

UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS PUEBLA

Escuela de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental



**Análisis en dominio de tiempo de edificaciones sometidas a
sismo en la Ciudad de Puebla**

Tesis que, para completar los requisitos del Programa de Honores presenta el
estudiante

José Luis Arellano Mendoza

166210

Licenciatura en Ingeniería Civil

Dr. José Manuel Cabrera Miranda

San Andrés Cholula, Puebla.

Primavera 2024

Hoja de firmas

Tesis que, para completar los requisitos del Programa de Honores presenta el
estudiante José Luis Arellano Mendoza 166210

Director de Tesis

Dr. José Manuel Cabrera Miranda

Presidente de Tesis

Dra. María Guadalupe Estrada Meza

Secretario de Tesis

Mtro. Marcelino Cruz González

Índice

1. Introducción	4
2. Justificación.....	5
3. Objetivos	8
4. Marco teórico	8
4.1. Análisis sísmico.....	8
4.2. Análisis de valores extremos.....	9
5. Metodología	11
6. Resultados y discusión.....	19
7. Conclusiones y recomendaciones	24
8. Bibliografía	25

1. Introducción

El comportamiento sísmico de una estructura es un factor de gran importancia en la actualidad, especialmente en países como México, cuyo contexto tectónico lo hace vulnerable a eventos sísmicos de manera frecuente.

Brindando cierto contexto, los sismos son un tipo de fenómeno natural que, según se describe en la publicación *Sismos* del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2019) son producto de un rompimiento repentino en la corteza terrestre, que genera la propagación de vibraciones. De manera similar, el British Geological Survey (s.f.), los define como una liberación repentina de energía de tensión en la corteza terrestre, que resulta en ondas de sacudida. Por su parte, en *Encyclopedia of Natural Hazards*, se da a entender que estos pueden tratarse de un fenómeno tectónico o volcánico, que implica el movimiento de la roca de la corteza, generando una sacudida o temblor (Cassidy, 2016). Siendo los sismos, por lo tanto, movimientos derivados de una liberación de energía a través del suelo, se sobreentiende la relación intrínseca que existe entre estos y cualquier estructura asentada sobre la corteza terrestre.

Por otro lado, a pesar de tratarse de uno de los fenómenos naturales menos predecibles y por consiguiente potencialmente más peligroso que otros, la realidad es que tan solo en 2023, de acuerdo con estadísticas del Servicio Sismológico Nacional, a lo largo del territorio de México se registraron un total de 24,205 eventos sísmicos, de entre los cuales menos del 1% rebasaron la magnitud 5 de la Escala Richter (SSN, 2023); de manera que la ocurrencia de la interacción sismo-estructura se puede interpretar como una muy frecuente, aunque muy

pocas veces de gran intensidad. Sin embargo, como se menciona en el libro *Basic Earthquake Engineering*, los sismos mayores con poder destructivo son menos frecuentes que otros riesgos considerados en el diseño estructural, pero el reto radica en el pronunciado impacto que estos tienen en el ambiente construido (Sucuoglu & Akkar, 2014). Así pues, la importancia de analizar el comportamiento sísmico de una estructura radicaría en determinar si la reacción de esta es adecuada dadas las condiciones que esta presenta de manera particular.

Con el fin de lograr lo anterior, existen diferentes metodologías de análisis y diseño que pueden ser aplicadas. Sin embargo, una de las que parece tener el mayor potencial para simular resultados más cercanos a la realidad es el método de elemento finito. Como metodología, Rao (2001) explica que se trata del reemplazo de un sistema inicial por múltiples piezas más pequeñas, cada una asumiendo un comportamiento como un elemento continuo conocido como un elemento finito; que se asume puede hacerse converger a la solución exacta por medio de la reducción del tamaño de los elementos finitos. En la actualidad, es posible realizar este tipo de análisis por medio de software especializado el cual tiene la capacidad de modelar y resolver este tipo de sistemas.

2. Justificación

El análisis sísmico de estructuras por medio del método de elemento finito no es un proceso nuevo, por esta razón, como parte de la presente investigación se procedió a realizar una revisión de literatura para identificar los enfoques que las investigaciones hasta la fecha han tomado respecto tema, así como posibles áreas de oportunidad.

Por un lado, se encontró en el artículo *Nonlinear Finite Element Analysis of the Seismic Retrofitting of Existing Buildings*, que el modelo analítico creado con base en una estructura existente arrojó resultados con un buen nivel de similitud y precisión de simulación del edificio en cuestión (Tao, et. al., 2021). Así mismo, el artículo *Comparative assessment of finite element macro-modelling approaches for seismic análisis of non-engineered masonry constructions*, menciona que, para su modelo simplificado de estructura de mampostería no diseñada, los resultados mostraron ser computacionalmente eficientes para análisis estáticos y dinámicos no lineales, particularmente en un enfoque a la mitigación de la vulnerabilidad sísmica de este tipo de estructuras (Ravichandran, et. al., 2021). De modo que, un análisis por el método de elemento finito de un modelo simplificado de estructura ya ha sido probado como resultados satisfactorios.

Por su parte, en el artículo *Comparative Study of Dynamic Earthquake Analysis with Spectral Design and Time History Methods*, se realizó un análisis comparativo del comportamiento dinámico de una estructura tanto en dominio de tiempo como contra espectros de diseño sísmico, usando como valor de comparación el periodo natural de la estructura, encontrando que, para el caso de diseño, los resultados cumplían en todos los casos con el código correspondiente (Seputra & Priastiwi, 2023).

Relativo al tema de la normativa de construcción, se encontró el artículo *Analysis of Earthquake-Resistant Design Approach for Buildings in Mexico*, el cual plantea la interrogante de la conveniencia de los criterios de diseño sismorresistente con base en los factores de diseño correspondientes (Carrillo, et. al., 2014). Siendo este de igual manera un tema controversial, especialmente debido a la forma de implementación de los códigos de

diseño por sismo en nuestro país, donde en su mayoría resultan ser adaptaciones o incluso referencias directas a las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del Reglamento de Construcción de la Ciudad de México. En este caso, de igual manera, el tema podría verse beneficiado por una investigación de los parámetros de diseño bajo condiciones particulares a nivel local, pues se desconoce si la normativa local al estar fuertemente influenciada por la de la Ciudad de México, pudiera contar con criterios excedidos para zonas de menor respuesta sísmica como las de la Ciudad de Puebla.

La literatura ha demostrado que los análisis dinámicos/sísmicos en modelos digitales son viables y pueden permitir obtener resultados suficientemente cercanos a la realidad, por lo que se consideró que existía la necesidad de realizar un análisis de este tipo para un contexto local/regional (en el caso específico de este trabajo, en algún punto de la Ciudad de Puebla) con miras a identificar si los resultados obtenidos mantienen congruencia con algunas de las observaciones de otras investigaciones. De igual manera, se decidió tomar este enfoque con el fin de poder analizar el efecto de las características particulares del comportamiento sísmico local, haciendo uso de bases de datos locales de aceleraciones sísmicas registradas en el pasado y tomando ventaja de las herramientas de modelación digital y análisis de elemento finito, para intentar encontrar valores de esfuerzos máximos aplicables de manera específica al lugar de estudio.

3. Objetivos

El propósito de esta tesis es analizar el comportamiento sísmico de una estructura simple de tres niveles, modelada a base de elementos finitos, contra valores de acelerogramas disponibles registrados en la Ciudad de Puebla.

Asimismo, este estudio busca identificar los esfuerzos máximos presentes en la estructura, y estimar la probabilidad de excedencia de estos con base en los resultados de las simulaciones de los acelerogramas históricos.

4. Marco teórico

4.1. Análisis sísmico

El cálculo básico de un sistema con múltiples grados de libertad implica una combinación de matrices de masa y rigidez, sin embargo, cuando el análisis se vuelve dinámico, es necesario añadir la interacción de vectores de aceleración relativa a la base. (Paz, 2019).

La ecuación de respuesta sísmica generalmente adquiere una estructura en la forma de:

$$[M]\{\ddot{u}_r\} + [K]\{u_r\} = -[M]\{1\}\ddot{u}_s(t), \quad (1)$$

donde $[M]$ se trata de la matriz de masa, $[K]$ la matriz de rigidez, $\{\ddot{u}_r\}$ el vector de aceleración, $\{u_r\}$ el vector de desplazamiento, y \ddot{u}_s la aceleración sísmica.

Con relación a la ecuación (1), es conveniente describir la vibración debida a la aceleración sísmica de la manera

$$\ddot{x}_m + 2\xi_m\omega_m\dot{x}_m + \omega_m^2x_m = -\Gamma_m\ddot{u}_s(t), \quad (2)$$

donde \ddot{x}_m es la aceleración, \dot{x}_m la velocidad, x el desplazamiento, ξ_m el amortiguamiento, ω_m la frecuencia angular, Γ_m el factor de participación y t el tiempo.

Con estas ecuaciones es posible definir el comportamiento dinámico de una estructura de manera general. Sin embargo, en el presente trabajo se hizo uso de la herramienta STAAD.pro, lo que permitió realizar tanto la modelación como los cálculos directamente sobre un sistema de elemento finito con las consideraciones anteriores.

4.2. Análisis de valores extremos

Para el caso de estudio del presente trabajo, la distribución de los valores de esfuerzo máximos es de interés. Por lo tanto, se consideró necesario hacer uso de algunas teorías de probabilidad básica, entre las que destacan la Distribución de Valores Extremos – Gumbel Max y la Estimación de Máxima Verosimilitud (*Maximum Likelihood Estimation*).

La distribución Gumbel Max, como el resto de las distribuciones de valores extremos, se entiende que corresponde a un interés particular en la distribución de dichos máximos en periodo de referencia en vez de la distribución propiamente de estos valores en el tiempo (Faber, 2012). En el caso de la distribución Gumbel Max, esta se determinó que podría ajustarse de buena manera al tipo de valores con los que se trabajaría, dado el comportamiento esperado de distribución de los máximos esfuerzos por sismo. Esta distribución tiene una densidad de probabilidad de la siguiente forma,

$$f_{X,T}^{max}(x) = \alpha \exp\{-\alpha(x - u) - \exp[-\alpha(x - u)]\}, \quad (3)$$

donde la variable α es un parámetro de escala mayor a cero, y u es un parámetro de ubicación (*location*). Y cuya media (μ) y desviación estándar (σ) se ven relacionadas a la distribución por medio de las siguientes expresiones,

$$\mu = u + \frac{0.577216}{\alpha}, \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{\pi}{\alpha\sqrt{6}}, \quad (5)$$

Permitiendo así tener valores de comparación para verificar la validez de la función obtenida para la distribución máxima.

Por su parte, el método de Máxima Verosimilitud brinda una herramienta útil para la estimación de riesgo, pues por medio de esta es posible determinar la probabilidad maximizada del parámetro de una función de distribución. Esto se logra por medio de un problema de optimización, en el que se obtienen parámetros de distribución que permiten maximizar la probabilidad de los valores observados. Lo anterior está descrito por las siguientes ecuaciones,

$$L(\theta|\hat{x}) = \prod_{i=1}^n f(x|\hat{x}_i|\theta), \quad (6)$$

donde $L(\theta|\hat{x})$ indica la verosimilitud/probabilidad de ocurrencia de la muestra de valores, $f(x|\hat{x}_i|\theta)$ la función de densidad de probabilidad, y θ los parámetros de distribución. Y la expresión,

$$\min_{\theta}(-L(\theta|\hat{x})), \quad (7)$$

la cual hace referencia al proceso de optimización de los parámetros de la función anterior.

En el presente caso se hizo uso de las funciones antes mencionadas precargadas en el software Matlab, de modo que el análisis probabilístico se pudiera realizar de manera más eficiente y con resultados más precisos.

5. Metodología

Como primera fase, fue necesario elegir un diseño de estructura relativamente sencillo que pudiera ser modelado en el software STAAD.pro y al que se le pudiera realizar el análisis dinámico. El modelo seleccionado fue el resultado simplificado de un proyecto de clase de diseño estructural, en el cual se planteaba el diseño de un centro de convenciones con zonas comerciales (estructura de acero y madera) y área de estacionamiento en la planta baja (estructura de concreto). Dicha estructura se utilizó como modelo, reduciéndola a 2x3 bahías de 2.5x5.0m y tres niveles con alturas y materiales variables. Las dimensiones de los elementos estructurales se detallan en la Tabla 1 y Tabla 2. Las cargas con factores de seguridad por carga muerta y carga viva incluidos se detallan en la Tabla 3.

Material: Concreto	
Columnas	35 × 35 cm
Trabes	20 × 35 mm
Losa	15 cm
Material: Acero	
Columnas	254.6 mm × 73.1 kg/m
Trabes	480.6 mm × 196.7 mm × 133.3 kg/m
Vigas	303.4 mm × 165.0 mm × 40.3 kg/m
Material: Madera	
Columnas	15 × 15 cm
Trabes	16 × 44 cm

Tabla 1: Dimensiones de elementos de modelo STAAD.

Claros	
GX	5.0 m
GZ	2.5 m
Alturas	
1 ^{er} entrepiso	2.8 m
2 ^{do} entrepiso	4.5 m
3 ^{er} entrepiso	4.5 m

Tabla 2: Dimensiones de estructura de modelo STAAD.

Cargas		
1 ^{er} nivel	Carga Muerta + FS	0.8 kN/m ²
	Carga Viva + FS	5.0 kN/m ²
2 ^{do} nivel	Carga Muerta + FS	1.0, 3.25 kN/m ²
	Carga Viva + FS	3.0, 5.0 kN/m ²
Techo	Carga Muerta + FS	0.5 kN/m ²
	Carga Viva + FS	1.0 kN/m ²
Otros	Peso propio	*variable

Tabla 3: Cargas de estructura de modelo STAAD.

Cabe aclarar que la estructura sirvió esencialmente como un modelo base en el que simular las fuerzas por sismo para identificar los esfuerzos mayores, más no se evaluó directamente las implicaciones que ciertas combinaciones de cargas u otras variaciones pudieran haber tenido en su respuesta dinámica.

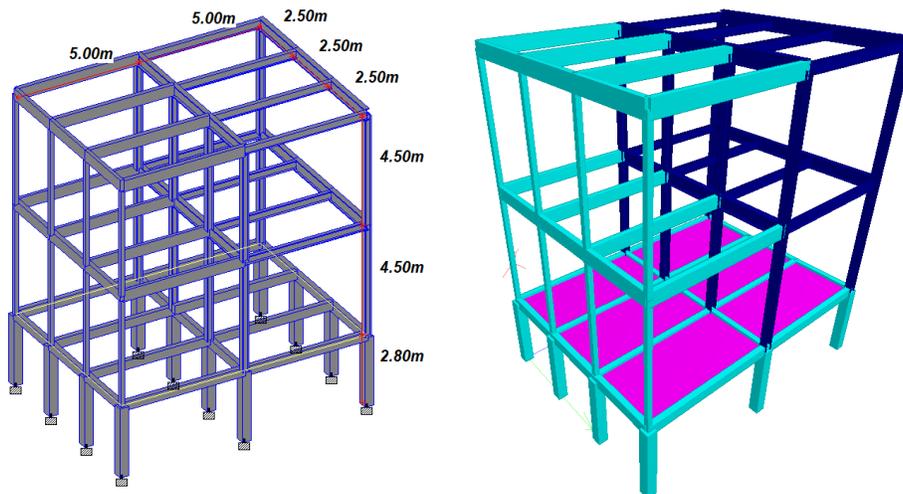


Figura 1: Diagrama y vista renderizada de estructura modelada en STAAD.

Posteriormente, fue necesario recopilar los datos correspondientes a aceleraciones por sismo para poder aplicarlos al modelo en STAAD y realizar el análisis dinámico. Los datos sísmicos fueron proporcionados por la Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería (RAII-UNAM, s.f.), producto de las labores de instrumentación y procesamiento de la Unidad de Instrumentación Sísmica.

Para el caso de estudio de este trabajo, se decidió utilizar aquellos registros existentes para la estación acelerográfica con código PZPU, localizada en el Cerro de la Paz, en la Ciudad de Puebla. Cabe mencionarse que la elección de dicha estación fue debida, entre varios otros factores, a su cercanía de la zona centro de la ciudad, su estatus activo a la fecha en que se realizó la presente investigación y la cantidad de registros acelerográficos disponibles de igual manera en el momento de la revisión. Esta estación, según la información provista en la página de la RAII-UNAM, se localiza en el Cerro de la Paz, Colonia La Paz, entre monumento a la Bandera e Iglesia, frente a la estación retransmisora. La estación se encuentra a una altura de 2260 msnm, está localizada en lo que se denomina como “terreno libre” y el suelo sobre el que se asiente es roca (cono volcánico).

La información contenida en los registros incluía datos generales como la hora, fecha, intensidad Richter del evento sísmico y datos de la estación, así como los valores de aceleración en cm/s^2 respecto del tiempo en segundos para los tres canales del registro. Con estos datos se volvía posible replicar los acelerogramas de manera gráfica, así como analizar el efecto individual de estos sobre la estructura propuesta en este trabajo.

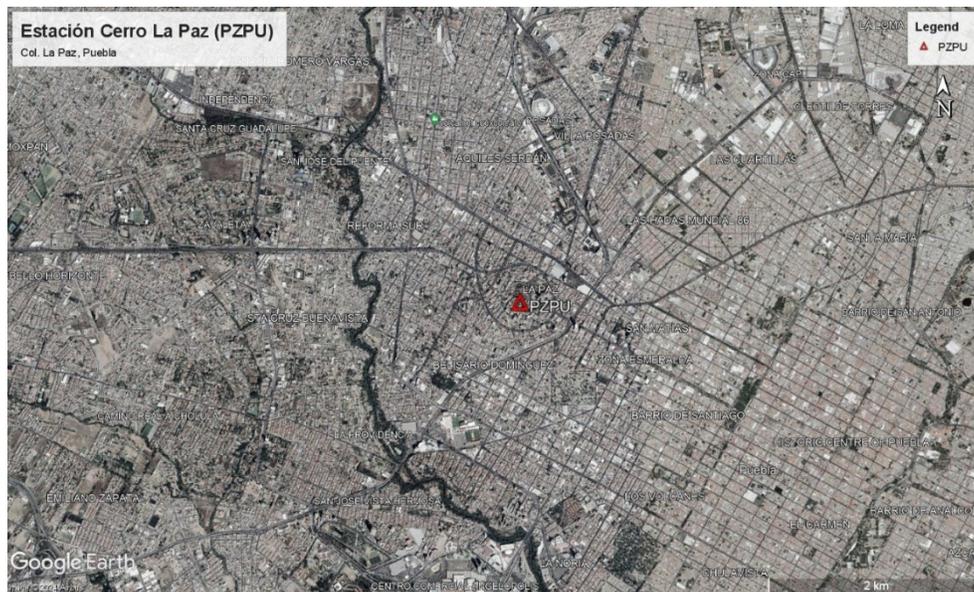


Figura 2: Ubicación de la estación acelerográfica PZPU (Google Earth Pro, 2023).

Cabe resaltar que la posibilidad de replicar de manera precisa los acelerogramas de manera unidimensional, brinda oportunidades de análisis complementarios de las condiciones más críticas de cada sismo. En las figuras 3, 4 y 5 a continuación, se muestra un ejemplo de esto usando los datos de uno de los registros de mayor intensidad medido por la estación PZPU (sismo del 19 de septiembre de 2017 cerca del límite entre Puebla y Morelos).

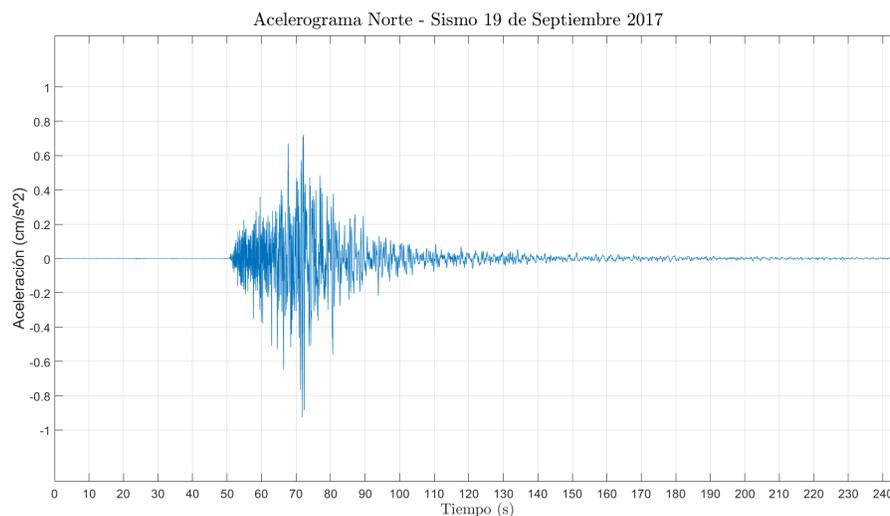


Figura 3: Aceleración dirección norte del sismo 19 de septiembre de 2017 estación PZPU.

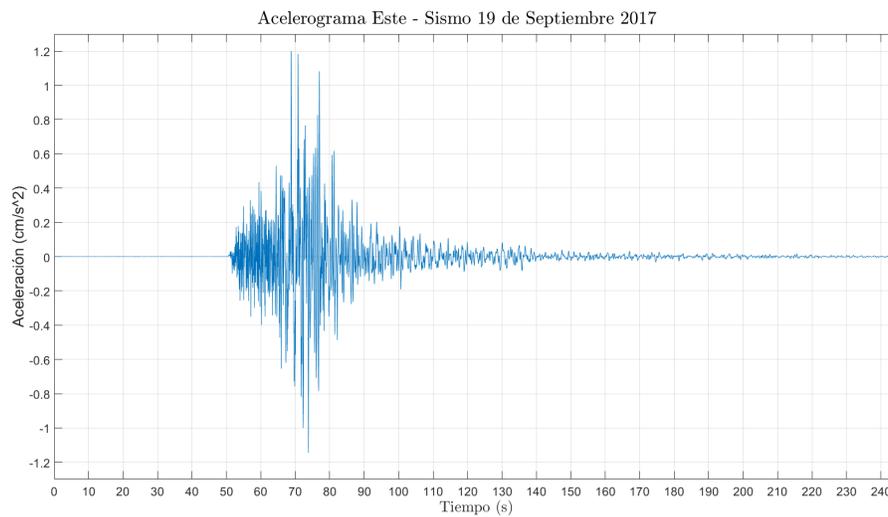


Figura 4: Aceleración dirección este del sismo 19 de septiembre de 2017 estación PZPU.

En estos es posible notar que la aceleración máxima registrada en dirección este (rumbo N90E) fue casi un 20% más que en la dirección norte (rumbo N00E), por lo que se esperaría que el escenario más crítico crítico para la estructura ante este evento, fuera aquel en que la fuerza sísmica en dirección este actuara perpendicular al lado con menor rigidez del modelo.

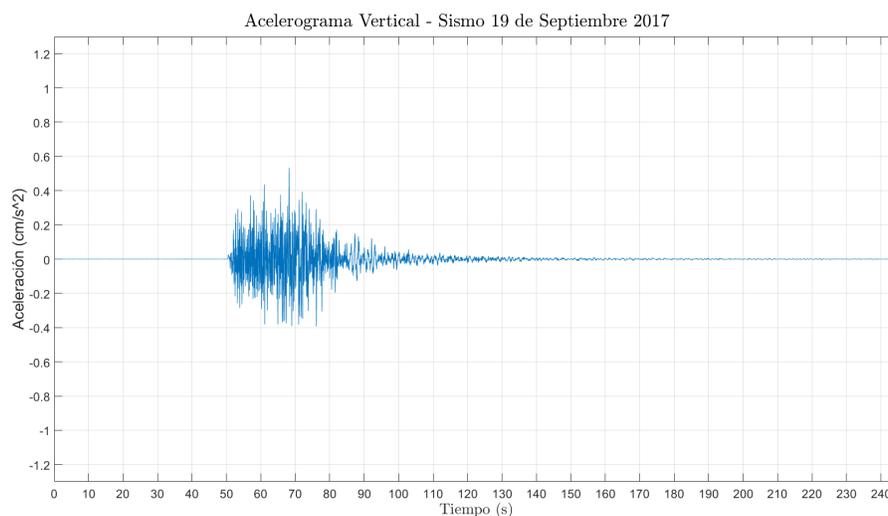


Figura 5: Aceleración dirección vertical de sismo 19 de septiembre de 2017 estación PZPU.

Por su parte, en la componente vertical, es posible notar que para este sismo se registraron aceleraciones de prácticamente la mitad de intensidad que en ambas mediciones horizontales, por lo que aparentemente el efecto individual de este no se consideraría crítico. Sin embargo, en el presente análisis, con el fin de conservar un procedimiento homogéneo en el que la estructura se viera sometida a las condiciones exactas de cualquier otra estructura presente en el sitio cuando dichos sismos sucedieron (históricamente), se conservaron las aceleraciones del suelo con la orientación original respecto de la estructura propuesta (en la ubicación de la estación acelerográfica).

Desde la base de datos de la RAII-UNAM fue posible obtener un total de 64 de estos acelerogramas para el periodo de tiempo entre 1997 y 2019, de entre los cuales se decidió realizar un proceso de filtrado para trabajar únicamente con aquellos registros que correspondieran a los sismos de mayor magnitud (en el epicentro) de acuerdo con la escala Richter y al año en que fueron registrados. Este proceso resultó en un total de 31 acelerogramas correspondientes a las 3 mayores mediciones de los años disponibles, o en su defecto el número de mediciones disponibles en aquellos años para los que se contaba con menos de 3 registros. Estos datos, fueron posteriormente convertidos a tablas de tiempo (s) contra aceleración (cm/s^2) divididos según la dirección de la aceleración, de manera que estos datos pudieran ser introducidos en la definición de carga en dominio de tiempo (*time history definition*) del modelo de STAAD.

El análisis dinámico, como se mencionó previamente, se realizó utilizando el software STAAD.pro, y la modalidad de carga en dominio del tiempo, donde se introdujeron los valores de aceleración en 3 direcciones y se aplicó a la masa de la estructura para convertirlas

en fuerzas que generaran una respuesta dinámica en la estructura modelo. Por medio de este proceso, fue posible observar el comportamiento de la estructura y obtener los valores de esfuerzo para todos los elementos que componían esta. No obstante, dado que para cumplir el objetivo de la investigación era necesario trabajar únicamente con valores de esfuerzo máximos, se decidieron establecer ciertos parámetros para reducir la cantidad información con la que se debía trabajar. Uno de los primeros criterios fue la decisión de trabajar únicamente con aquellos resultados correspondientes a esfuerzos en elementos tipo columna, pues por lógica se esperaba que fueran aquellos en los que podría existir un efecto mayor derivado de una fuerza sísmica. Como un segundo parámetro, se decidió utilizar únicamente aquellos máximos correspondientes a esfuerzos por la fuerza sísmica, por lo que se realizaron tablas de valores máximos y se separaron aquellos que eran debidos a las cargas verticales de aquellos debidos a sismo. Finalmente, como tercer criterio se decidió separar los valores de acuerdo con el material al que correspondía la columna, por lo que se terminaron obteniendo tres tablas de valores máximos para las diferentes fuerzas y esfuerzos, de acuerdo con el material en que se registraron respectivamente (Tabla 4, 5 y 6).

Concreto							
(-)	MPa	MPa	kN	kN-m	kN-m	kN	kN
AÑO	ST(comp)	ST(ten)	AX	BE(Mz)	BE(My)	SH(Fy)	SH(Fz)
1997	3.249	2.351	186.331	19.534	2.93	11.29	2.032
1999	3.294	2.638	186.417	19.22	3.046	10.974	2.152
2000	3.88	3.262	194.137	23.62	3.593	15.398	2.537
2010	3.522	2.966	187.156	20.589	5.129	12.347	3.134
2011	3.566	2.925	187.345	21.074	3.274	12.84	2.329
2012	4.089	3.414	192.242	23.325	7.641	15.101	4.366
2013	3.397	2.663	186.152	20.651	2.842	12.415	1.805
2014	3.837	3.227	188.761	21.973	4.718	13.741	3.28
2015	3.2	2.361	186.014	18.791	2.783	10.543	1.647
2016	3.208	2.505	186.211	18.606	2.897	10.358	1.952
2017	14.123	12.956	275.878	77.142	43.629	50.915	29.166
2018	4.348	3.739	191.711	21.724	9.357	13.495	6.325
2019	3.122	2.251	185.977	18.256	2.795	10.006	1.684

Tabla 4: Esfuerzos y fuerzas máximas en columnas de concreto.

Acero							
AÑO	ST(comp)	ST(ten)	AX	BE(Mz)	BE(My)	SH(Fy)	SH(Fz)
1997	35.746	13.22	108.648	14.827	11.361	5.278	4.03
1999	33.97	11.447	108.674	13.834	13.072	5.048	4.703
2000	49.751	27.31	109.047	27.262	14.446	11.301	5.287
2010	48.87	26.507	109.063	17.999	14.832	7.449	5.458
2011	41.034	18.545	108.831	19.453	14.021	7.394	5.113
2012	69.391	47.011	109.328	26.421	16.792	10.886	6.34
2013	36.727	14.206	108.704	18.241	11.63	6.792	4.071
2014	51.203	28.503	109.126	22.245	15.655	8.798	5.824
2015	28.6	9.184	108.527	12.54	10.636	4.372	3.927
2016	31.638	10.323	108.568	11.977	12.336	4.219	4.38
2017	225.901	203.501	141.81	98.319	75.801	41.156	32.059
2018	65.098	42.653	109.519	21.513	22.043	8.783	8.608
2019	25.477	9.146	108.479	10.878	10.647	3.468	3.936

Tabla 5: Esfuerzos y fuerzas máximas en columnas de acero.

Madera							
AÑO	ST(comp)	ST(ten)	AX	BE(Mz)	BE(My)	SH(Fy)	SH(Fz)
1997	2.604	0.818	24.77	0.555	0.365	0.222	0.157
1999	2.553	0.849	24.624	0.511	0.371	0.204	0.159
2000	3.437	1.392	26.614	1.119	0.225	0.458	0.095
2010	3.706	1.942	25.339	0.702	0.869	0.284	0.381
2011	3	1.218	25.439	0.764	0.412	0.309	0.178
2012	5.241	3.156	26.529	1.081	1.25	0.442	0.551
2013	2.694	0.817	25.263	0.709	0.248	0.287	0.104
2014	3.613	1.751	25.931	0.892	0.624	0.363	0.273
2015	2.072	0.542	24.42	0.451	0.179	0.179	0.074
2016	2.314	0.579	24.329	0.425	0.333	0.168	0.142
2017	15.181	12.371	35.603	3.84	3.823	1.595	1.699
2018	5.052	3.13	25.879	0.858	1.395	0.349	0.615
2019	1.967	0.384	24.155	0.376	0.189	0.147	0.078

Tabla 6: Esfuerzos y fuerzas máximas en columnas de madera.

El proceso final, consistió en estimar la probabilidad de excedencia de los máximos registrados en las tablas anteriores, para lo cual se decidió procesar los datos por medio del software Matlab. Principalmente, se utilizó la función de estimación de máxima verosimilitud (*maximum likelihood estimates*), por medio de la cual se aplicó una distribución de Valores Máximos de Gumbel para obtener la probabilidad de ocurrencia para distintos rangos de esfuerzos máximos. Lo anterior resultó en gráficas de probabilidad de excedencia para cada uno de los esfuerzos y materiales respectivamente.

6. Resultados y discusión

Recapitulando de manera breve, como resultado del análisis estructural dinámico realizado en el software STAAD.pro, se recopilaron reportes de esfuerzos (tensión/compresión), momentos flexionantes, fuerzas cortantes y fuerzas axiales para todos los elementos y nodos de la estructura, de entre los cuales se compilaron únicamente aquellos correspondientes a elementos tipo columna y correspondientes a un esfuerzo máximo por la carga sísmica. A partir de las respuestas máximas se obtuvieron gráficas de distribución acumulativa de la probabilidad de excedencia para distribuciones de Valores Máximos de Gumbel, de manera independientemente para cada material y tipo de esfuerzo. Dichas gráficas corresponden a las Figuras 3, 4 y 5, para los diferentes materiales de los que se componía la estructura.

A partir de los resultados obtenidos, fue posible observar que de manera generalizada la concentración de probabilidades de excedencia se mantuvo en valores de esfuerzos/fuerzas bajas, lo cual se alinea con la mayor cantidad de sismos de magnitud media/baja de los que se tenía registro. Lo anterior parece reflejar las respuestas estructurales más habituales durante la mayoría de la vida útil de la construcción (baja intensidad), que generalmente tienen nulo o muy reducidos efectos en la estructura. Aquellos esfuerzos correspondientes a las fuerzas sísmicas de mayor intensidad se ubicaron con porcentajes de probabilidad considerablemente bajos dada su poca ocurrencia según lo observado en los registros.

Con base en los resultados plasmados en las gráficas de probabilidad de excedencia se agregaron líneas correspondientes a la probabilidad para periodos de retorno de 20 años, según las recomendaciones para estado límite de servicio de las Normas Técnicas

Complementarias para Diseño por Sismo (RCDF, 2020). Respecto a la probabilidad para el estado límite de prevención de colapso, según la recomendación, se deberían considerar valores para un periodo de retorno de por lo menos 250 años (RCDF, 2020), lo que corresponde prácticamente a una probabilidad de ocurrencia de 0.4%, lo que para los datos obtenidos en el presente trabajo corresponde prácticamente a los valores máximos registrados para cada concepto de fuerza/esfuerzo.

Por otro lado, se pudo notar que, en la comparación entre las tablas de máximos y las gráficas de probabilidad, la distribución de probabilidades no fue tan distinta entre esfuerzos del mismo tipo para diferentes materiales, a pesar de la gran diferencia de rangos de esfuerzo con los que soportaban respectivamente. Esto permite observar una tendencia en cuanto a la distribución de probabilidades según el tipo de esfuerzo/fuerza en consideración, sin embargo, no parece existir un nivel de similitud suficiente para asumir distribuciones equivalentes entre materiales. Además, dado que los resultados de los elementos se mantuvieron dentro de rangos no muy altos en comparación la resistencia habitual de materiales como los utilizados en el modelo, se puede considerar que la estructura mostró un comportamiento adecuado para los casos de estudio (registros sísmicos/acelerográficos de la zona). De igual manera, cabe resaltar que, de manera independiente a los resultados, las pruebas realizadas en el presente trabajo parecieran mostrar un resultado favorable en cuanto al uso de una metodología como ésta, para analizar algunos márgenes de operación reales de una estructura ante condiciones dinámicas (por sismo) de cierta zona, e incluso con ciertas precauciones, para la determinación de valores preliminares de diseño con base en el comportamiento sísmico local.

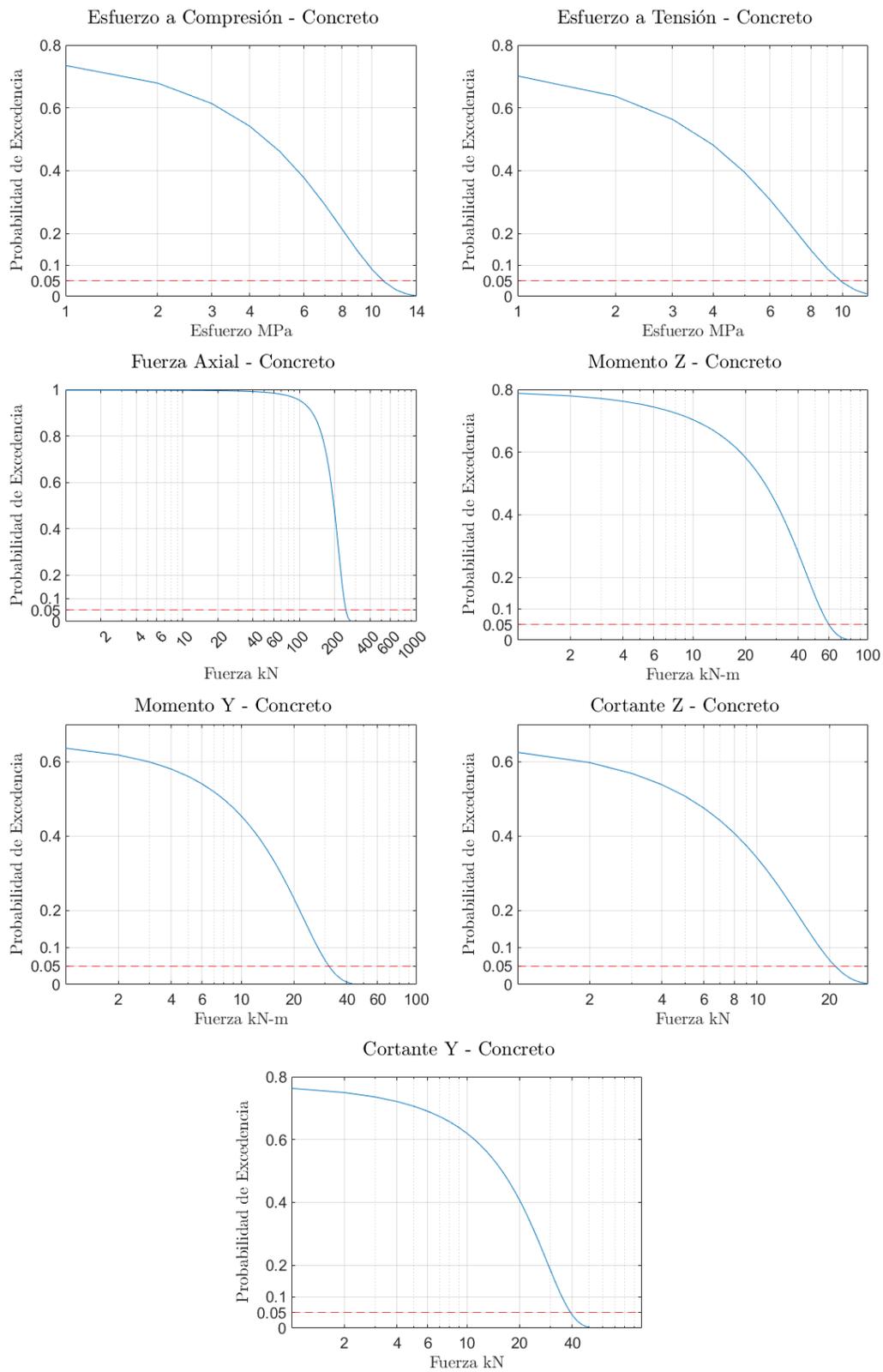


Figura 6: Distribuciones de excedencia en columnas de concreto.

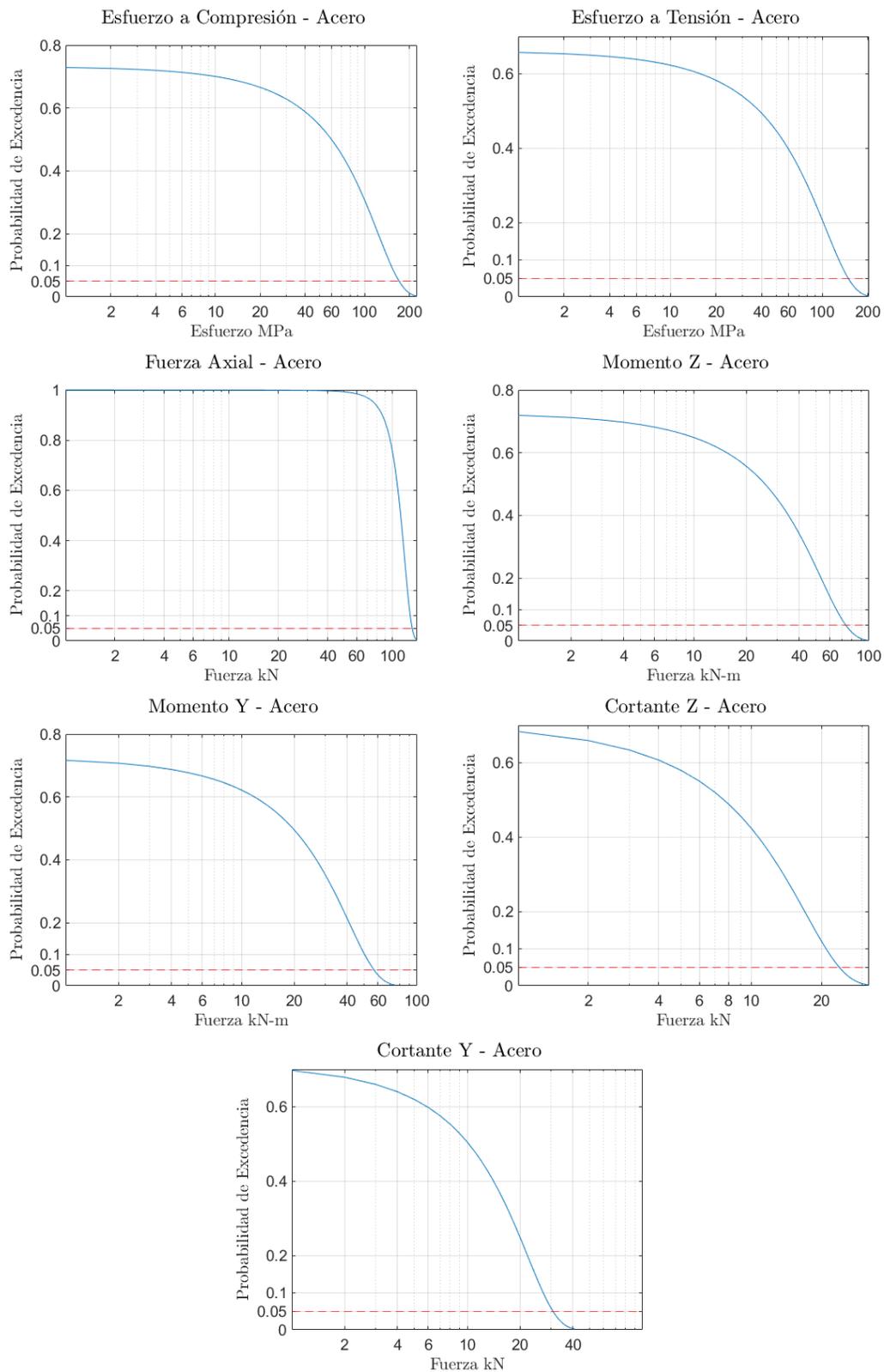


Figura 7: Distribuciones de excedencia en columnas de acero.

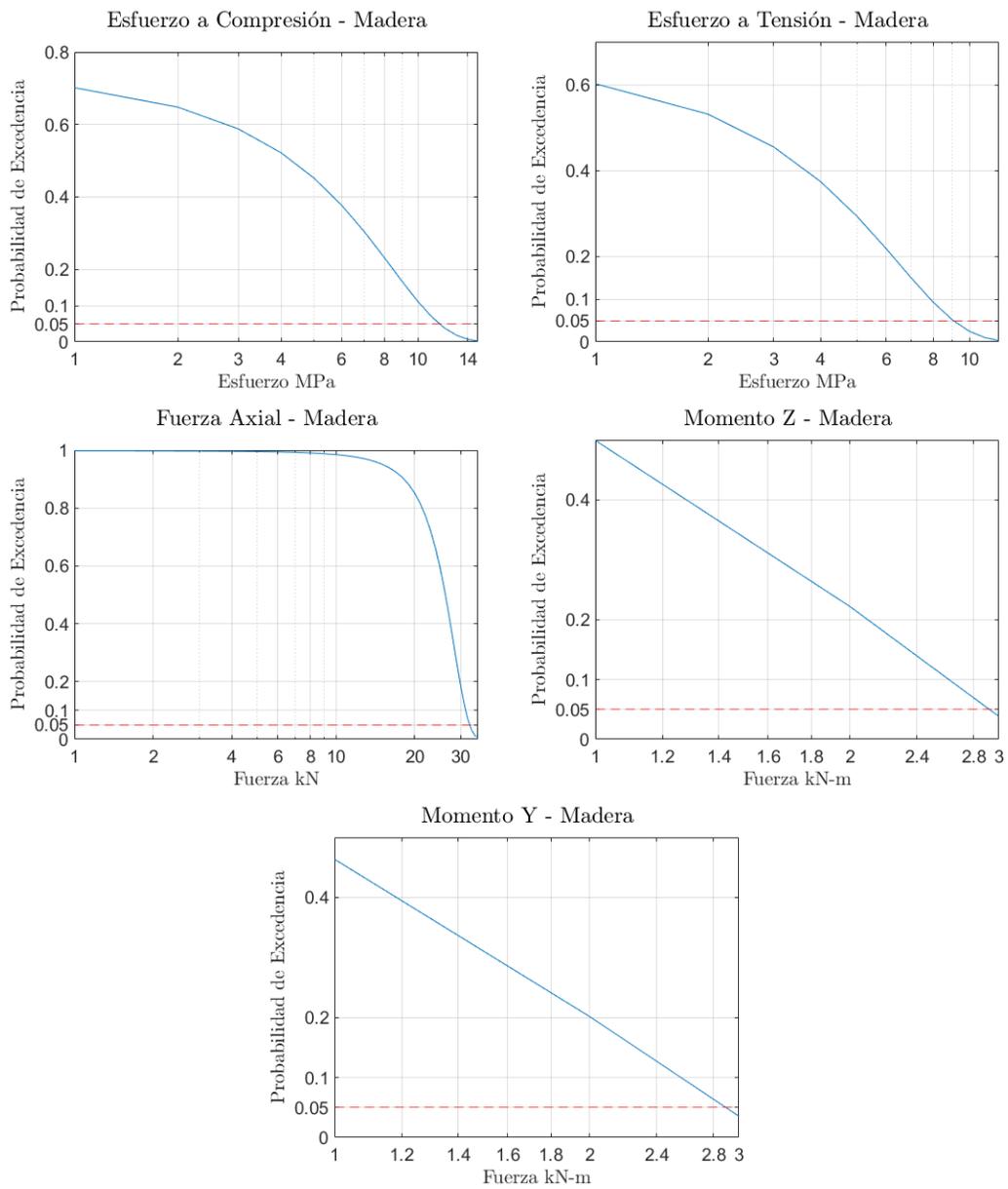


Figura 8: Distribuciones de excedencia en columnas de madera.

7. Conclusiones y recomendaciones

En el presente trabajo se obtuvieron resultados de esfuerzos máximos en una estructura de tres niveles, sometida a aceleraciones sísmicas en dominio de tiempo. Con los resultados fue posible realizar un análisis estadístico del que se obtuvieron gráficas de probabilidad de excedencia basadas en el comportamiento mostrado por la estructura de estudio.

Los resultados obtenidos demostraron que un análisis dinámico aprovechando los registros acelerográficos locales históricos tiene el potencial de brindar otro punto de vista para la comprensión del tipo esfuerzos que una estructura podría experimentar durante su vida útil bajo condiciones previas (en cuestión de sismos). Asimismo, al ser posible determinar probabilidades de excedencia con base en los resultados obtenidos del análisis dinámico, se considera que se abre la puerta a la posibilidad de utilizar estos datos como criterios adicionales para la optimización y eficiencia estructural de una construcción aún en fase de diseño.

Sin embargo, hasta el punto alcanzado en esta investigación es importante recordar que quedan múltiples áreas de oportunidad con las que este análisis podría verse perfeccionado. Por un lado, la consideración de la influencia de factores como los diferentes tipos de cimentaciones, amortiguadores y elementos estructurales para control de fuerzas dinámicas podrían aportar interesantes resultados y variaciones en los esfuerzos máximos registrados y la distribución de estos. Por el otro lado, diferentes combinaciones de modelos estructurales (tipos de soportes, uniones, materiales) se esperaría que mostraran cambios en el comportamiento de los valores máximos, especialmente en el caso de estructuras

rigidizadas únicamente en una dirección, lo que a su vez podría también mostrar un comportamiento distinto de la distribución de máximos.

De igual manera, cabe mencionar que se consideraría muy beneficioso poder contar con un mayor número de registros acelerográficos para diferentes puntos en la ciudad o por lo menos a lo largo de un periodo de tiempo mayor, pues se asume que esto podría haber mejorado las distribuciones de probabilidad, sobre todo para materiales con esfuerzos de baja magnitud como la madera. A pesar de lo anterior, se consideró que los resultados obtenidos mostraron un comportamiento razonable y probabilidades cercanas al comportamiento esperado en la realidad.

Por último, se hizo la observación de que el modelo podría apoyarse, hasta cierto punto, de acelerogramas artificiales con el fin de ampliar un poco más el espectro de estudio y poder explorar el comportamiento ante escenarios hipotéticos o de sismos históricos mayores de los que no se tienen registros acelerográficos precisos.

8. Bibliografía

British Geological Survey (BGS). (s.f.). *The Science of Earthquakes*. Earthquake Hazards

Program. U. S. Geological Survey. <https://www.bgs.ac.uk/discovering-geology/earth-hazards/earthquakes/>

Carrillo, J., Hernández-Barrios, H. & Rubiano-Fonseca, A. (2014). *Analysis of the Earthquake-Resistant Design Approach for Buildings in Mexico*. Ingeniería, Investigación y Tecnología, 15(1), 151–162. [https://doi-org.udlap.idm.oclc.org/10.1016/S1405-7743\(15\)30013-5](https://doi.org/udlap.idm.oclc.org/10.1016/S1405-7743(15)30013-5)

- Cassidy, J.F. (2013). *Earthquake*. In: Bobrowsky, P.T. (eds) Encyclopedia of Natural Hazards. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht. https://doi-org.udlap.idm.oclc.org/10.1007/978-1-4020-4399-4_104
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (2019). *Sismos (Folleto)*. Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana. Recuperado de: <https://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/131-131-FOLLETOSISMOS.PDF>
- Faber, M. H. (2012). *Statistics and Probability Theory [electronic resource]: In Pursuit of Engineering Decision Support / by Michael Havbro Faber*. Springer Netherlands.
- Google Earth Pro (28 de abril de 2023). *Estación Cerro La Paz (PZPU)*. 19°03'19.39"N, 98°13'37.52"W, Eye alt 8.18 km. Borders and labels. Image © Airbus 2024. (Fecha de acceso: 31 de marzo de 2024).
- Paz, M. (2019). *Structural Dynamics [electronic resource]: Theory and Computation / by Mario Paz, Young Hoon Kim*. Springer International Publishing.
- Rao, S. S. (2001). *FINITE ELEMENT METHODS*. Encyclopedia of Vibration, 530–544. <https://doi.org/10.1006/RWVB.2001.0004>
- Ravichandran, N., Losanno, D., & Parisi, F. (2021). *Comparative assessment of finite element macro-modelling approaches for seismic analysis of non-engineered masonry constructions*. Bulletin of Earthquake Engineering, 19(13), 5565–5607. <https://doi-org.udlap.idm.oclc.org/10.1007/s10518-021-01180-3>

- Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería (RAII-UNAM). (s.f.). *Acelerogramas Estación Acelerográfica Cerro La Paz, Puebla (PZPU)* [Base de datos]. Sistema de Base de Datos Acelerográficos. Recuperado el 10 de marzo de 2021 de <http://aplicaciones.iingen.unam.mx/AcelerogramasRSM/>
- Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. (2020). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo*. Gaceta Oficial de la Ciudad de México.
- Saputra, N. E., & Priastiwi, Y. A. (2023). *Comparative Study of Dynamic Earthquake Analysis with Spectral Design and Time History Methods*. *Jurnal Indonesia Sosial Teknologi*, 4(8), 1223–1234. <https://doi-org.udlap.idm.oclc.org/10.59141/jist.v4i8.700>
- Servicio Sismológico Nacional (SSN). (2023). *Estadísticas de los sismos reportados por el SSN*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Servicio Sismológico Nacional, México. <http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/estadisticas/>
- Sucuoğlu, H. (2014). *Basic Earthquake Engineering [electronic resource]: From Seismology to Analysis and Design* / by Halûk Sucuoğlu, Sinan Akkar. Springer International Publishing.
- Tao, Y., Zhao, W., Shu, J., & Yang, Y. (2021). *Nonlinear Finite-Element Analysis of the Seismic Behavior of RC Column–Steel Beam Connections with Shear Failure Mode*. *Journal of Structural Engineering*, 147(10), 1–18. [https://doi-org.udlap.idm.oclc.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0003132](https://doi-org.udlap.idm.oclc.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003132)