localización de los inmuebles de estudio

Con base en los dictámenes estructurales, se determinó que el número de niveles de los inmuebles se encontraron entre 1 y 15. En la **Figura 28** se observa que la mayoría de los inmuebles están en el intervalo de 1 a 9 niveles, siendo 5, 2 y 6 niveles los que presentaron mayor número de edificaciones 17.4%, 17.0% y 14.4%, respectivamente.

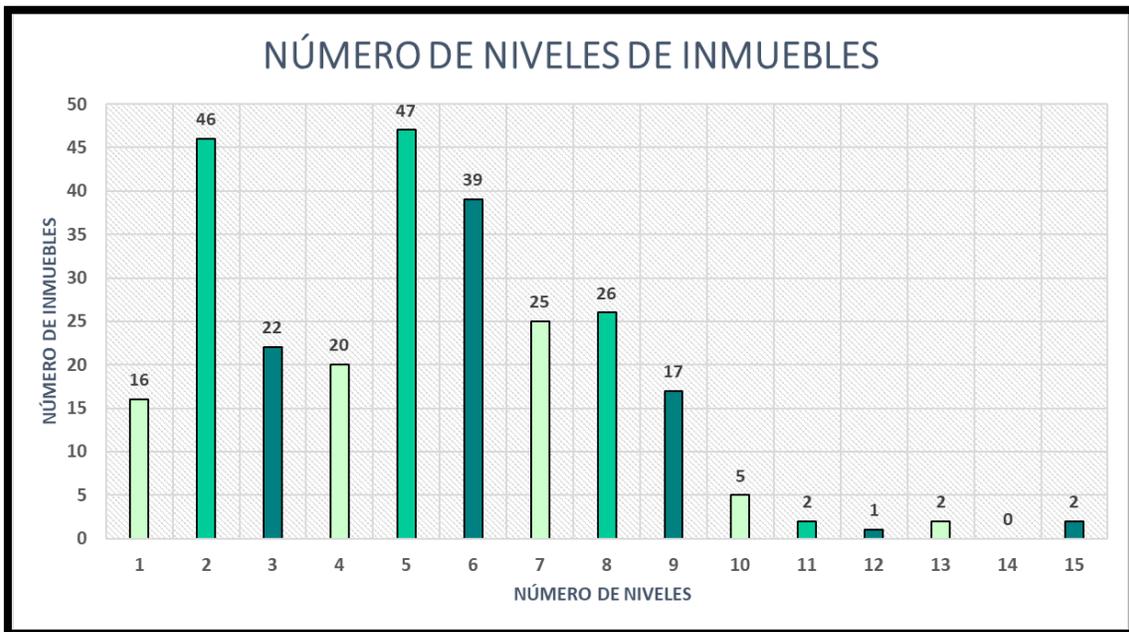


Figura 28 Número de niveles de los inmuebles dañados

También gracias a los 270 dictámenes fue posible conocer la estructuración de los inmuebles, así como su sistema de piso. Las **Figura 29** a **Figura 30** muestran el tipo de estructuración y el sistema de piso de los inmuebles de estudio; se aprecia que el tipo de estructuración más frecuente fue de marcos de concreto y el sistema de piso más usado fue de losas macizas. Los edificios con marcos de concreto fueron 134 lo que equivale a un 49.6% y el sistema de losas planas lo presentaron 187 edificios lo que equivale a un 69.3%.

En la **Figura 29**, la columna que dice “Mixto” se refiere a un sistema estructural compuesto por marcos de concreto en algunas partes de los inmuebles y marcos de carga de mampostería en otras. Así mismo la columna que dice “N/E” se refiere a los inmuebles que no especificaba su tipo de estructuración en los dictámenes de estudio.

Por otra parte, la etiqueta “Mixto” de la **Figura 30** corresponde a inmuebles con losas macizas en algunas zonas y losacero en otras. En esta figura, la columna que tiene por nombre “N/E”, se refiere a los dictámenes donde no se especificó el sistema de piso.

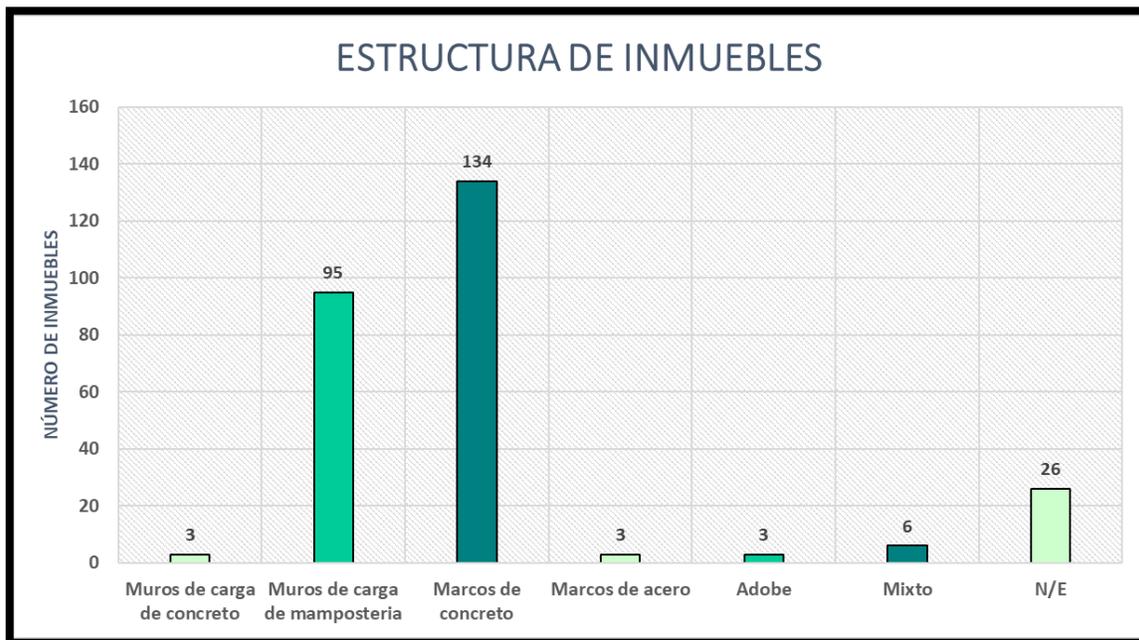


Figura 29 Estructuración de los inmuebles de estudio

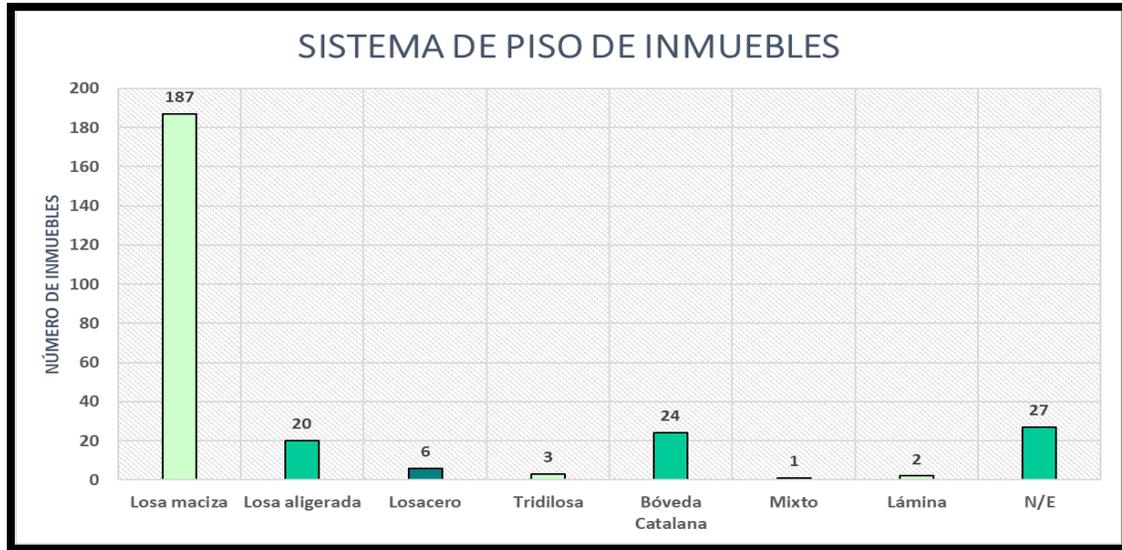


Figura 30 Sistemas de piso de los inmuebles de estudio

Finalmente, la **Figura 31** muestra el uso de los inmuebles. De acuerdo con los dictámenes, muchos de los inmuebles había cambio el uso para el que fueron creados y otros presentaron trabajos de autoconstrucción. Se observa que los usos más frecuentes fueron de casas habitación (49 inmuebles), departamentos (77 inmuebles) y departamentos que contaban en su planta baja con estacionamiento para los inquilinos (55 inmuebles), los cuales equivalen al 17.2%, 28.5% y 20.4% respectivamente. La columna que tiene como nombre “N/E” hace alusión a inmuebles que se encontraban en abandono cuando el ocurrió el sismo.

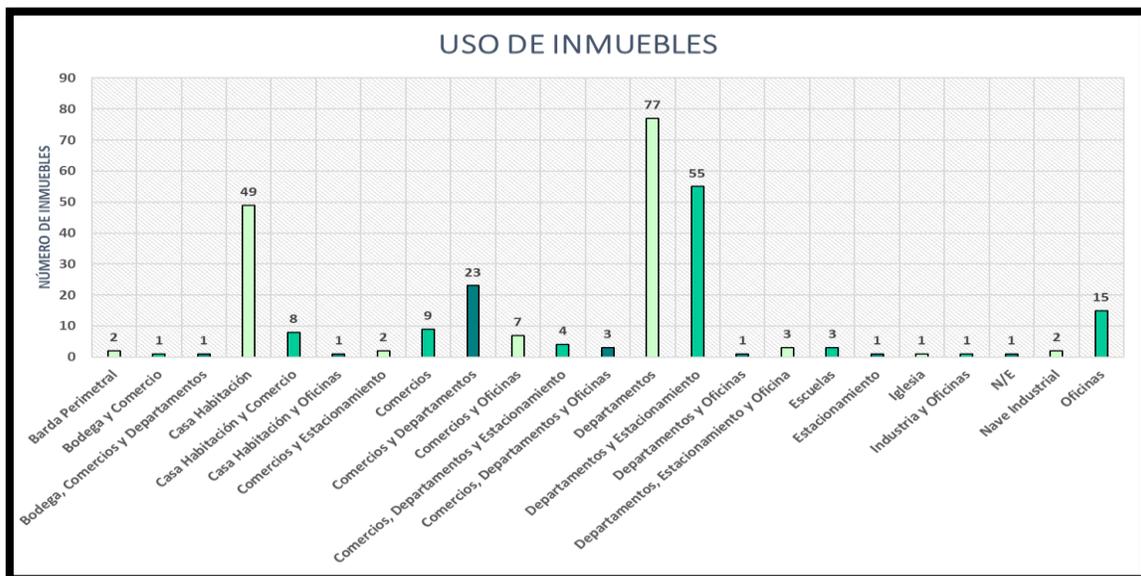


Figura 31 Uso de los inmuebles de estudio

Con base en las estadísticas de los 270 dictámenes se observa que los mayores daños se presentaron en los inmuebles de uso habitacional, ubicados en la zona III a, con cinco niveles. También se determinó que los edificios que presentaron derrumbes fueron construidos antes del sismo del 19 de septiembre de 1985.

3.1 ESTADÍSTICAS DE LOS INMUEBLES EN ESQUINA

De acuerdo con estudios preliminares (Galvis, Miranda, Heresi, Dávalos, & Silos, 2017) del sismo del 19 de septiembre de 2017, el 59% de las estructuras que presentaron colapso fue debido a edificaciones que se encontraban ubicadas en esquina. Es importante mencionar que todas estas presentaban una estructuración formada por marcos formados por traveses y columnas y en los dos lados perimetrales que colindaban con terrenos vecinos, contaban con muros de relleno de mampostería **Figura 32**.

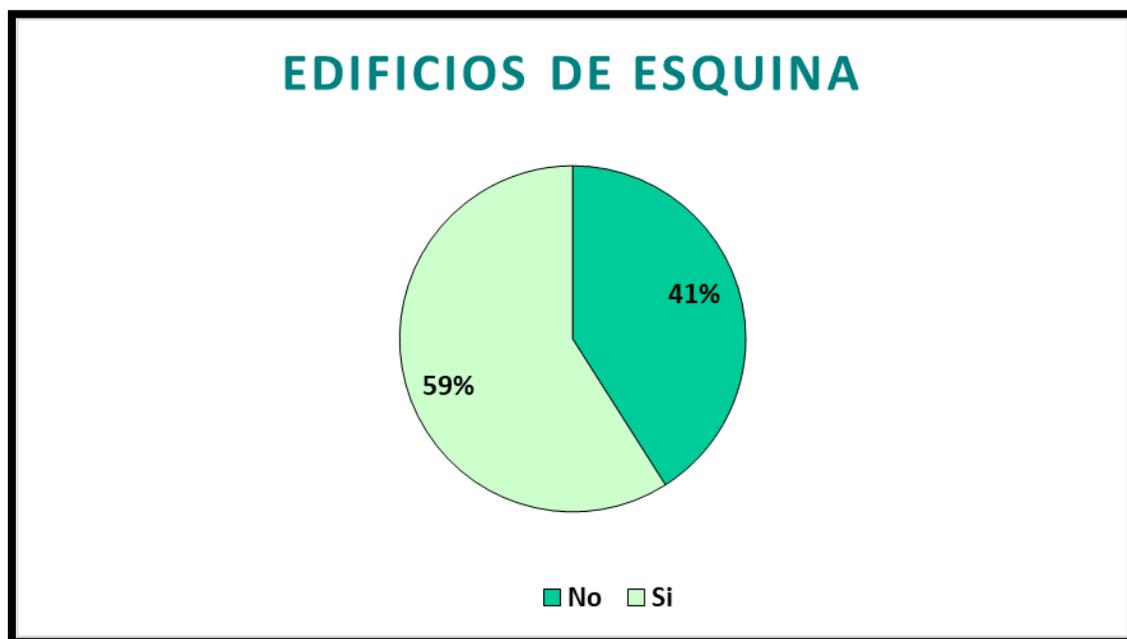


Figura 32 Porcentaje preliminar de edificios ubicados en esquina que sufrieron colapso (Galvis et al., 2017)

Como se mencionó anteriormente uno de los factores que directamente contribuye a producir torsión en una edificación, es colocar muros de relleno ligados a las columnas en dos lados perimetrales que colindan con las edificaciones vecinas. Adicionalmente, se observó que la mayoría de estas edificaciones tenían formas irregulares en planta (H, L, I).

En la **Figura 33**, se aprecia que un gran número de edificios de esquina entraron en la clasificación de derrumbe. De los 20 inmuebles en esquina, 13 de ellos colapsaron, lo que equivale a un 65%. Como se puede apreciar en la **Figura 34**, 68 de los 70 edificios de esquina presentan muros colindantes de relleno.

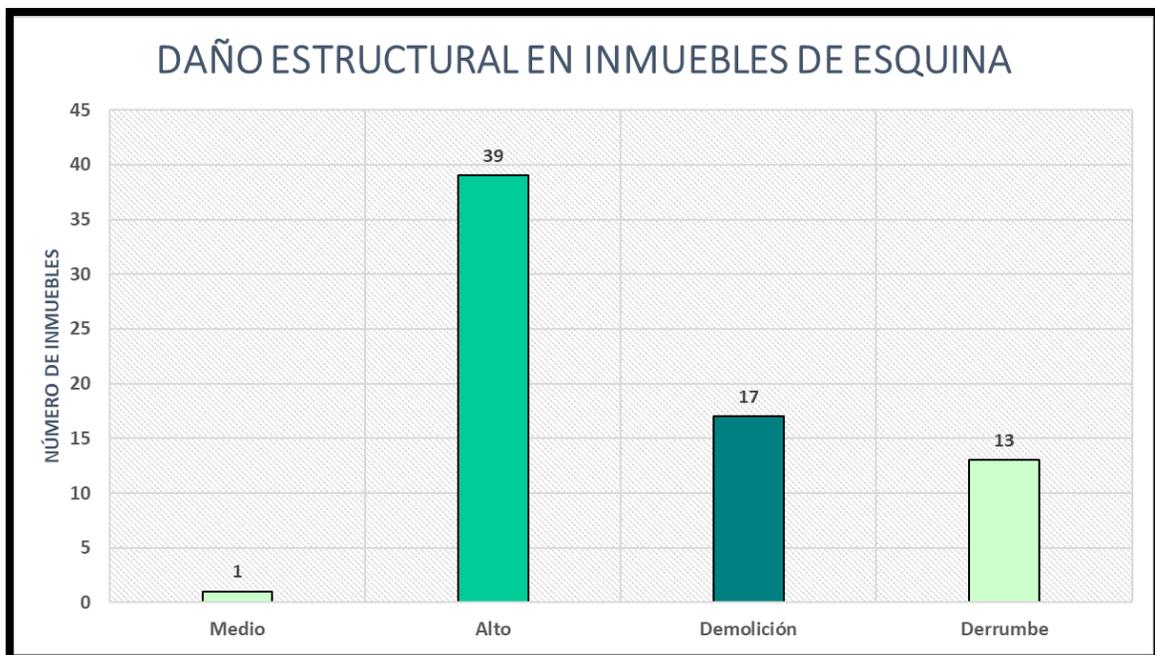


Figura 33 Daño estructural en inmuebles de esquina

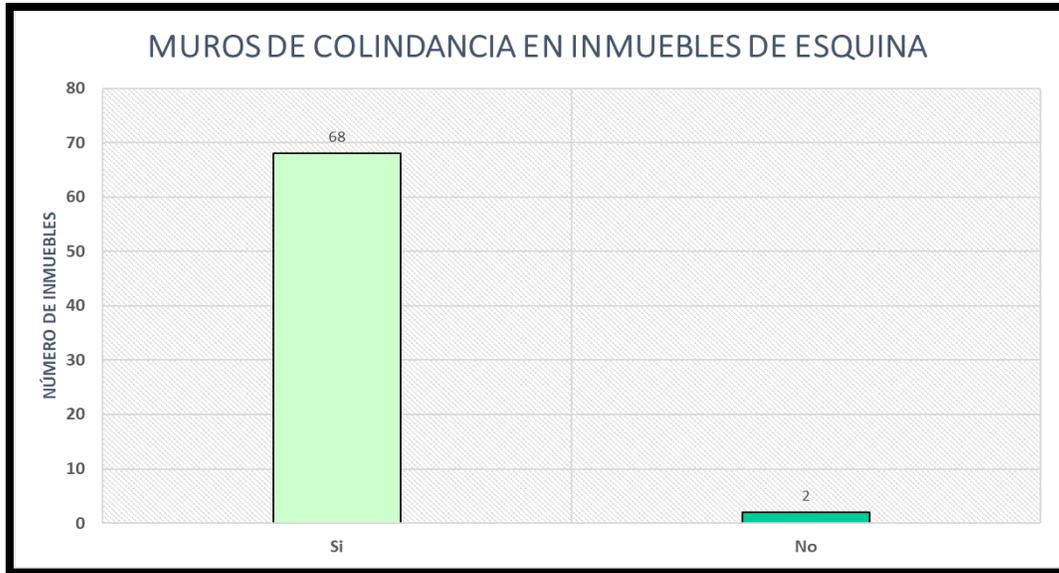


Figura 34 Número de edificios en esquina que contaban con muros colindantes

En la **Figura 35**, se observa que el mayor número de inmuebles en esquina se ubicaban en las zonas geotécnicas III a (27 inmuebles) y III b (25 inmuebles). De los 109 edificios localizados en zona III a, 27 estaban en esquina lo que equivale a 24.8%. En la zona III b, 25 de los 83 edificios estaban ubicados en esquina lo que equivale a 30.1%.

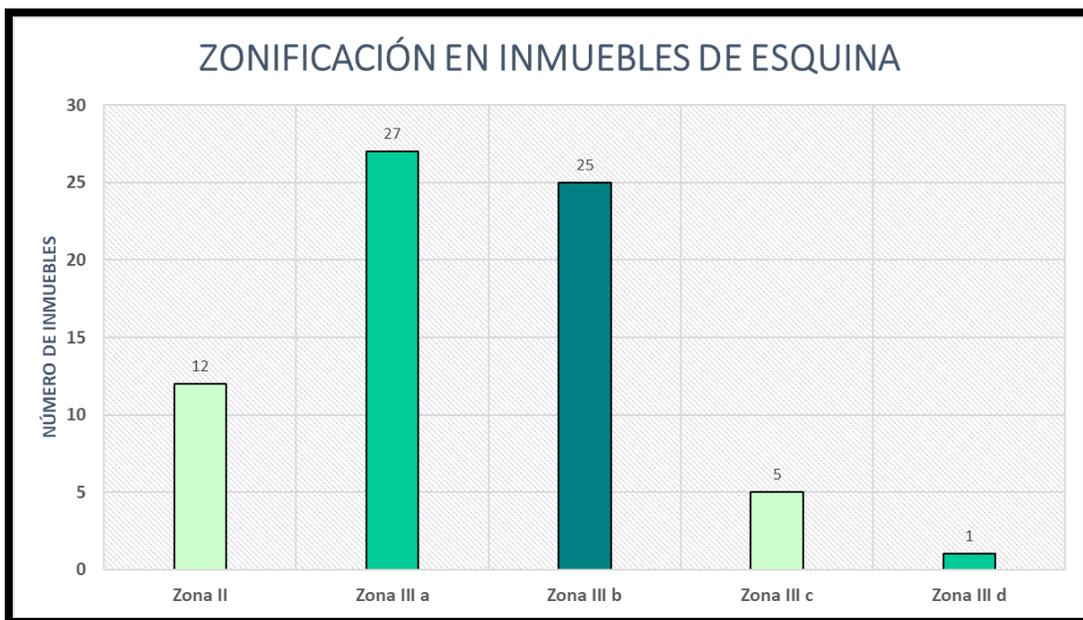


Figura 35 Zonificación de los inmuebles de estudio en esquina

De la **Figura 36** a **Figura 39**, se muestra el número de niveles, estructuración, sistema de piso e uso de los inmuebles que presentaron los edificios en esquina. Se puede observar en la **Figura 36**, que la mayoría de los edificios en esquina contaban con dos niveles, estos representan el 18.5%. Por otra parte, en la **Figura 37** es evidente que este tipo de edificaciones presentaron una estructura a base de marcos de concreto, las cuales representa un 54.2%. Así mismo en la **Figura 38**, los sistemas de piso con que contaban la mayoría de las edificaciones fueron de losa maciza representando un 58.5%. Finalmente, en la **Figura 39** se visualiza que las edificaciones presentaron en su mayoría un uso de departamentos con el 17.1%.

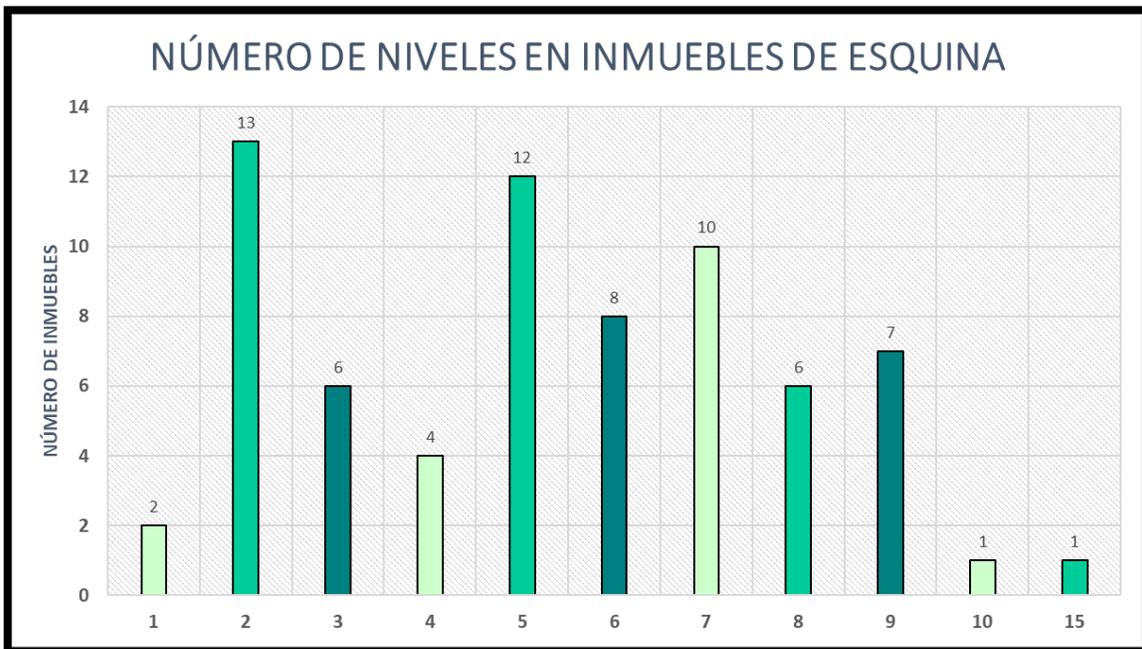


Figura 36 Número de niveles en inmuebles de esquina

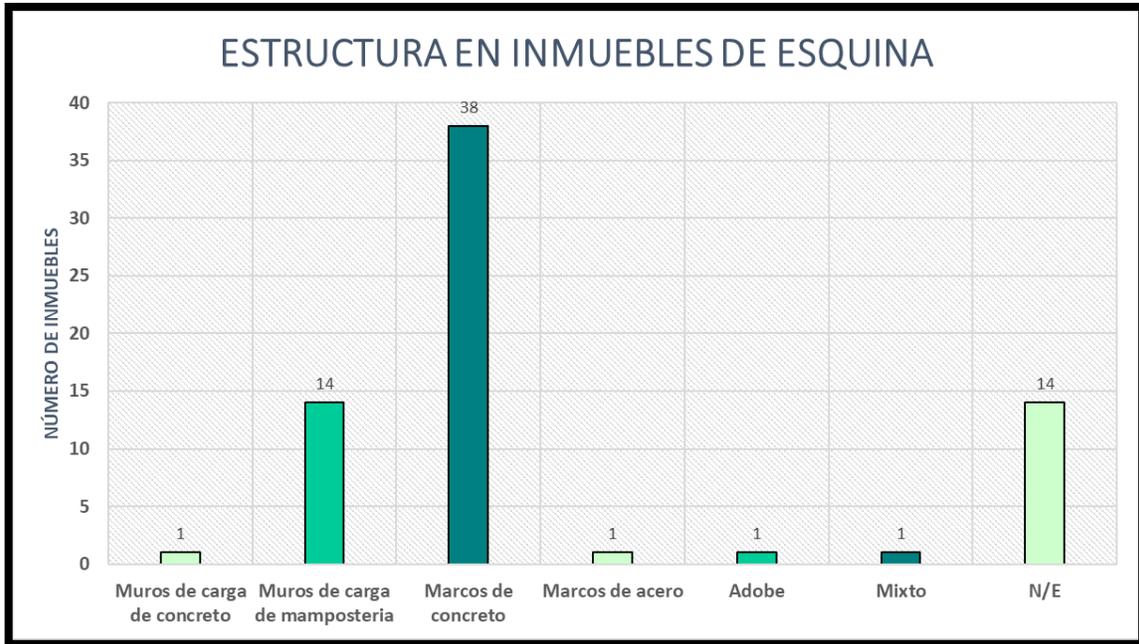


Figura 37 Estructuración en inmuebles de esquina

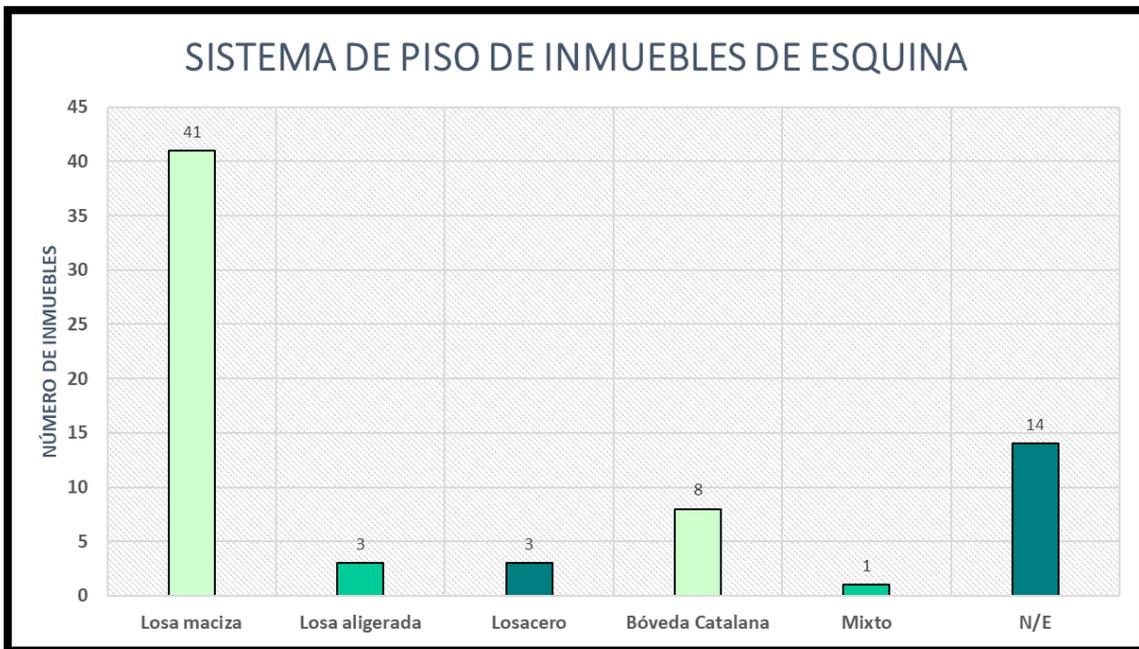


Figura 38 Sistema de piso que presentaron los inmuebles de esquina

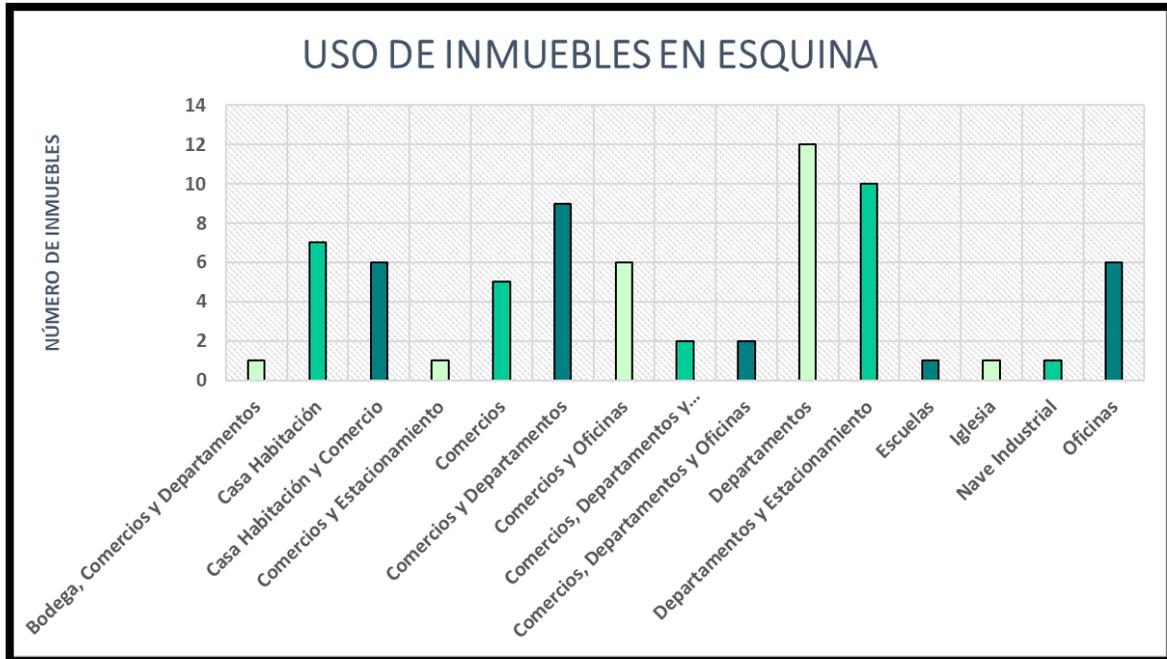


Figura 39 Uso de inmuebles en esquina

CAPÍTULO IV

ACELEROGRAMAS REGISTRADOS EN TERRENO FLEXIBLE

El terremoto de 1957 mejor conocido como el terremoto del ángel demostró los efectos que tienen los suelos flexibles o blandos sobre la respuesta sísmica de las edificaciones de la CDMX. La influencia que tuvieron este sismo y el del 19 de septiembre de 1985 fue decisiva en la evolución de los reglamentos para diseño sísmico.

Para esta investigación se recopiló un total de 131 registros sísmicos obtenidos del Servicio Sismológico Nacional (UNAM, 2019) y del Centro de Instrumentación y Registro Sísmico (CIRES, 2019). Como se observa en la **Tabla 2**, tan solo en la CDMX se obtuvo un conjunto de 62 acelerogramas. Con base en las ubicaciones de los edificios dañados, se seleccionó un conjunto de 28 acelerogramas de los 62 en total. Estos acelerogramas en su mayoría se encuentran en zona III a y III b; y solo tres en zona II.

En la

Tabla 8 se muestran los 28 acelerogramas seleccionados para los análisis no lineales de los modelos. Se observa la ubicación de las estaciones, la red a la que pertenecen y las aceleraciones máximas en las tres direcciones.

Tabla 8 Acelerogramas seleccionados para análisis no lineales de modelos de estudio

CÁLOGO DE ACELEROGRAMAS										
No. registro	Clave	Página (Organización)	Información de estación				Zona Sísmica	Aceleraciones Máximas (m/s ²)		
			Red	Ubicación	Latitud	Longitud		Norte - Sur	Vertical	Este - Oeste
1	AL01	CIRES	RACM	Colonia: Centro Delegación: Cuauhtémoc	19.4356 N	99.1453 W	III b	1.1711544	1.2214853	1.08563
2	AO24	CIRES	RACM	Colonia: General Pedro María Anaya Delegación: Benito Juárez	19.3580 N	99.1539 W	II	1.0639447	0.4791651	1.1965177
3	AU46	CIRES	RACM	Colonia: Del Valle Delegación: Benito Juárez	19.3832 N	99.1681 W	II	0.772866	0.3344356	0.9489166
4	BL45	CIRES	RACM	Colonia: Doctores Delegación: Benito Juárez	19.4253 N	99.1481 W	III b	1.0227312	0.3970041	1.1447396
5	CCCL	INSTITUTO DE INGENIERIA, UNAM	I de I - UNAM	Colonia: Tlatelolco Delegación: Cuauhtémoc	19.449858 N	99.137919 W	III b	0.855283	0.410016	0.734187
6	CH84	CIRES	RACM	Colonia: Ampliación San Francisco Culhuacán Delegación: Coyoacán	19.33 N	99.1254 W	III a	1.4895962	0.8380995	2.2559915
7	CI05	CIRES	RACM	Colonia: Roma Norte Delegación: Cuauhtémoc	19.4186 N	99.1653 W	III b	1.1331878	0.5119687	1.1424343
8	CJ03	CIRES	RACM	Colonia: Roma Delegación: Cuauhtémoc	19.4097 N	99.1567 W	III b	1.1199449	0.363878	0.980309
9	CJ04	CIRES	RACM	Colonia: Roma Delegación: Cuauhtémoc	19.4098 N	99.1566 W	III b	1.2392777	0.3477837	0.97064
10	CO56	CIRES	RACM	Colonia: Roma Delegación: Cuauhtémoc	19.4215 N	99.1590 W	III b	1.0976185	0.5381906	1.1399171

11	DX37	CIRES	RACM	Colonia: Ciudad Jardín Delegación: Coyoacán	19.3322 N	99.1439 W	II	1.8772643	0.5237194	1.2394107
12	GA62	CIRES	RACM	Colonia: Guerrero Delegación: Cuauhtémoc	19.4385 N	99.1401 W	III b	0.9706874	0.336615	0.8403455
13	GC38	CIRES	RACM	Colonia: Culhuacán Delegación: Iztapalapa	19.3161 N	99.1059 W	III a	1.2562416	0.4317244	1.2419848
14	IB22	CIRES	RACM	Colonia: Campestre Delegación: Coyoacán	19.3450 N	99.1297 W	III a	1.1901291	0.4621105	1.6088158
15	JC54	CIRES	RACM	Colonia: Jardines de Coyoacán Delegación: Coyoacán	19.3130 N	99.1272 W	III a	2.2026671	0.5985458	2.0410569
16	LI33	CIRES	RACM	Colonia: Santa Catarina Delegación: Tláhuac	19.3064 N	98.9631 W	III a	1.3793052	0.6525584	1.133813
17	LI58	CIRES	RACM	Colonia: Juárez Delegación: Cuauhtémoc	19.4263 N	99.1569 W	III b	0.958086	0.5112188	0.8990518
18	LV17	CIRES	RACM	Colonia: Lindavista Delegación: Gustavo A. Madero	19.4931 N	99.1275 W	III a	1.2301647	0.2592726	1.0413809
19	MI15	CIRES	RACM	Colonia: San Bartolo Chico Delegación: Xochimilco	19.2834 N	99.1253 W	III a	2.0719345	0.552924	1.3342696
20	PE10	CIRES	RACM	Colonia: Barrio San Pedro Delegación: Iztacalco	19.3809 N	99.1318 W	III b	1.0140528	0.3114842	1.245604

21	RM48	CIRES	RACM	Colonia: Centro Delegación: Cuauhtémoc	19.4359 N	99.1280 W	III b	0.6107271	0.378507	0.7801341
22	SCT2	INSTITUTO DE INGENIERIA, UNAM	I de I - UNAM	Colonia: Narvarte Oriente Delegación: Benito Juárez	19.394694 N	99.148678 W	III b	0.903323	0.417671	0.916775
23	SI53	CIRES	RACM	Colonia: San Simon Delegación: Benito Juarez	19.3753 N	99.1483 W	III a	1.2902944	0.5678383	1.7756513
24	SP51	CIRES	RACM	Colonia: Sector Popular Delegación: Iztapalapa	19.3656 N	99.1189 W	III b	0.773631	0.3849628	1.0038069
25	TL08	CIRES	RACM	Colonia: Morelos Delegación: Cuauhtémoc	19.45 N	99.1336 W	III b	0.8284913	0.3017763	0.812083
26	TL55	CIRES	RACM	Colonia: 5 de Mayo Delegación: Cuauhtémoc	19.4536 N	99.1425 W	III b	0.8245664	0.3357064	0.6919602
27	UC44	CIRES	RACM	Colonia: San Rafael Delegación: Cuauhtémoc	19.4337 N	99.1654 W	III a	1.2531945	0.4172581	1.2492514
28	VG09	CIRES	RACM	Colonia: Nicolas Bravo Delegación: Venustiano Carranza	19.4539 N	99.1225 W	III b	1.1954487	0.3644657	1.0184624

4.1 ACELEROGRAMAS Y ESPECTROS DE RESPUESTA

Los espectros de respuesta forman una parte fundamental en la ingeniería sísmica. Son gráficas que relacionan la respuesta máxima (de desplazamiento, velocidad, aceleración, o según sea el parámetro de interés) producida por una acción sísmica con el periodo natural (T_n) o la frecuencia (f_n) de un sistema de un grado de libertad.

Los espectros de respuesta más utilizados son de pseudo-aceleración, pseudo-velocidad y de desplazamientos; la palabra pseudo se refiere a que no se obtiene de la forma convencional, la cual sería mediante la derivación de los desplazamientos, obtener las velocidades y posteriormente mediante la derivación de estas obtener las aceleraciones. Se calculan a partir de los espectros de respuesta de desplazamientos, y en un intervalo de periodos tienen valores muy aproximados a los obtenidos de forma convencional.

La obtención de los espectros de respuesta se realizó mediante el programa "SEISMOSIGNAL". Cabe mencionar que todos los espectros obtenidos para esta investigación son de pseudo-aceleraciones del tipo elástico y cuentan con un amortiguamiento del 5%.

4.1.1 ZONA TIPO II

En las **Figura 40** a **Figura 45**, se muestran los tres acelerogramas correspondientes a suelo tipo II. En cada una de las figuras se observa las aceleraciones en las dos direcciones ortogonales de cada uno de estos registros.

A continuación, en las **Figura 46** y **Figura 47**, se muestran los espectros de respuesta para 5% de amortiguamiento, correspondientes a los acelerogramas en suelo tipo II. Estos espectros muestran los periodos de mayor amplificación.

Se observa en ambas figuras de los espectros de respuesta que las amplitudes mayores están en el intervalo de 1.0-1.5 s. Esto es significativo para la evaluación de la respuesta sísmica de los edificios; como se observó en el capítulo pasado la mayoría de los edificios dañados presentaron alturas en su mayoría pequeñas que elásticamente los podrían ubicar a la izquierda de esta zona espectral.

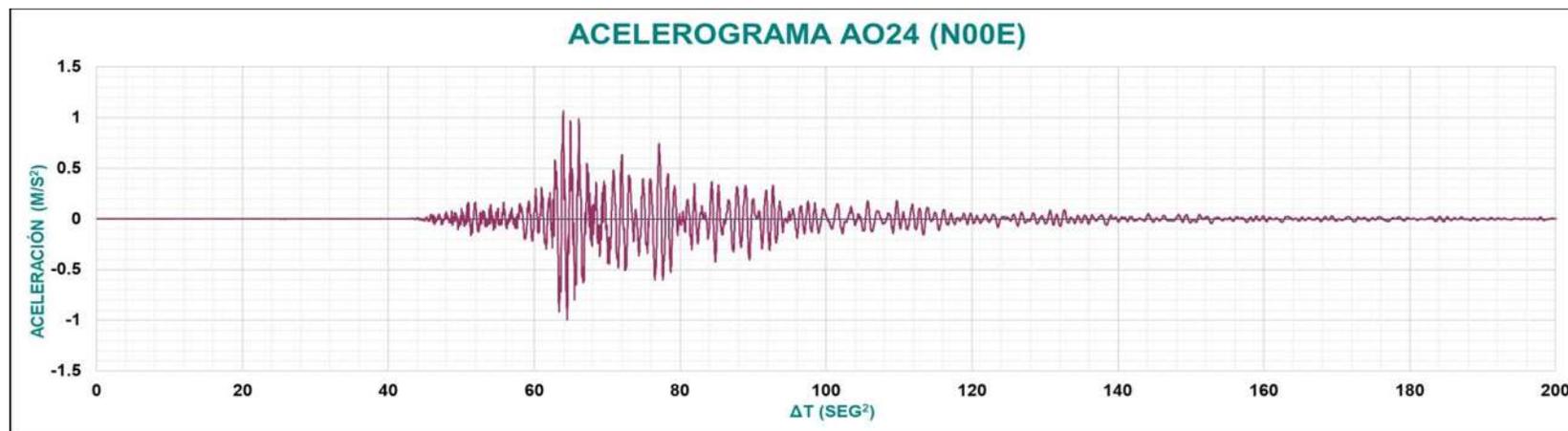


Figura 40 Registro de acelerograma A024. Ubicación: General Pedro María Anaya, Benito Juárez (Dirección N00E)

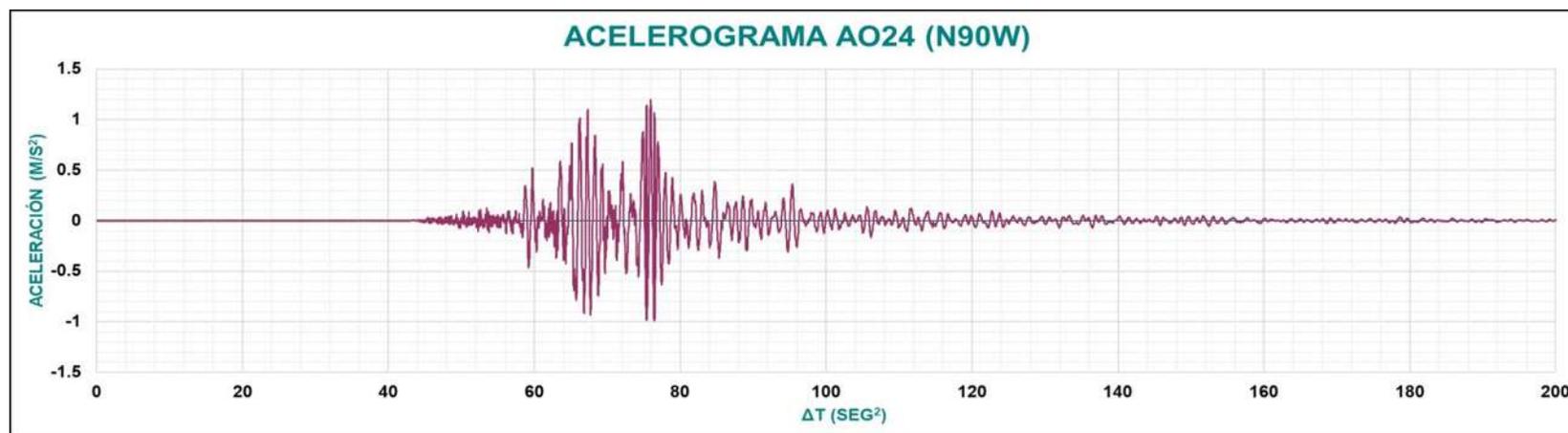


Figura 41 Registro de acelerograma A024. Ubicación: General Pedro María Anaya, Benito Juárez (Dirección N90W)

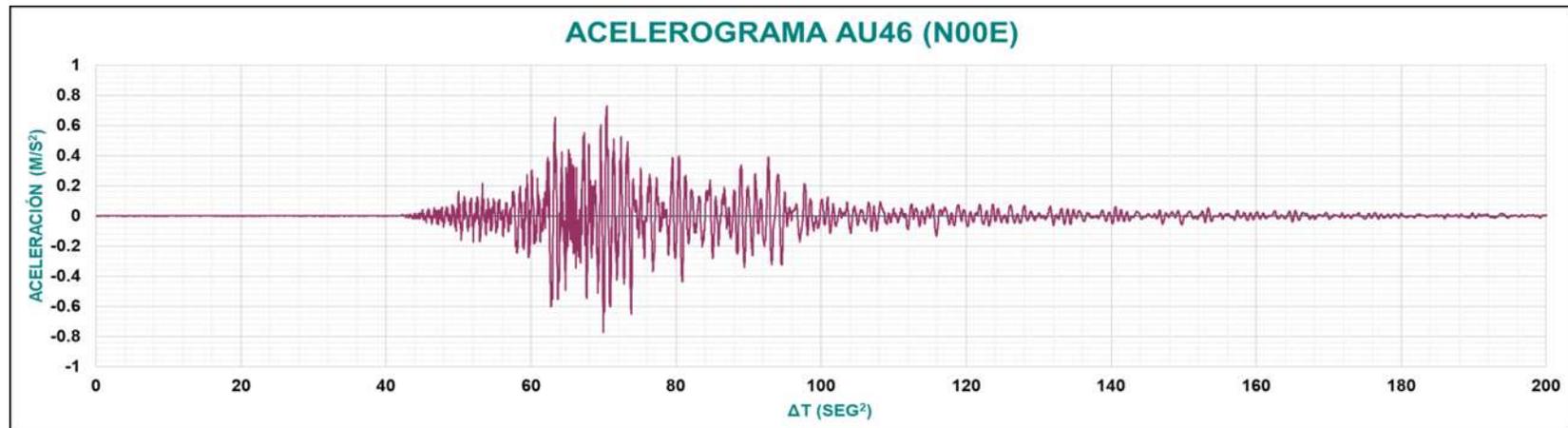


Figura 42 Registro de acelerograma AU46. Ubicación: Del Valle, Benito Juárez (Dirección N00E)

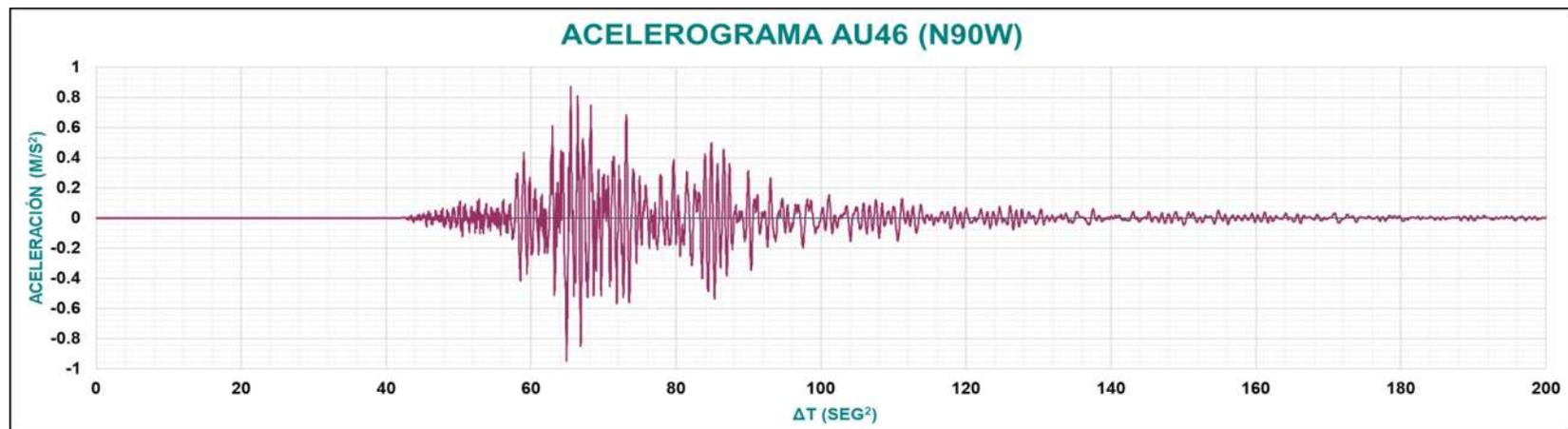


Figura 43 Registro de acelerograma AU46. Ubicación: Del Valle, Benito Juárez (Dirección N90W)

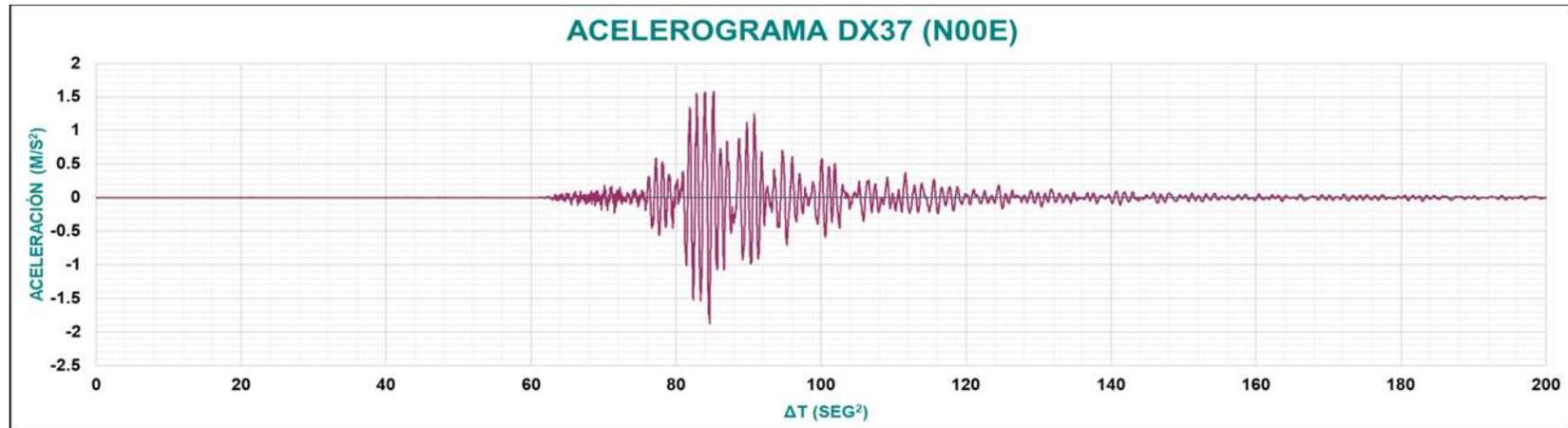


Figura 44 Registro de acelerograma DX37. Ubicación: Ciudad Jardín, Coyoacán (Dirección N00E)

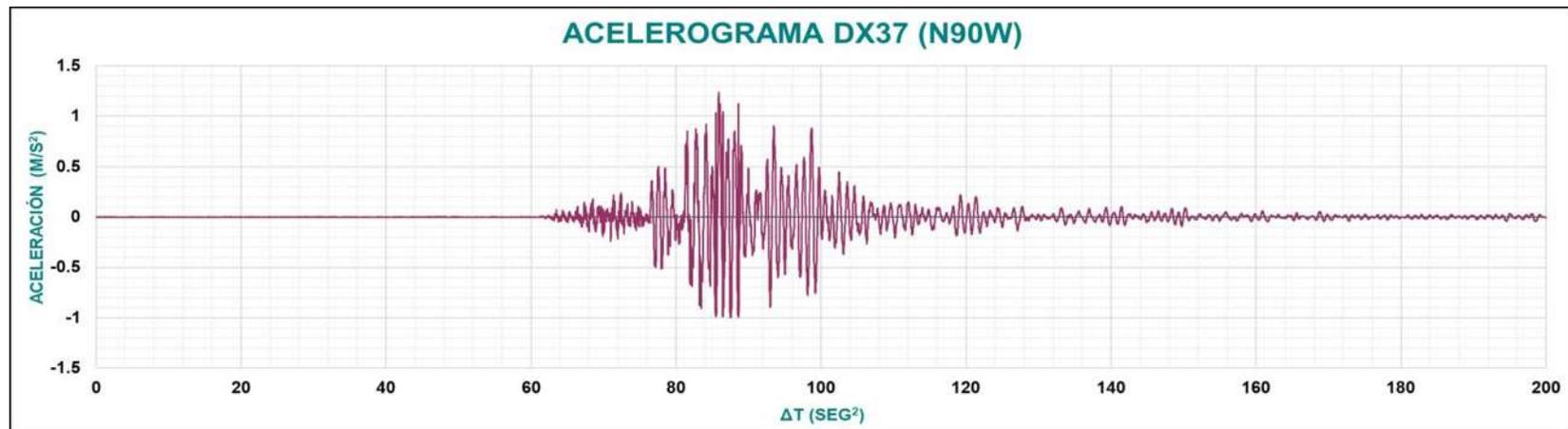


Figura 45 Registro de acelerograma DX37. Ubicación: Ciudad Jardín, Coyoacán (Dirección N90W)

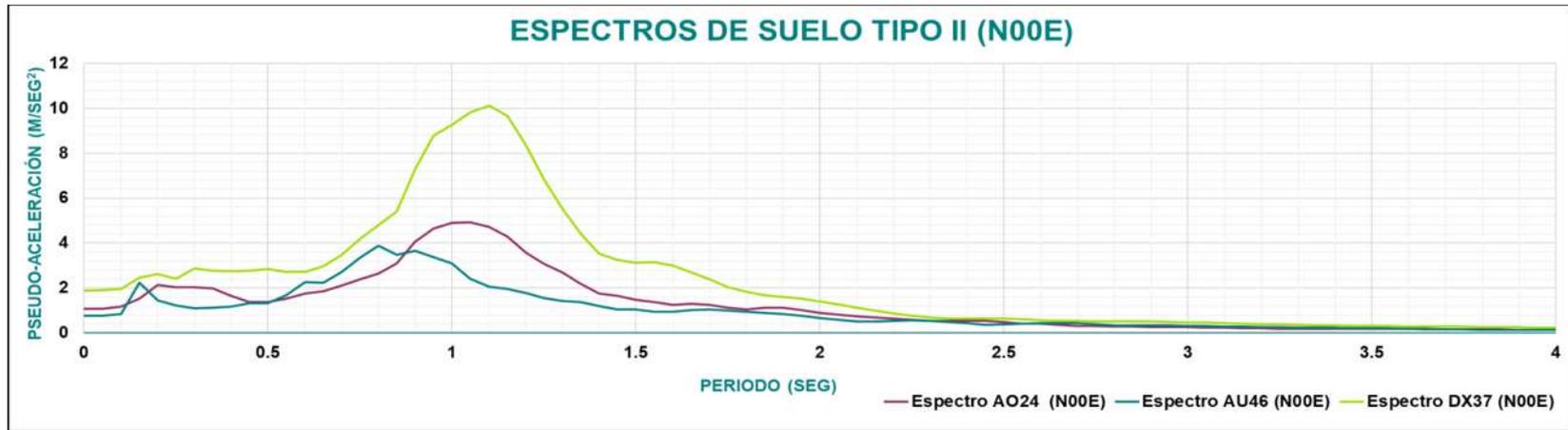


Figura 46 Espectros de respuesta en suelo tipo II correspondientes al sismo del 19 de septiembre de 2017 (Dirección N00E)

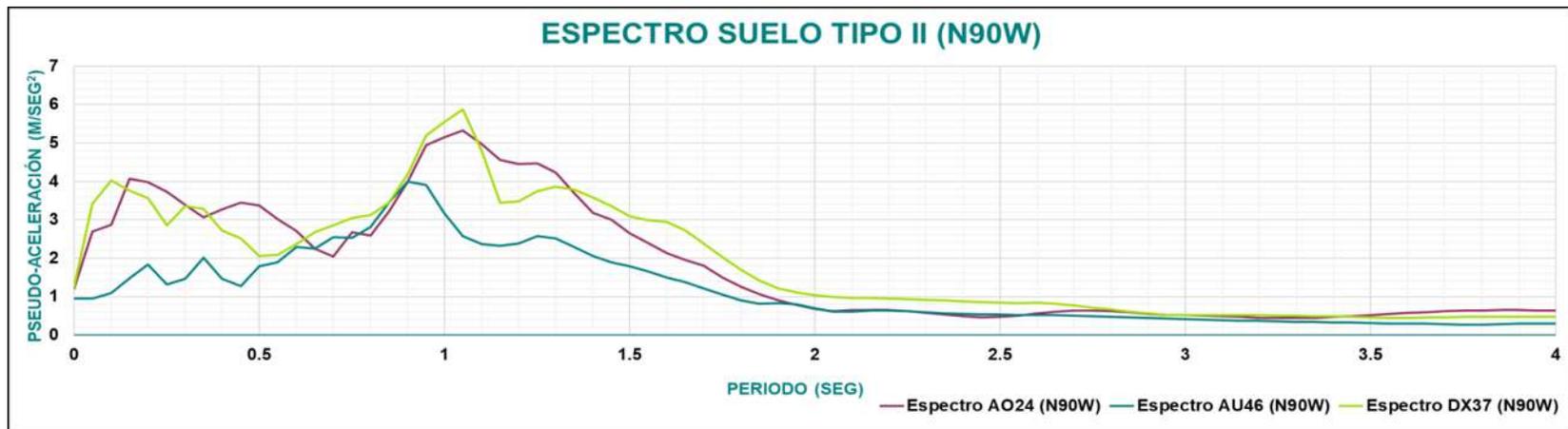


Figura 47 Espectros de respuesta en suelo tipo II correspondientes al sismo del 19 de septiembre de 2017 (Dirección N90W)

4.1.2 ZONA TIPO III a

Las **Figura 48** a **Figura 53** muestran tres acelerogramas correspondientes a suelo tipo III a. En cada una de las gráficas se observa las aceleraciones en las dos direcciones ortogonales de cada uno de estos registros.

A continuación, en las **Figura 54** y **Figura 55**, se muestran los espectros de respuesta para 5% de amortiguamiento, correspondientes a los acelerogramas en suelo tipo III a.

Se observa en ambas graficas que la mayor amplitud de los espectros se encuentra en el intervalo de 0.5-1.5 s. Esta zona es más cercana a los periodos fundamentales de los edificios más afectados.

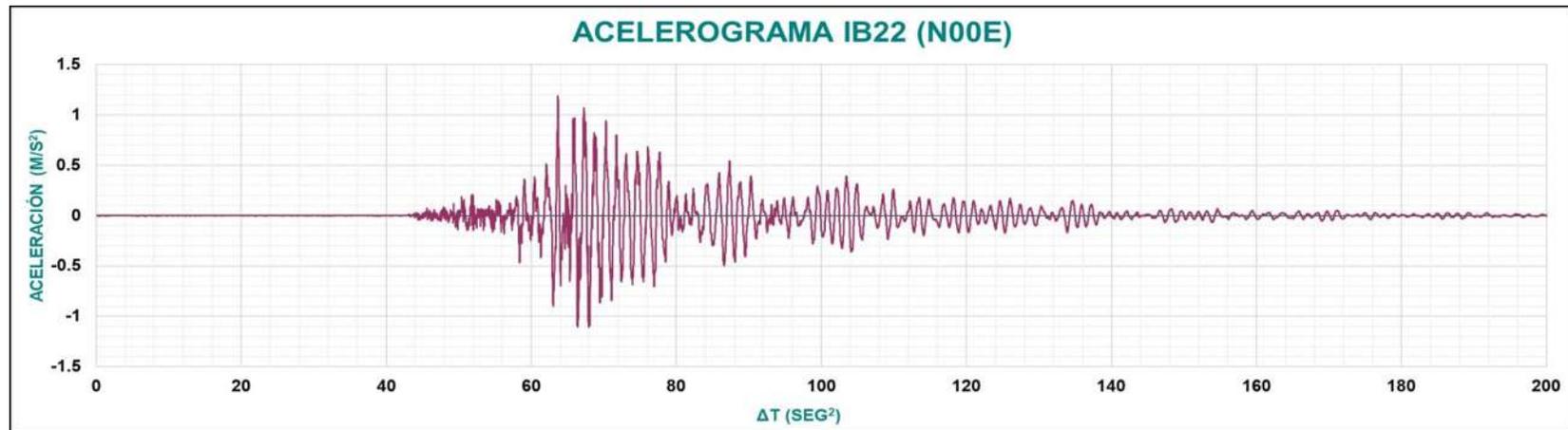


Figura 48 Registro de acelerograma IB22. Ubicación: Campestre, Coyoacán (Dirección N00E)

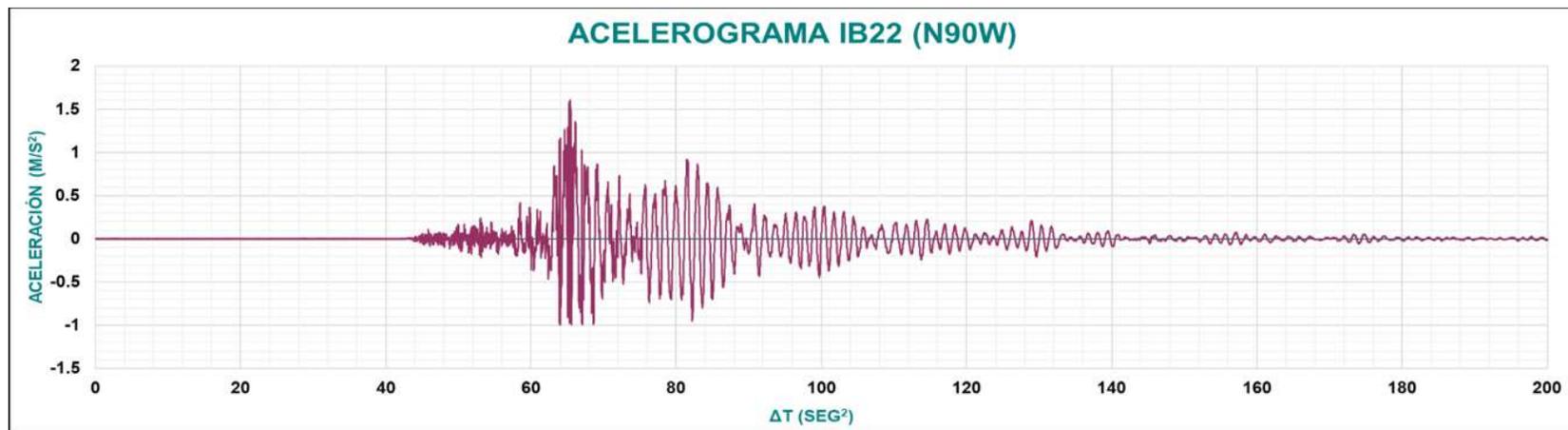


Figura 49 Registro de acelerograma IB22. Ubicación: Campestre, Coyoacán (Dirección N90W)

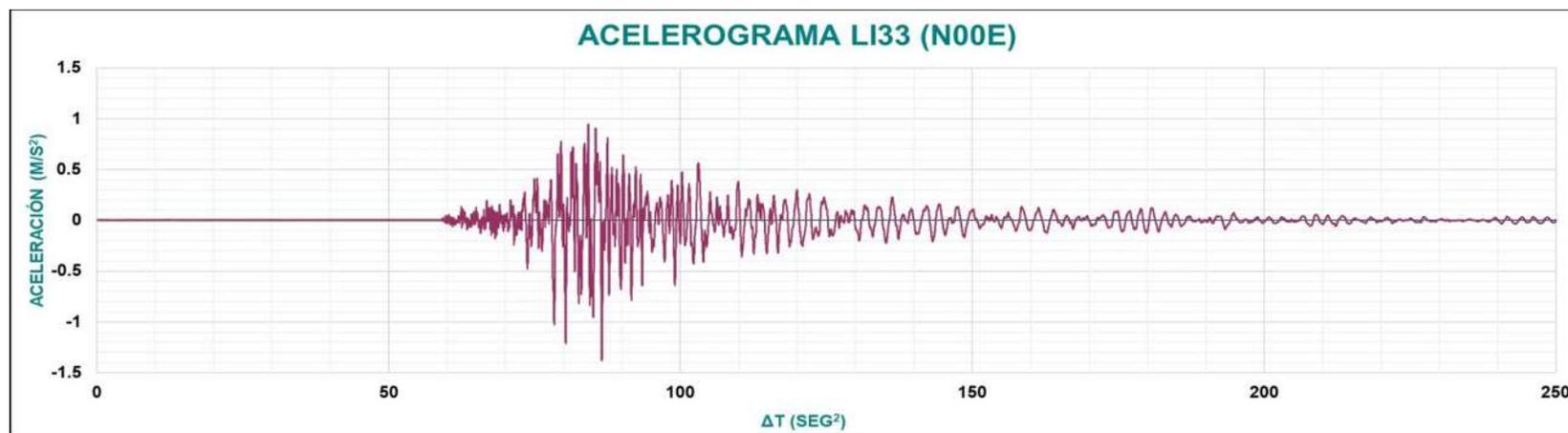


Figura 50 Registro de acelerograma LI33. Ubicación: Santa Catarina, Tláhuac (Dirección N00E)

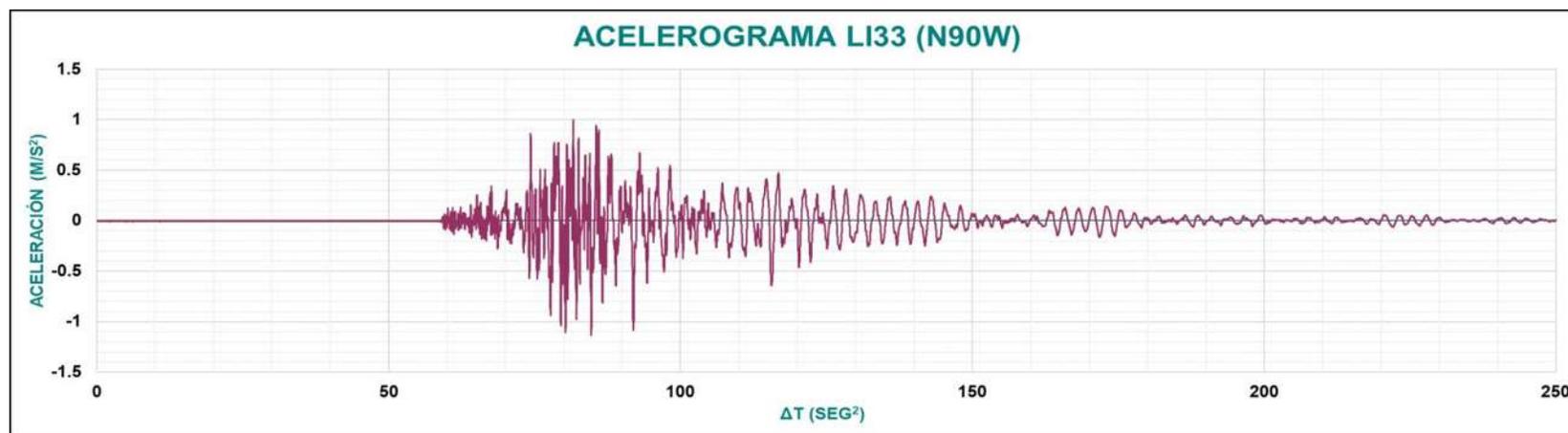


Figura 51 Registro de acelerograma LI33. Ubicación: Santa Catarina, Tláhuac (Dirección N90W)

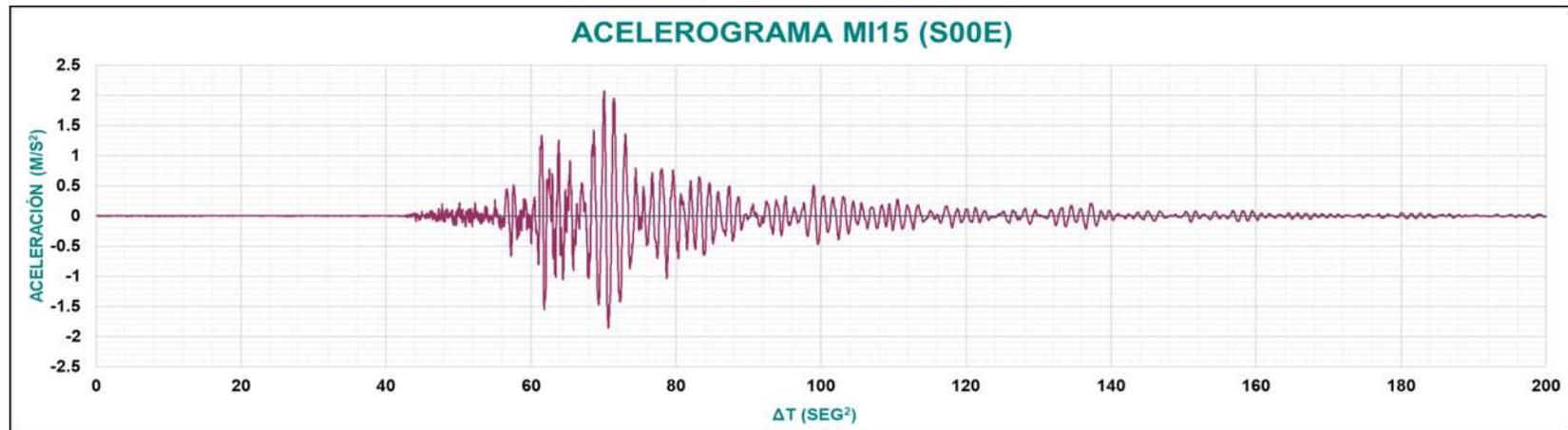


Figura 52 Registro de acelerograma MI15. Ubicación: San Bartolo Chico, Xochimilco (Dirección S00E)

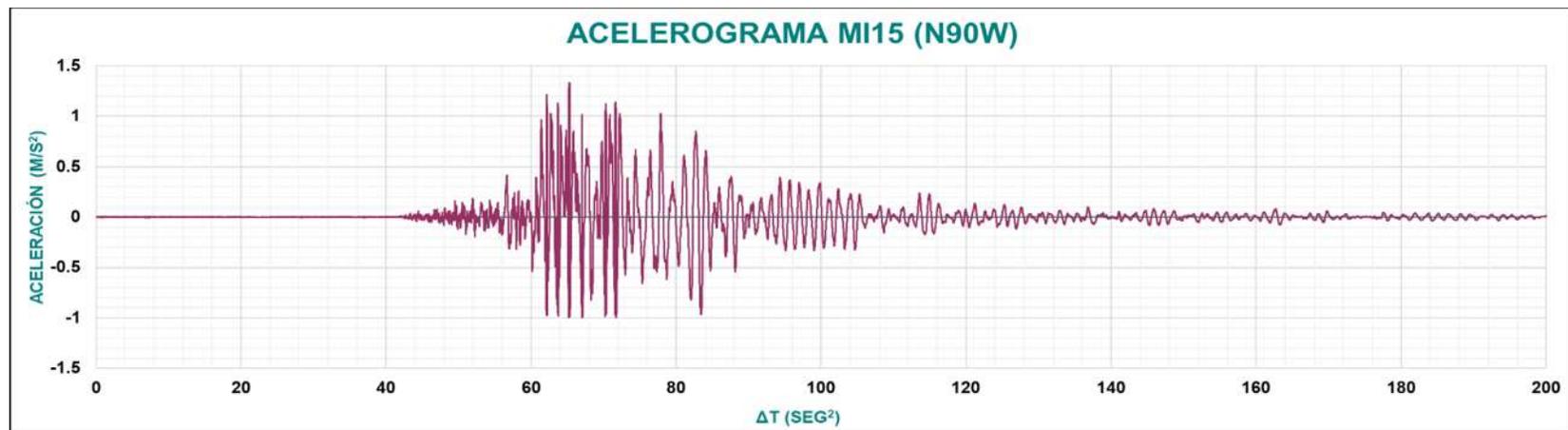


Figura 53 Registro de acelerograma MI15. Ubicación: San Bartolo Chico, Xochimilco (Dirección N90W)

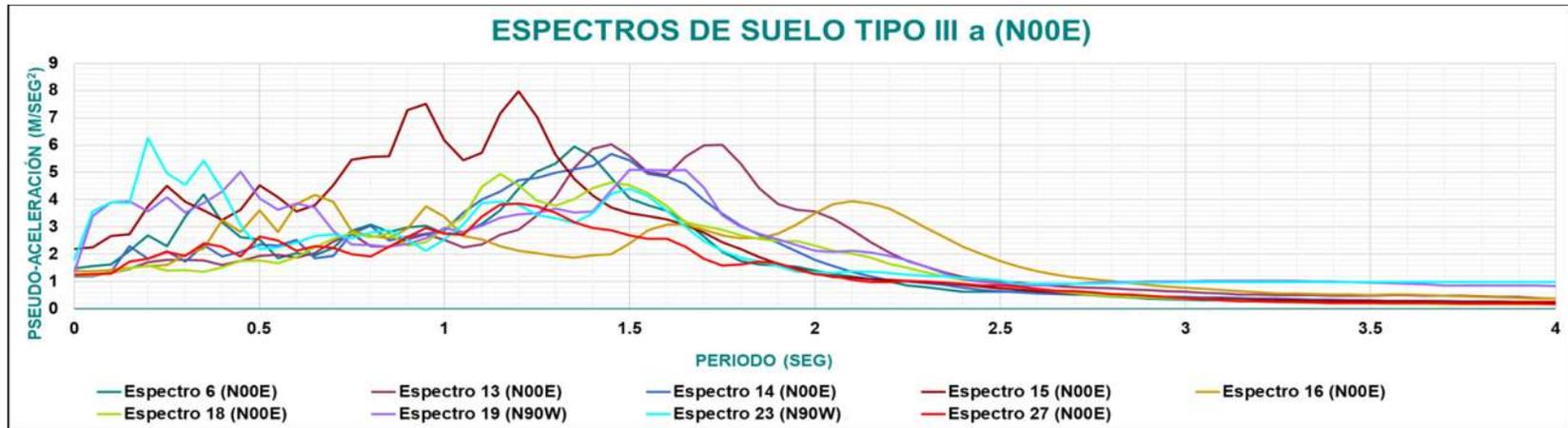


Figura 54 Espectros de respuesta en suelo tipo III a correspondientes al sismo del 19 de septiembre de 2017 (Dirección N00E)

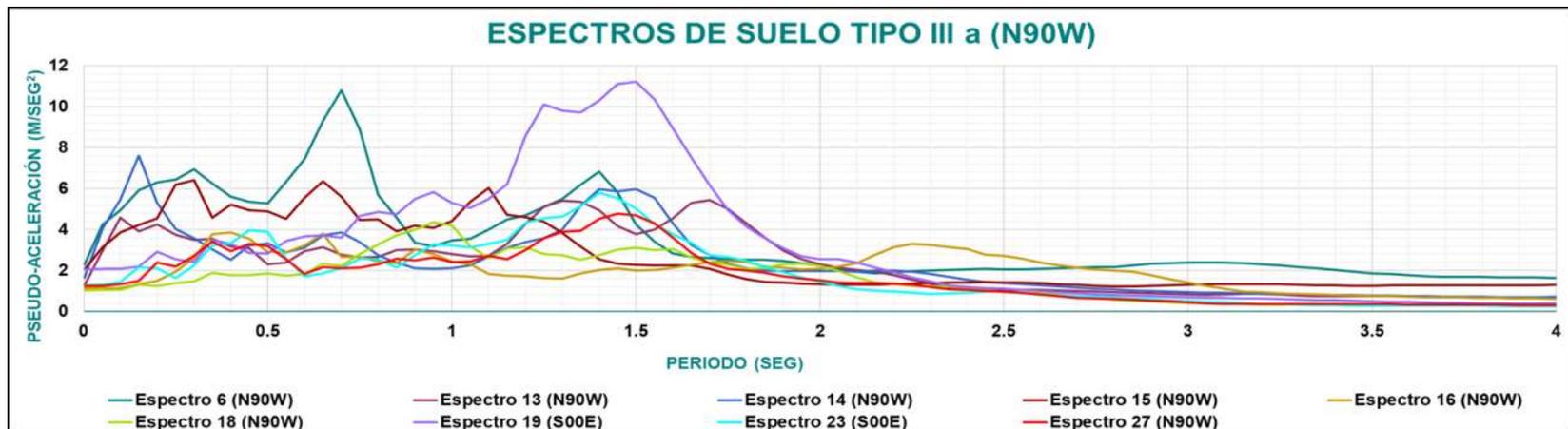


Figura 55 Espectros de respuesta en suelo tipo III a correspondientes al sismo del 19 de septiembre de 2017 (Dirección N90W)

4.1.3 ZONA TIPO III b

Las **Figura 56** a **Figura 61** muestran tres acelerogramas correspondientes a suelo tipo III b; cada figura corresponde a una de las direcciones horizontales de los registros.

Las **Figura 62** y **Figura 63** muestran los espectros de respuesta para 5% de amortiguamiento, correspondientes a los acelerogramas en suelo tipo III b. Se observa en los espectros de respuesta que en terreno tipo III b la mayor amplitud espectral se encuentra entre 1.5 y 2 s.

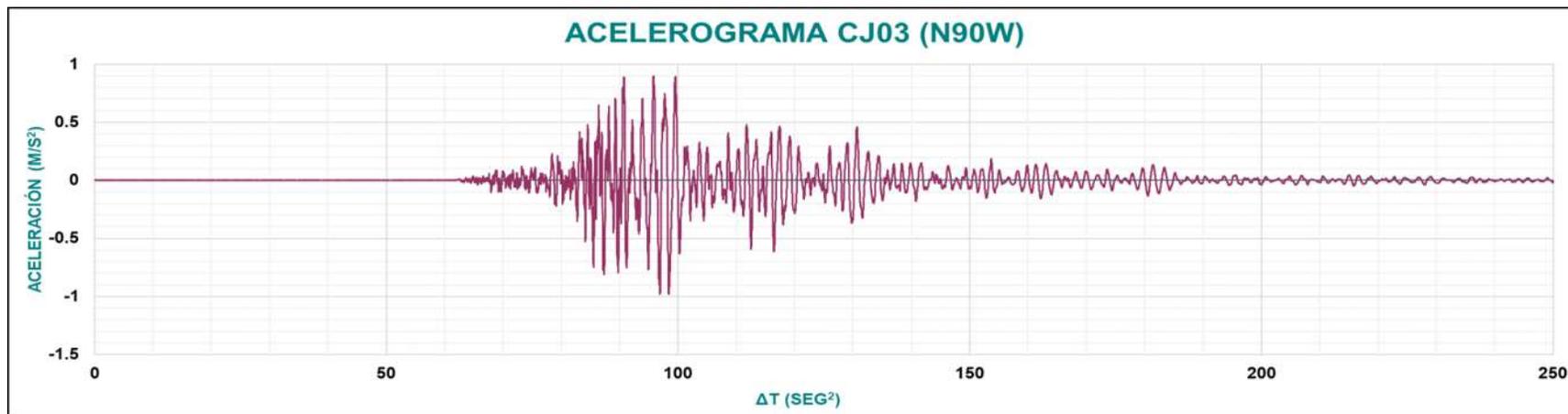


Figura 56 Registro de acelerograma CJ03. Ubicación: Roma, Cuauhtémoc (Dirección N00E)

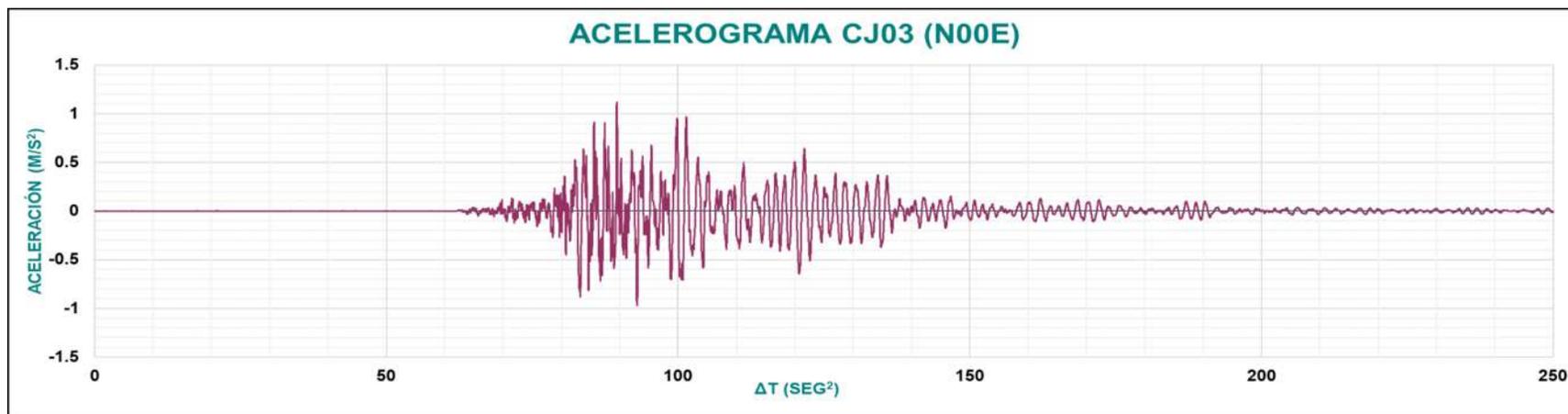


Figura 57 Registro de acelerograma CJ03. Ubicación: Roma, Cuauhtémoc (Dirección N90W)

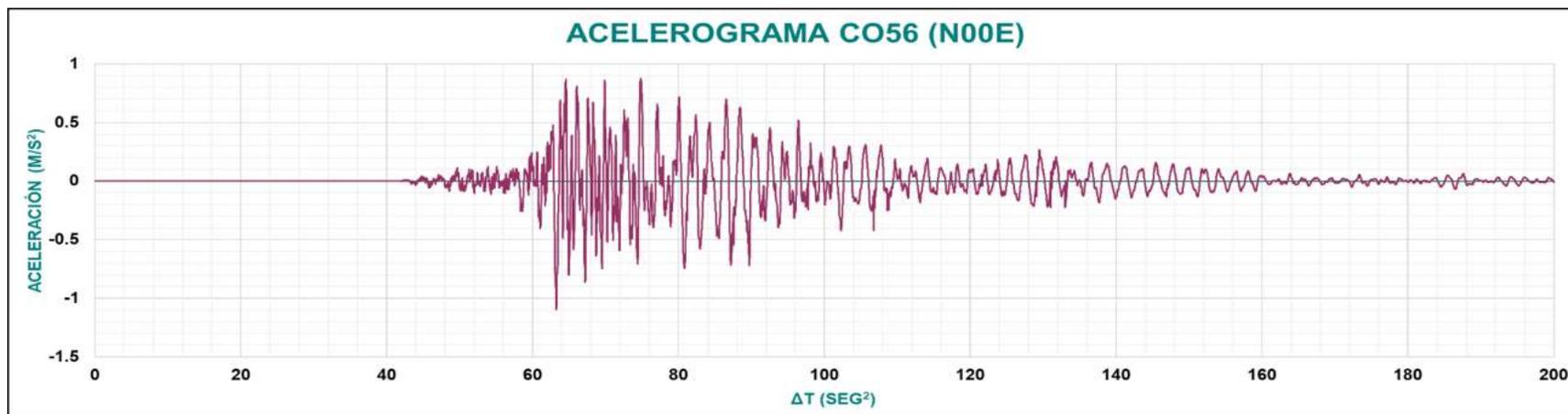


Figura 58 Registro de acelerograma CO56. Ubicación: Roma, Cuauhtémoc (Dirección N00E)

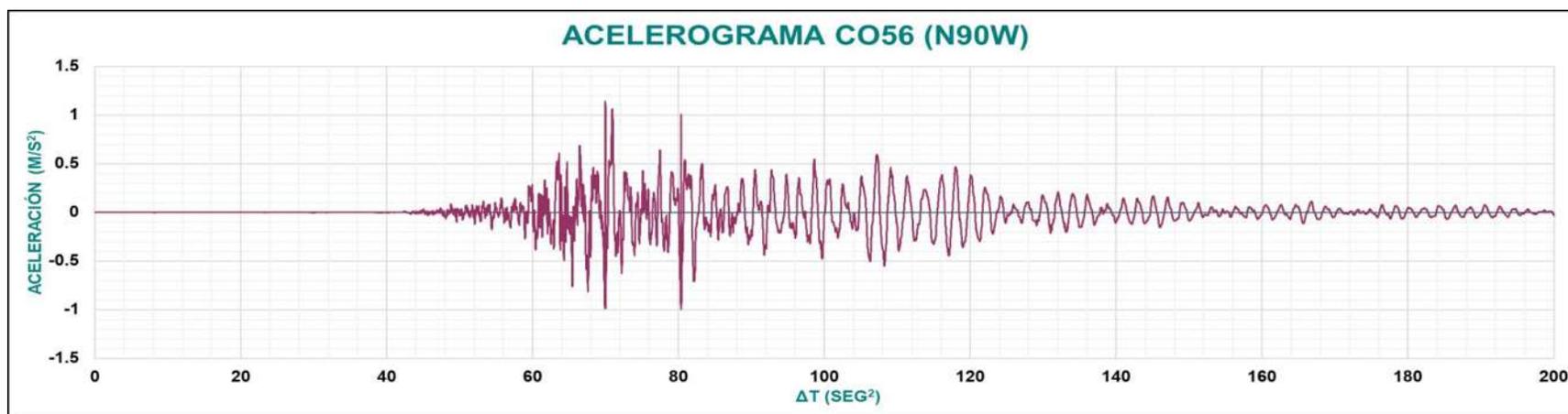


Figura 59 Registro de acelerograma CO56. Ubicación: Roma, Cuauhtémoc (Dirección N90W)

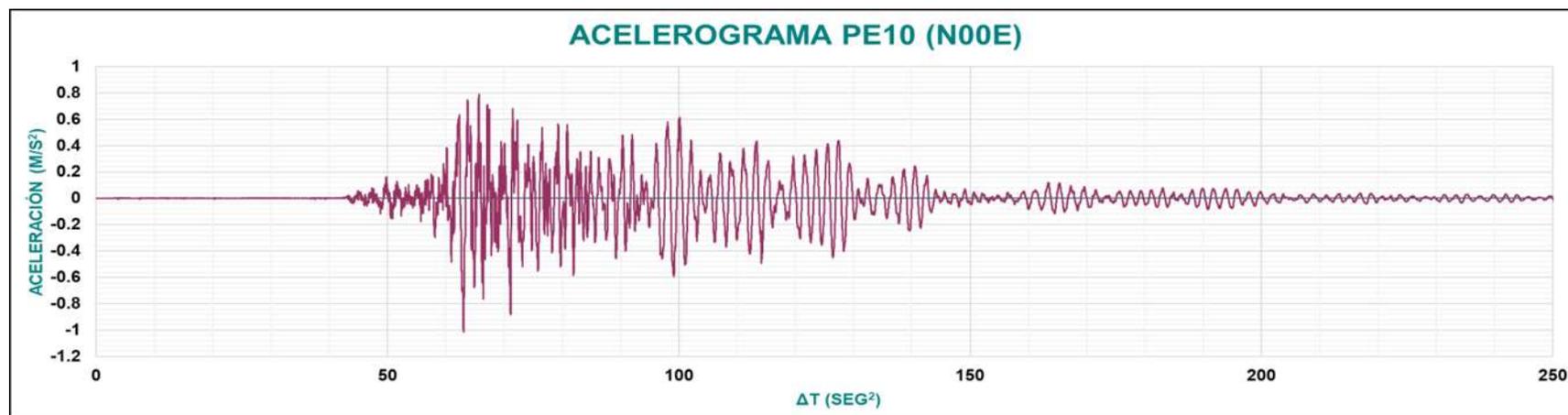


Figura 60 Registro de acelerograma PE10. Ubicación: Barrio San Pedro, Iztacalco (Dirección N00E)

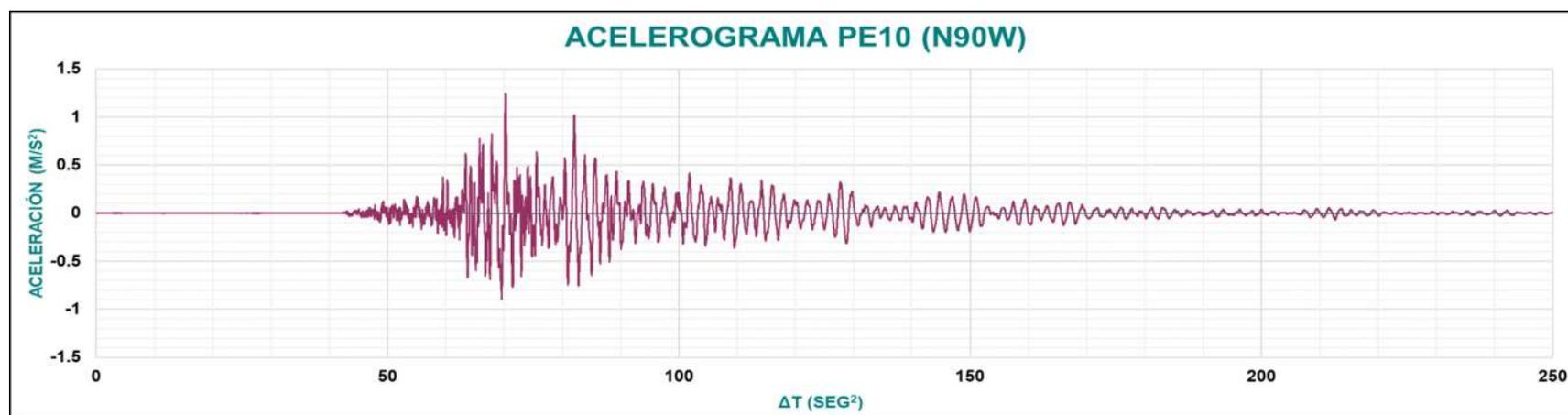


Figura 61 Registro de acelerograma PE10. Ubicación: Barrio San Pedro, Iztacalco (Dirección N90W)

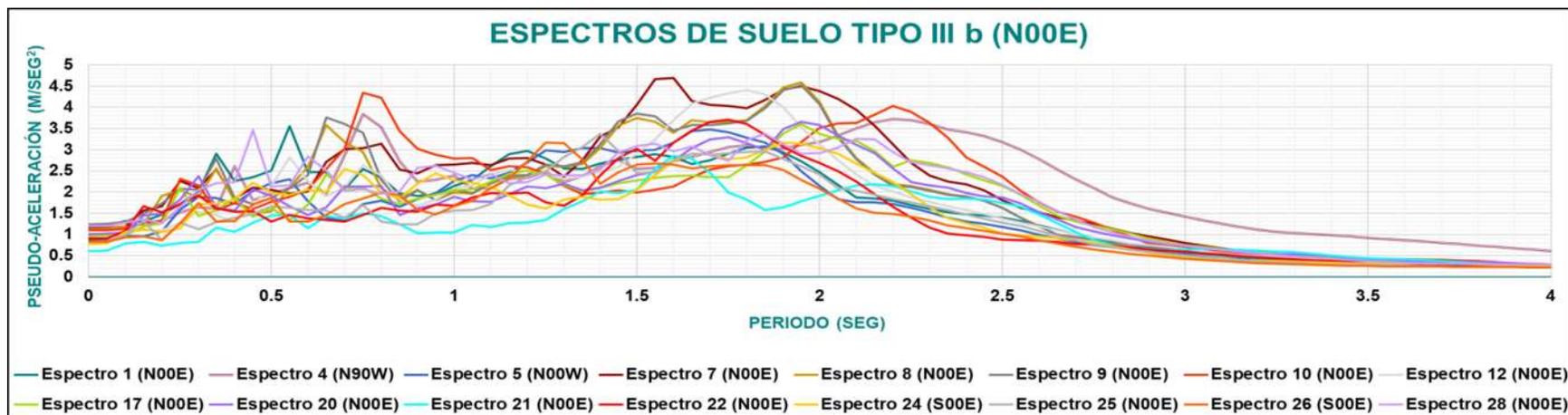


Figura 62 Espectros de respuesta en suelo tipo III b correspondientes al sismo del 19 de septiembre de 2017 (Dirección N00E)

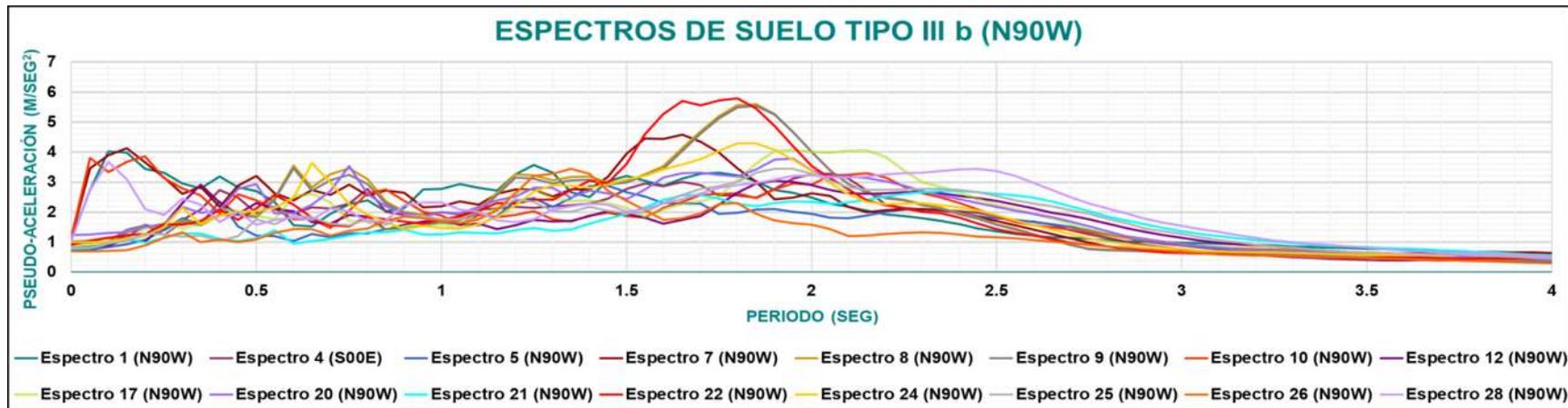


Figura 63 Espectros de respuesta en suelo tipo III b correspondientes al sismo del 19 de septiembre de 2017 (Dirección N90W)

CAPÍTULO V

MODELOS NUMÉRICOS DE LOS EDIFICIOS A ESTUDIAR

Los modelos numéricos para esta investigación fueron definidos de acuerdo con las estadísticas obtenidas en el capítulo 3. En virtud de que se modelan edificios localizados en esquina, se utilizan estas estadísticas previamente presentadas. Como resultado, se proponen cuatro sistemas estructurales para realizar análisis lineales y análisis no lineales.

Los análisis lineales de los sistemas estructurales se modelan con el programa SAP2000, mientras que los análisis no lineales se elaboraron con el programa PERFORM 3D.

5.1 CONFIGURACIÓN DE LOS MODELOS DE ESTUDIO

La CDMX es una de las ciudades de la República Mexicana con mayor número de habitantes y grandes avances en infraestructura. Basta con caminar por algunas calles de esta ciudad para darse cuenta de los avances que tienen en infraestructura. Es notable observar que la mayoría de sus edificaciones de varios pisos están formadas por un sistema estructural a base de marcos de concreto y muros de mampostería.

Mucha de la infraestructura de esta ciudad se vio enormemente afectada tras el terrible sismo del 19 de septiembre de 2017. De acuerdo con las visitas realizadas a las edificaciones, se estima que estas fueron construidas utilizando el reglamento de construcción del Distrito Federal de 1976. Este reglamento tiene diferencias importantes respecto al reglamento actual de la Ciudad de México, particularmente en lo relativo a la irregularidad de las estructuras.

Con base en los dictámenes analizados se concluyó que en su mayoría los edificios de esquina presentaban irregularidades de rigidez en planta. Los modelos a estudiar constan de tres crujías en una dirección y cuatro crujías en la otra. La distancia entre columnas es de 5 m (**Figura 64**).

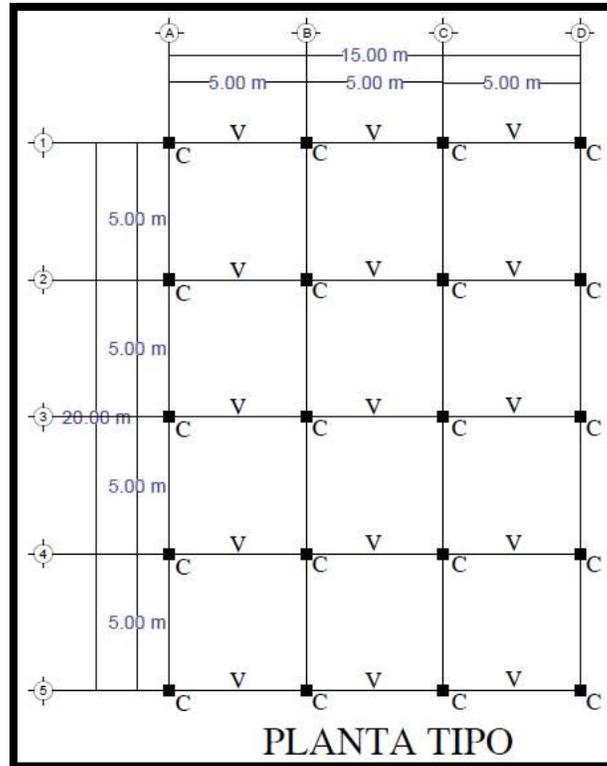


Figura 64 Croquis de planta tipo de los modelos de estudio

En las **Figura 33** y **Figura 35** se observa que los edificios de esquina presentaron daño alto y que la mayoría de ellos se encontraban edificados sobre suelo tipo III a, III b y II. La **Figura 36** muestra que los edificios en esquina dañados tenían entre 2 y 15 niveles, aunque la mayoría se encontraban en el intervalo de 2-9 niveles. Por ello, en este trabajo se modelan cuatro edificios de tres, cinco, seis y nueve niveles. Las **Figura 65** a **Figura 68**, muestran la configuración de los modelos numéricos en estudio. Todos presentan en su primer nivel una altura de 3 m, con alturas de entrepiso de 2.85 m desde el segundo nivel hasta azotea.

Como se mostró en la **Figura 37** en los edificios de esquina dañados, predomina el sistema estructural de marcos de concreto reforzado. Por ello, esta fue la estructuración seleccionada para crear los modelos de estudio. De acuerdo con las estadísticas se observó también que el sistema de piso más frecuente fue el de losas macizas (**Figura 38**). De acuerdo con el uso de los inmuebles (**Figura 39**), se decidió que los modelos de estudio sean oficinas.

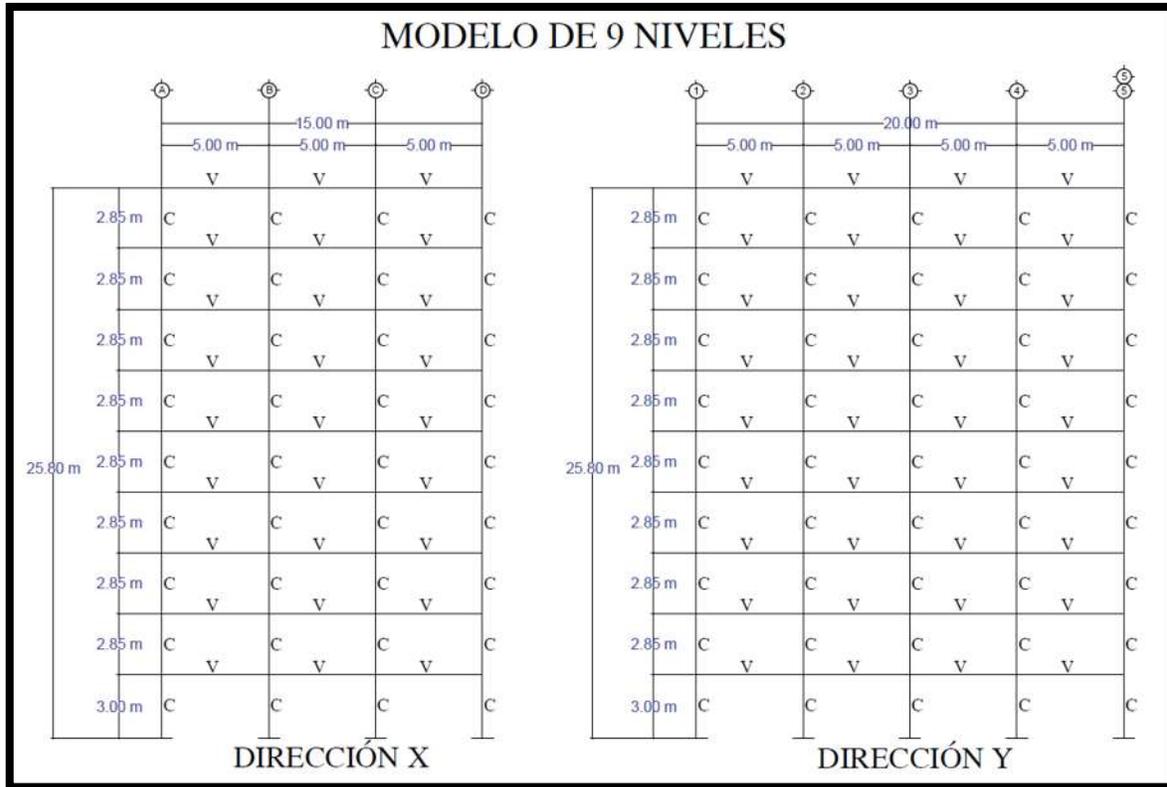


Figura 65 Configuración de las elevaciones en dirección X e Y para modelo de 9 niveles

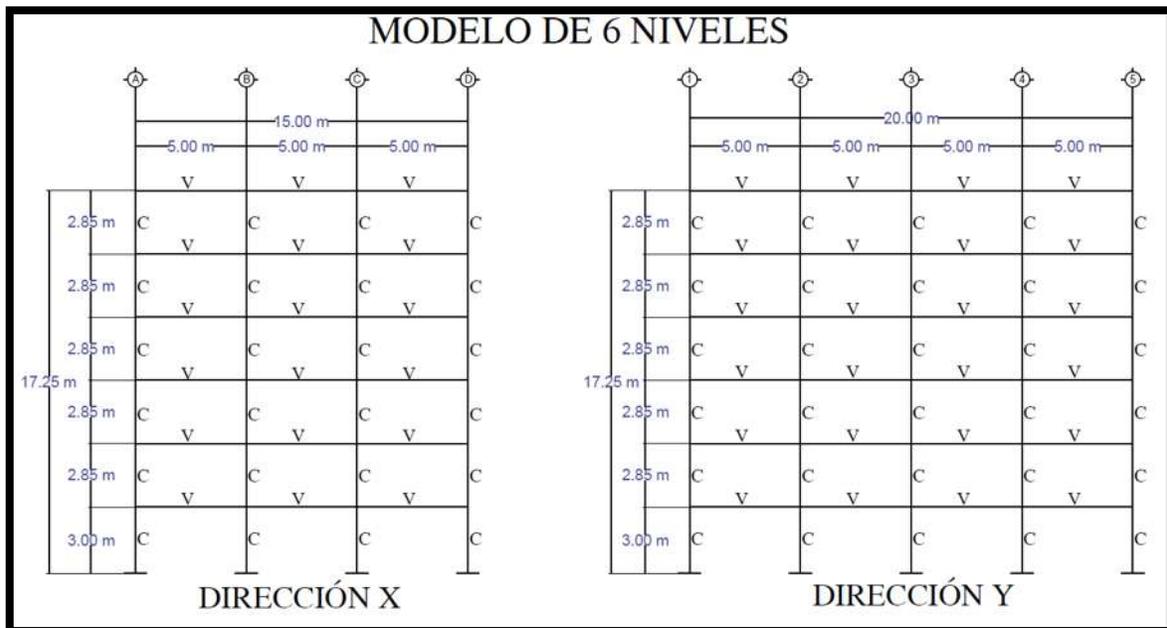


Figura 66 Configuración de las elevaciones en dirección X e Y para modelo de 6 niveles

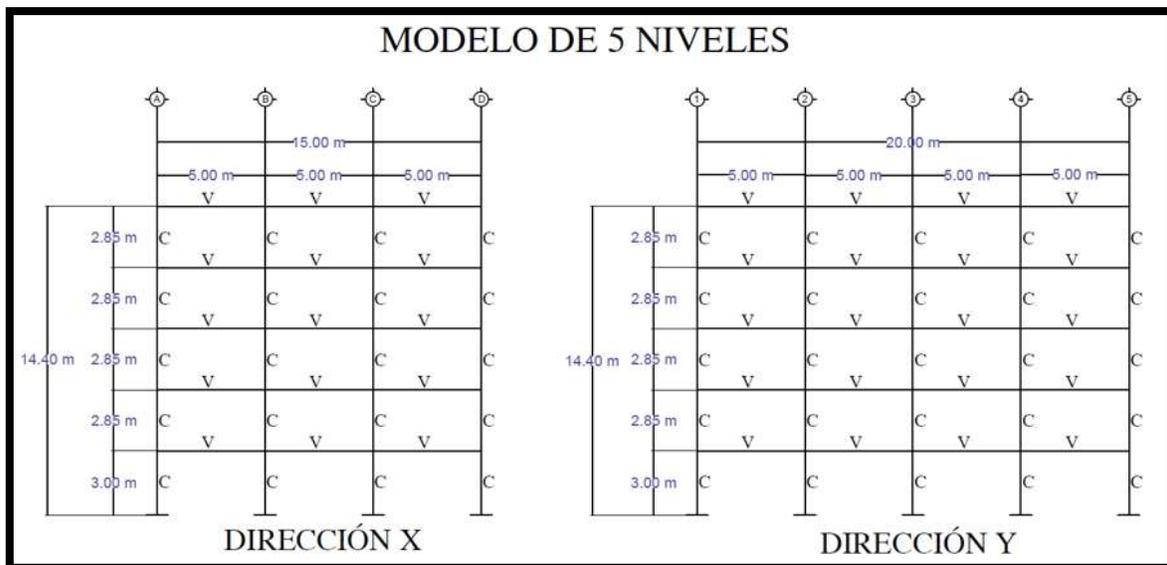


Figura 67 Configuración de las elevaciones en dirección X e Y para modelo de 5 niveles

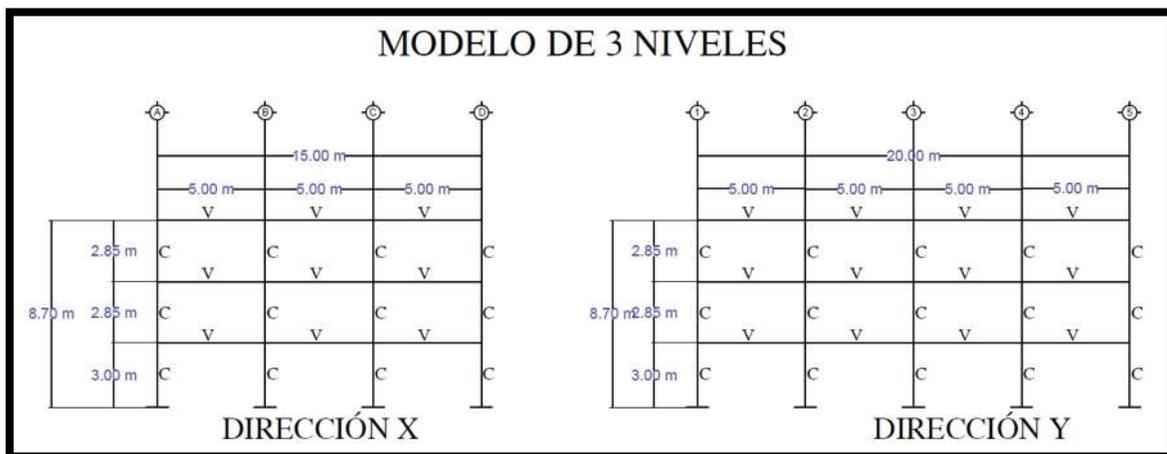


Figura 68 Configuración de las elevaciones en dirección X e Y para modelo de 3 niveles

5.2 DISEÑO Y CARACTERÍSTICAS DE LOS ELEMENTOS

En virtud de que la mayoría de los edificios colapsados fueron construidos antes de la década de los 80's, se decidió emplear para el diseño de los modelos numéricos el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal vigente en 1976. La filosofía de diseño del reglamento es la basada en fuerzas y la ciudad de México estaba dividida desde el punto de vista geotécnicos en zonas I (terreno duro) II (terreno de transición) y III (terreno blando).

5.2.1 MATERIALES EMPLEADOS

Para crear los modelos numéricos de los edificios se consideraron tres materiales: concreto, acero y mampostería. De acuerdo con el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal de 1976 (INSTITUTO DE INGENIERIA DE LA UNAM, 2019), el módulo de Young del concreto y del acero se calcula con las **Ecuación 23** y **Ecuación 24**.

$$E_c = 10000 \sqrt{f'_c} \quad \text{Ecuación 21}$$

$$E_s = 2 \times 10^6 \quad \text{Ecuación 22}$$

El f'_c es la resistencia a compresión del concreto a los 28 días en kg/cm^2 . Ambos módulos de elasticidad resultan en unidades de kg/cm^2 . El acero que fue considerado fue ASTM A42. Las propiedades de los materiales en las unidades del modelo numérico (t-m) se muestran en la **Tabla 9**.

Tabla 9 Propiedades de los materiales empleados

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES				
Materiales	f'_c (T/m ²)	F_y (T/m ²)	E (T/m ²)	ν
Concreto	2500.0	No aplica	18.26	0.2
Acero (A42)	No aplica	42000	18.32	0.3
Mampostería	No aplica	No aplica	18.174	0.25

Donde:

$f'c$ Resistencia del concreto a la compresión.

Fy Resistencia a la tensión del acero.

E También llamado Módulo de Young, es la relación entre esfuerzo y la deformación unitaria de un material cuando está sometido a acciones de tensión o compresión.

ν Coeficiente de Poisson, es la relación entre la deformación transversal y longitudinal de un material.

5.2.2 ESPECTRO DE DISEÑO

De acuerdo con el artículo 232 del Reglamento de Construcciones de 1976, las oficinas se catalogan dentro del grupo B. El artículo 234 señala que el coeficiente sísmico (c) para estructuras del grupo B en suelo tipo III es de 0.24.

El factor Q , de acuerdo con la tabla del artículo 235 puede variar desde 1 hasta 6. Aunque en muchos casos se utilizaba $Q=4$ para el diseño de edificios con marcos de concreto de esa época, se decidió emplear $Q=2$ en este estudio considerando, conservadoramente, la irregularidad que origina los muros en dos ejes perimetrales.

Tabla 10 Parámetros para el espectro de diseño en zona III

PARÁMETROS PARA ESPECTRO DE DISEÑO					
Zona	a_o	c	T_1	T_2	r
III	0.06	0.24	0.8	3.3	1

El espectro de diseño se construye con los parámetros mostrados en la **Tabla 10**, utilizando las **Ecuación 25** a **Ecuación 27**. La **Ecuación 25** se aplica para T menor que T_1 . La **Ecuación 26** se aplica para T entre T_1 y T_2 ; finalmente la **Ecuación 27** se aplica para T mayor que T_2 .

$$a = a_o + (c - a_o) * \frac{T}{T_1}$$

Ecuación 23

$$a = c \quad \text{Ecuación 24}$$

$$a = c * \left(\frac{T_2}{T}\right)^r \quad \text{Ecuación 25}$$

Las variables de las **Ecuación 25** a **Ecuación 27** se definen como:

- a** Ordenada espectral como fracción de la aceleración de la gravedad.
- a_o** Valor de a para T = 0 (aceleración máxima del terreno).
- c** Coeficiente sísmico adimensional (meseta del espectro).
- T** Periodo natural.
- T1, T2** Periodos característicos de los espectros de diseño en segundos.
- r** Exponente en las expresiones de los espectros de diseño para dibujar la curva descendente posterior al periodo T2.

De acuerdo con las ecuaciones anteriores, se determinó el espectro de diseño para una zona III mostrado en la **Figura 69** con línea de color púrpura. El espectro representado en línea verde es el espectro reducido por el factor Q de ductilidad.

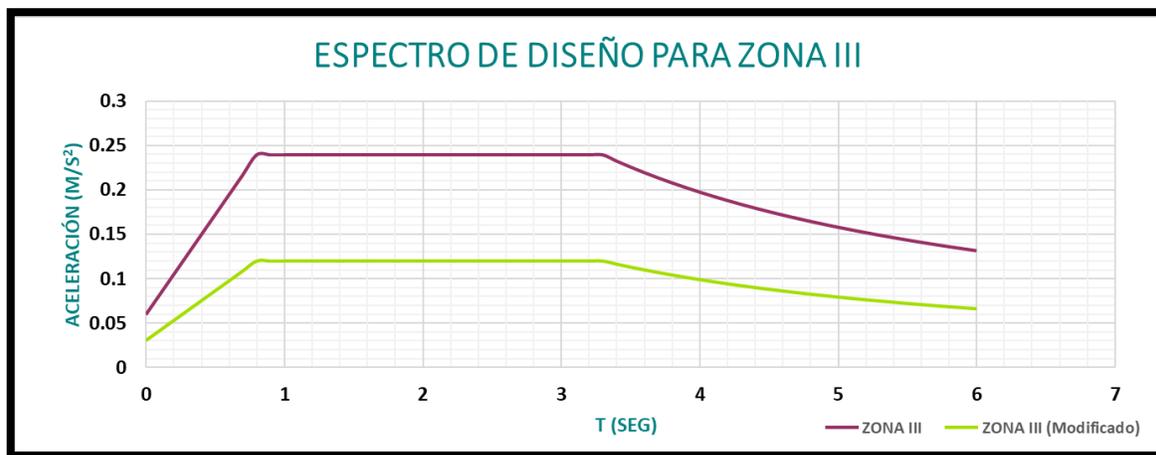


Figura 69 Espectro de diseño y espectro de diseño modificado o reducido de acuerdo con el reglamento de construcción de 1976

Las cargas vivas y muertas especificadas en el reglamento se muestran en las **Tabla 11 Cargas vivas consideradas para oficinas según el reglamento de 1976** **Tabla 11** a **Tabla 13**.

Tabla 11 Cargas vivas consideradas para oficinas según el reglamento de 1976

CARGA VIVA (kg/m²)			
DESTINO DE PISO O CUBIERTA	Servicio (W)	Sismo (Wa)	Maxima (Wm)
Oficinas, despachos y laboratorios	70	90	145.3269529
Azotea con pendiente no mayor de 5%	15	70	100

Tabla 12 Cargas muertas para losa de azotea consideradas

CARGA MUERTA EN LOSA DE AZOTEA, COMPLEJO DE OFICINAS				
LOSA MACIZA	MATERIAL	ESPESOR (m)	PESO VOL (Kg/m³)	SUBTOTAL Kg/m²
AZOTEA	Plafon e instaciones	-	-	40
	Relleno	0.1	1600	160
	Entortado	0.03	2200	66
	Enladrillado	-	-	25
	Impermeabilizante	-	-	5
	Carga adicional mortero	-	-	20
	Carga adicional concreto	-	-	20
	TOTAL ADICIONAL (Kg/m²)			336

Tabla 13 Cargas muertas para losas de entrepisos consideradas

CARGA MUERTA EN LOSA DE ENTREPISO, COMPLEJO DE OFICINAS				
LOSA MACIZA	MATERIAL	ESPESOR (m)	PESO VOL (Kg/m³)	SUBTOTAL Kg/m²
ENTREPISO	Plafon e instaciones	-	-	40
	Terrazo			50
	Morte (pega piso)	0.02	2100	42
	Carga adicional mortero	-	20	20
	Carga adicional concreto	-	20	20
	TOTAL ADICIONAL (Kg/m²)			172

5.2.4 COLUMNAS Y VIGAS

El diseño de las vigas y columnas de concreto reforzado, fue realizado considerando el Reglamento de Construcciones de 1976. Para el diseño de las vigas se consideraron las acciones de carga uniformemente (repartida sobre ellas) y de carga sísmica.

La resistencia del concreto considerada para las vigas y columnas es de $f'c=250$ kg/cm² y el límite de fluencia considerado para el refuerzo fue de $f_y=4,200$ kg/cm². El factor de carga empleado fue de 1.4 para condiciones de carga permanente, de acuerdo con el artículo 220 del Reglamento y para la combinación con carga sísmica el factor de carga fue de 1.1.

En las **Tabla 14** a **Tabla 18**, se muestran los diseños finales de las vigas y columnas por niveles de cada uno de los modelos numéricos de estudio.

Tabla 14 Diseño de vigas para modelos estructurales

DISEÑO DE VIGAS PARA TODOS LOS MODELOS			
Elemento	Alto (m)	Ancho (m)	Largo (m)
Vigas	0.45	0.2	5

Tabla 15 Diseño de columnas de esquina, centrales y de borde para el modelo de tres niveles

DISEÑO DE COLUMNAS PARA EDIFICIO DE 3 NIVELES				
Nivel\Columna	Propiedades	CC-01	CC-02	CC-03
		C ESQUINA	C PUNTALES	C CENTRO
1	SECCIÓN	40x40	40x40	40x40
	ÁREA CÁLCULO	23.00 cm ²	16.50 cm ²	20.10 cm ²
	ARMADO	12#5	8#5	4#6+4#5
	ÁREA REAL	23.75 cm ²	15.83 cm ²	19.32 cm ²
		$\rho = 1.48 \%$	$\rho = 0.99 \%$	$\rho = 1.21 \%$
2	SECCIÓN	35x35	35x35	35x35
	ÁREA CÁLCULO	10.65 cm ²	10.37 cm ²	11.00 cm ²
	ARMADO	8#5	8#5	8#5
	ÁREA REAL	15.83 cm ²	15.83 cm ²	15.83 cm ²
		$\rho = 1.29 \%$	$\rho = 1.29 \%$	$\rho = 1.29 \%$
3	SECCIÓN	35x35	35x35	35x35
	ÁREA CÁLCULO	8.46 cm ²	8.42 cm ²	9.30 cm ²
	ARMADO	8#5	8#5	8#5
	ÁREA REAL	15.83 cm ²	15.83 cm ²	15.83 cm ²
		$\rho = 1.29 \%$	$\rho = 1.29 \%$	$\rho = 1.29 \%$

Tabla 16 Diseño de columnas de esquina, centrales y de borde para el modelo de cinco niveles

DISEÑO DE COLUMNAS PARA EDIFICIO DE 5 NIVELES				
Nivel\Columna	Propiedades	CC-01	CC-02	CC-03
		C ESQUINA	C PUNTALES	C CENTRO
1	SECCIÓN	50x50	50x50	50x50
	ÁREA CÁLCULO	40.00 cm ²	35.80 cm ²	32.30 cm ²
	ARMADO	4#8+12#5	4#6+12#5	16#5
	ÁREA REAL	44.02 cm ²	35.15 cm ²	31.67 cm ²
		$\rho = 1.76 \%$	$\rho = 1.41 \%$	$\rho = 1.27 \%$
2	SECCIÓN	50x50	50x50	50x50
	ÁREA CÁLCULO	19.57 cm ²	19.57 cm ²	19.57 cm ²
	ARMADO	12#5	12#5	12#5
	ÁREA REAL	23.75 cm ²	23.75 cm ²	23.75 cm ²
		$\rho = 0.95 \%$	$\rho = 0.95 \%$	$\rho = 0.95 \%$
3	SECCIÓN	50x50	50x50	50x50
	ÁREA CÁLCULO	17.60 cm ²	17.60 cm ²	17.60 cm ²
	ARMADO	12#5	12#5	12#5
	ÁREA REAL	23.75 cm ²	23.75 cm ²	23.75 cm ²
		$\rho = 0.95 \%$	$\rho = 0.95 \%$	$\rho = 0.95 \%$
4	SECCIÓN	45x45	45x45	45x45
	ÁREA CÁLCULO	15.40 cm ²	15.40 cm ²	15.40 cm ²
	ARMADO	8#5	8#5	8#5
	ÁREA REAL	15.83 cm ²	15.83 cm ²	15.83 cm ²
		$\rho = 0.78 \%$	$\rho = 0.78 \%$	$\rho = 0.78 \%$
5	SECCIÓN	45x45	45x45	45x45
	ÁREA CÁLCULO	8.80 cm ²	8.80 cm ²	8.80 cm ²
	ARMADO	8#5	8#5	8#5
	ÁREA REAL	15.83 cm ²	15.83 cm ²	15.83 cm ²
		$\rho = 0.78 \%$	$\rho = 0.78 \%$	$\rho = 0.78 \%$

Tabla 17 Diseño de columnas de esquina, centrales y de borde para el modelo de seis niveles

DISEÑO DE COLUMNAS PARA EDIFICIO DE 6 NIVELES				
Nivel\Columna	Propiedades	CC-01	CC-02	CC-03
		C ESQUINA	C PUNTALES	C CENTRO
1	SECCIÓN	50x50	50x50	50x50
	ÁREA CÁLCULO	45.58 cm ²	39.50 cm ²	35.80 cm ²
	ARMADO	16#6	8#6+8#5	4#6+12#5
	ÁREA REAL	45.60 cm ²	38.64 cm ²	35.15 cm ²
		$\rho = 1.82 \%$	$\rho = 1.55 \%$	$\rho = 1.41 \%$
2	SECCIÓN	50x50	50x50	50x50
	ÁREA CÁLCULO	28.40 cm ²	21.30 cm ²	19.95 cm ²
	ARMADO	8#6+8#5	12#5	12#5
	ÁREA REAL	38.64 cm ²	23.75 cm ²	23.75 cm ²
		$\rho = 1.55 \%$	$\rho = 0.95 \%$	$\rho = 0.95 \%$
3	SECCIÓN	50x50	50x50	50x50
	ÁREA CÁLCULO	22.50 cm ²	20.40 cm ²	19.00 cm ²
	ARMADO	12#5	12#5	12#5
	ÁREA REAL	23.75 cm ²	23.75 cm ²	23.75 cm ²
		$\rho = 0.95 \%$	$\rho = 0.95 \%$	$\rho = 0.95 \%$
4	SECCIÓN	45x45	45x45	45x45
	ÁREA CÁLCULO	23.78 cm ²	17.50 cm ²	16.40 cm ²
	ARMADO	12#5	12#5	12#5
	ÁREA REAL	23.75 cm ²	23.75 cm ²	23.75 cm ²
		$\rho = 1.17 \%$	$\rho = 1.17 \%$	$\rho = 1.17 \%$
5	SECCIÓN	45x45	45x45	45x45
	ÁREA CÁLCULO	17.50 cm ²	15.70 cm ²	14.30 cm ²
	ARMADO	12#5	8#5	8#5
	ÁREA REAL	23.75 cm ²	15.83 cm ²	15.83 cm ²
		$\rho = 1.17 \%$	$\rho = 0.78 \%$	$\rho = 0.78 \%$
6	SECCIÓN	45x45	45x45	45x45
	ÁREA CÁLCULO	14.50 cm ²	11.50 cm ²	9.14 cm ²
	ARMADO	8#5	8#5	8#5
	ÁREA REAL	15.83 cm ²	15.83 cm ²	15.83 cm ²
		$\rho = 0.78 \%$	$\rho = 0.78 \%$	$\rho = 0.78 \%$

Tabla 18 Diseño de columnas de esquina, centrales y de borde para el modelo de nueve niveles

DISEÑO DE COLUMNAS PARA EDIFICIO DE 9 NIVELES				
Nivel\Columna	Propiedades	CC-01	CC-02	CC-03
		C ESQUINA	C PUNTALES	C CENTRO
1	SECCIÓN	60x60	60x60	60x60
	ÁREA CÁLCULO	84.00 cm ²	75.00 cm ²	64.20 cm ²
	ARMADO	16#8	16#8	8#8+8#6
	ÁREA REAL	81.07 cm ²	81.07 cm ²	63.34 cm ²
		$\rho = 2.25 \%$	$\rho = 2.25 \%$	$\rho = 1.76 \%$
2	SECCIÓN	60x60	60x60	60x60
	ÁREA CÁLCULO	47.30 cm ²	41.60 cm ²	32.20 cm ²
	ARMADO	8#8+8#6	8#8+8#6	12#6
	ÁREA REAL	63.34 cm ²	63.34 cm ²	34.20 cm ²
		$\rho = 1.76 \%$	$\rho = 1.76 \%$	$\rho = 0.95 \%$
3	SECCIÓN	60x60	60x60	60x60
	ÁREA CÁLCULO	32.10 cm ²	30.50 cm ²	28.50 cm ²
	ARMADO	12#6	12#6	6#5+6#6
	ÁREA REAL	34.20 cm ²	34.20 cm ²	28.98 cm ²
		$\rho = 0.95 \%$	$\rho = 0.95 \%$	$\rho = 0.80 \%$
4	SECCIÓN	60x60	60x60	60x60
	ÁREA CÁLCULO	31.60 cm ²	28.80 cm ²	25.70 cm ²
	ARMADO	12#6	6#5+6#6	6#5+6#6
	ÁREA REAL	34.20 cm ²	28.98 cm ²	28.98 cm ²
		$\rho = 0.95 \%$	$\rho = 0.80 \%$	$\rho = 0.80 \%$
5	SECCIÓN	60x60	60x60	60x60
	ÁREA CÁLCULO	31.40 cm ²	27.20 cm ²	25.00 cm ²
	ARMADO	12#6	6#5+6#6	6#5+6#6
	ÁREA REAL	34.20 cm ²	28.98 cm ²	28.98 cm ²
		$\rho = 0.95 \%$	$\rho = 0.80 \%$	$\rho = 0.80 \%$
6	SECCIÓN	55x55	55x55	55x55
	ÁREA CÁLCULO	27.50 cm ²	24.70 cm ²	21.10 cm ²
	ARMADO	6#5+6#6	12#5	12#5
	ÁREA REAL	28.98 cm ²	23.75 cm ²	23.75 cm ²
		$\rho = 0.96 \%$	$\rho = 0.79 \%$	$\rho = 0.79 \%$
7	SECCIÓN	55x55	55x55	55x55
	ÁREA CÁLCULO	26.00 cm ²	22.60 cm ²	18.50 cm ²
	ARMADO	6#5+6#6	12#5	12#5
	ÁREA REAL	28.98 cm ²	23.75 cm ²	23.75 cm ²
		$\rho = 0.96 \%$	$\rho = 0.79 \%$	$\rho = 0.79 \%$
8	SECCIÓN	55x55	55x55	55x55
	ÁREA CÁLCULO	23.40 cm ²	21.30 cm ²	16.40 cm ²
	ARMADO	12#5	12#5	12#5
	ÁREA REAL	23.75 cm ²	23.75 cm ²	23.75 cm ²
		$\rho = 0.79 \%$	$\rho = 0.79 \%$	$\rho = 0.79 \%$
9	SECCIÓN	55x55	55x55	55x55
	ÁREA CÁLCULO	18.50 cm ²	14.00 cm ²	7.00 cm ²
	ARMADO	12#5	12#5	12#5
	ÁREA REAL	23.75 cm ²	23.75 cm ²	23.75 cm ²
		$\rho = 0.79 \%$	$\rho = 0.79 \%$	$\rho = 0.79 \%$

5.2.5 PUNTALES EQUIVALENTES

En la **Figura 34** se observa que más del 90% de las edificaciones de esquina presentaban muros de mampostería en los marcos colindantes con las edificaciones vecinas. Los muros estaban colocados desde el primero hasta el último nivel de la edificación, proporcionando una importante rigidez a los marcos y excentricidad entre el centro de masas y el centro de rigideces. Este cambio de rigidez se manifestó como giros alrededor del eje vertical, producidos en las edificaciones.

Para fines del análisis de esta investigación y de acuerdo con el reglamento FEMA 356, los muros de relleno pueden ser sustituidos por puntales equivalentes que aportan a los marcos la rigidez proporcionada por los muros de relleno. Para calcular el ancho de estos puntales equivalentes, el FEMA 356 presenta dos ecuaciones que dependen de las características de los elementos que forman el marco y el muro de relleno (**Ecuación 28** y **Ecuación 29**). En la **Figura 71** se observa con mayor claridad la consideración de las variables de las ecuaciones.

$$a = 0.175(\lambda_1 h_{col})^{-0.4} r_{inf} \quad \text{Ecuación 26}$$

$$\lambda_1 = \left[\frac{E_{me} t_{inf} \sin 2\theta}{4 E_{fe} I_{col} h_{inf}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad \text{Ecuación 27}$$

Las variables mostradas en las **Ecuación 28** y **Ecuación 29**, de acuerdo con el FEMA 356 se definen como:

- a** Ancho equivalente de los puntales en metros.
- h_{col}** Altura de columna entre líneas centrales de vigas en metros.
- h_{inf}** Altura del muro de relleno en metros.
- E_{fe}** Módulo de elasticidad del material del marco en kg/m²
- E_{me}** Módulo de elasticidad del material del muro de relleno en kg/m²
- I_{col}** Momento de inercia de las columnas en m⁴
- L_{inf}** Longitud del muro de relleno en metros
- r_{inf}** Longitud diagonal del muro de relleno en metros

- t_{inf} Espesor del muro de relleno y puntal equivalente en metros
- θ Ángulo cuya tangente es la relación de aspectos altura/longitud del muro de relleno en radianes
- λ_1 Coeficiente utilizado para determinar el ancho equivalente del puntal de relleno.

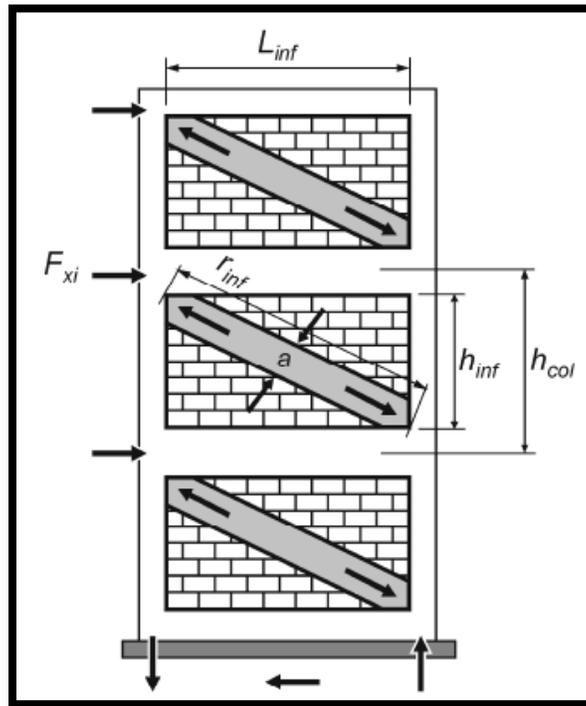


Figura 71 Variables del puntal equivalente de acuerdo con reglamento FEMA 356 (ASCE, 2000)

En la **Tabla 19** se muestra el ancho obtenido de los puntales equivalentes para los cuatro modelos de estudio de acuerdo con sus niveles y dimensionamiento. En todos los casos, el espesor considerado fue de 15 cm este incluyo los muros de mampostería y los recubrimientos. Estos elementos se modelaron como elementos tipo barra en los modelos lineales realizados con ayuda del software SAP2000.

Tabla 19 Anchos de los puntales equivalentes de los modelos de estudio

ANCHO DE LOS PUNTALES "a"		
Modelo	Nivel	Ancho (m)
3 Niveles	1	0.7
	2 a 3	0.6
5 Niveles	1 a 5	0.7
6 Niveles	1 a 6	0.7
9 Niveles	1 a 5	0.8
	6 a 8	0.7

En la **Figura 72** se observa una vista frontal y posterior del modelo de tres niveles; se aprecia claramente que los puntales equivalentes se colocaron en la cara posterior y una cara lateral, con la finalidad de representar los muros colindantes que presentaban las edificaciones.

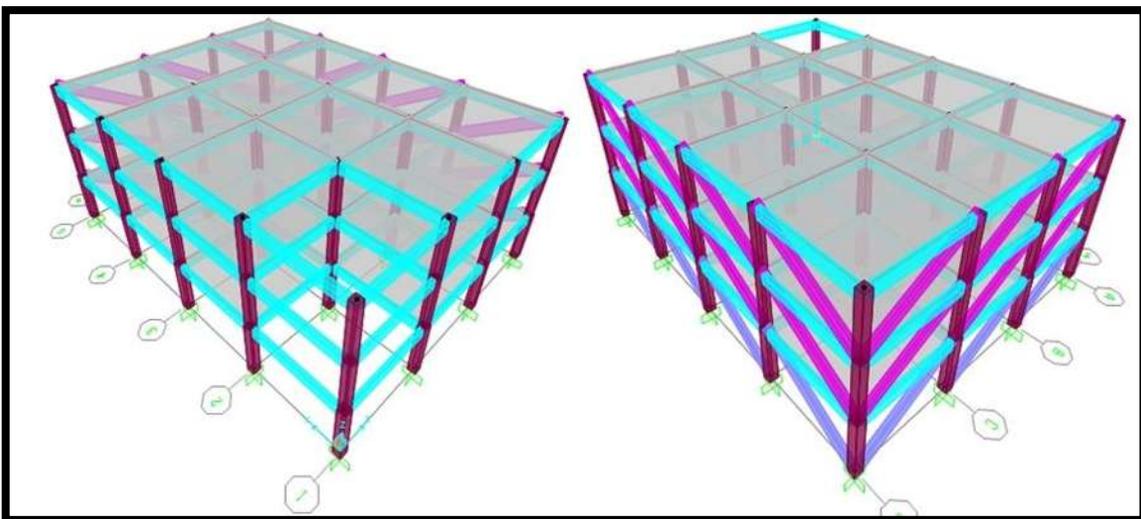


Figura 72 Vista frontal y posterior del modelo de tres niveles con puntales equivalentes

La **Figura 73** se muestra el croquis del modelo de nueve niveles en las direcciones x e y.

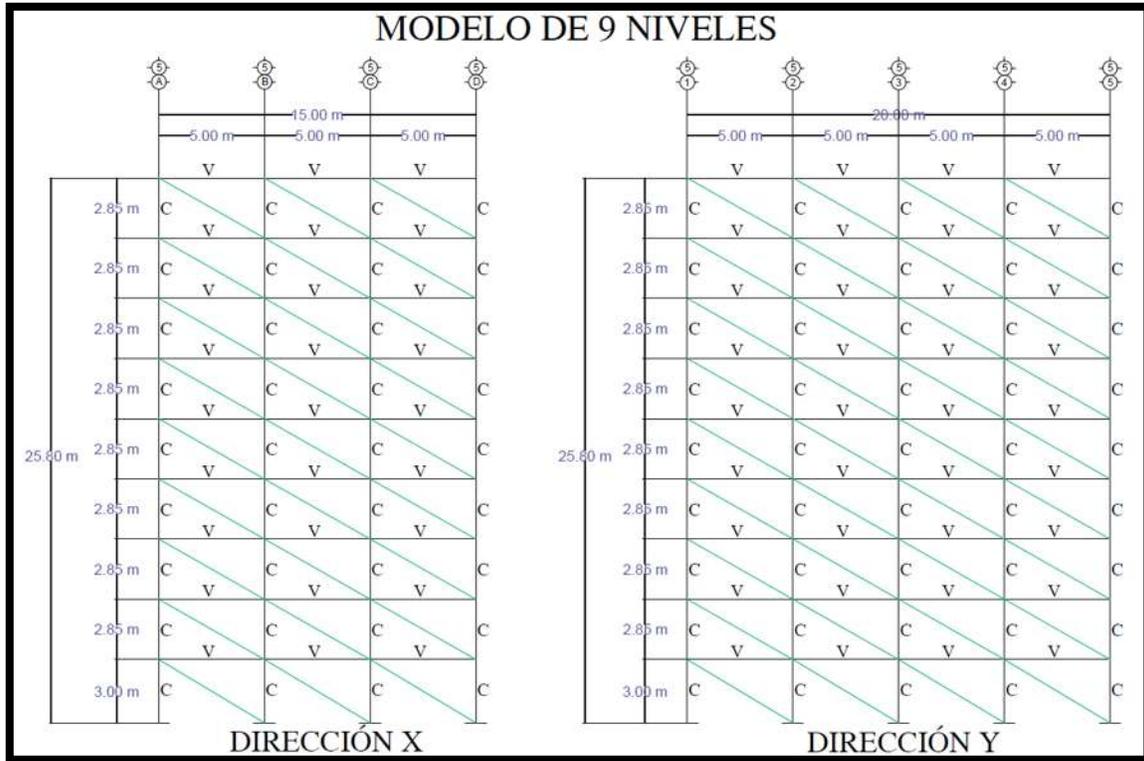


Figura 73 Configuración de las elevaciones en dirección x e y para modelo de 9 niveles con puntales equivalentes

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS DINÁMICO LINEAL Y NO LINEAL DE LOS MODELOS ESTRUCTURALES

Resulta cada día más evidente que las filosofías de diseño que permiten muchos de los reglamentos en la actualidad no son lo suficientemente eficientes para el análisis y construcción de la infraestructura actual, particularmente cuando se evalúan los daños sísmicos de temblores de gran intensidad.

Actualmente no solo basta con realizar el análisis modal espectral de las edificaciones si no que aunado a este es conveniente en ocasiones llevar a cabo un análisis no lineal.

6.1 ANÁLISIS DINÁMICOS LINEALES

Para el desarrollo de esta parte de la investigación se implementó la filosofía de diseño sísmico basada en fuerzas. Mediante el software SAP200 se modelaron y diseñaron los modelos analíticos producto de las estadísticas analizadas en esta investigación.

La filosofía de diseño conduce a analizar las edificaciones en su intervalo elástico y se verifican al final las distorsiones de entrepiso, de acuerdo con las admisibles señaladas en el reglamento. Estas limitaciones se encuentran en el artículo 242 del Reglamento de Construcción del Distrito Federal de 1976.

Para este tipo de análisis también se requiere considerar un factor de ductilidad Q ; este depende de las características geométricas, resistencia de la estructura, tipo de materiales y comportamiento dinámico. Dicho factor de ductilidad es especificado en el artículo 235 del Reglamento de Construcción del Distrito Federal de 1976. Con base en las características presentes en los modelos de estudio se decidió utilizar un factor de ductilidad Q de dos para todos los modelos. Este factor Q es empleado para reducir las acciones sísmicas para analizar la estructura elásticamente. Los elementos que conforman los modelos son de tipo barra a excepción de los elementos tipo placa que fueron empleados para la representación de los sistemas de piso.

Con base en estos análisis se realiza el dimensionamiento de los elementos que componen a las estructuras de estudio. Para ello se propone un pre-dimensionamiento que cumpla las condiciones de servicio y resistencia, de no ser así será cambiando el dimensionamiento hasta que este cumpla con dichas condiciones.

Cualquier estructura es tridimensional y debido a esto pueden presentar desplazamientos o deformaciones en las tres direcciones del espacio, donde esta contenidas, así mismo pueden presentar giros (rotaciones). Un modo de vibrar se define como las posibles formas de oscilar de una estructura. En general, una estructura tiene tantos modos de vibrar como grados de libertad; sin embargo, los primeros modos suelen tener la mayor contribución en la respuesta sísmica. El número adecuado de modos a considerar en los análisis depende de los factores de participación de masas.

Los modos de vibrar de una estructura son la base de la solución de las ecuaciones de equilibrio dinámico de sistemas de varios grados de libertad y con base en ellos es posible determinar las fuerzas que actúan sobre la estructura.

En las **Tabla 20** a **Tabla 23**, se muestran las formas modales obtenidas para cada uno de los modelos numéricos de estudio. Se observa que todos los modelos tienen un primer modo fundamental alrededor del eje vertical (torsión), y no es sino hasta el cuarto y quinto modo que se presentan los modos asociados con los movimientos longitudinales y transversales.

Tabla 20 Formas modales para el modelo de tres niveles

Formas Modales (3 Niveles)		
No.	Dirección	T (seg)
1	Torsión	0.638
4	x (Transversal)	0.205
5	y (Longitudinal)	0.19

Tabla 21 Formas modales para el modelo de cinco niveles

Formas Modales (5 Niveles)		
No.	Dirección	T (seg)
1	Torsión	0.879
4	x (Transversal)	0.275
5	y (Longitudinal)	0.262

Tabla 22 Formas modales para el modelo de seis niveles

Formas Modales (6 Niveles)		
No.	Dirección	T (seg)
1	Torsión	1.07
4	x (Transversal)	0.34
5	y (Longitudinal)	0.322

Tabla 23 Formas modales para el modelo de nueve niveles

Formas Modales (9 Niveles)		
No.	Dirección	T (seg)
1	Torsión	1.529
4	x (Transversal)	0.4823
5	y (Longitudinal)	0.4575

A continuación, en las Espectro de diseño, espectro de diseño modificado y formas modales para el modelo de tres niveles *Figura 74 a Figura 77* se presentan en forma de gráficas el espectro de diseño elástico, el espectro modificado o reducido con base en el factor de ductilidad Q, y las formas modales fundamentales de los edificios diseñados a base de marcos de concreto antes mostradas para cada uno de los modelos.

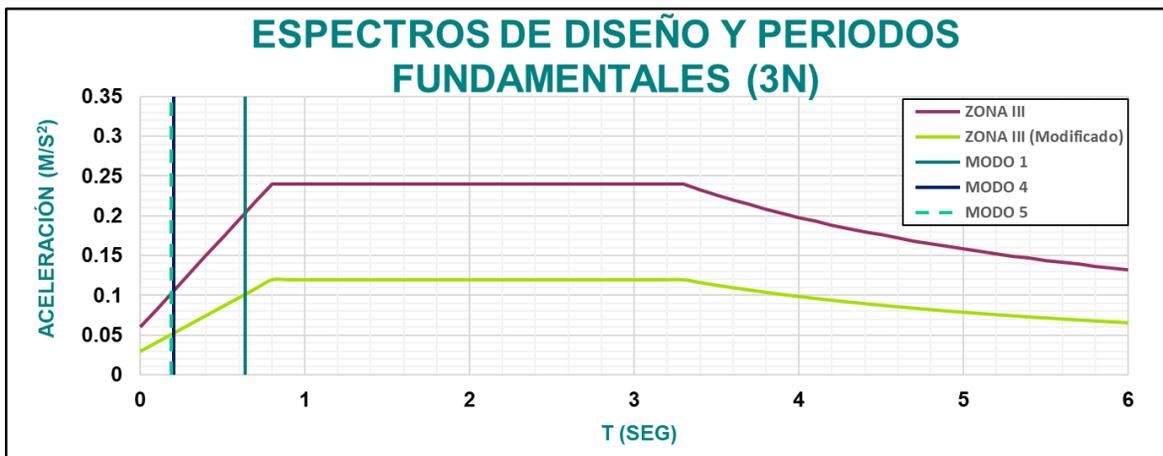


Figura 74 Espectro de diseño, espectro de diseño modificado y formas modales para el modelo de tres niveles

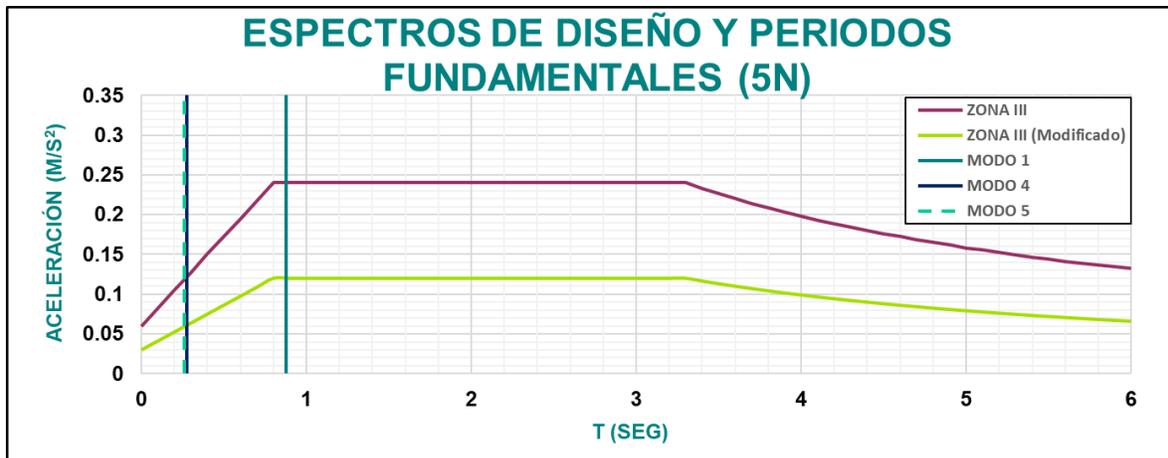


Figura 75 Espectro de diseño, espectro de diseño modificado y formas modales para el modelo de cinco niveles

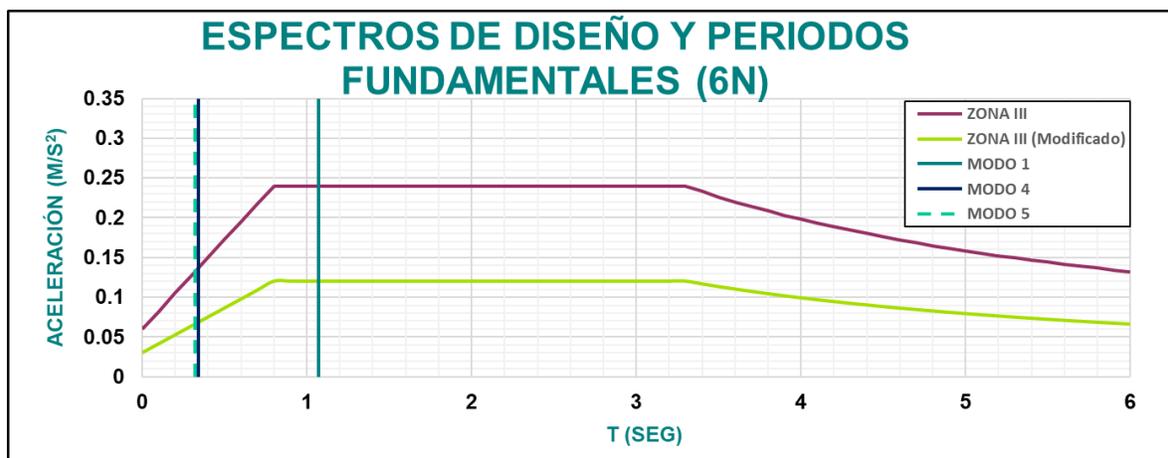


Figura 76 Espectro de diseño, espectro de diseño modificado y formas modales para el modelo de seis niveles

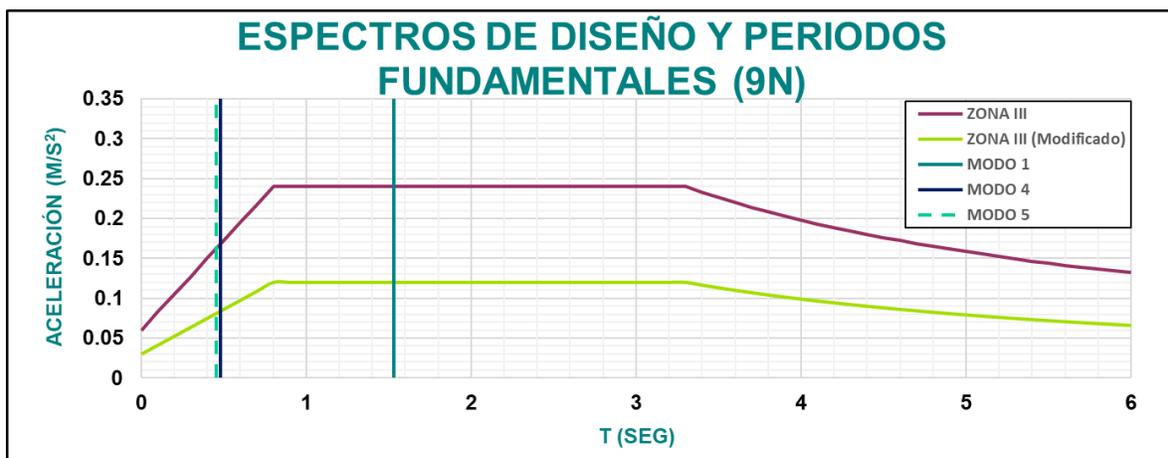


Figura 77 Espectro de diseño, espectro de diseño modificado y formas modales para el modelo de nueve niveles

6.2 ANÁLISIS DINÁMICOS NO LINEALES

Es claro y notorio que hoy en día no es suficiente realizar solo un análisis lineal elástico de las estructuras, y es ahí donde entra en práctica los conocimientos y habilidades adquiridos de un estructurista. Aunado a esto es importante mencionar el gran abanico de herramientas y tecnologías con que se cuenta hoy en día, las cuales permiten facilitar la solución de todo tipo de análisis estructural.

Para esta parte de la investigación se empleó el programa PERFORM 3D, el cual cuenta con una interfaz que muestra un doble menú que nos permite ingresar a la parte de modelación o la otra corresponde al análisis.

Para modelar las vigas y columnas de los marcos, se emplearon elementos tipo barras. A las barras que representan las vigas se les asignaron cargas muerta, viva máximas, instantáneas y el peso de los muros sobre estas de manera uniforme. Los entrepisos fueron representados mediante diafragmas rígidos. Los modelos no incorporan el efecto de la interacción suelo-estructura. Las masas rotacionales se calcularon con la **Ecuación 30**, a partir de la obtención de las masas traslacionales; y estas fueron asignadas en los centroides de cada piso respectivamente.

Para los modelos se consideró un amortiguamiento Rayleigh, es decir, que el primer y cuarto modos de los modelos tienen un amortiguamiento del 5% respecto del crítico.

Para considerar la no linealidad de los modelos se adicionaron articulaciones plásticas, las cuales se encuentran colocadas en los extremos de los elementos tipo barras que corresponden a las vigas y a las columnas. Se consideró que las columnas están sometidas a flexocompresión cuyo comportamiento P-M se determina a través del uso de diagramas de interacción. Por otra parte, para las vigas se despreciaron las cargas axiales. Los muros al igual que en el programa SAP200, se idealizaron como puntales. Siguiendo la normativa del FEMA 356, estos fueron modelados como barras inelásticas considerando comportamiento con degradación de rigidez. La masa rotacional de los modelos es:

$$masa\ rot = \frac{masa\ traslacional\ (B^2+H^2)}{12}$$

Ecuación 28

Donde:

B Dimensión del lado más corto en metros.

H Dimensión del lado más largo en metros.

Las articulaciones plásticas asignadas a las vigas y columnas en el programa PERFORM 3D, consideran modelos con degradación de rigidez (**Figura 78**) empleando los factores de degradación proporcionados por el FEMA 356, para los análisis no lineales.

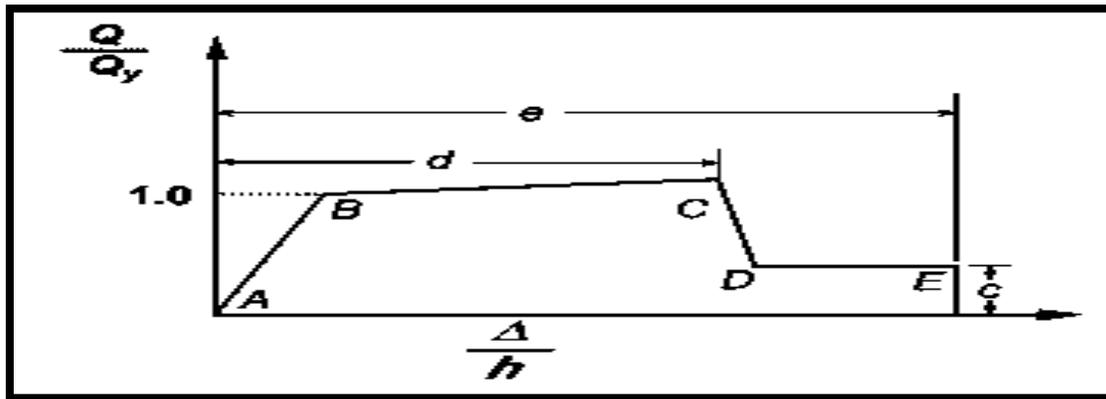


Figura 78 Modelos con degradación de rigidez (ASCE, 2000)

De los modelos de estudio se obtuvieron cuatro resultados importantes:

1. Demanda de distorsiones de entrepiso
2. Rotaciones en columnas
3. Energía de entrada de los modelos
4. Energía histerética en columnas

6.3 DEMANDA DE DISTORSIONES

En las **Figura 79** a **Figura 98**, se observa las distorsiones máximas obtenidas de los análisis lineales, las distorsiones admisibles que el Reglamento de construcción para el Distrito Federal de 1976 (Luis Echeverría Álvarez, 1976) proponía, de acuerdo con el artículo 242 (Estado límite por desplazamientos horizontales) de dicho reglamento y la envolvente de las medianas de las distorsiones máximas. Para el cálculo de las distorsiones se consideraron las sumas vectoriales de las demandas de los ejes ortogonales en cada uno de los intervalos de tiempo (**Ecuación 31**).

$$Distorsión = \frac{\sqrt{DesMax_x^2 + DesMax_y^2}}{h}$$

Ecuación 29

Donde

Des_{Max} Desplazamientos máximos en dirección x e y

h Altura de los entresijos de los modelos

Para cada modelo de estudio se obtuvieron las medianas de las distorsiones considerando los desplazamientos en cinco columnas para los 28 acelerogramas mencionados en el capítulo cuarto de esta investigación. De las columnas de estudio se eligieron una central y cuatro de esquina. Una de ellas se encuentra restringida por puntales a ambos lados, otras dos están restringidas solo por un puntal y una es libre de puntales.

En las figuras se observa con línea discontinua las distorsiones propuestas por el reglamento. También se observa que las distorsiones obtenidas de los análisis lineales son en todos los casos menores de las admisibles en el reglamento. Así mismo se observa que las distorsiones de los análisis no lineales son mucho mayores, en algunos casos son hasta 10 veces mayores que lo marcado por el reglamento de 1976.

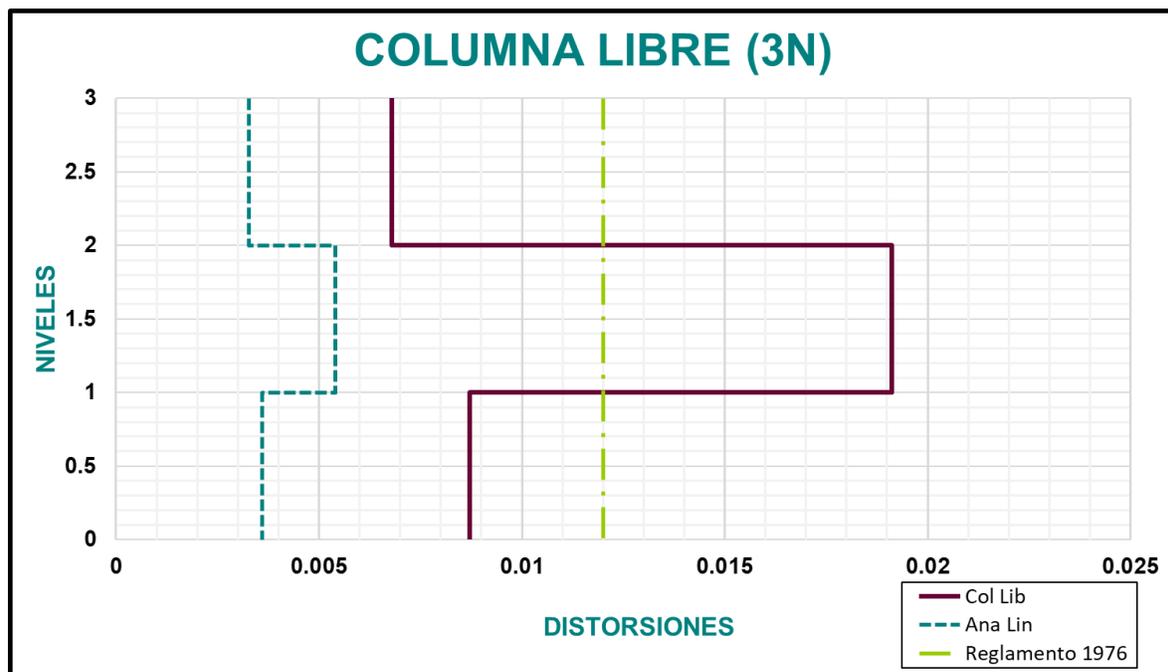


Figura 79 Demanda de distorsiones para columna libre en modelo de tres niveles

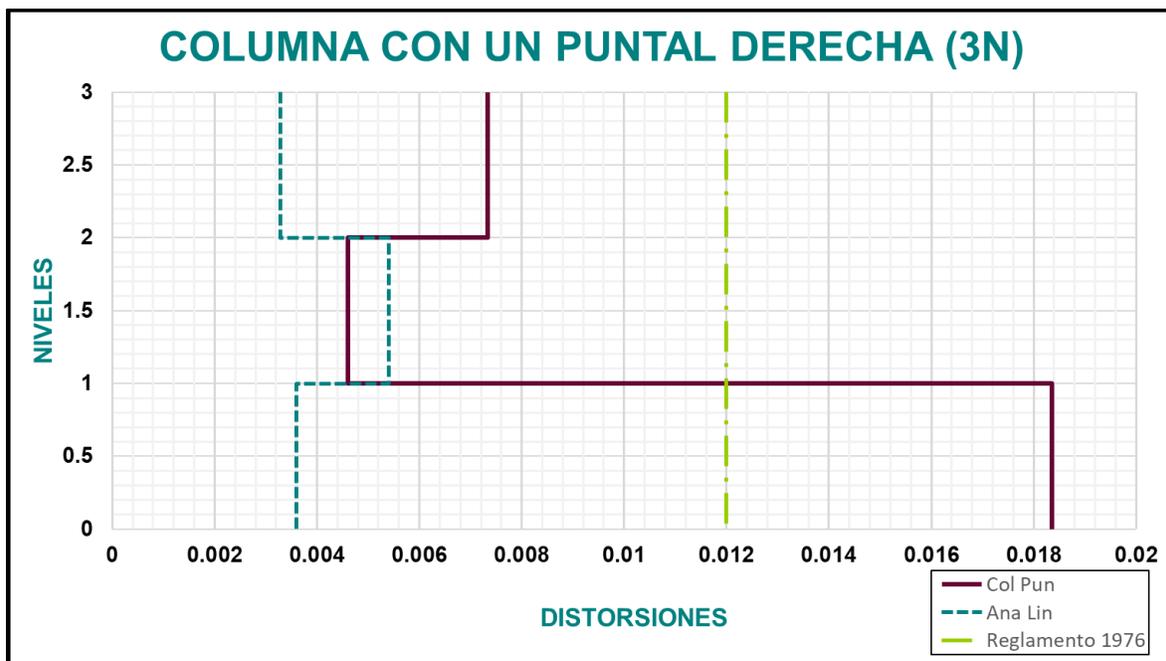


Figura 80 Demanda de distorsiones para columna con puntal a la derecha en modelo de tres niveles

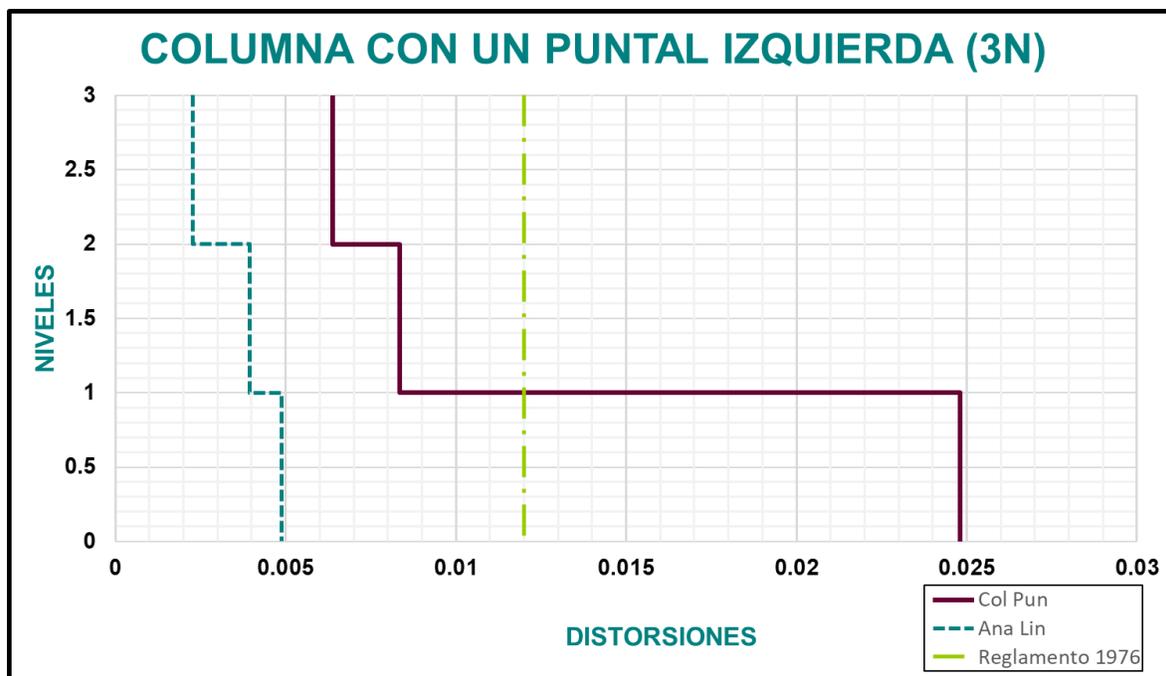


Figura 81 Demanda de distorsiones para columna con puntal a la izquierda en modelo de tres niveles

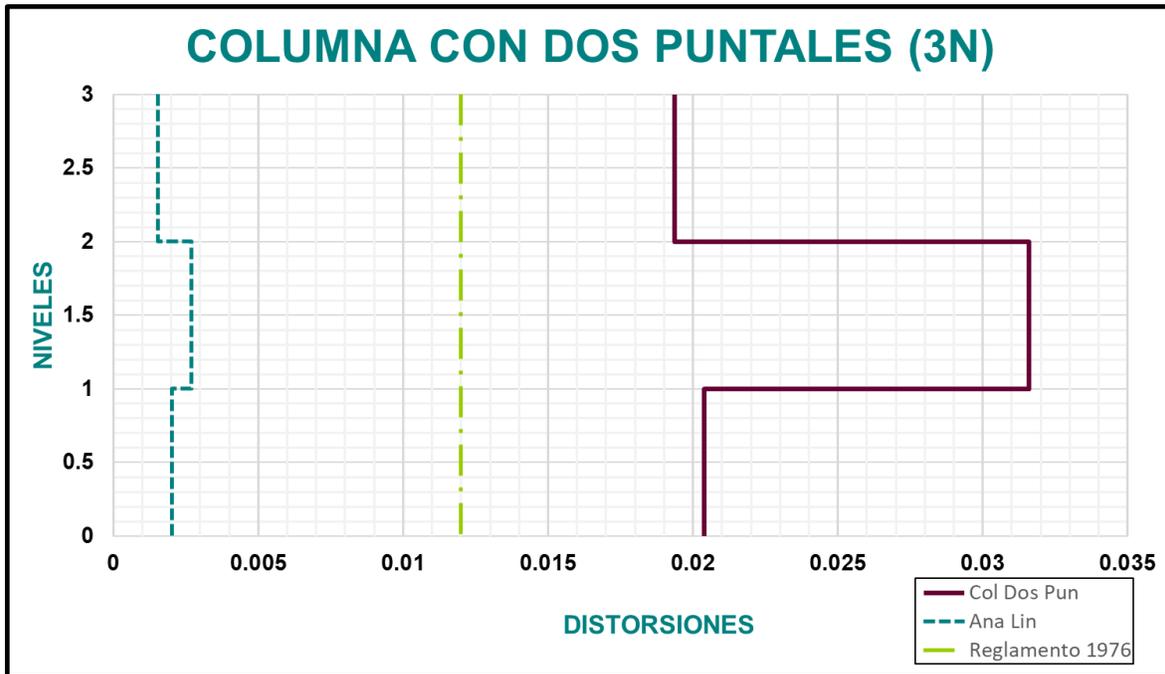


Figura 82 Demanda de distorsiones para columna con dos puntales en modelo de tres niveles

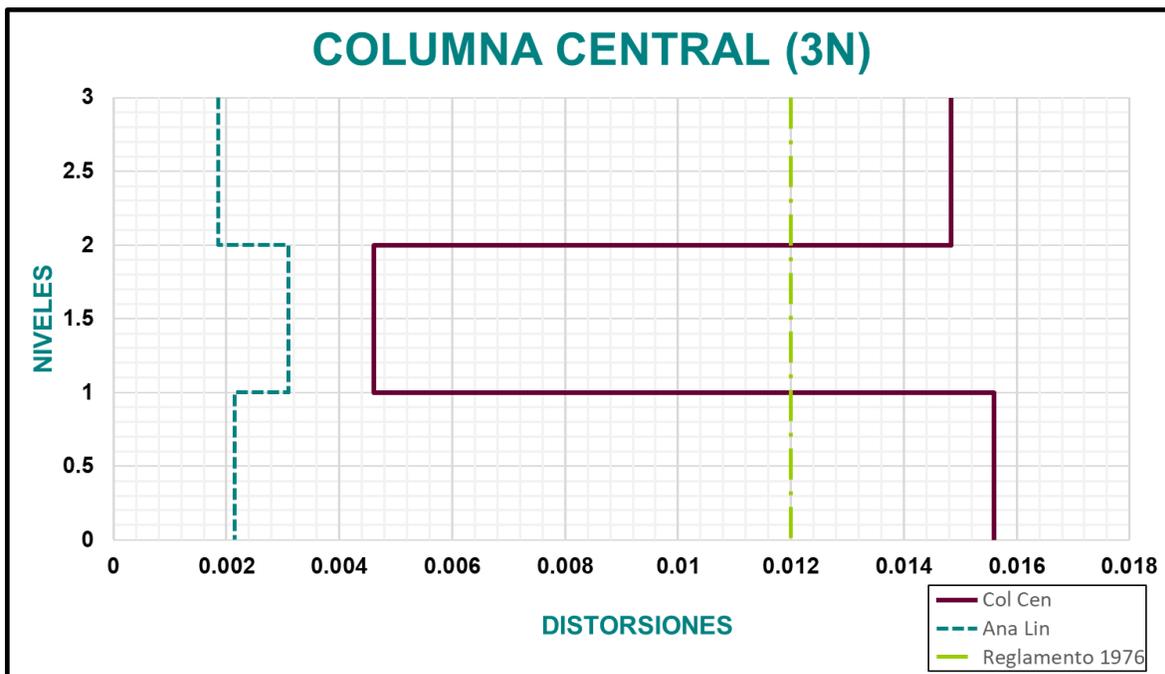


Figura 83 Demanda de distorsiones para columna central en modelo de tres niveles

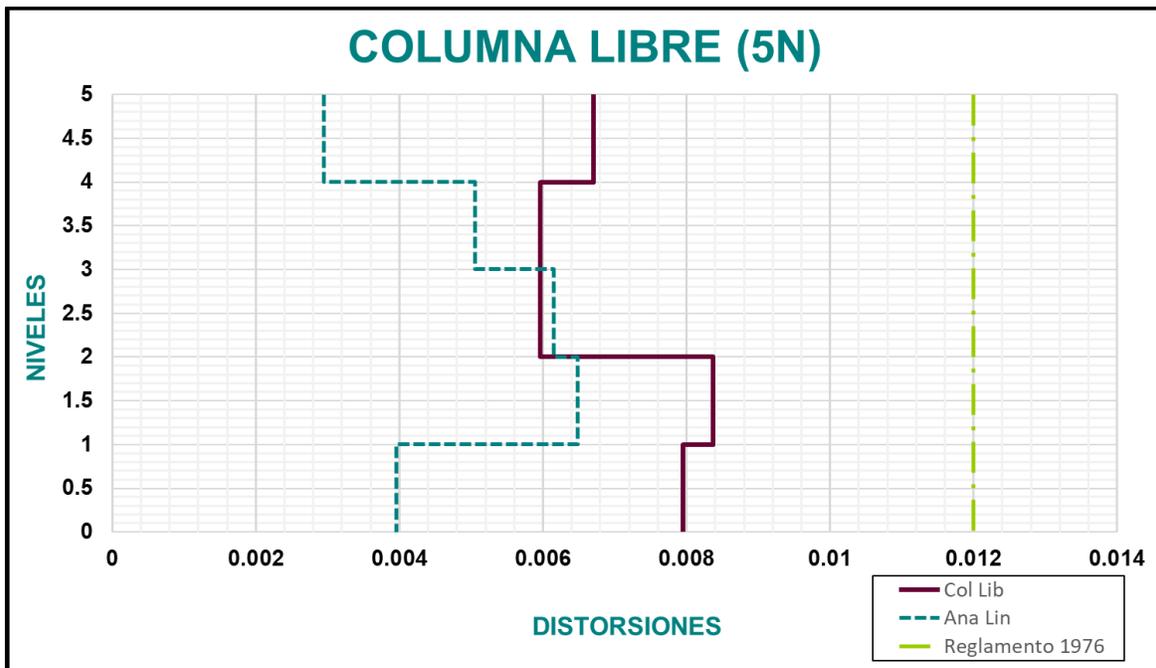


Figura 84 Demanda de distorsiones para columna libre en modelo de cinco niveles

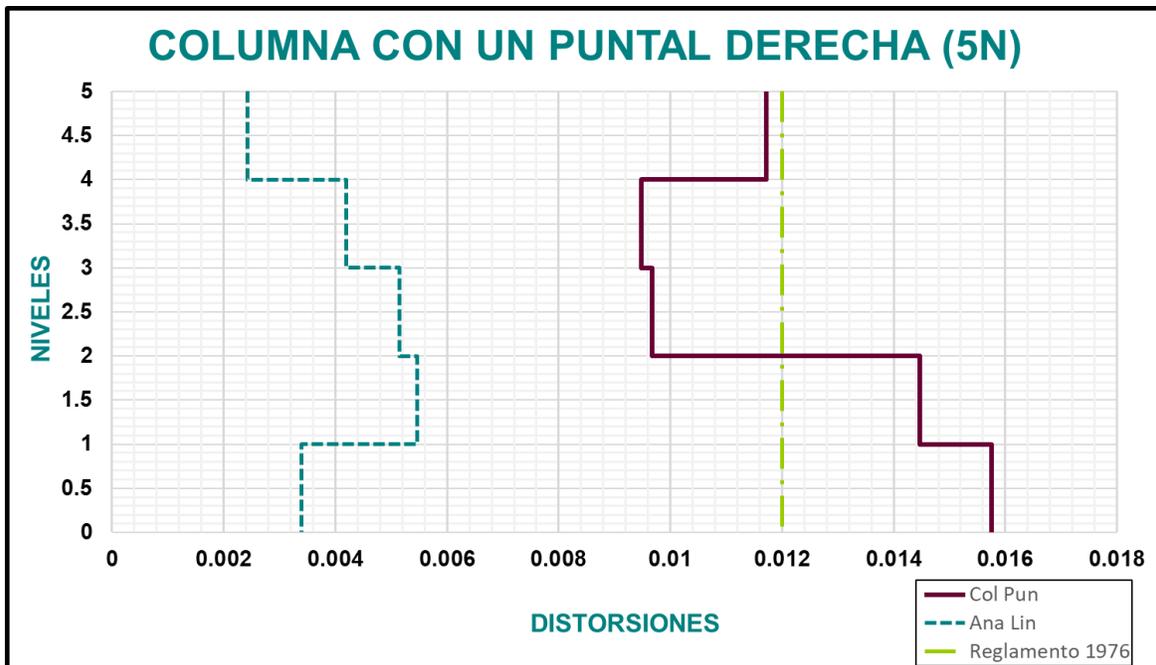


Figura 85 Demanda de distorsiones para columna con puntal a la derecha en modelo de cinco niveles

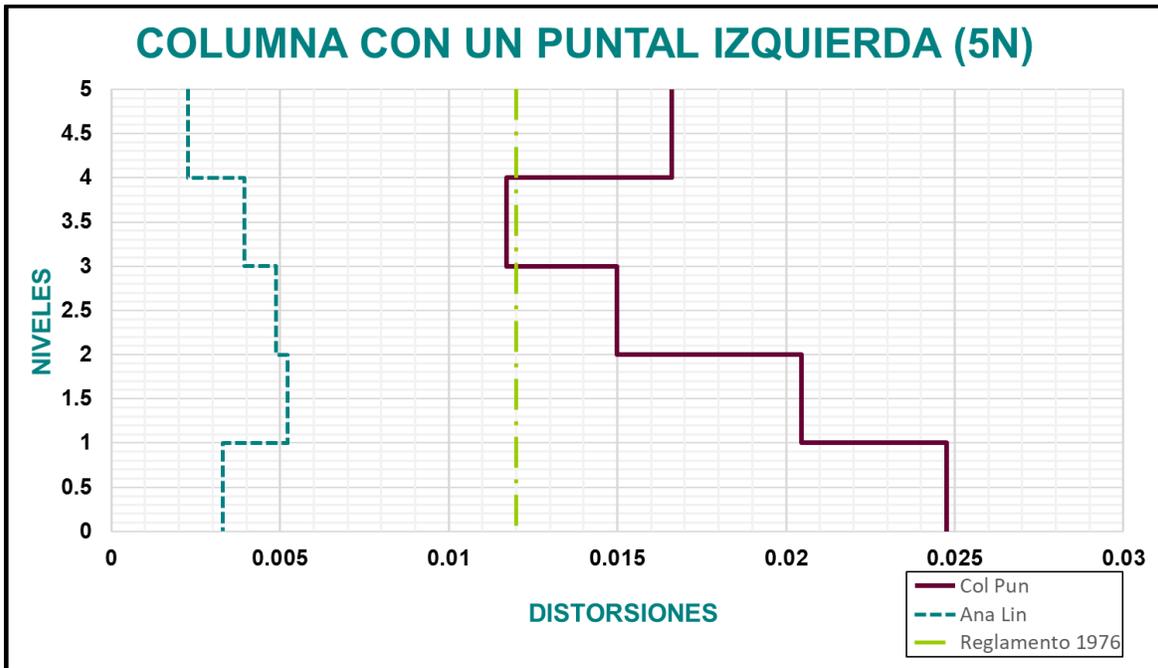


Figura 86 Demanda de distorsiones para columna con puntal a la izquierda en modelo de cinco niveles

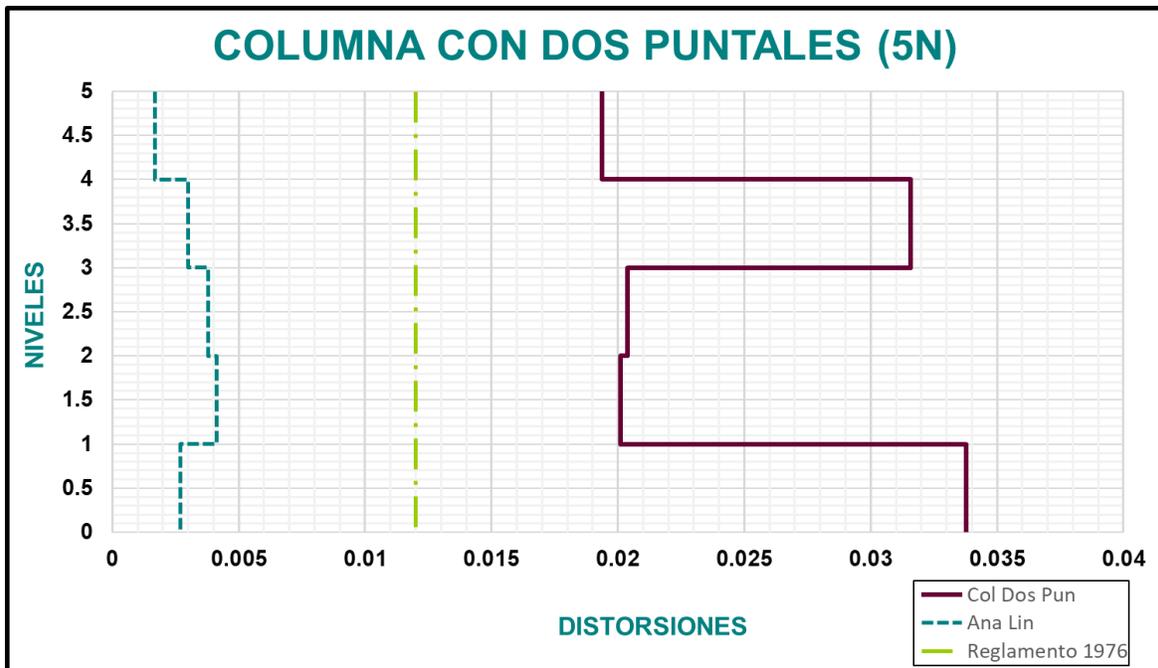


Figura 87 Demanda de distorsiones para columna con dos puntales en modelo de cinco niveles

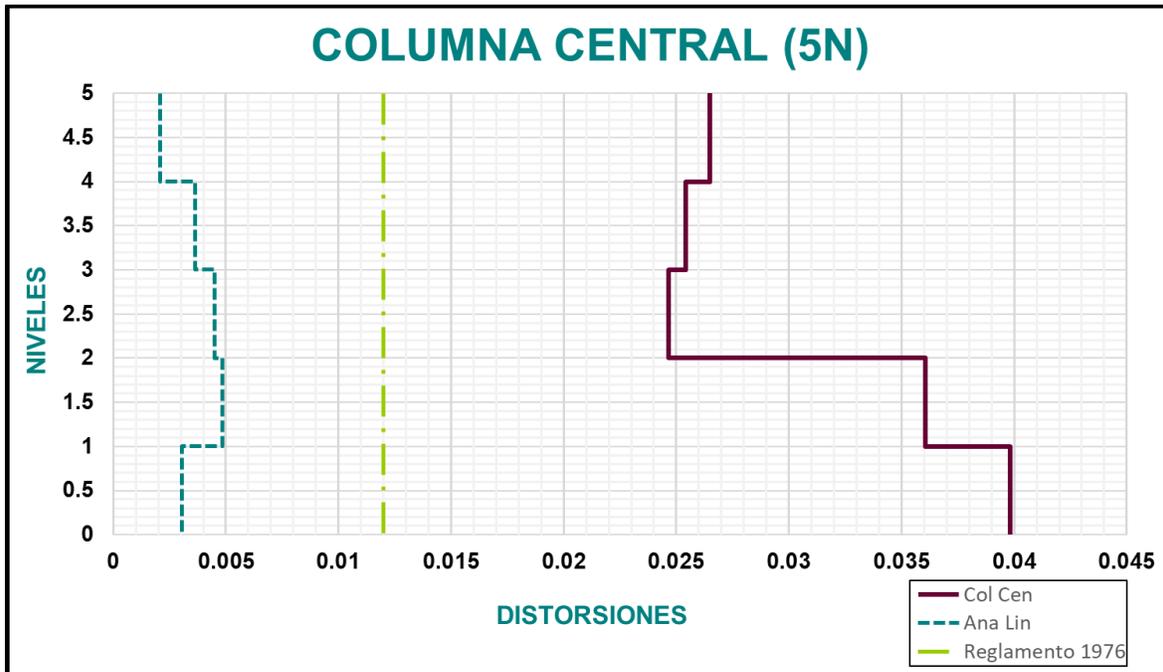


Figura 88 Demanda de distorsiones para columna central en modelo de cinco niveles

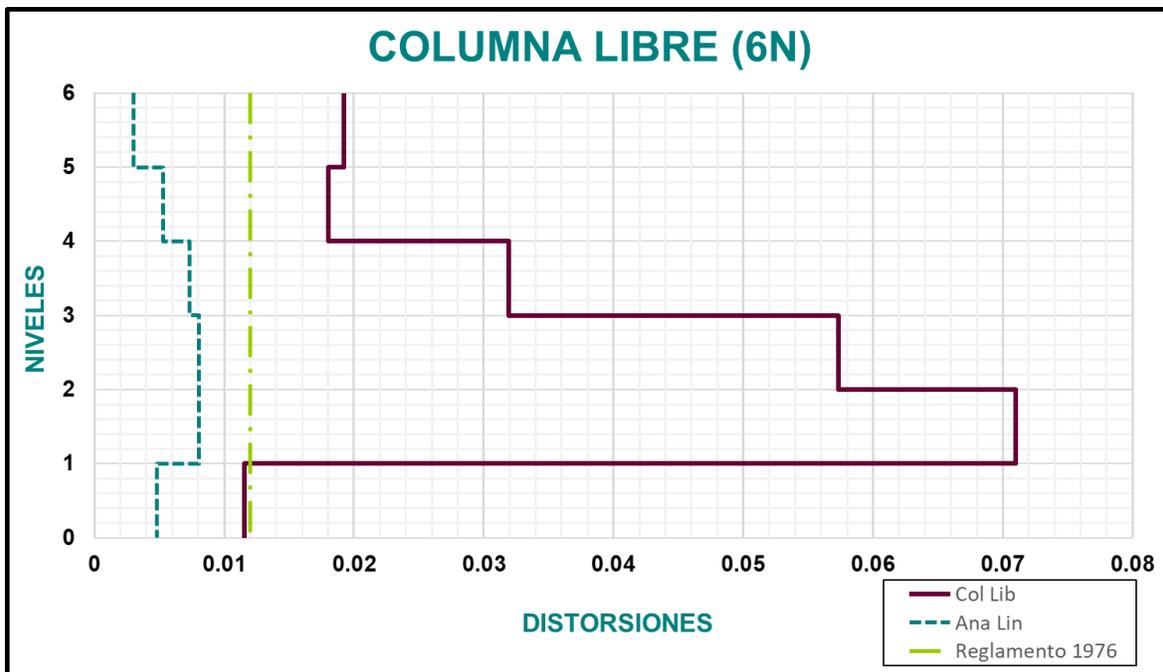


Figura 89 Demanda de distorsiones para columna libre en modelo de seis niveles

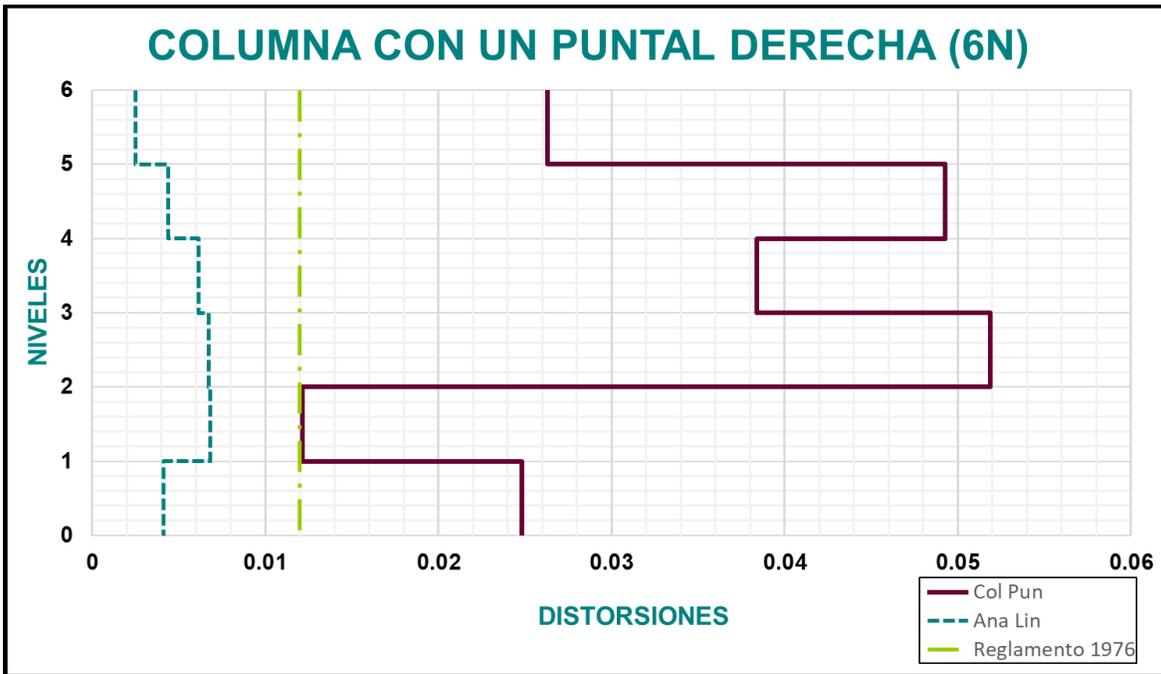


Figura 90 Demanda de distorsiones para columna con puntal a la derecha en modelo de seis niveles

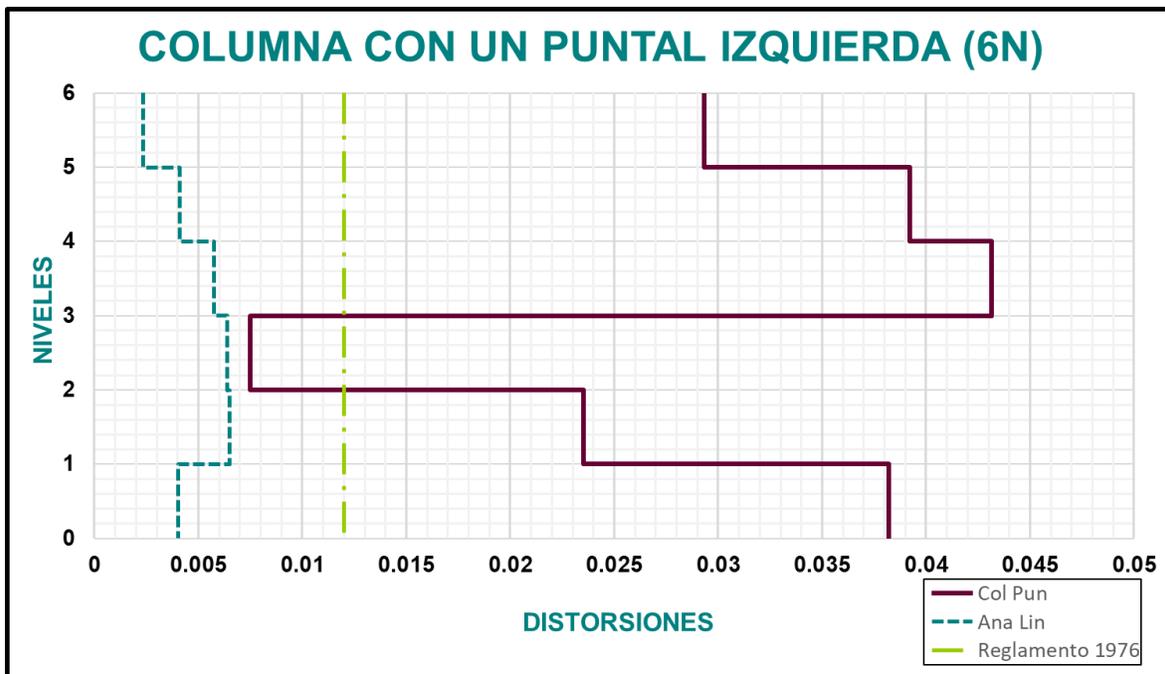


Figura 91 Demanda de distorsiones para columna con puntal a la izquierda en modelo de seis niveles

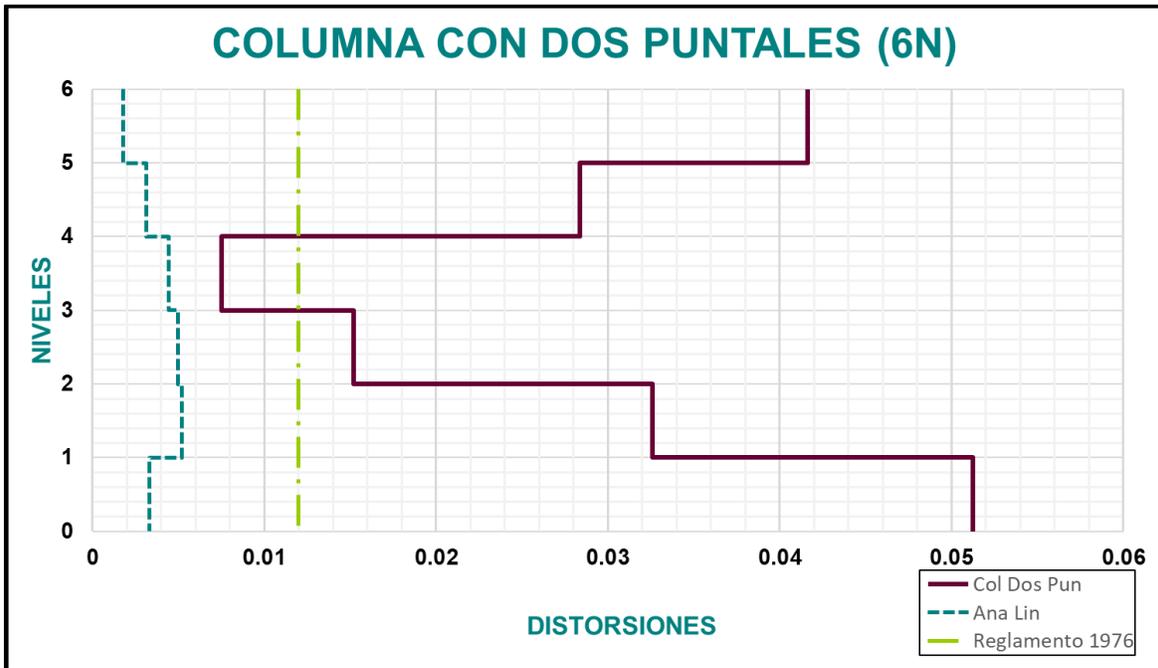


Figura 92 Demanda de distorsiones para columna con dos puntales en modelo de seis niveles

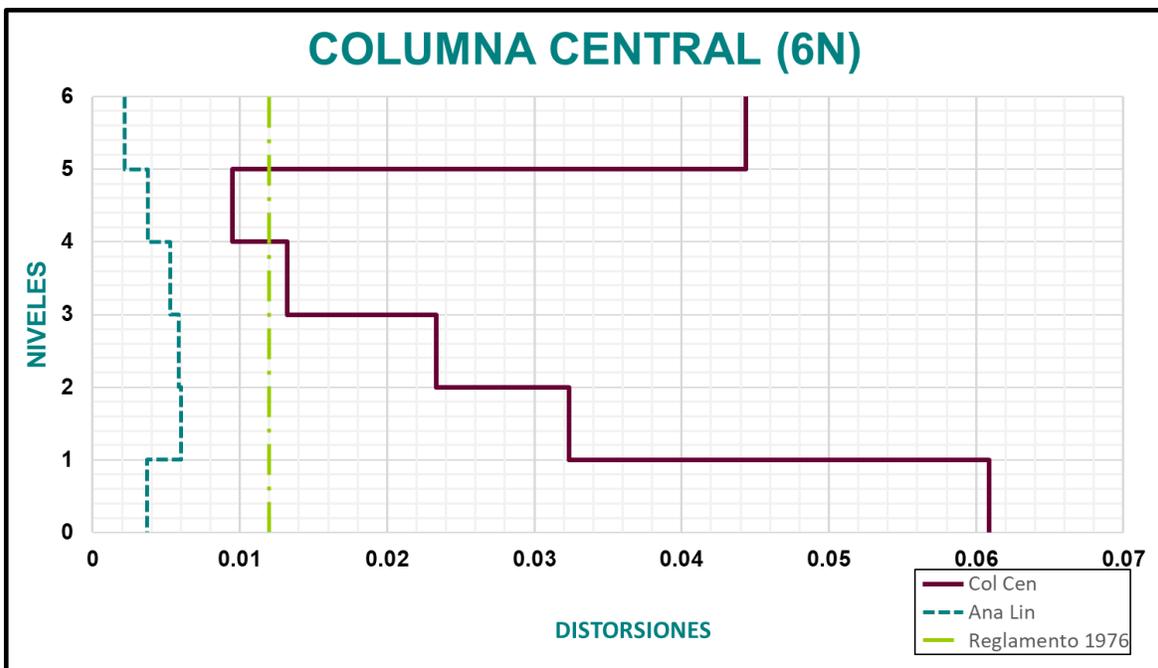


Figura 93 Demanda de distorsiones para columna central en modelo de seis niveles

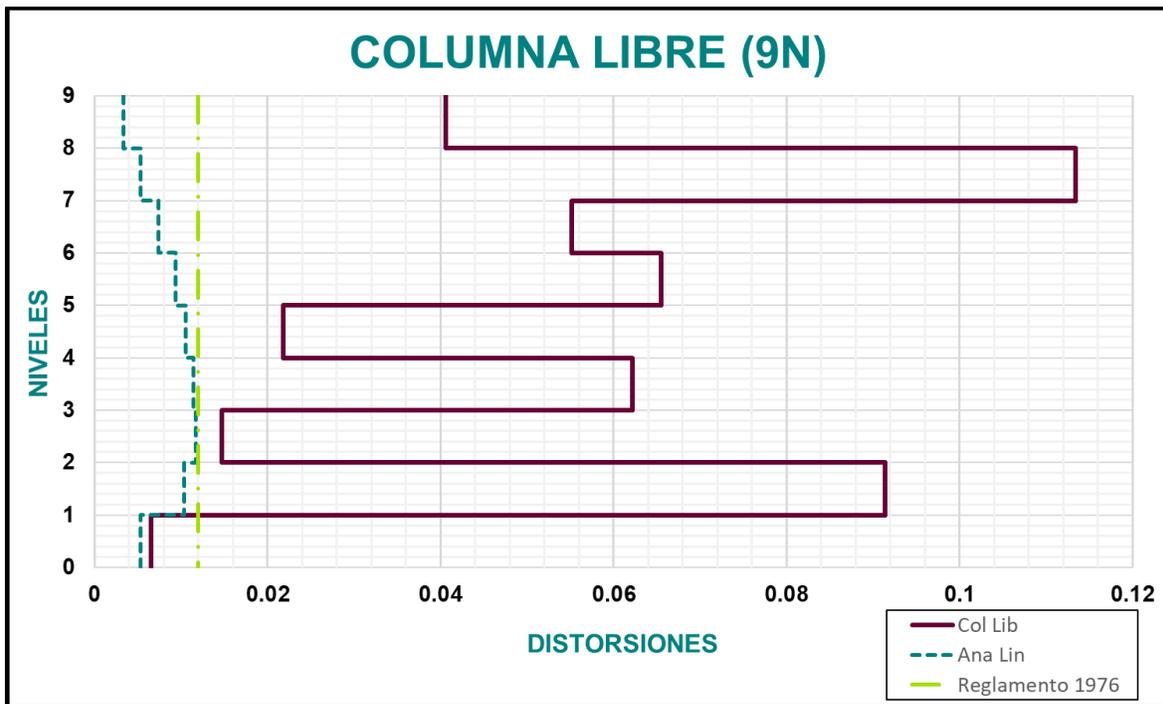


Figura 94 Demanda de distorsiones para columna libre en modelo de nueve niveles

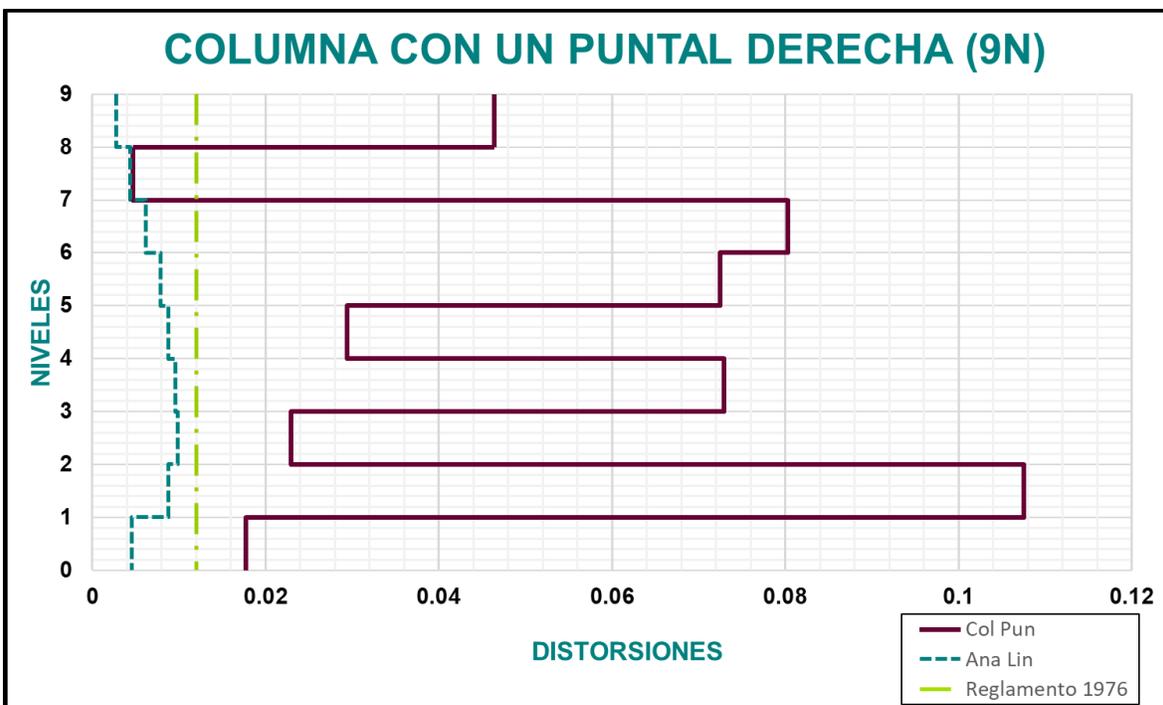


Figura 95 Demanda de distorsiones para columna con puntal a la derecha en modelo de nueve niveles

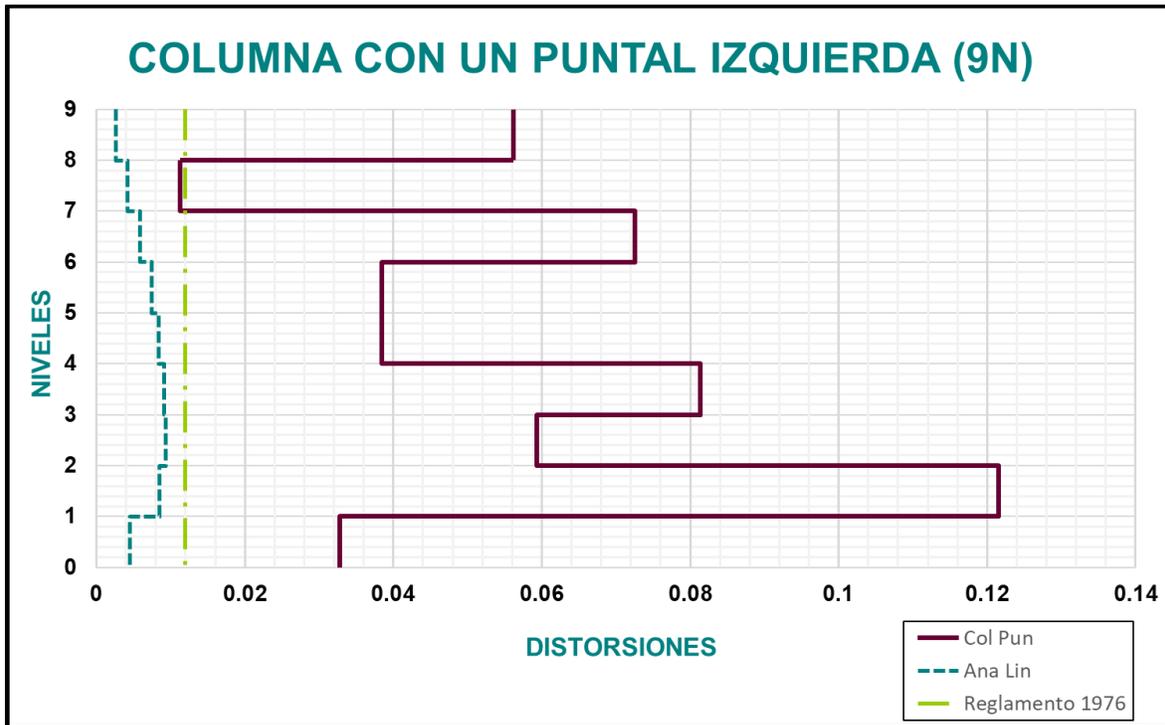


Figura 96 Demanda de distorsiones para columna con puntal a la izquierda en modelo de nueve niveles

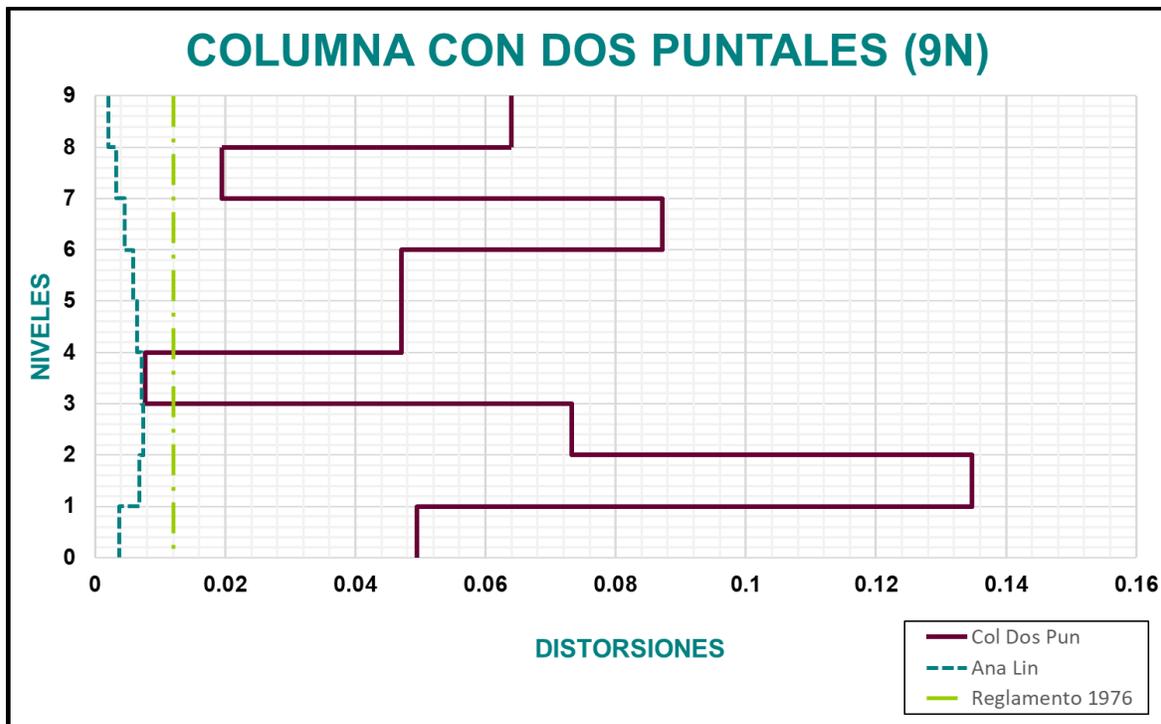


Figura 97 Demanda de distorsiones para columna con dos puntales en modelo de nueve niveles

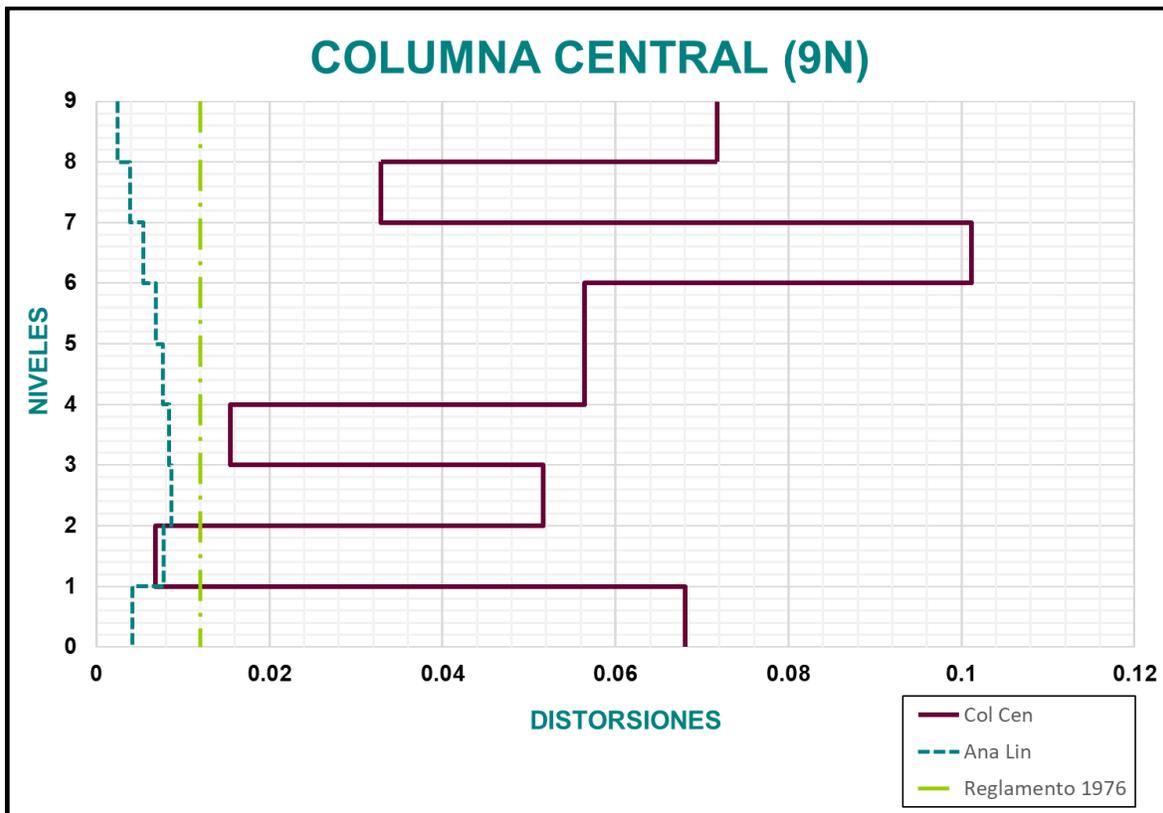


Figura 98 Demanda de distorsiones para columna central en modelo de nueve niveles

6.4 ROTACIÓN EN COLUMNAS

Las **Figura 99** a *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.* presentan las rotaciones obtenidas con los análisis no lineales. Dichas rotaciones son el resultado de obtener el promedio de las rotaciones correspondientes a cada una de las columnas de estudio respecto a los 28 acelerogramas para cada intervalo de tiempo y cada entre piso de los diferentes modelos analíticos.

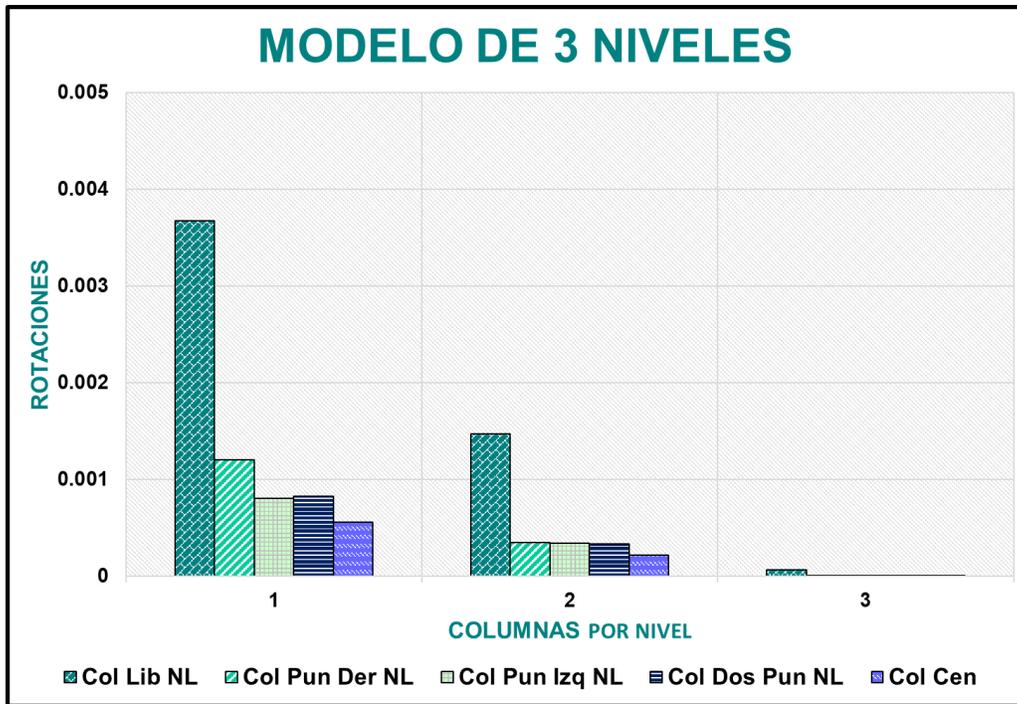


Figura 99 Rotación promedio para las cinco columnas de estudio del modelo de tres niveles

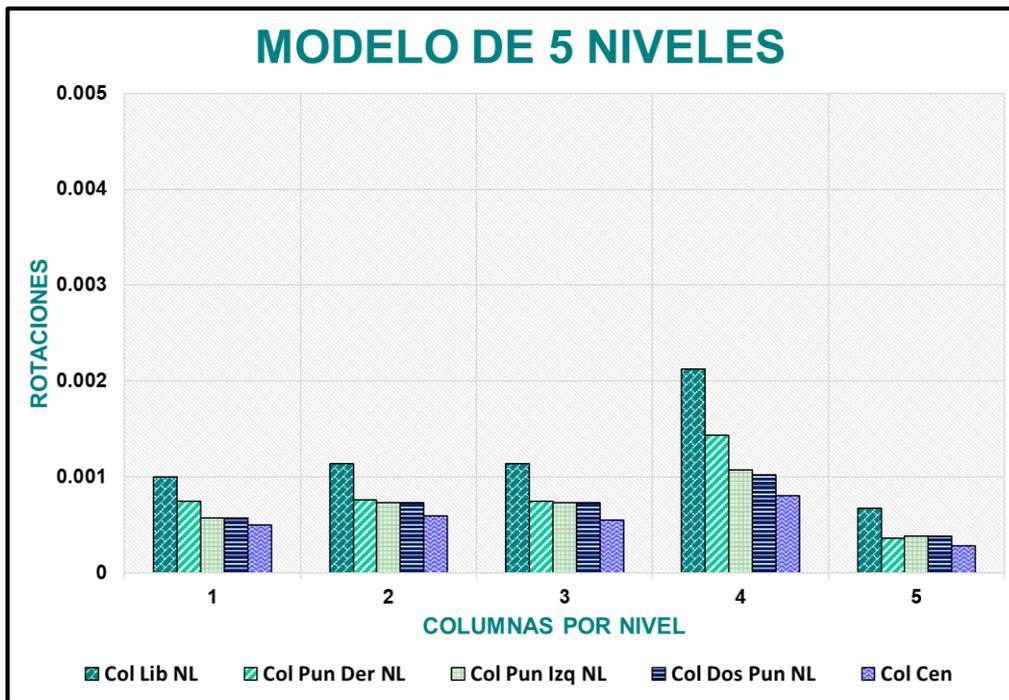


Figura 100 Rotación promedio para las cinco columnas de estudio del modelo de cinco niveles

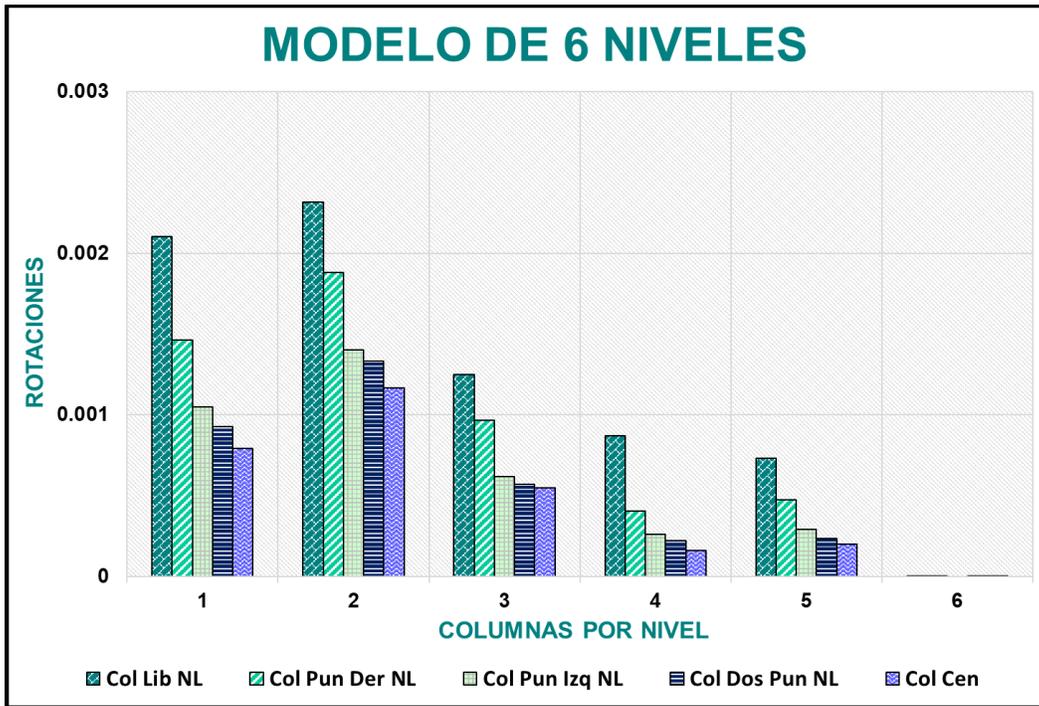


Figura 101 Rotación promedio para las cinco columnas de estudio del modelo de seis niveles

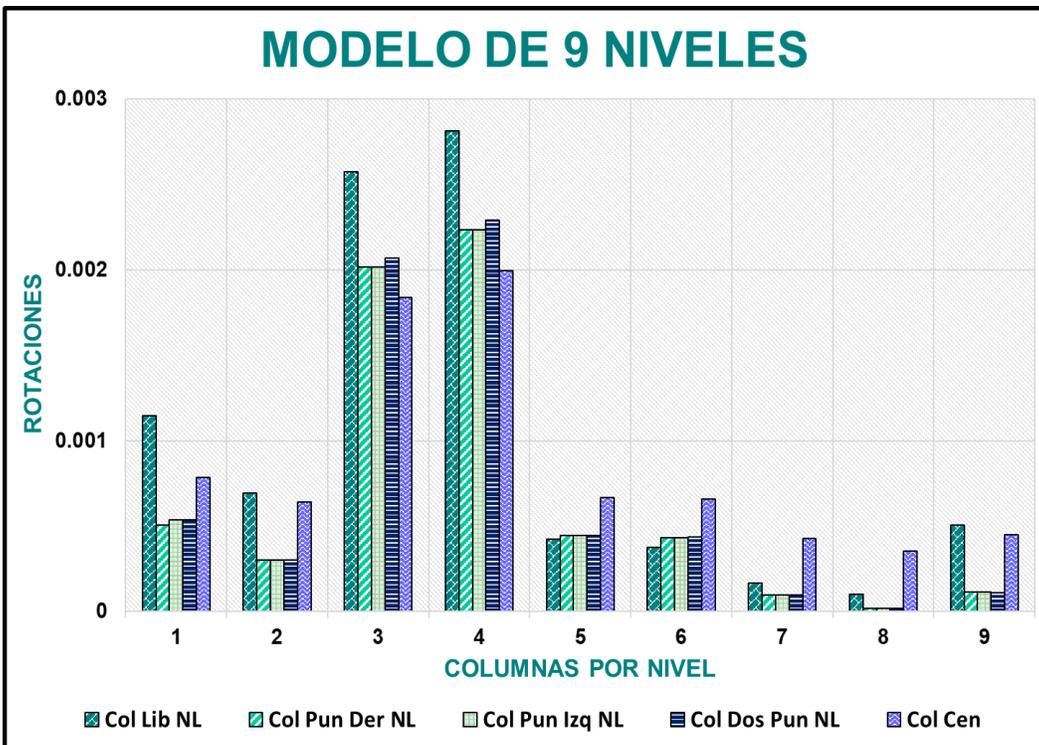


Figura 102 Rotación promedio para las cinco columnas de estudio del modelo de nueve niveles

6.5 ENERGIA DE ENTRADA DE LOS EDIFICIOS Y ENERGIA HISTERÉTICA DE LAS COLUMNAS

De la **Figura 103** a la **Figura 126**, se muestran las curvas de balance de energía para los diferentes modelos analíticos. Estas imágenes muestran los espectros de energía correspondientes a los acelerogramas con mayores aceleraciones para los tres diferentes tipos de suelo estudiados en el capítulo cuarto de esta investigación (Consultar

Tabla 8). La curva superior representa la energía de entrada que es igual a la suma de las demás energías mostradas en las figuras. Estas son la energía cinética, la energía de deformación elástica, la energía de amortiguamiento y la energía histerética.

También de la **Figura 127** a **Figura 160**, se muestran las curvas de energía histerética correspondientes a las columnas de los diferentes modelos analíticos. Estas imágenes muestran la energía de entrada correspondientes para los acelerogramas con mayor aceleración de acuerdo con los tres tipos de suelo estudiados.

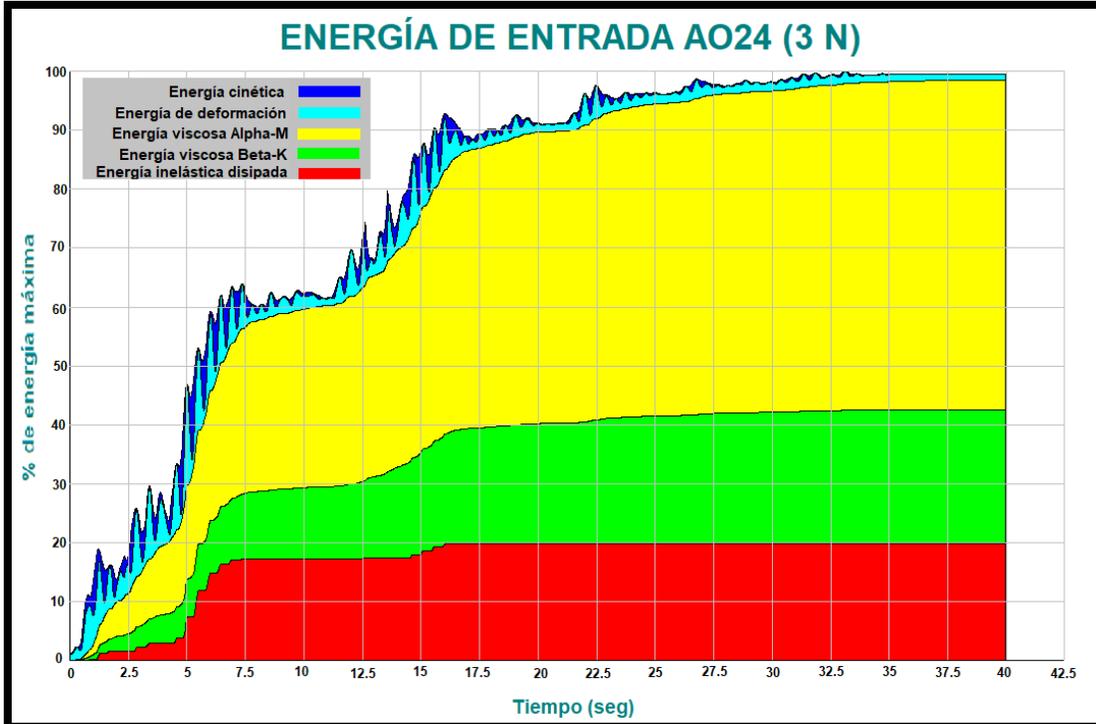


Figura 103 Curvas de balance de energía para modelo de tres niveles con registro de acelerograma AO24

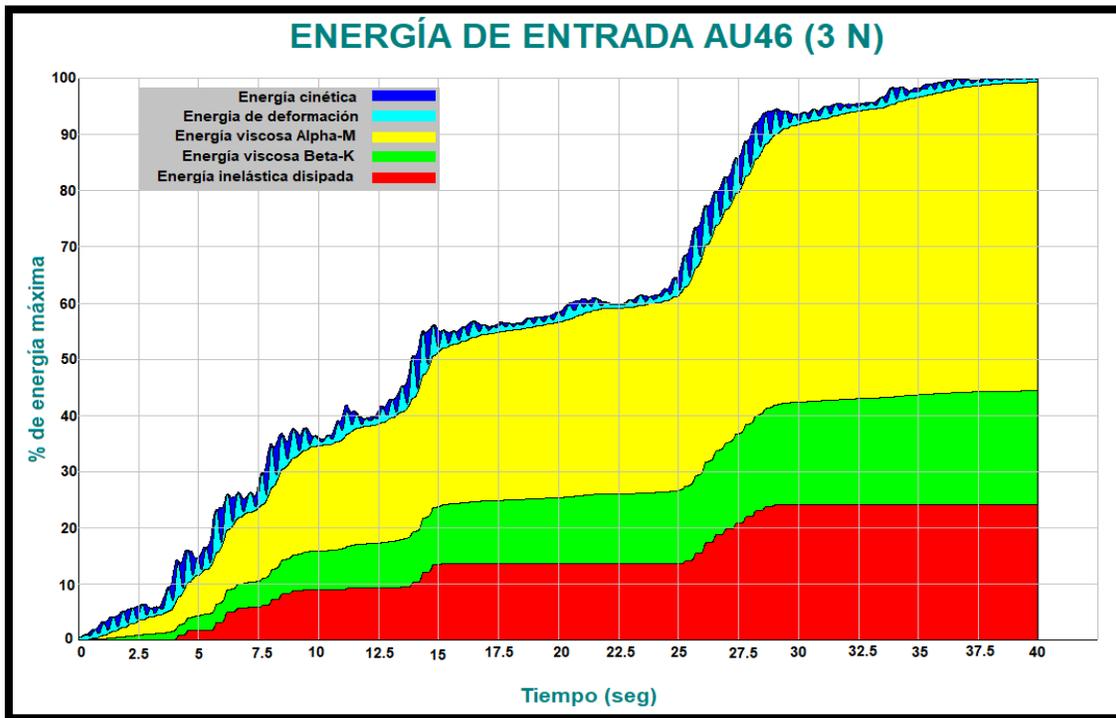


Figura 104 Curvas de balance de energía para modelo de tres niveles con registro de acelerograma AU46

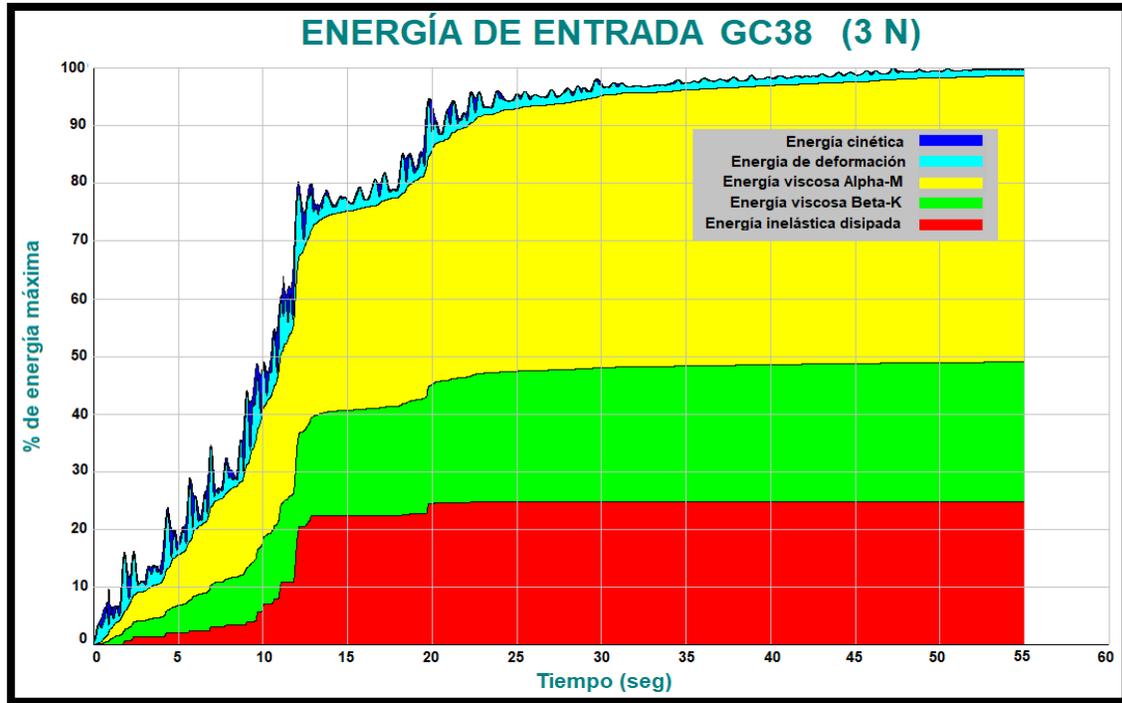


Figura 105 Curvas de balance de energía para modelo de tres niveles con registro de acelerogramaGC38

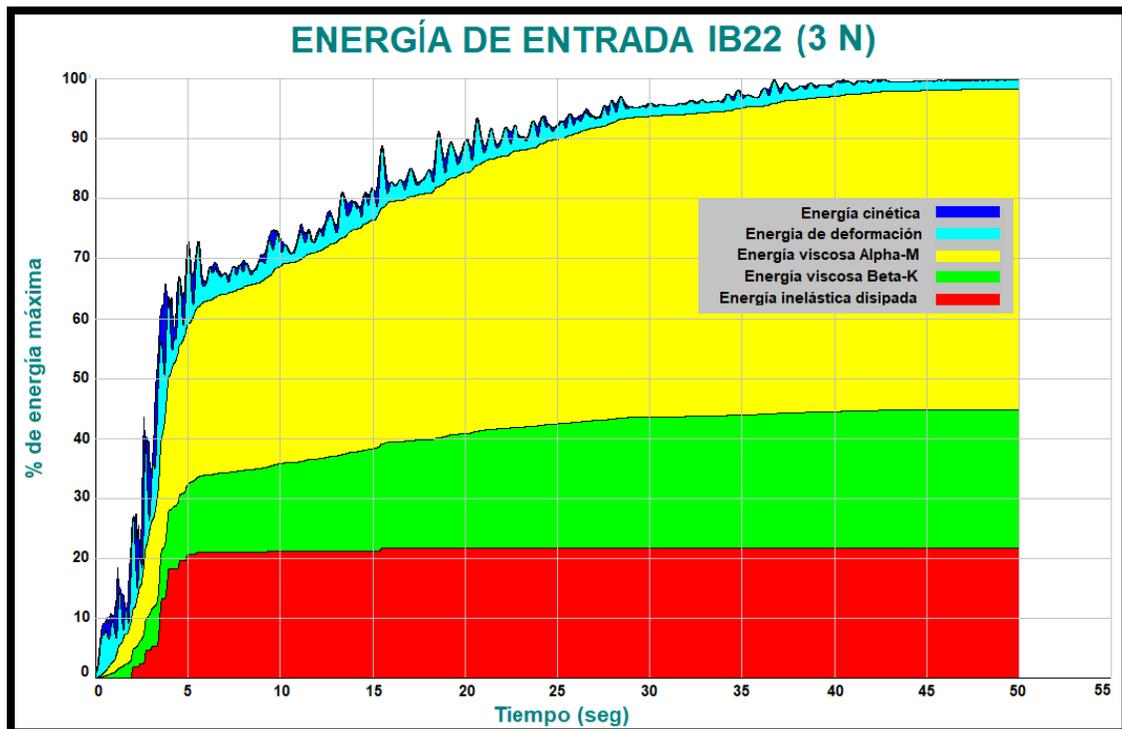


Figura 106 Curvas de balance de energía para modelo de tres niveles con registro de acelerograma IB22

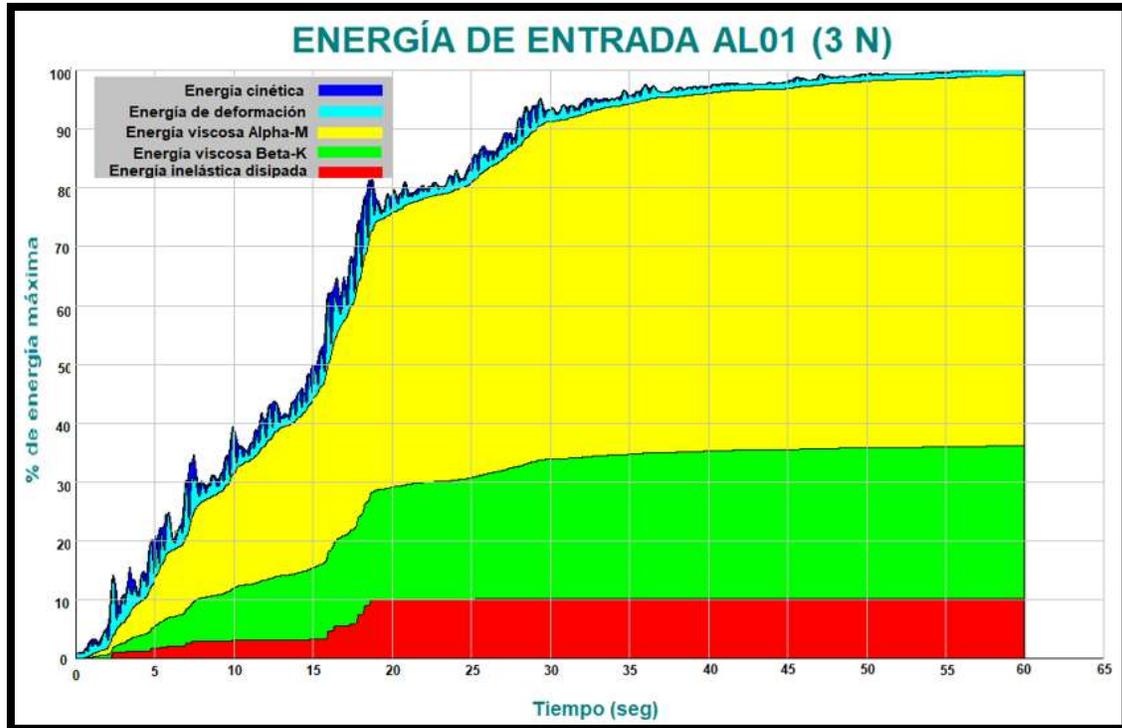


Figura 107 Curvas de balance de energía para modelo de tres niveles con registro de acelerograma AL01

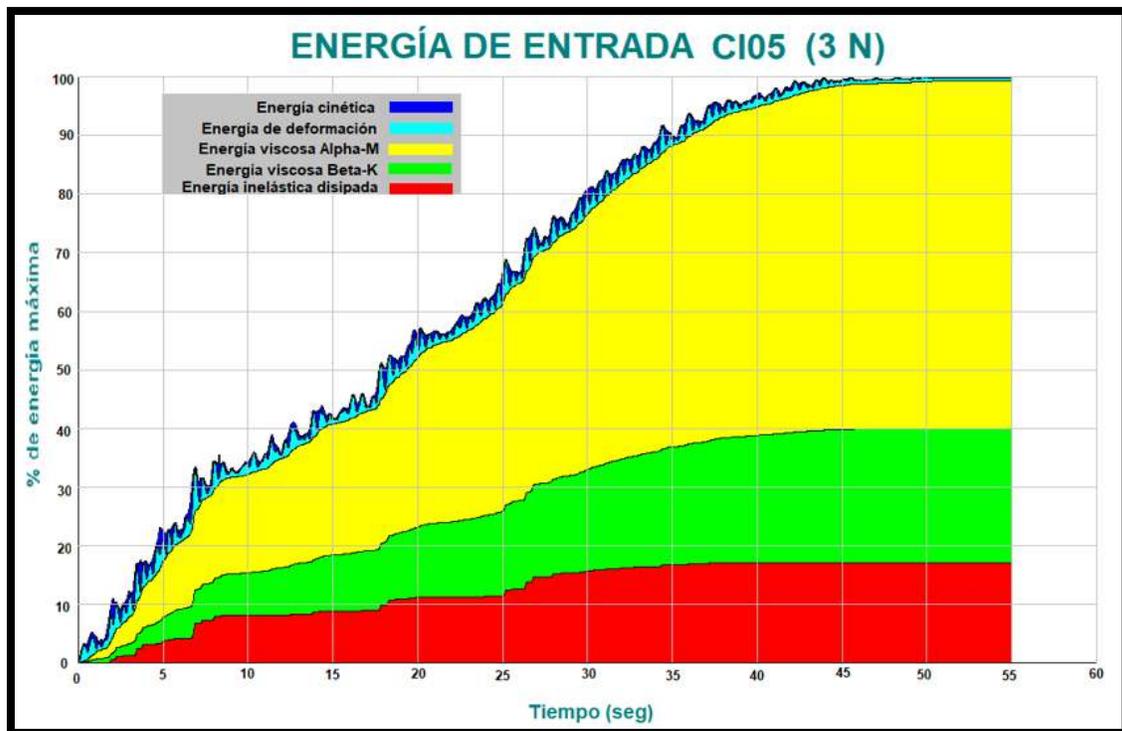


Figura 108 Curvas de balance de energía para modelo de tres niveles con registro de acelerograma CI05

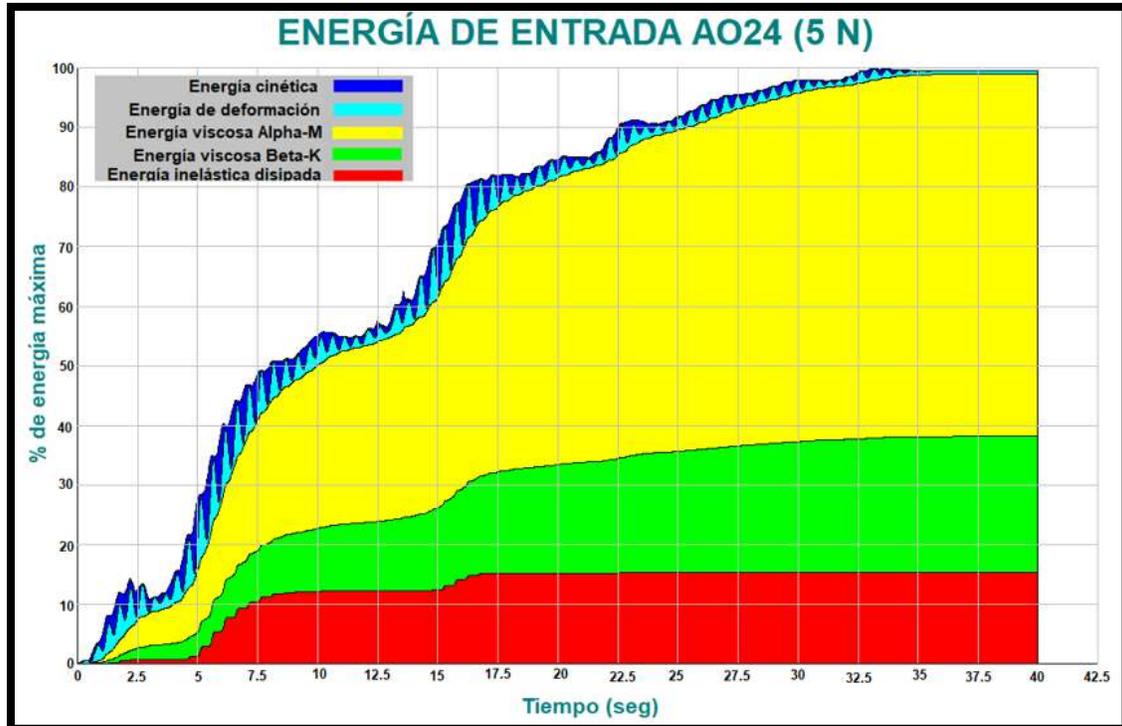


Figura 109 Curvas de balance de energía para modelo de cinco niveles con registro de acelerograma AO24

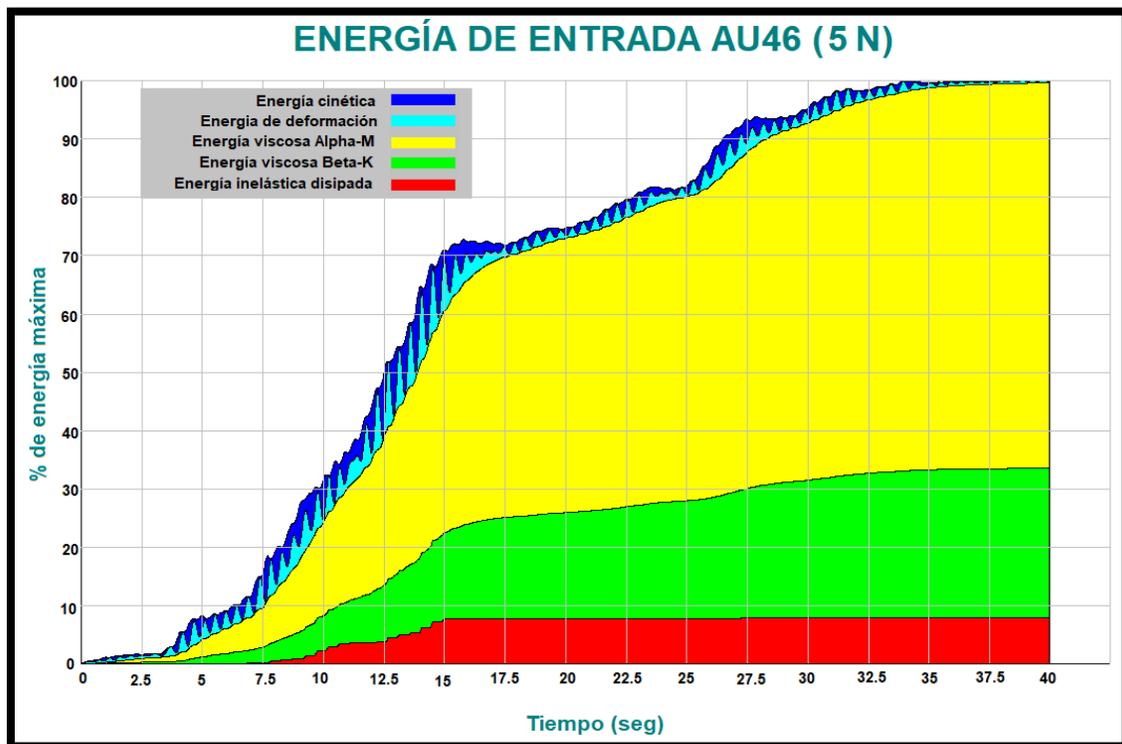


Figura 110 Curvas de balance de energía para modelo de cinco niveles con registro de acelerograma AU46

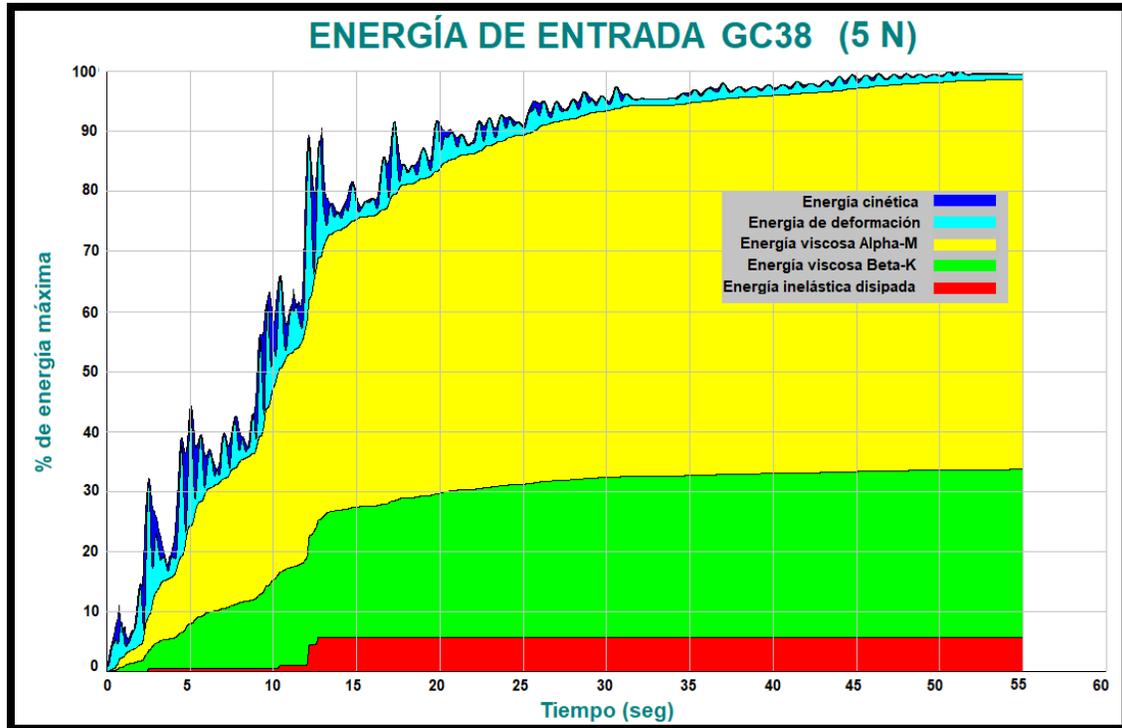


Figura 111 Curvas de balance de energía para modelo de cinco niveles con registro de acelerograma GC38

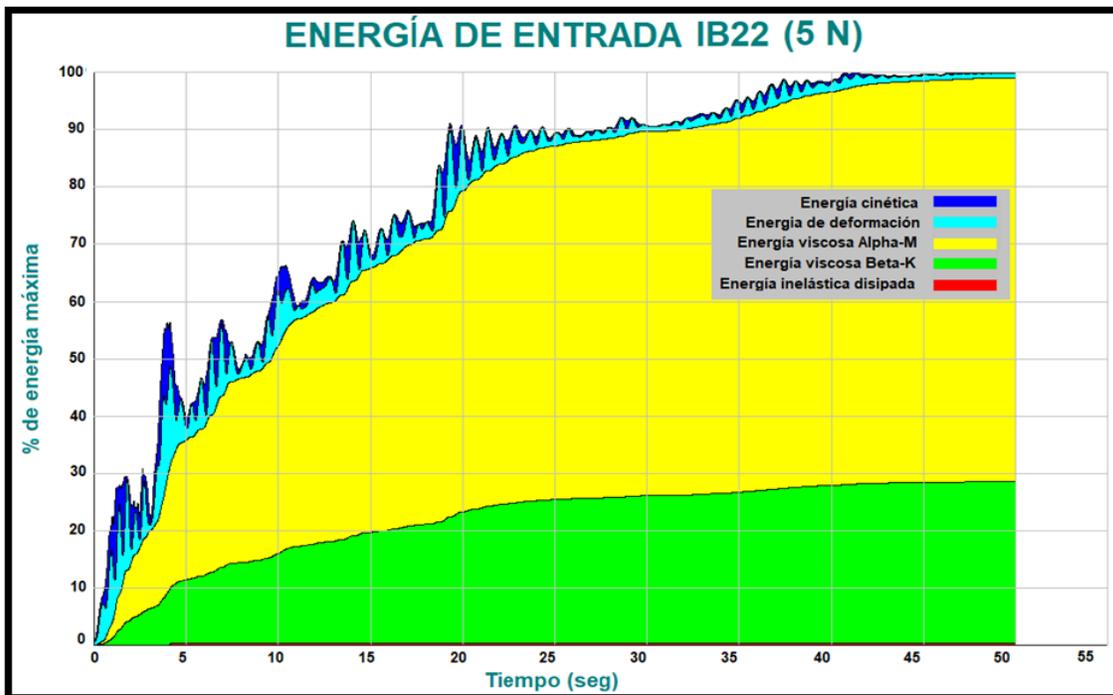


Figura 112 Curvas de balance de energía para modelo de cinco niveles con registro de acelerograma IB22



Figura 113 Curvas de balance de energía para modelo de cinco niveles con registro de acelerograma AL01



Figura 114 Curvas de balance de energía para modelo de cinco niveles con registro de acelerograma CI05

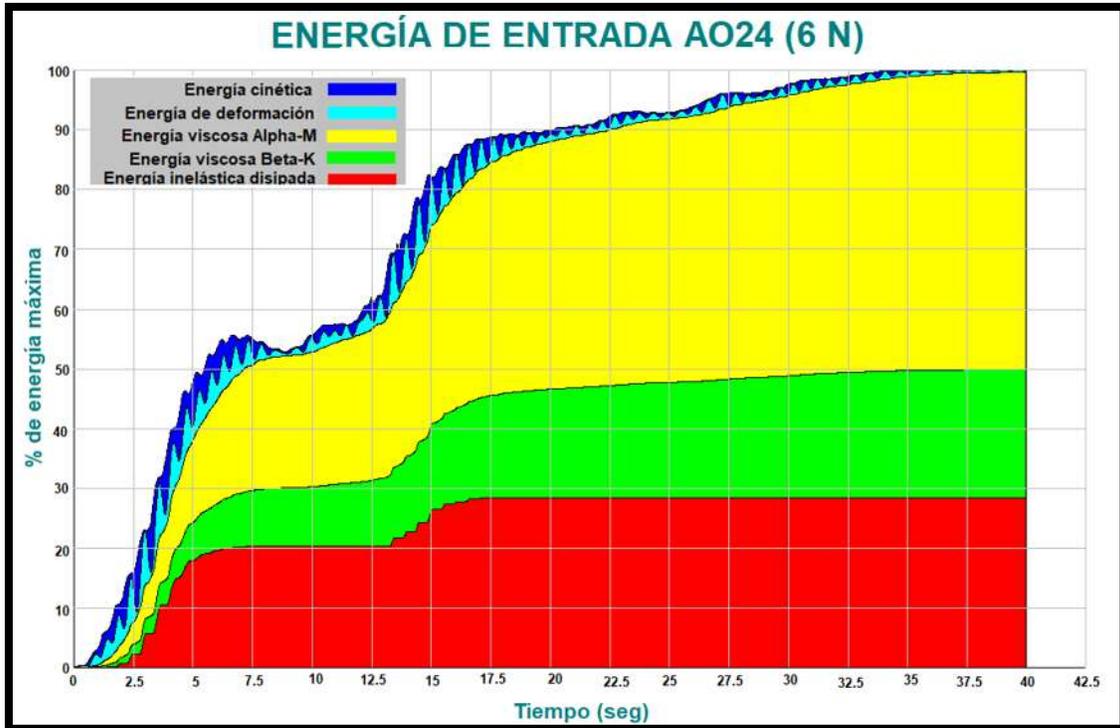


Figura 115 Curvas de balance de energía para modelo de seis niveles con registro de acelerograma AO24

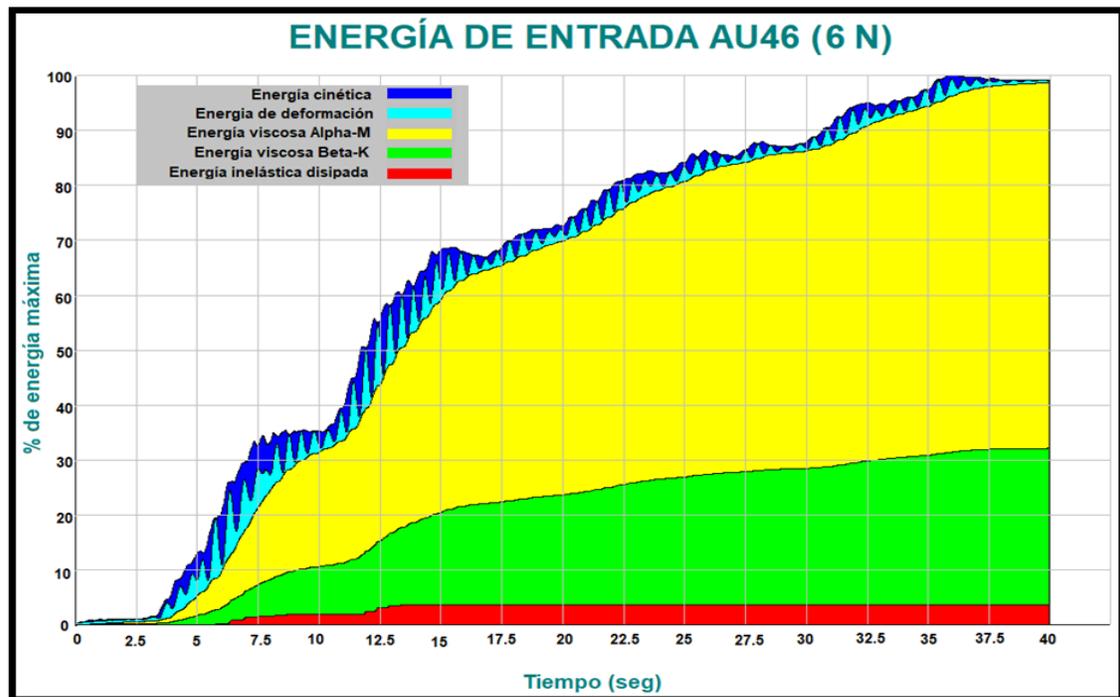


Figura 116 Curvas de balance de energía para modelo de seis niveles con registro de acelerograma AU46

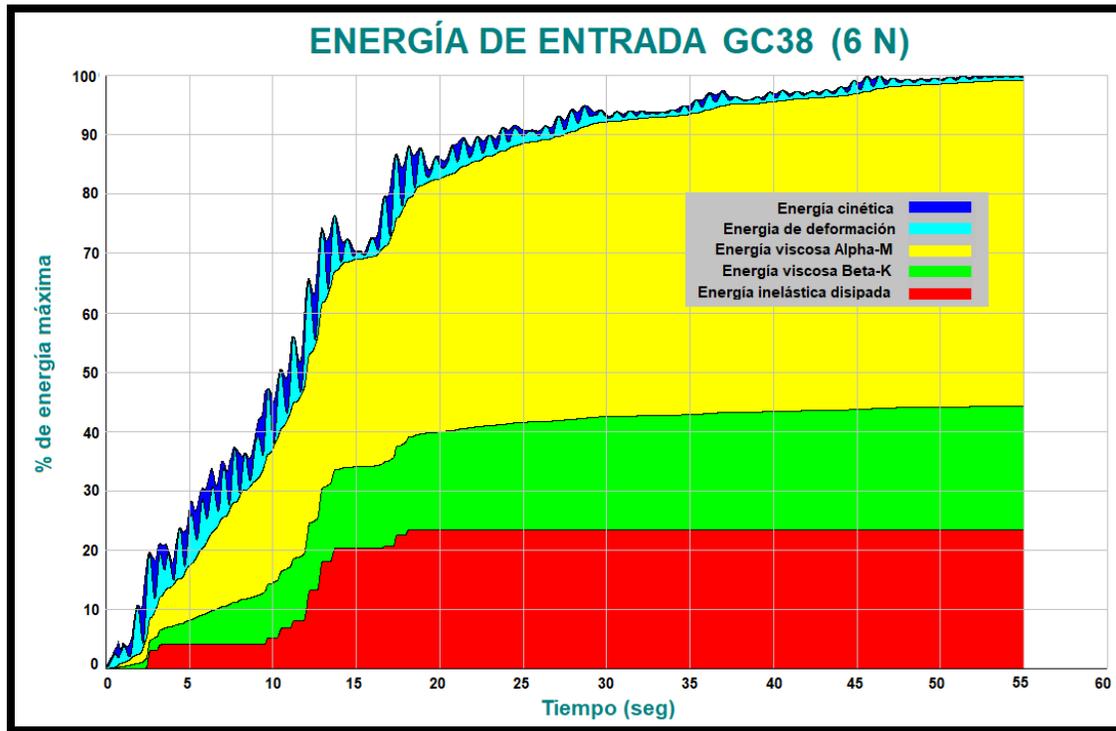


Figura 117 Curvas de balance de energía para modelo de seis niveles con registro de acelerograma GC38

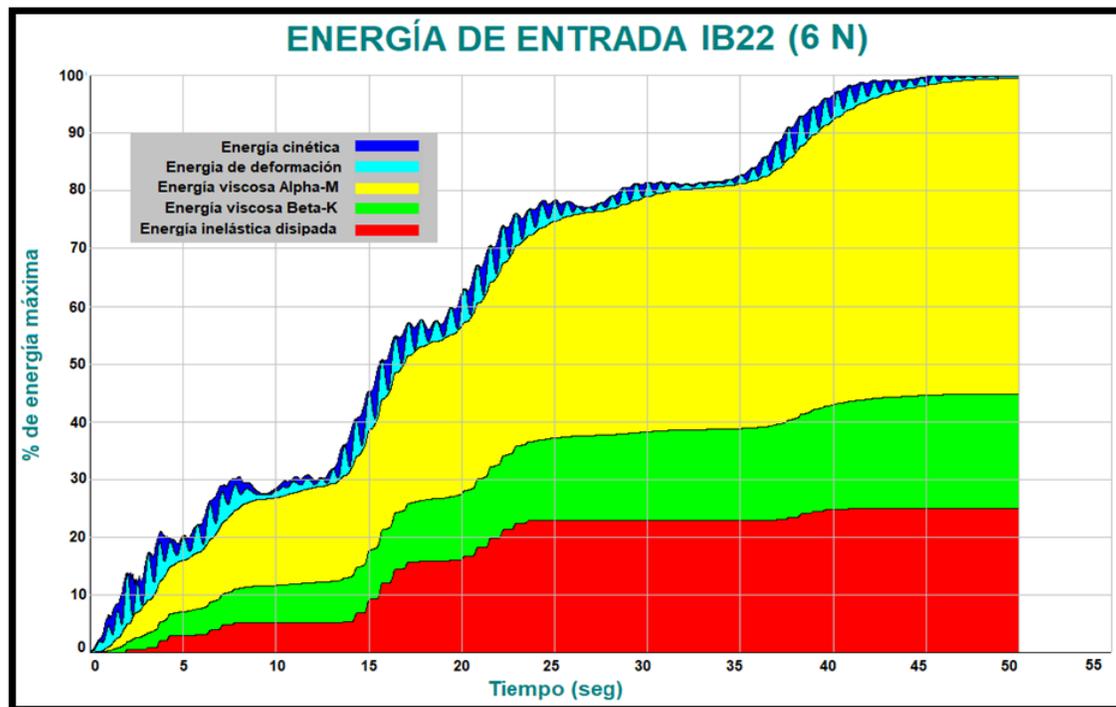


Figura 118 Curvas de balance de energía para modelo de seis niveles con registro de acelerograma IB22

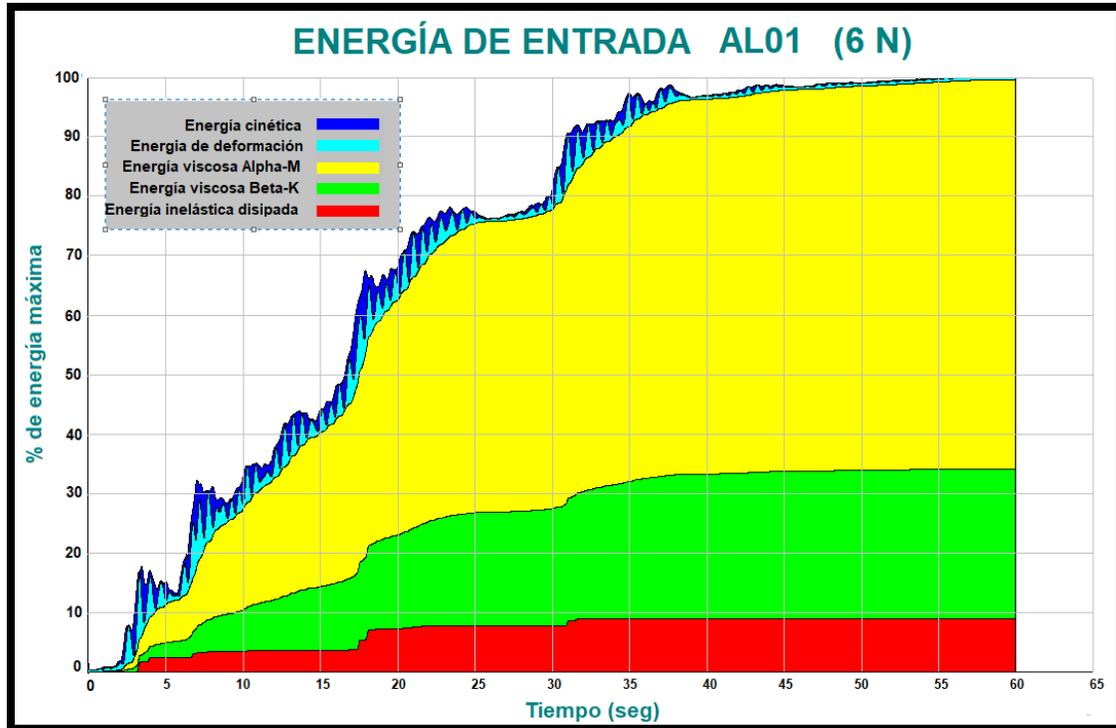


Figura 119 Curvas de balance de energía para modelo de seis niveles con registro de acelerograma AL01

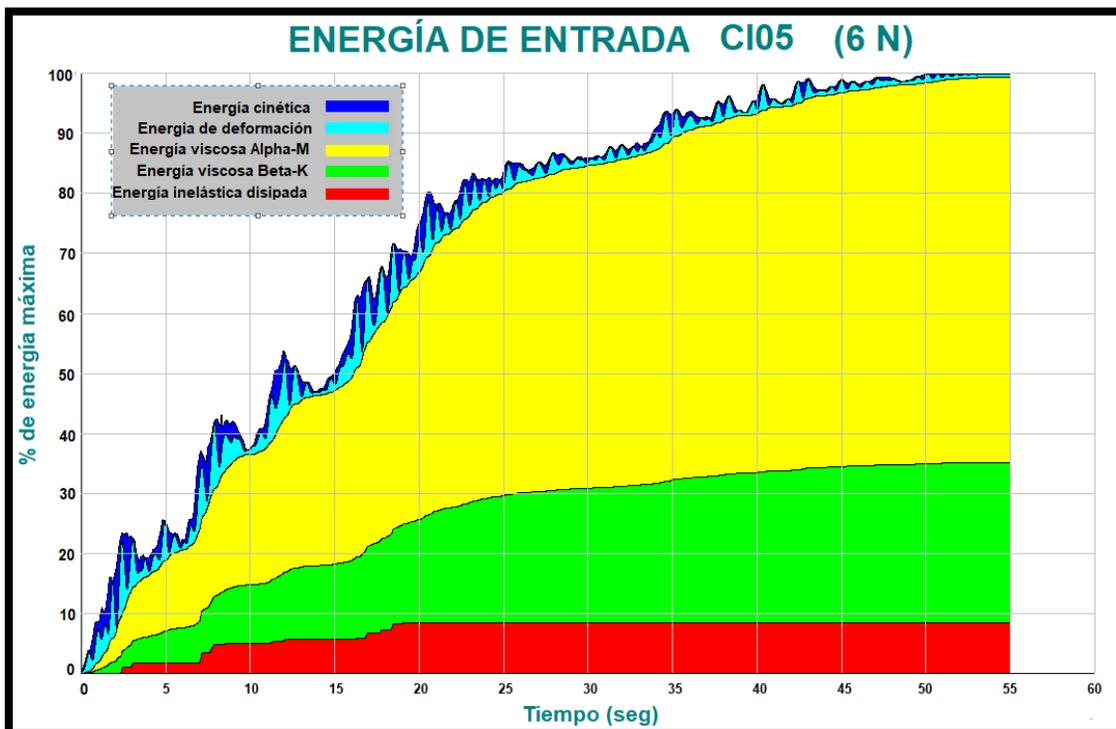


Figura 120 Curvas de balance de energía para modelo de seis niveles con registro de acelerograma CI05

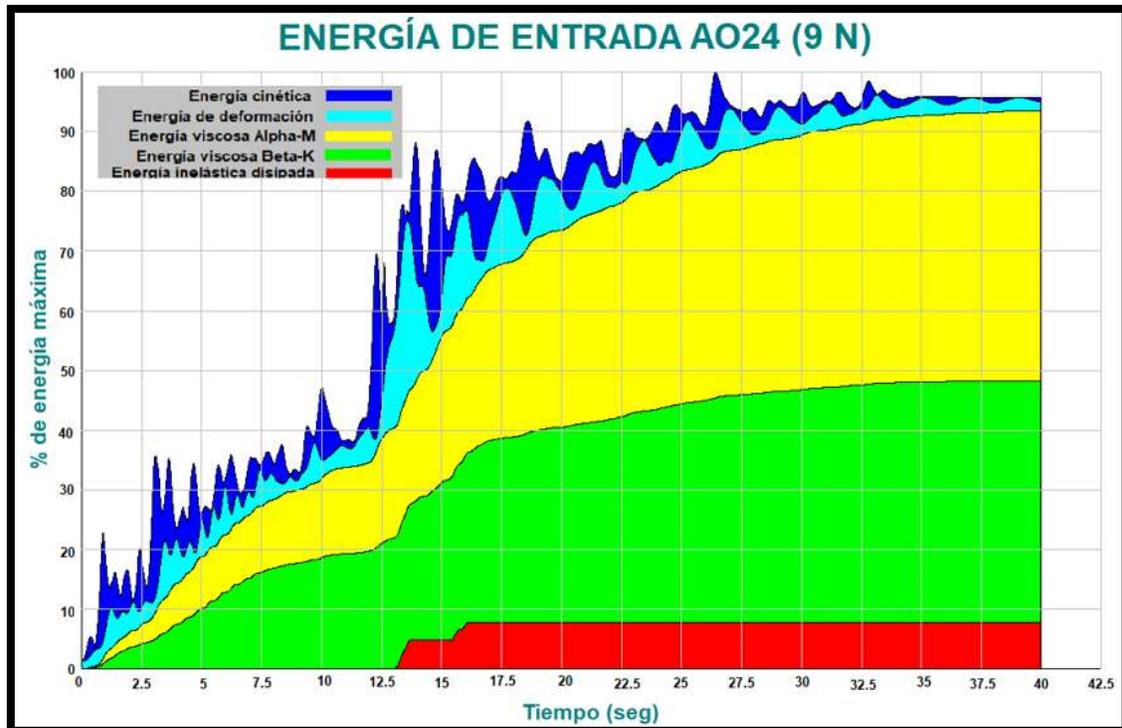


Figura 121 Curvas de balance de energía para modelo de nueve niveles con registro de acelerograma AO24

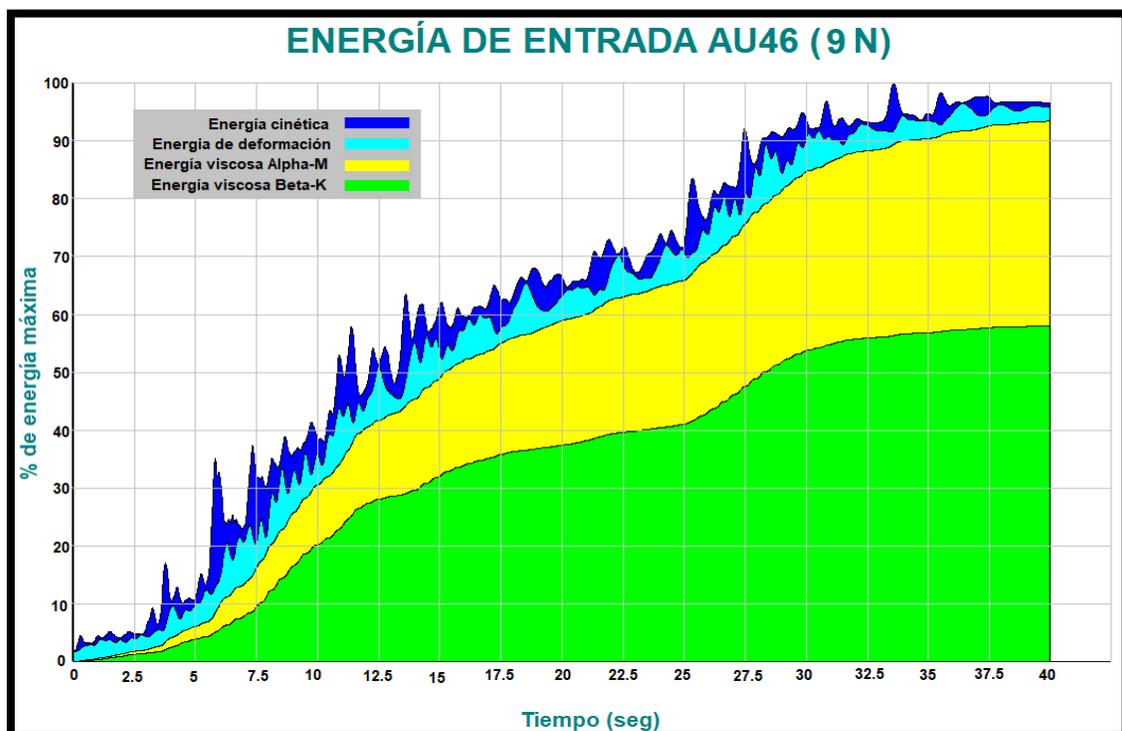


Figura 122 Curvas de balance de energía para modelo de nueve niveles con registro de acelerograma AU46

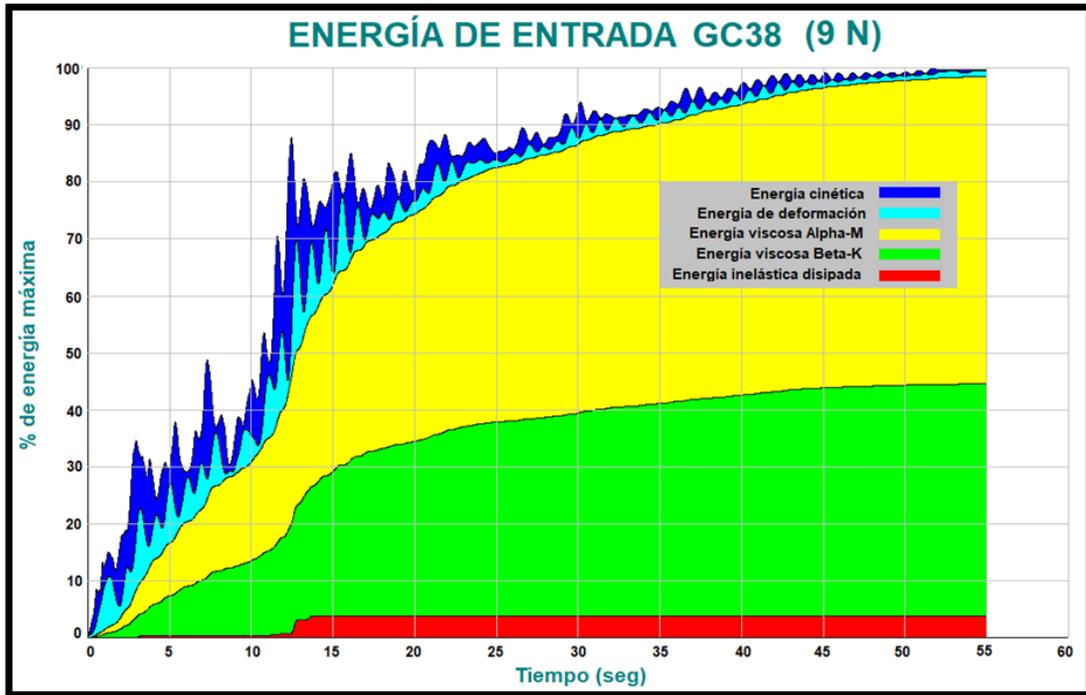


Figura 123 Curvas de balance de energía para modelo de nueve niveles con registro de acelerograma GC38

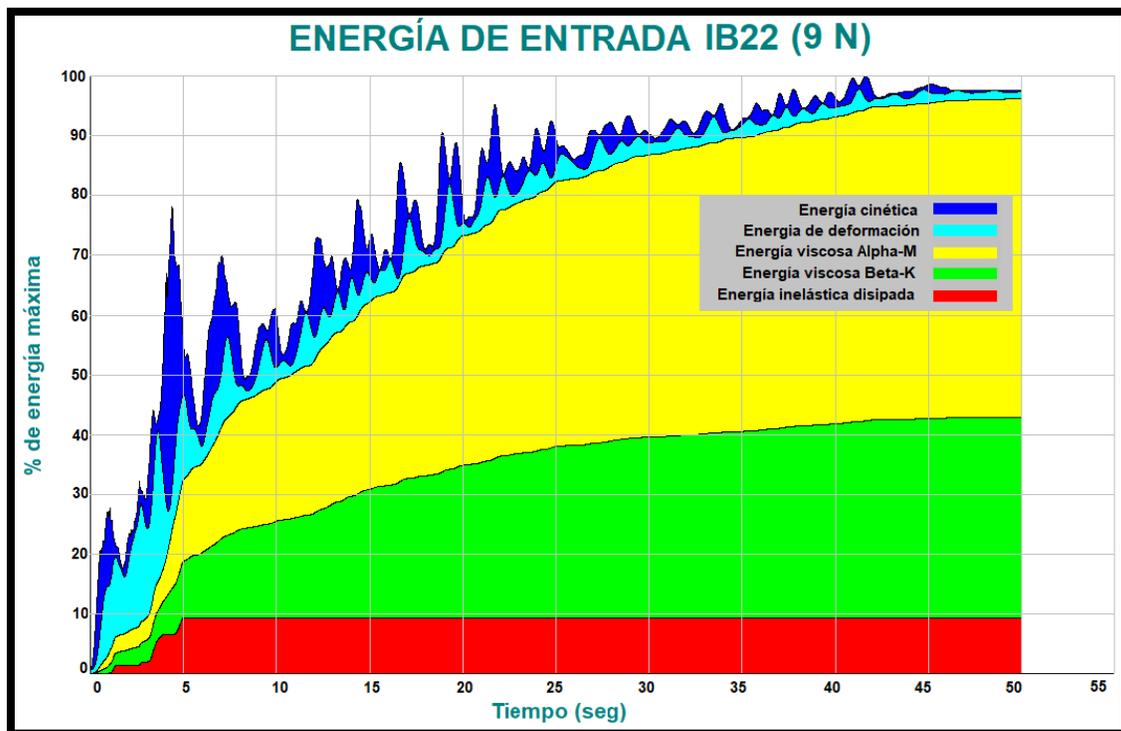


Figura 124 Curvas de balance de energía para modelo de nueve niveles con registro de acelerograma IB22



Figura 125 Curvas de balance de energía para modelo de nueve niveles con registro de acelerograma AL01

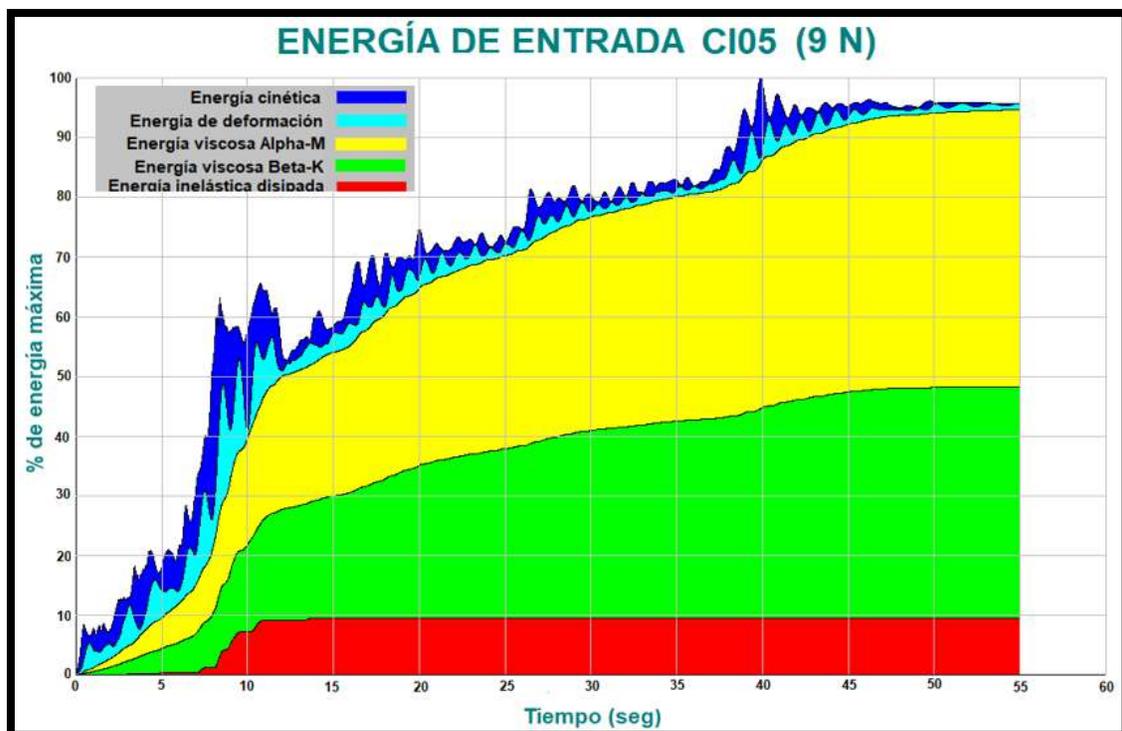


Figura 126 Curvas de balance de energía para modelo de nueve niveles con registro de acelerograma CI05



Figura 127 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 1 del modelo de tres niveles con registro de acelerograma AO24



Figura 128 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 2 del modelo de tres niveles con registro de acelerograma AO24

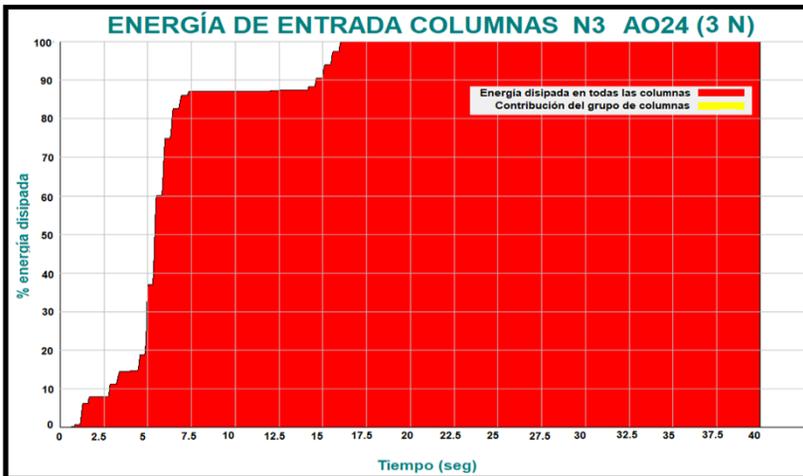


Figura 129 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 3 del modelo de tres niveles con registro de acelerograma AO24

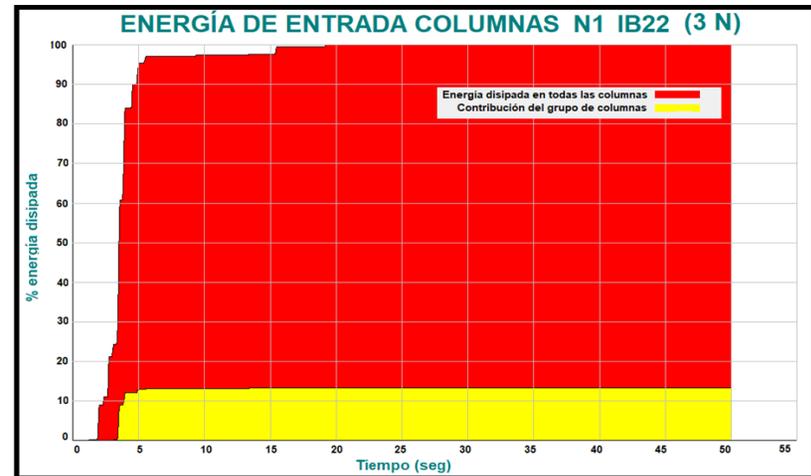


Figura 130 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 1 del modelo de tres niveles con registro de acelerograma IB22



Figura 131 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 2 del modelo de tres niveles con registro de acelerograma IB22

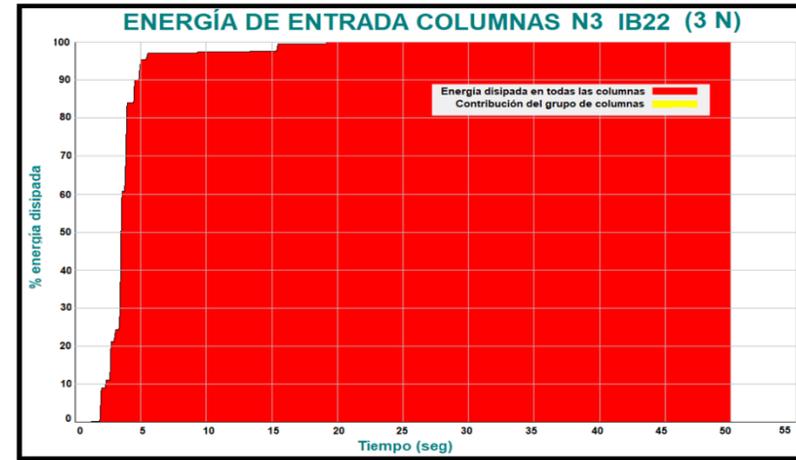


Figura 132 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 3 del modelo de tres niveles con registro de acelerograma IB22



Figura 133 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 1 del modelo de tres niveles con registro de acelerograma AL01



Figura 134 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 2 del modelo de tres niveles con registro de acelerograma AL01



Figura 135 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 3 del modelo de tres niveles con registro de acelerograma AL01

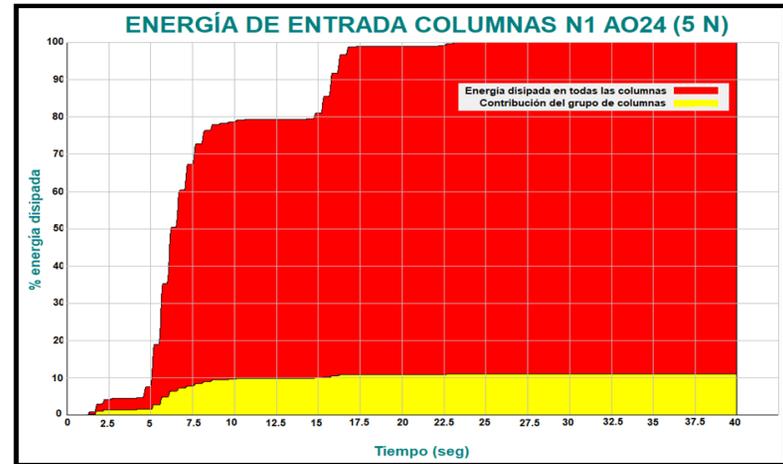


Figura 136 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 1 del modelo de cinco niveles con registro de acelerograma AO24



Figura 137 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 2 del modelo de cinco niveles con registro de acelerograma AO24



Figura 138 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 3 del modelo de cinco niveles con registro de acelerograma AO24

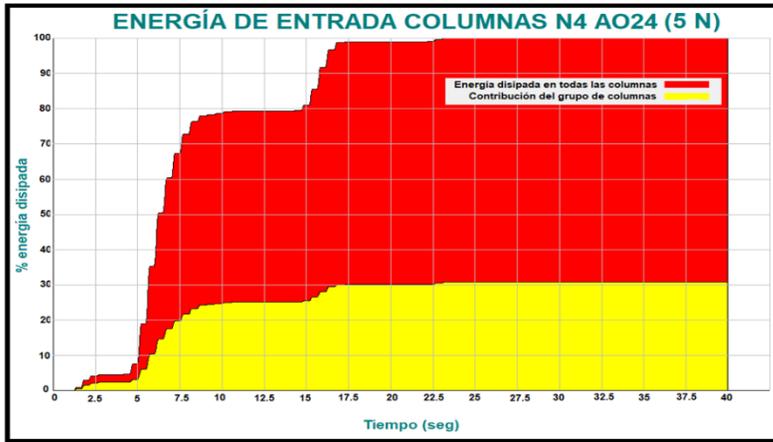


Figura 139 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 4 del modelo de cinco niveles con registro de acelerograma AO24

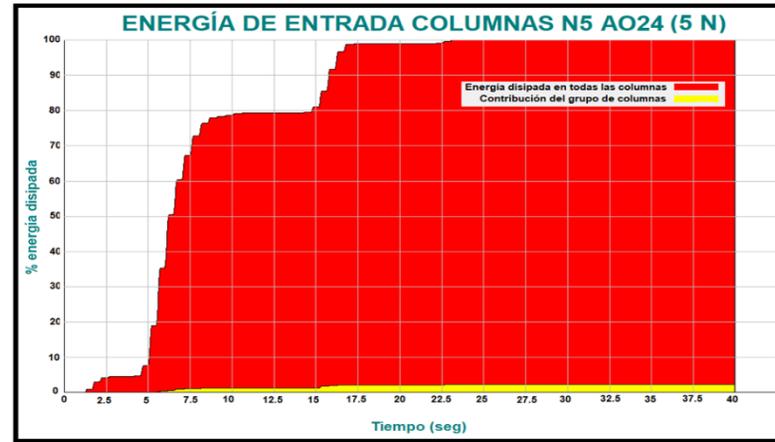


Figura 140 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 5 del modelo de cinco niveles con registro de acelerograma AO24

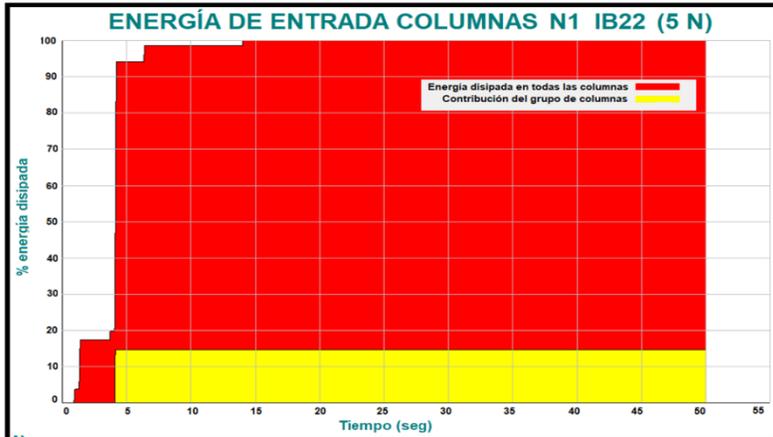


Figura 141 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 1 del modelo de cinco niveles con registro de acelerograma IB22



Figura 142 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 2 del modelo de cinco niveles con registro de acelerograma IB22

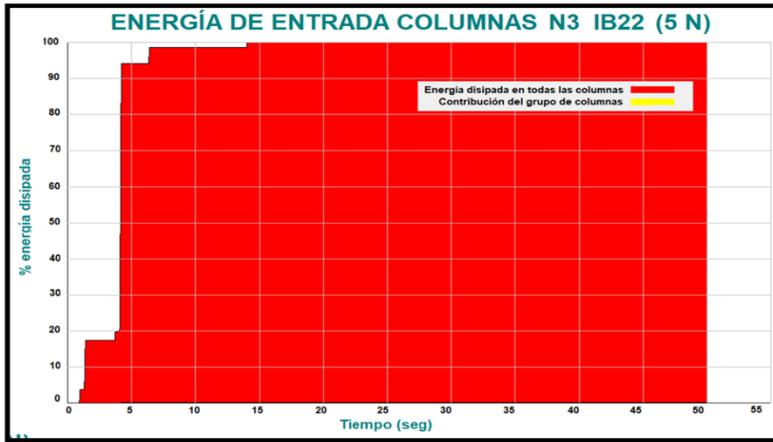


Figura 143 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 3 del modelo de cinco niveles con registro de acelerograma IB22

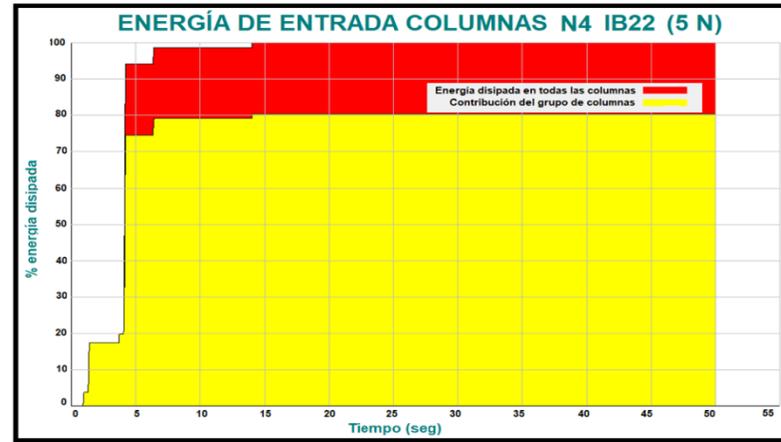


Figura 144 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 4 del modelo de cinco niveles con registro de acelerograma IB22

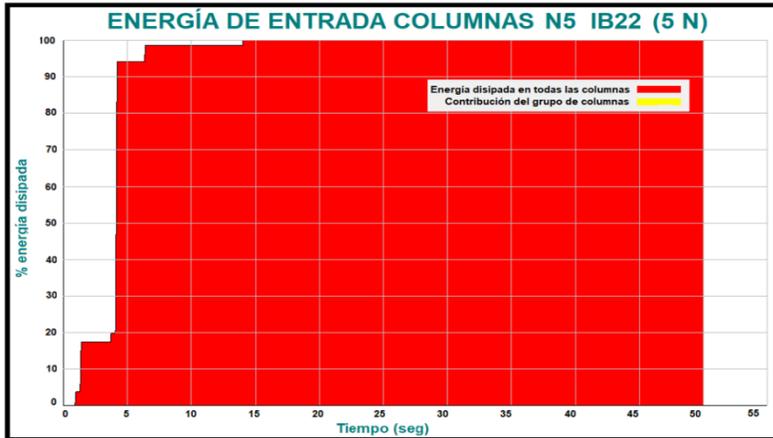


Figura 145 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 5 del modelo de cinco niveles con registro de acelerograma IB22

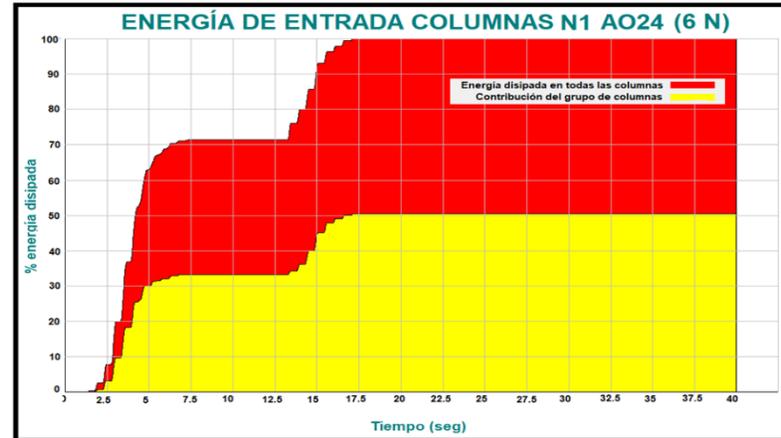


Figura 146 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 1 del modelo de seis niveles con registro de acelerograma AO24

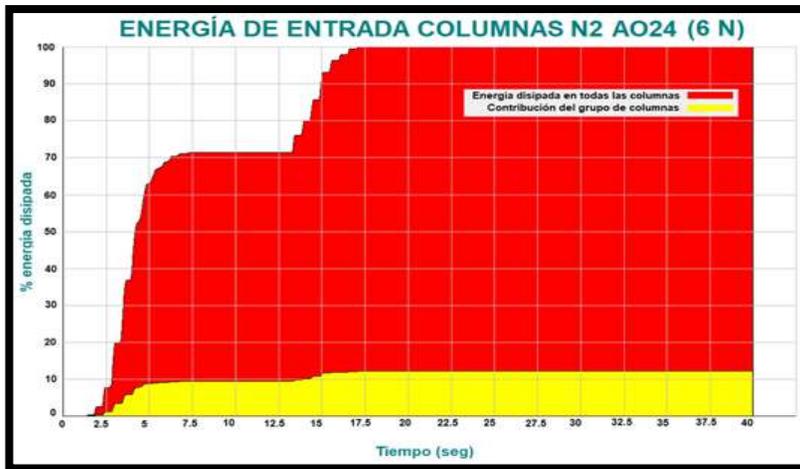


Figura 147 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 2 del modelo de seis niveles con registro de acelerograma AO24



Figura 148 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 3 del modelo de seis niveles con registro de acelerograma AO24



Figura 149 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 4 del modelo de seis niveles con registro de acelerograma AO24



Figura 150 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 5 del modelo de seis niveles con registro de acelerograma AO24

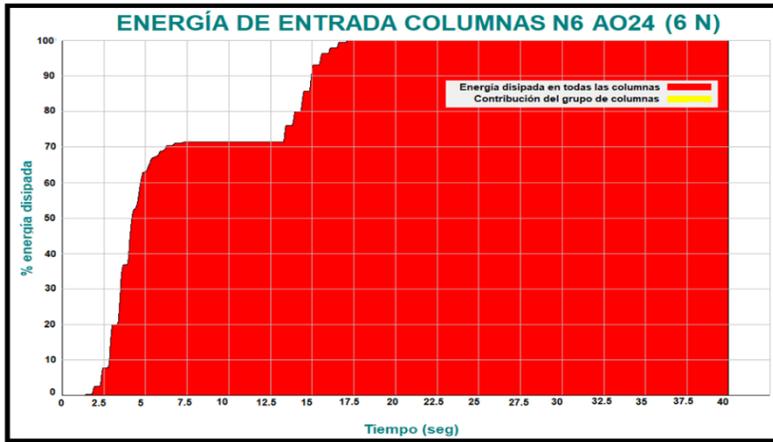


Figura 151 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 6 del modelo de seis niveles con registro de acelerograma AO24

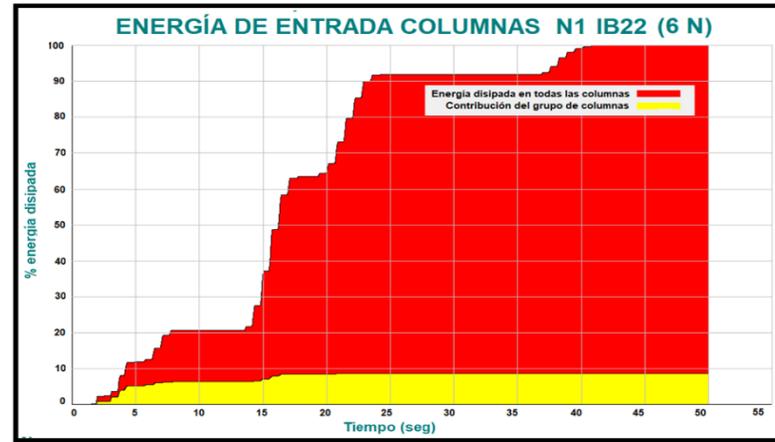


Figura 152 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 1 del modelo de seis niveles con registro de acelerograma IB22

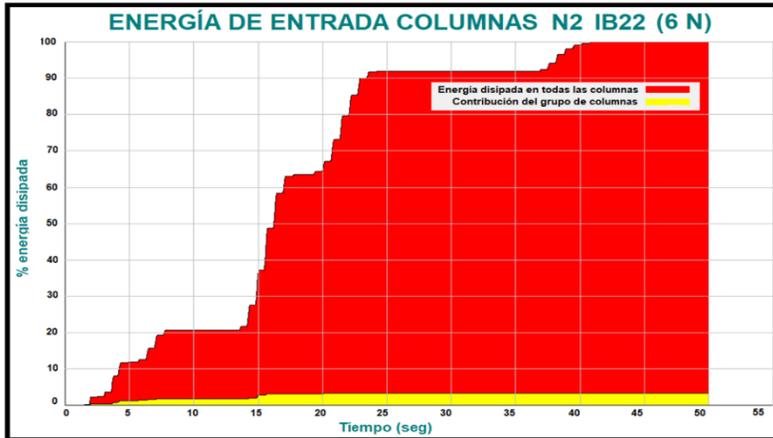


Figura 153 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 2 del modelo de seis niveles con registro de acelerograma IB22

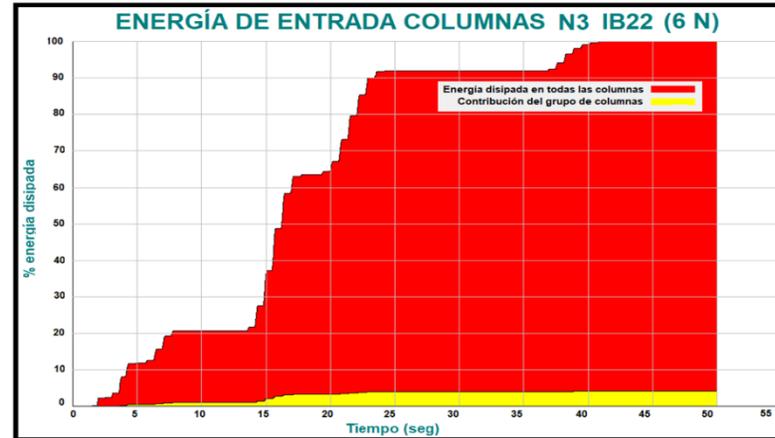


Figura 154 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 3 del modelo de seis niveles con registro de acelerograma IB22

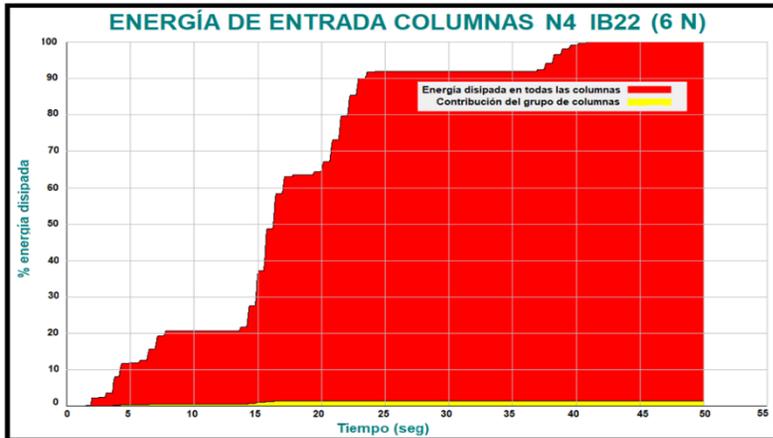


Figura 155 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 4 del modelo de seis niveles con registro de acelerograma IB22

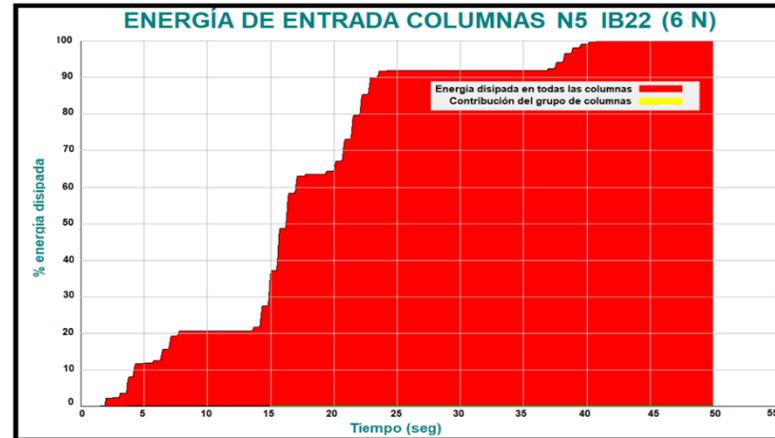


Figura 156 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 5 del modelo de seis niveles con registro de acelerograma IB22

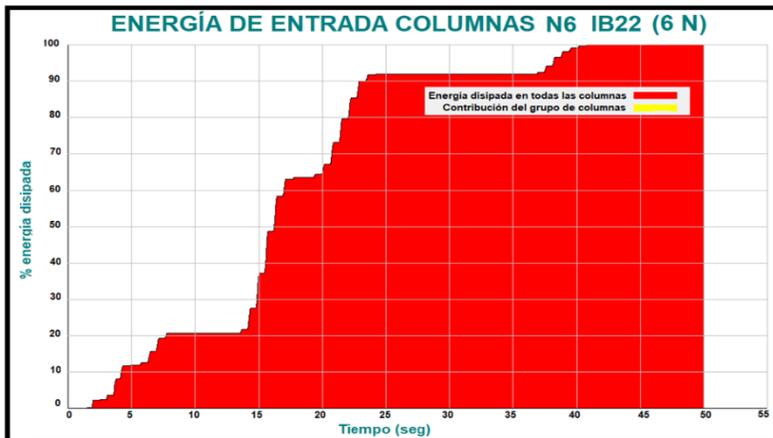


Figura 157 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 6 del modelo de seis niveles con registro de acelerograma IB22



Figura 158 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 1 a 9 del modelo de nueve niveles con registro de acelerograma A024



Figura 159 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 1 a 5 del modelo de nueve niveles con registro de acelerograma IB22



Figura 160 Curvas de energía histerética para columnas de nivel 6 a 9 del modelo de nueve niveles con registro de acelerograma IB22

CAPÍTULO VII

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En las **Figura 161** a **Figura 164**, se muestra un resumen de las distorsiones por nivel de cada uno de los modelos correspondientes para las cinco columnas en estudio. Además, se observa un área en color vino en cada una de las figuras, la cual representa el valor de las distorsiones aceptadas con base en el Reglamento de construcción para el Distrito Federal de 1976 (Luis Echeverría Álvarez, 1976) .

Se observó que las distorsiones de entre piso para el modelo analítico de tres niveles (**Figura 161**) presento valores mayores en cada nivel sobre los permitidos por el reglamento, Es importante notar que las distorsiones más grandes se encontraron en el primer nivel; también se puede observar que la columna con puntal a la derecha fue la más afectada presentando distorsiones de 0.02.

Para el modelo analítico de cinco niveles (**Figura 162**) se puede observar de nuevo como las mayores distorsiones se encuentran en el primer nivel, a diferencia del modelo analítico de tres niveles, el modelo de cinco niveles presento las mayores distorsiones en la columna central del primer nivel alcanzando un valor de 0.04, el doble del valor alcanzado por la columna del modelo de tres niveles. En la **Figura 163**, correspondiente al modelo analítico de seis niveles se observa que en los primero tres niveles se presentaron valores de distorsiones mayores que en el resto de estos, es evidente que las mayores distorsiones se presentaron en la columna de esquina libre de puntales, presentando distorsiones cuyo valor alcanzado fue de 0.07. Finalmente, en la **Figura 164**, se muestran las distorsiones del modelo analítico de nueve niveles en este caso se observa que las distorsiones fueron bastante significantes en los diversos niveles, pero las mayores se presentaron en la columna con dos puntales del segundo valor alcanzando valores de 0.13.

Sin duda alguna las distorsiones que se obtuvieron a través de los análisis no lineales nos demuestran las deficiencias que presentaban la mayoría de las edificaciones.

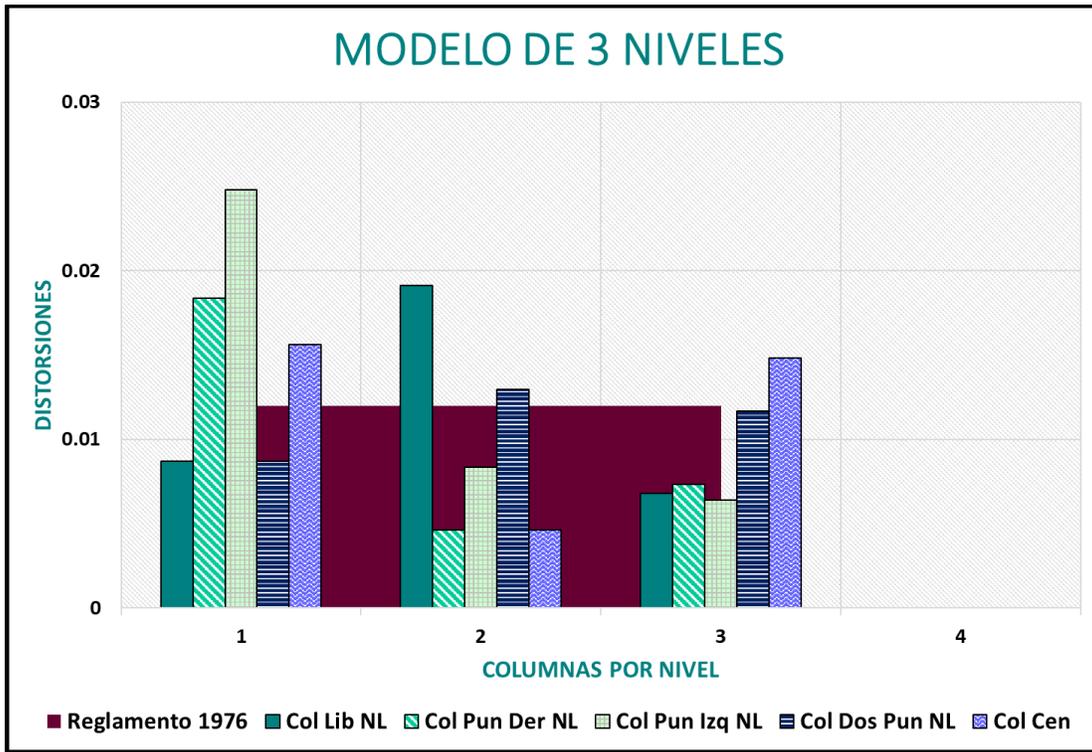


Figura 161 Distorsiones para las cinco columnas de estudio para modelo de tres niveles

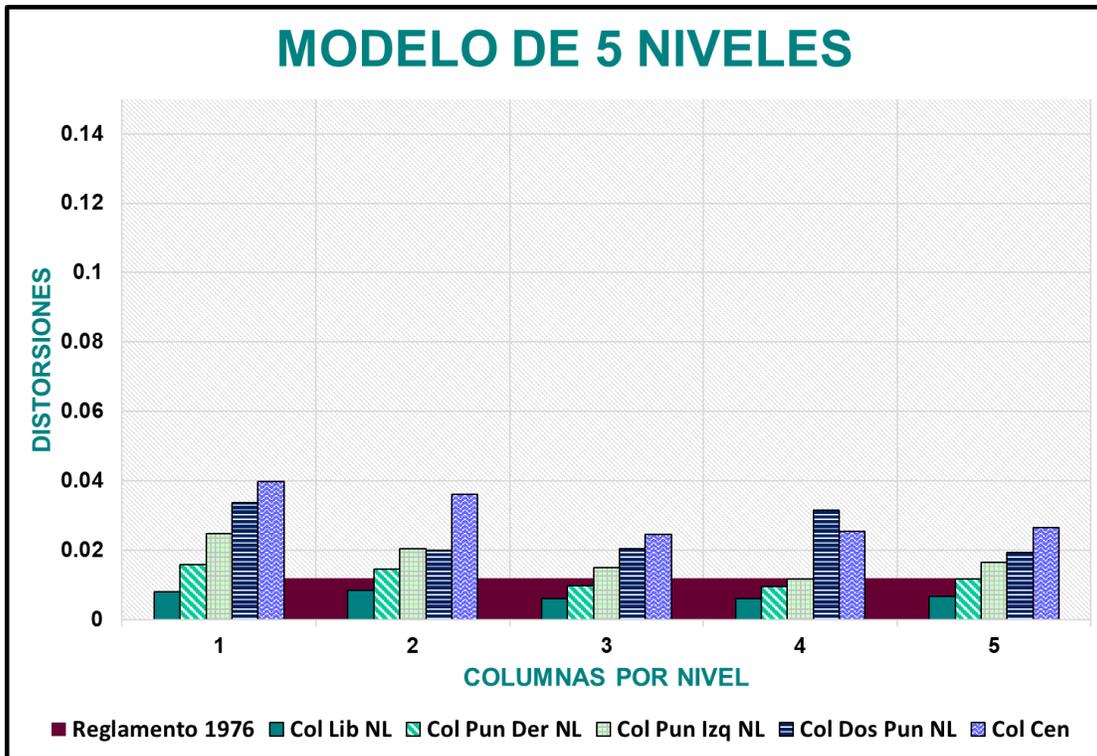


Figura 162 Distorsiones para las cinco columnas de estudio para modelo de cinco niveles

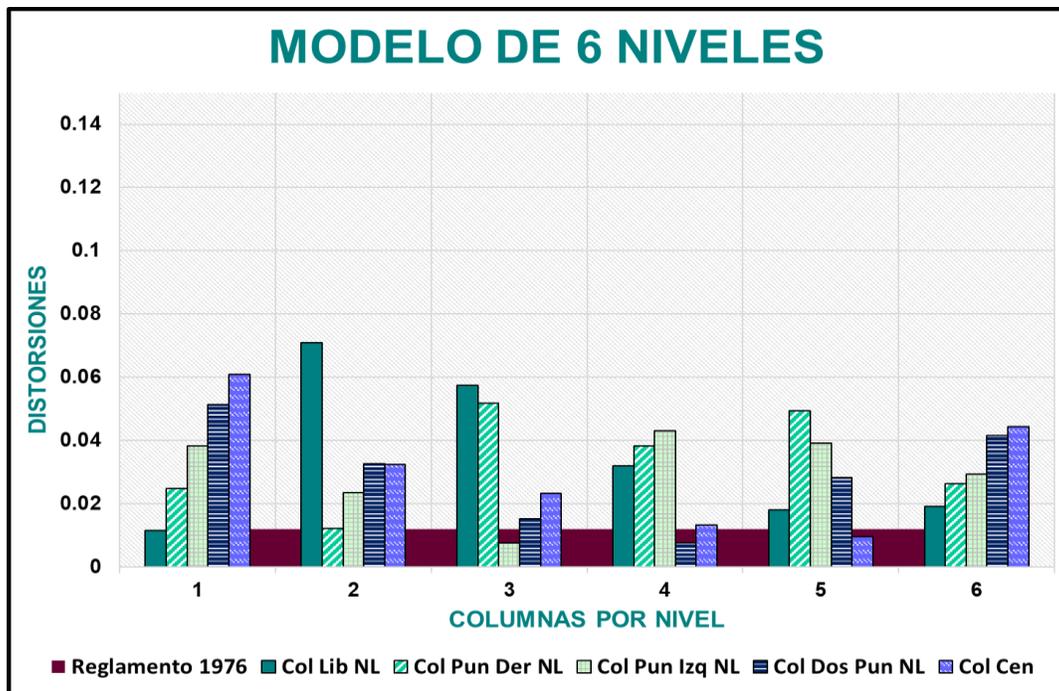


Figura 163 Distorsiones para las cinco columnas de estudio para modelo de seis niveles

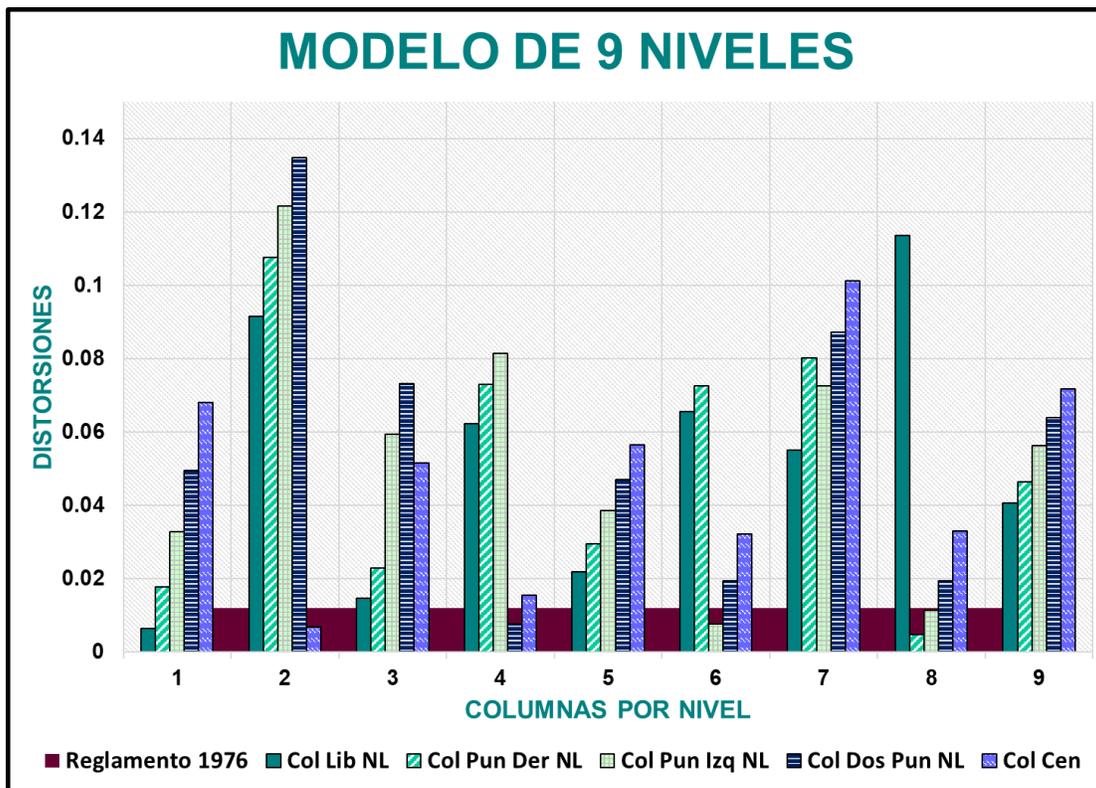


Figura 164 Distorsiones para las cinco columnas de estudio para modelo de nueve niveles

Es importante, además de conocer los valores de las distorsiones de entre piso conocer los valores de las rotaciones para los análisis no lineales, pues nos permiten conocer la rigidez en los elementos. En las figuras **Figura 99** a **Figura 102**, se muestran los valores de las rotaciones promedio para cada uno de los cuatro modelos analíticos respecto a los resultados obtenidos en base a los 28 acelerogramas de terreno flexible.

En la **Figura 99**, se muestran las rotaciones para el modelo de tres niveles, se puede observar que las mayores rotaciones se presentaron en el primer nivel, más específicamente para la columna de esquina libre de puntales alcanzando valores de 0.0036, mientras que las rotaciones del tercer nivel son apenas apreciables. En la **Figura 100**, correspondiente al modelo de cinco niveles, se puede observar que, a diferencia del modelo de tres niveles, este presentó los mayores valores en el cuarto nivel, siendo de nuevo la columna de esquina libre la más afectada por alcanzar valores de rotación de 0.002. En la **Figura 101**, correspondiente al modelo de seis niveles se puede apreciar que las mayores rotaciones se presentaron en los dos primeros niveles, ubicándose las mayores en la columna de esquina libre de puntales del segundo nivel con valores 0.002. Y finalmente en la **Figura 102**, se muestran las rotaciones correspondientes para el modelo analítico de nueve niveles; se observa que los valores mayores se obtuvieron en el tercer y cuarto nivel de nuevo en la columna de esquina libre con valores de 0.0025 y 0.0028 respectivamente.

CAPÍTULO VIII

CONCLUSIONES

- Las distorsiones son un parámetro que nos permite conocer los desplazamientos que presenta la edificación. Cuando las distorsiones sobrepasan lo permitido por el reglamento es un indicativo de daño en los elementos. En todos los modelos analíticos de estudio las distorsiones sobrepasaban el valor permitido, mientras que las distorsiones obtenidas con los análisis lineales permanecieron por debajo del valor permitido por el reglamento.
- Las rotaciones son otro parámetro importante que nos permite conocer los desplazamientos en los elementos respecto a su eje vertical. Para todos los modelos de análisis resultó muy claro que el elemento más afectado bajo este parámetro fue la columna de esquina libre.
- Una recomendación para evitar este tipo de daños en las edificaciones futuras es que deslinden los muros de los marcos para no incrementar más rigidez a la estructura, o de lo contrario reforzar los elementos de esquina.
- La investigación también demostró la importancia de realizar los análisis no lineales para el diseño de cualquier edificación que se desee realizar en el futuro.

REFERENCIAS

- ASCE. (2000). American Society of Civil Engineers, FEMA 356 Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Building. *Rehabilitation*, (November).
- CENAPRED. (2019). Atlas Nacional de Riesgos.
- CIRES. (2019). Centro de Instrumentación y Registro Sísmico, a. c. Retrieved from <http://www.cires.org.mx/>
- Cruz Atienza, V. M., Krishna Singh, S., & Ordaz Schroeder, M. (2017). ¿ Qué ocurrió el 19 de septiembre de 2017 en México ? 7, 18. Retrieved from <http://www.revista.unam.mx/2017v18n7/que-ocurrio-el-19-de-septiembre-de-2017-en-mexico/>
- Earthquake Hazards Program. (2019). USGS.
- Escobar Sánchez, J. A. (2011). *Nueva filosofía de diseño por torsion sismica en estructuras de mamposteria*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Escobar Sánchez, J. A., Cisneros, C. M., & Roberto, G. M. (2004). Evaluación de Criterios de Diseño por Torsión Sísmica Estática para Edificios de Varios Pisos. *Revista de Ingeniería Sísmica No. 70*, 63–89.
- Galvis, F., Miranda, E., Heresi, P., Dávalos, H., & Silos, J. R. (2017). Preliminary Statistics of Collapsed Buildings in Mexico City in the September 19 , 2017 Puebla-Morelos Earthquake. Retrieved from http://www.construccionenacero.com/sites/construccionenacero.com/files/u11/ci40_40801_stanford_university_reporte_preliminar.pdf
- Giorgana Peralta, S. (2004). *Efectos de torsion accidental en estructuras con masa y rigidez lateral uniformemente distribuida*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gobierno, J. D. E. (2004). GACETA OFICIAL DEL DISTRITO FEDERAL.
- Google Maps. (n.d.). Google Maps. Retrieved November 11, 2019, from <https://www.google.com.mx/maps/@19.704831,-101.2044726,15z>
- INSTITUTO DE INGENIERIA DE LA UNAM. (2019). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO*. Distrito Federal.
- ley del Congreso en 1879. (2019). USGS science for a changing world. Retrieved from <https://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/slabs.html>
- Mendoza Carvajal, R. C. (2007). *Evaluación de métodos para estimar la excentricidad de estructuras a partir de pruebas dinámicas*. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Ruiz, J. L. (2017). *FOTOS : El antes y después de los edificios derrumbados en CDMX*. Retrieved from http://www.construccionenacero.com/sites/construccionenacero.com/files/u11/ci40_40203_edificios_derrumbados.pdf
- Secretaria de Desarrollo Económico. (2017). INVENTARIO DE DAÑOS EN LA CDMX En imágenes todas las zonas colapsadas de la CDMX y su impacto económico, 1–44.
- SMIS. (2017). *BOLETÍN SISMO M7.1, Puebla - Morelos* (Vol. 2017). Retrieved from <http://www.smis.org.mx/pdf/BOLETINSISMOM7.1.pdf>
- SSN. (2017). *Sismo del día 19 de Septiembre de 2017, Puebla-Morelos (M 7.1)*. Retrieved from http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2017/SSNMX_rep_esp_20170919_Puebla-Morelos_M71.pdf?fbclid=IwAR1sacUr2H7P5VbhZDklxtpbwtwD8B8vggyTcCQCOAK7IEZZJ4fs3fuV8kg
- UNAM. (2019). Servicio Sismológico Nacional. Retrieved from <http://www.ssn.unam.mx/>
- Zapata Munera, U. (1993). *Comportamiento en torsion de modelos de estructuras de cortante de varios niveles*.