

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE UN EDIFICIO DE
HORMIGÓN ARMADO EN LOJA, MEDIANTE PUSHOVER, TIEMPO
HISTORIA Y METODOLOGÍA PROBABILÍSTICA CON
MODELAMIENTO EN PYTHON Y MATLAB.

PROYECTO DE GRADUACIÓN

Previo la obtención del Título de:

Máster en Estructuras Civiles Sismorresistente

Presentado por:

Barcia Ruiz Kerlly Marianela

Córdova Calle Alex Ivan

Tutor:

Ing. Luis Villavicencio Caverro. Msc

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2024

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mi familia mis padres y mis dos hermanas por ser mi mayor motivación cada día a seguir adelante.

Alex Ivan Córdova Calle

A mis padres, hermana y abuelita, por ser mi ejemplo de vida, por su amor incondicional, sacrificios y apoyo constante en cada paso de este camino. Este logro es el fruto de sus valores y enseñanzas, y se los dedico con todo mi amor y gratitud.

Kerlly Marianela Barcia Ruiz.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios por permitirme llegar hasta este momento de una maravillosa oportunidad, después quiero agradecer a nuestro tutor Ing. Luis Fernando Villavicencio Cavero Msc, por brindarnos el acompañamiento y también a mi compañera de trabajo Kerlly por la colaboración y participación en todo el proceso de este trabajo.

Alex Ivan Córdova Calle

En primer lugar, agradezco a Dios y a la Mater por ser mi guía en este camino y permitirme culminar este logro con fe y confianza.

A mi tutor, Ing. Luis Fernando Villavicencio Cavero Msc, por su paciencia, guía y conocimientos compartidos. Su orientación fue clave para culminar este trabajo con éxito y también a mi compañero de tesis, Alex Córdova, por su dedicación, compromiso y trabajo en equipo.

Kerlly Marianela Barcia Ruiz.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; (*Barcia Ruiz Kerlly Marianela, Alex Ivan Córdova Calle*) y damos nuestro consentimiento para que la ESPOl realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

Barcia Ruiz Kerlly Marianela

Autor 1

Alex Ivan Córdova Calle

Autor 2

EVALUADORES

M.Sc Nadia Quijano Arteaga
PROFESORA DE LA MATERIA

M.Sc Samantha Hidalgo Astudillo
PROFESORA DE LA MATERIA

M.Sc Luis Villavicencio Caverio
PROFESOR TUTOR

RESUMEN

En el siguiente proyecto se calcula las curvas de fragilidad para una estructura de 5 losas, con el fin de evaluar la vulnerabilidad frente a los diferentes escenarios sísmicos posibles. Para esto se hace uso de registros nacionales e internacionales, y para capturar la respuesta de la estructura en cada escenario se aplica el método de análisis no lineal dinámico tiempo historia, luego de tener todas las respuestas se establecerá umbrales de daño, que son desplazamientos calibrados en función de la capacidad lateral de la estructura, que permite diferenciar cuatro estados de daño que se alcanzan conforme se incrementa la demanda de desplazamiento, denominados: leve, moderado, extenso y completo.

Para calcular las curvas de fragilidad se empleara la metodología de franjas múltiples propuesta por Baker, siendo apropiada para el caso cuando se aplica gran variedad de registros a una estructura sin seguir un patrón IDA de dinámico incremental, sino que se evalúa para la mayor cantidad de escenarios y a esta data observada o resultante de los análisis no lineales se le aplica una corrección denominada de máxima verisimilitud, que ayuda a predecir la máxima probabilidad que tiene la estructura de alcanzar cierto estado de daño.

Se elaboran las conclusiones que se obtienen con base a la interpretación de los resultados de las curvas de fragilidad, además se indica criterios importantes para lograr entender que todos estos resultados son directamente lineales entre el buen diseño y comportamiento, mientras más patologías tenga el diseño, más probabilidad logra de conseguir daños mayores.

Palabras Clave: Pushover, tiempo historia, fragilidad, vulnerabilidad sísmica

ABSTRACT

In the following project, the fragility curves for a 5-slab structure are calculated, in order to evaluate the vulnerability to the different possible seismic scenarios. For this, national and international records are used, and to capture the response of the structure in each scenario, the dynamic nonlinear analysis method is applied time history, after having all the answers, damage thresholds will be established, which are calibrated displacements based on the lateral capacity of the structure, which allows differentiating four states of damage that are reached as the demand for displacement increases, called: mild, moderate, extensive and complete.

To calculate the fragility curves, the multiple fringe methodology proposed by Baker will be used, being appropriate for the case when a wide variety of records is applied to a structure without following an IDA pattern of incremental dynamics, but is evaluated for the largest number of scenarios and this observed data or resulting from the nonlinear analyses is applied a correction called maximum verisimilitude. which helps predict the maximum probability that the structure has of reaching a certain state of damage.

The conclusions obtained based on the interpretation of the results of the frailty curves are elaborated, in addition to indicating important criteria to understand that all these results are directly linear between good design and behavior, the more pathologies the design has, the more probability it is of achieving greater damage.

Keywords: Pushover, time history, fragility, seismic vulnerability

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL	III
SIMBOLOGÍA	V
TABLA DE ILUSTRACIONES	VI
INDICE DE TABLAS.....	VIII
CAPÍTULO 1.....	9
Introducción	9
1.1 Antecedentes.....	11
1.2 Problemática para resolver	12
1.3 Justificación	12
1.4 Objetivos.....	13
1.4.1 Objetivo General	13
1.4.2 Objetivos Específicos	13
CAPÍTULO 2.....	14
Desarrollo del proyecto.....	14
2.1 Marco conceptual.....	14
2.1.1 Tectónica de placas y origen de los sismos	14
2.1.2 Mayores magnitudes registradas mundialmente	16
2.1.3 Mayores eventos sísmicos registrados en Ecuador	19
2.1.4 Estaciones Ecuador	21
2.1.5 Sismicidad y fallas en la ciudad de Loja -Ecuador	22
2.1.6 Riesgo sísmico	23
2.1.4 Análisis Estático no lineal por el método de Pushover	25
2.1.5 Tiempo historia.....	34

2.1.6	Curvas de Fragilidad	34
2.1.7	¿Cómo hacer un análisis de vulnerabilidad para un sector o ciudad?	40
2.2	Marco metodológico.....	41
2.2.1	Características de la Estructura	41
2.2.2	Revisión de Cargas	44
2.2.3	Modelado estructural.....	45
2.2.4	Análisis para llevar a cabo en cada dirección	49
2.2.5	Tabulación de datos.....	50
2.2.6	Solución para diseñar.....	51
CAPÍTULO 3.....		52
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		52
3.1	Resultados.....	52
3.1.1	Curvas de Pushover del Edificio.....	52
3.2	Respuesta de la estructura para tiempo historia.....	54
3.3	Análisis de resultados	63
CAPÍTULO 4.....		67
Conclusiones Y Recomendaciones		67
Recomendaciones.....		69
BIBLIOGRAFÍA.....		70
PLANOS Y ANEXOS.....		75

SIMBOLOGÍA

D_U Desplazamiento último

D_Y Desplazamiento de fluencia

SD_1 Estado de daño leve

SD_2 Estado de daño moderado

SD_3 Estado de daño extenso

SD_4 Estado de daño completo

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2.1: Principales placas tectónicas [Oterino, 2020].....	15
Ilustración 2.2: Márgenes tectónicos del Continente Americano (Hamilton, 2014).....	16
Ilustración 2.3: Terremoto de 9,5 grados (CHILE,1960)	16
Ilustración 2.4: Terremoto de 9,2 grados (ALASKA,1964).....	17
Ilustración 2.5: Terremoto de 9,0 grados (JAPON, 2011).....	18
Ilustración 2.6: Sismo 16 de abril de 2016(Castañeda & Mieles Bravo, 2017)	20
Ilustración 2.7: Sismo 16 de abril de 2016(Castañeda & Mieles Bravo, 2017)	20
Ilustración 2.8: Distribución, Red de acelerógrafos (Instituto Geofísico, 2016).....	21
Ilustración 2.9: Mapa geológico del Ecuador (Guamán, 2014)	23
Ilustración 2.10: Modelo de Mander Concreto (Medina, 2015).....	29
Ilustración 2.11: Modelo de Park para el acero (Medina, 2015)	30
Ilustración 2.12: Niveles de desempeño (Institute, 2023)	32
Ilustración 2.13: Umbrales para daño (Sousa, Marques, Silva, & Weatherill, 2018).....	34
Ilustración 2.14: Estados de daño (Hazus, 1999)	35
Ilustración 2.15: Planta Baja [CONSORCIO RP.LEGAL DR]	42
Ilustración 2.16: Plantas altas 1,2,3,4 tipo [CONSORCIO RP.LEGAL DR].....	42
Ilustración 2.17: Fachada principal y posterior [CONSORCIO RP.LEGAL DR].....	43
Ilustración 2.18: Losa de Entrepiso (tipo) [CONSORCIO RP.LEGAL DR].....	44
Ilustración 2.19: Modelación tridimensional [Barcia & Córdova, 2024].....	46
Ilustración 2.20: Modelado en Opensees Eje C [Barcia & Córdova, 2024].....	47
Ilustración 2.21: Modelado en Opensees eje 6 [Barcia & Córdova, 2024].....	48
Ilustración 2.22: Registros sísmicos para análisis [Barcia & Córdova, 2024]	50
Ilustración 3.23: Curva de capacidad, dirección X [Barcia & Córdova, 2024].....	52
Ilustración 3.24: Curva de capacidad, dirección Y [Barcia & Córdova, 2024].....	53
Ilustración 3.25: Desp. espectral vs tiempo historia (X) [Barcia & Córdova, 2024]	55
Ilustración 3.26: Acel. espectral vs tiempo historia (X) [Barcia & Córdova, 2024]	55
Ilustración 3.27: Desp. espectral vs tiempo historia (Y) [Barcia & Córdova, 2024]	56
Ilustración 3.28: Acel. espectral vs tiempo historia (Y) [Barcia & Córdova, 2024]	57
Ilustración 3.29: Curva de fragilidad sentido X (Sa g) [Barcia & Córdova, 2024].....	59
Ilustración 3.30: Curva de fragilidad sentido X (Sd m) [Barcia & Córdova, 2024].....	60
Ilustración 3.31: Curva de fragilidad sentido Y (Sa g) [Barcia & Córdova, 2024].....	61
Ilustración 3.32: Curva de fragilidad sentido Y (Sd m) [Barcia & Córdova, 2024].....	62

Ilustración 3.33: Dirección X [Barcia & Córdova, 2024]65
Ilustración 3.34: Dirección Y [Barcia & Córdova, 2024]65
Ilustración 3.35: Comparación de fragilidad X [Barcia & Córdova, 2024]66

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Resumen de niveles de losas [Barcia & Córdova, 2024].....	43
Tabla 2.2: Resumen de cargas para cada nivel [CONSORCIO RP.LEGAL DR].....	45
Tabla 3.3: Tabla comparativa de resultados Pushover [Barcia & Córdova, 2024].....	63
Tabla 3.4: Umbrales de cada estado de daño [Barcia & Córdova, 2024].....	64

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Los terremotos o eventos sísmicos conllevan gran potencial de destrucción, que pueden provocar pérdidas que van desde lo material hasta pérdidas humanas. Al ser fenómenos naturales no se los puede evitar, sin embargo, es posible mitigar el daño asociado, implementando medidas preventivas como eficaces diseños sismorresistentes, así como diseñando planes de emergencia adecuados, entre otros (Oterino, 2020).

Las construcciones humanas pueden enfrentar serios problemas si no se consideran todos los escenarios de peligro sísmicos a los que estarán expuestas durante su vida útil. Los sismos, siendo eventos naturales incontrolables, contrastan con las obras civiles, que sí pueden prepararse adecuadamente para tales eventualidades. De lo contrario, los sismos generan impactos catastróficos, desde la pérdida de la productividad, la destrucción de infraestructuras y lo más lamentable, la pérdida de vidas humanas. Por esta razón, el estudio del riesgo sísmico es fundamental para asegurar la resiliencia de las construcciones y minimizar las consecuencias de estos eventos (Sáenz Muños, 2018).

A través de herramientas como las curvas de fragilidad estructural, es posible determinar la probabilidad de que las edificaciones superen un umbral de seguridad aceptable, lo que permite cuantificar el riesgo en términos de daño potencial. Este análisis proporciona una base sólida para planificar de manera efectiva, implementación de medidas de protección, refuerzo estructural y estrategias de mitigación y contingencia adecuadas, según sea necesario (Sousa, Marques, Silva, & Weatherill, 2018).

En este proyecto se evaluará la vulnerabilidad sísmica de una estructura residencial, compuesta por un sótano, planta baja, mezzanine, tres losas de entrepiso y una losa de terraza accesible, mediante la generación de curvas de fragilidad. El propósito final es proponer estrategias de protección estructural que garanticen la integridad del inmueble frente a posibles eventos sísmicos.

Este estudio se limita a la evaluación de una sola tipología estructural de hormigón armado, sin embargo, no solo ofrecerá recomendaciones específicas para este tipo de edificación, sino que también podrá servir como referencia para la evaluación sísmica de otras estructuras con características similares. Además, establecerá un modelo que facilitará la evaluación de otras tipologías estructurales.

Como primer paso se desarrollará un modelo matemático y luego, se lo llevará a un análisis estático no lineal mediante el método Pushover, con el fin de determinar la capacidad lateral de la estructura en un eje de cada dirección, lo que constituye un análisis bidimensional. Este análisis permitirá establecer los umbrales para los diferentes estados de daño.

Como segundo paso, se realizará el análisis dinámico no lineal por tiempo historia, el cual capturará el comportamiento no lineal de la estructura. Para ello, se utilizarán registros obtenidos de la plataforma Seismic Performance Prediction Platform, complementados con un conjunto de datos del Red Nacional de Acelerógrafos del Instituto Geofísico (Renac). Esto proporcionará una amplia variedad de respuestas que se utilizarán para aplicar análisis estadísticos, calculando la media y la desviación estándar para cada franja correspondiente.

Para calcular las funciones de fragilidad se hará uso de herramientas de acceso libre, publicadas en internet por el profesor Baker ("Efficient Analytical Fragility Function Fitting"). Con esta información, se podrá identificar las probabilidades de que la estructura alcance ciertos estados de daño en función de diferentes intensidades sísmicas.

Los resultados obtenidos, permitirán establecer conclusiones y recomendaciones respecto a las medidas que podrían implementarse para proteger y garantizar un comportamiento sísmico adecuado de la estructura, conforme a los estándares establecidos en los códigos pertinentes.

1.1 Antecedentes

Ecuador ha experimentado una intensa actividad sísmica a lo largo de su historia, que en los últimos 460 años ha causado la destrucción de ciudades como Riobamba e Ibarra y ha resultado en la pérdida de más de 60,000 vidas. Los estudios de escenarios sísmicos probables en provincias como costa y sierra revelan la urgente necesidad de implementar programas para mitigar el riesgo sísmico. Investigar el riesgo sísmico y su impacto en el desarrollo constituye un desafío científico de gran relevancia para el siglo XXI. El riesgo sísmico se deriva de la interacción de tres factores principales: el peligro sísmico, el nivel de exposición y la vulnerabilidad de las edificaciones al daño (NEC-15, 2015).

La ciudad de Loja, ubicada en el sur de Ecuador, es una zona geográficamente vulnerable a eventos sísmicos de diversas magnitudes, está influenciada por diversas fallas tectónicas y estructuras geológicas debido a su ubicación en la convergencia de las placas tectónicas de Nazca y Sudamericana. Esta realidad ha generado inquietudes en torno al comportamiento estructural y la respuesta de los edificios frente a sollicitaciones sísmicas. Las columnas y vigas incursionan en el rango no lineal durante la acción de un movimiento telúrico, lo que en términos comunes se traduce como daño, tomando en cuenta que hay daño local y daño global, y para esto las curvas de fragilidad permiten conocer el grado de vulnerabilidad de dicha estructura (Hamilton, 2014).

Cuando se trata de riesgos sísmicos se puede especificar que son los principales factores que influyen en las pérdidas y contratiempo financiero. Además, anticipar con exactitud la ocurrencia de estos sismos no es tarea fácil, pero por medio de estadística y probabilidad se puede atenuar el daño estructural antes de la ocurrencia de los sismos. (Patel & Vasanwala, 2020). Para determinar de manera precisa la respuesta de las estructuras ante los sismos se requiere técnicas de análisis dinámico no lineal, incorporando la variación del tiempo de las propiedades de los materiales y determinar la historia de las respuestas (López & Ruiz, 2008).

1.2 Problemática para resolver

Debido a que la estructura fue construida en el año 2014, durante el periodo de transición hacia la norma ecuatoriana de la construcción (NEC -15), además por estar ubicada en un sector densamente poblado como es el centro de la ciudad, resulta fundamental que no falle de manera prematura ante amenazas sísmica durante su vida útil, para lo cual, se ha llevado a cabo una revisión exhaustiva de los planos estructurales y así diagnosticar posibles patologías y deficiencias que puedan comprometer su desempeño adecuado.

Durante la verificación técnica de los planos, se ha detectado que, en la dirección corta de la planta de la edificación, la disposición actual de los elementos estructurales presenta incertidumbres significativas, de manera específica se hace referencia a que las columnas de la edificación podrían no cumplir con los requisitos necesarios, debido a que la dimensión es reducida por la cual no podría garantizar un desempeño adecuado ante cargas laterales, comprometiendo así la respuesta de la estructura frente a las diferentes sollicitaciones y excitaciones sísmicas en la base de la estructura, además se notó que los elementos estructurales tanto vigas como columnas tiene un diseño constante a lo largo de toda su altura. Por lo tanto, se requiere una evaluación más profunda para determinar su comportamiento limitado quizá por deficiencias específicas y evaluar la vulnerabilidad para finalmente si es necesario proponer soluciones efectivas que mitiguen el riesgo asociado.

Incluso cuando las construcciones se han realizado sin una adecuada dirección técnica o bajo normativas que, aunque en su momento fueran cumplidas, resultan insuficientes en lo que respecta a medidas de protección sísmica en comparación con los avances y exigencias de las normativas actuales.

1.3 Justificación

El objetivo principal de este trabajo de titulación es garantizar que la infraestructura existente sea confiable, sostenible y resiliente conforme a la meta 9.1 del ODS, asegurando tanto la seguridad de los ocupantes como la protección del inmueble ante posibles eventos sísmicos. Para lograrlo, se desarrollará las curvas de fragilidad con base a los resultados obtenidos de la respuesta estructural mediante los análisis no

lineales estático y dinámico como es el Pushover y tiempo historia, posteriormente se realizará las debidas interpretaciones con los parámetros de intensidad adecuado, lo que permitirá detectar zonas críticas y llevar a cabo recomendaciones, acciones para potencializar a la estructura con el fin de cumplir los estándares de seguridad establecidos con las normativas actuales y así prevenir el colapso de la estructura. Mediante los análisis mencionadas anteriormente, podemos identificar cuan vulnerable vuelve a la estructura el tener columnas con sección reducida.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Determinar la vulnerabilidad sísmica en edificio residencial de ocho pisos mediante curvas de fragilidad para evaluar los niveles de daño por eventos sísmicos.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Elaborar un análisis estático no lineal de Pushover para determinar los umbrales de los 4 estados de daño, conforme a ASCE 41-17 Y RISK WP04.
- Realizar el análisis dinámico no lineal tiempo historia con una serie de registros, para obtener la base de datos que sirve para determinar los parámetros estadísticos y realizar las distribuciones log normales conforme al FEMA P58.
- Generar las curvas de fragilidad correspondientes a los diferentes estados de daño, basadas en el análisis no lineal y la metodología probabilística aplicada.
- Recomendar medidas correctivas y preventivas, basadas en los resultados obtenidos del análisis de vulnerabilidad, con el fin de optimizar el desempeño estructural del edificio y mitigar posibles riesgos futuros.

CAPÍTULO 2

DESARROLLO DEL PROYECTO

2.1 Marco conceptual

En este apartado se expone las principales fuentes que generan los movimientos y aceleraciones en las estructuras, siendo las fuentes más comunes los sismos debido a los movimientos de las placas tectónicas; mientras que los volcánicos debido a las erupciones. Se hará énfasis en los movimientos debido a los sismos, además se hará un repaso general de las catástrofes que se ha sufrido a lo largo de los años tanto en el mundo, como en Ecuador, y también se aterriza estudiando el peligro sísmico general de la ciudad de Loja.

La siguiente parte de esta sección será destinada a estudiar los métodos para realizar los análisis no lineal estático por el método de Pushover y dinámico por el método tiempo historia, se especifica los conceptos básicos de cada método, los parámetros necesarios para aplicarlo y los resultados que se obtiene de cada método, además se indica para que sirve hacer estos análisis en la metodología del desarrollo del tema, y finalmente se cierra explicando la metodología de rayas múltiples para el caso de estudio en la determinación de la vulnerabilidad sísmica.

2.1.1 Tectónica de placas y origen de los sismos

Existen algunos tipos de terremotos basándose en el modo de generación, terremotos tectónicos, terremotos volcánicos, terremotos por impacto de meteoritos, además otros causados por actividades humanas, pero en esta sección se hará hincapié en el primer tipo (Sánchez, 1994).

Los sismos son fenómenos geológicos que ocurren de manera súbita, como resultado de la liberación repentina de energía acumulada en el interior de la corteza terrestre, la cual está conformada por grandes placas tectónicas que se encuentran en constante movimiento entre sí, de acuerdo con la teoría de tectónica que se postuló en el año 1986 donde se afirma que la tierra está en continuo movimiento (Rodríguez & CENAI, 2013).

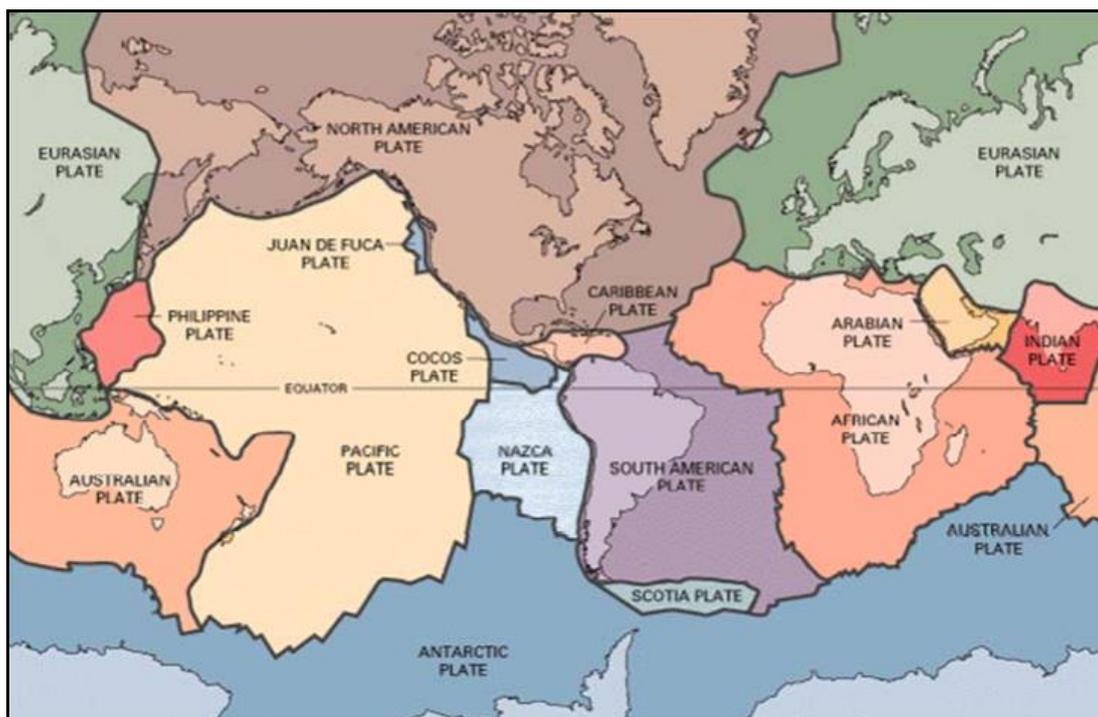


Ilustración 2.1: Principales placas tectónicas [Oterino, 2020]

Estos eventos sísmicos se producen en los límites o márgenes de las placas tectónicas a los cuales están asociados tres fallas que los caracterizan, si hablamos de margen convergente o destructivo se trata de una falla por compresión siendo que dos placas se desplazan en sentidos opuestos donde la placa más densa, se hunde bajo la otra, llevando a la formación de cordilleras y está asociada a la actividad volcánica. Por otro lado, el margen divergente o constructivo se produce por una falla normal (esfuerzos tensionales) donde las placas se separan y producen el ascenso de material volcánico hacia la superficie mientras que en los límites transformantes el movimiento es lateral y en direcciones opuestas, permitiendo que las placas se acomoden evitando que la energía se siga acumulando (SOMOZA & GHIDELLA, 2005).

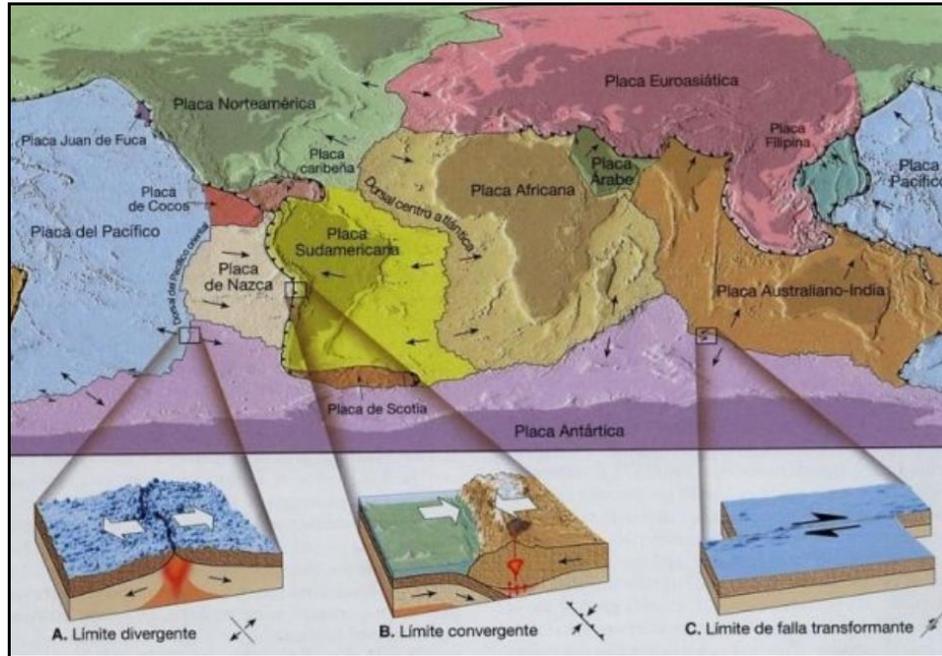


Ilustración 2.2: Márgenes tectónicos del Continente Americano (Hamilton, 2014)

2.1.2 Mayores magnitudes registradas mundialmente

Teóricamente no existe límite superior de magnitud, pero los mayores terremotos registrados en la historia han sido los siguientes:

- **1960 – Chile Mw= 9,5**



Ilustración 2.3: Terremoto de 9,5 grados (CHILE,1960)

El 22 de mayo de 1960, en las cercanías de Valdivia, Chile, se produjo un sismo de magnitud 9,5 (Mw), el cual constituye el evento sísmico de mayor magnitud registrado a nivel mundial desde el inicio de las observaciones instrumentales. Este evento sísmico

generó un tsunami caracterizado por un tren de olas con períodos aproximados de 30 minutos. La primera ola del tsunami alcanzó una altura de 5 metros, la segunda alcanzó 8 metros, y la tercera, que presentó la mayor energía, tuvo una altura de 8 y 11 metros (Desastres, 2019).

Aproximadamente 2 millones de personas quedaron sin hogar, y así mismo se registran alrededor de 2.5 millones de fallecidos, incluso se han evaluado que los daños materiales oscilar alrededor de 500 a 700 millones de dólares (Astroza & Lazo, 2010).

- **1964 – Alaska Mw= 9.2**



Ilustración 2.4: Terremoto de 9,2 grados (ALASKA,1964)

El 27 de marzo de 1964, a las 17:36 hora local (28 de marzo a las 3:36 UTC), se registró un terremoto de magnitud 9,2 en la región de Prince William Sound, en Alaska. La ruptura sísmica tuvo lugar a una profundidad aproximada de 25 kilómetros bajo la superficie terrestre, con el epicentro localizado a cerca de 10 kilómetros al este de la desembocadura del fiordo College, a 90 kilómetros al oeste de Valdez y 120 kilómetros al este de Anchorage. Este evento sísmico tuvo una duración de aproximadamente 4.5 minutos, convirtiéndose en el terremoto más potente jamás registrado en la historia de Estados Unidos.

Además, ocupa el segundo lugar en la lista de los terremotos más fuertes documentados a nivel mundial, solo superado por el terremoto de magnitud 9,5 que ocurrió en Chile en 1960. La intensidad de este fenómeno tuvo repercusiones

significativas, no solo en términos de daños estructurales, sino también en la configuración geológica de la región (USGS, 2010).

- **2011, Japón Mw=9,0**



Ilustración 2.5: Terremoto de 9,0 grados (JAPON, 2011)

El 11 de marzo de 2011, se produjo un devastador terremoto y tsunami en la región de Tōhoku, Japón. Este evento sísmico alcanzó una magnitud de 9.0 (Mw), lo que lo convierte en el terremoto más potente registrado en la historia del país. El epicentro del temblor se localizó frente a la costa de Sanriku, generando una serie de olas de tsunami que devastaron múltiples localidades, especialmente en las áreas costeras de la región de Tōhoku, junto al océano Pacífico.

Un aspecto notable de este desastre fue el accidente en la central nuclear de Fukushima Daiichi, que ocurrió como consecuencia directa del terremoto y el tsunami. La emergencia nuclear resultante tuvo implicaciones significativas tanto a nivel local como internacional, provocando una reevaluación de las políticas energéticas y de seguridad nuclear en varios países. La magnitud de este evento y sus repercusiones siguen siendo objeto de estudio y análisis, destacando la importancia de la preparación ante desastres naturales (Japan, 2011).

Según la investigación de (Delgado, 2011) se ha registrado mas de 15000 muertos, mas de 5000 desaparecidos, mas de 300 000 edificios destruidos lo que muestra que la ocurrencia de terremotos, mremotos solo deja catastrofes a escalas inconcebibles.

2.1.3 Mayores eventos sísmicos registrados en Ecuador

La sismicidad en Ecuador es consecuencia de la convergencia entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana. El Ecuador se ve afectado a la vez por sismos originados en la zona de subducción y por sismos superficiales relacionados con la deformación andina actual (Yepes, 1994).

- **1868 – Ibarra Mw= 7,2**

Los terremotos que afectaron a Ecuador en 1868 ocurrieron en dos momentos distintos: el primero el 15 de agosto a las 19:30 UTC y el segundo el 16 de agosto a las 06:30 UTC. Se estima que el primero tuvo una magnitud de 6,3 MW, mientras que el segundo alcanzó una magnitud de 7,7 MW. Estos eventos sísmicos provocaron una tragedia significativa, con un número estimado de víctimas. Los daños fueron particularmente severos en el noreste de Ecuador y en el suroeste de Colombia. El sismo del 15 de agosto se originó cerca de El Ángel, en la provincia de Carchi, que está situada cerca de la frontera colombiana. Por otro lado, el terremoto del 16 de agosto se localizó en las cercanías de Ibarra, en la provincia de Imbabura (Geofisico, 2017).

Las consecuencias de estos terremotos no solo se sintieron en términos de pérdidas humanas, sino que también causaron daños extensos en infraestructuras, edificaciones y comunidades enteras, afectando la vida cotidiana de millas de personas. Este desastre natural destacó la vulnerabilidad de la región a los sismos (Geofisico, 2017).

- **2016 – Manabí Mw= 7,8**

El 16 de abril de 2016, Ecuador experimentó un terremoto de magnitud 7,8 Mw, localizado a 20 km de profundidad y con una duración aproximada de 75 segundos. En los días posteriores, se registraron seis réplicas, con magnitudes entre 6,0 y 6,76.

El sismo provocó la pérdida de 661 vidas y dejó a 6,274 personas heridas, afectando a un total de 430,000 individuos; de estos, 350,000 necesitaron asistencia humanitaria y 80,000 fueron desplazados debido a la destrucción o daños en sus viviendas.

La devastación fue particularmente severa en localidades como Jama y Pedernales, generando problemas significativos en términos de seguridad, salud y acceso a alimentos y servicios básicos. Estas crisis impactaron a amplios sectores de la población en las provincias de Esmeraldas, Manabí, Santo Domingo de los Tsáchilas, Guayas, Los Ríos y Santa Elena, lo que requirió la intervención coordinada de diversas organizaciones estatales a niveles local, provincial y nacional para abordar las necesidades humanitarias y restaurar la normalidad en la región (Alvarado, 2018).

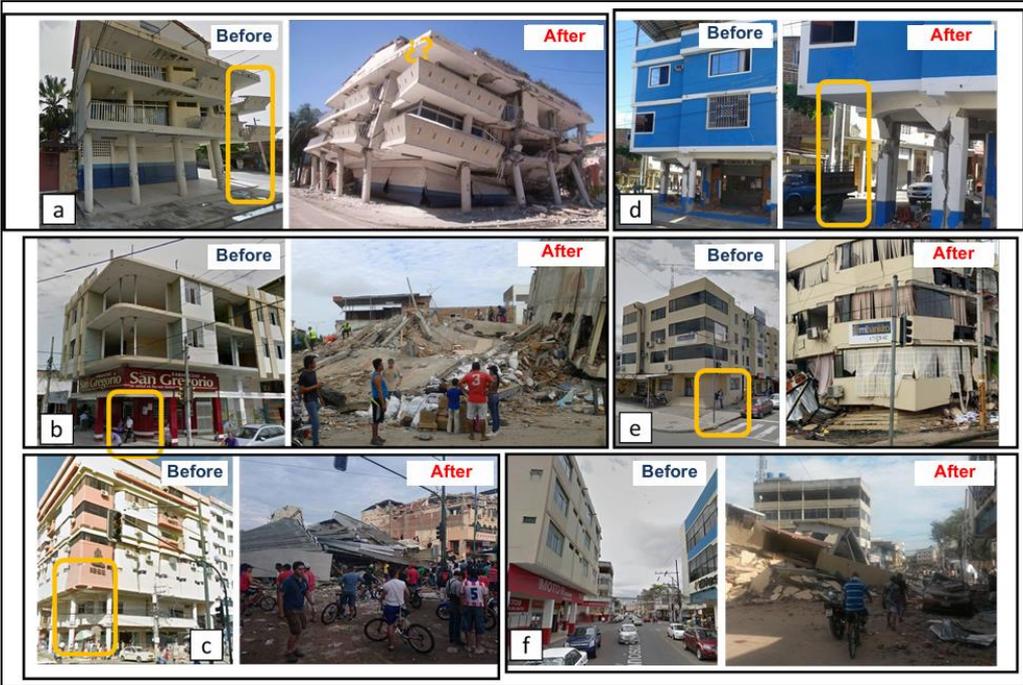


Ilustración 2.6: Sismo 16 de abril de 2016(Castañeda & Mieles Bravo, 2017)



Ilustración 2.7: Sismo 16 de abril de 2016(Castañeda & Mieles Bravo, 2017)

2.1.4 Estaciones Ecuador

Es de especial importancia mostrar el mapa de la ubicación de las estaciones que tiene Ecuador.

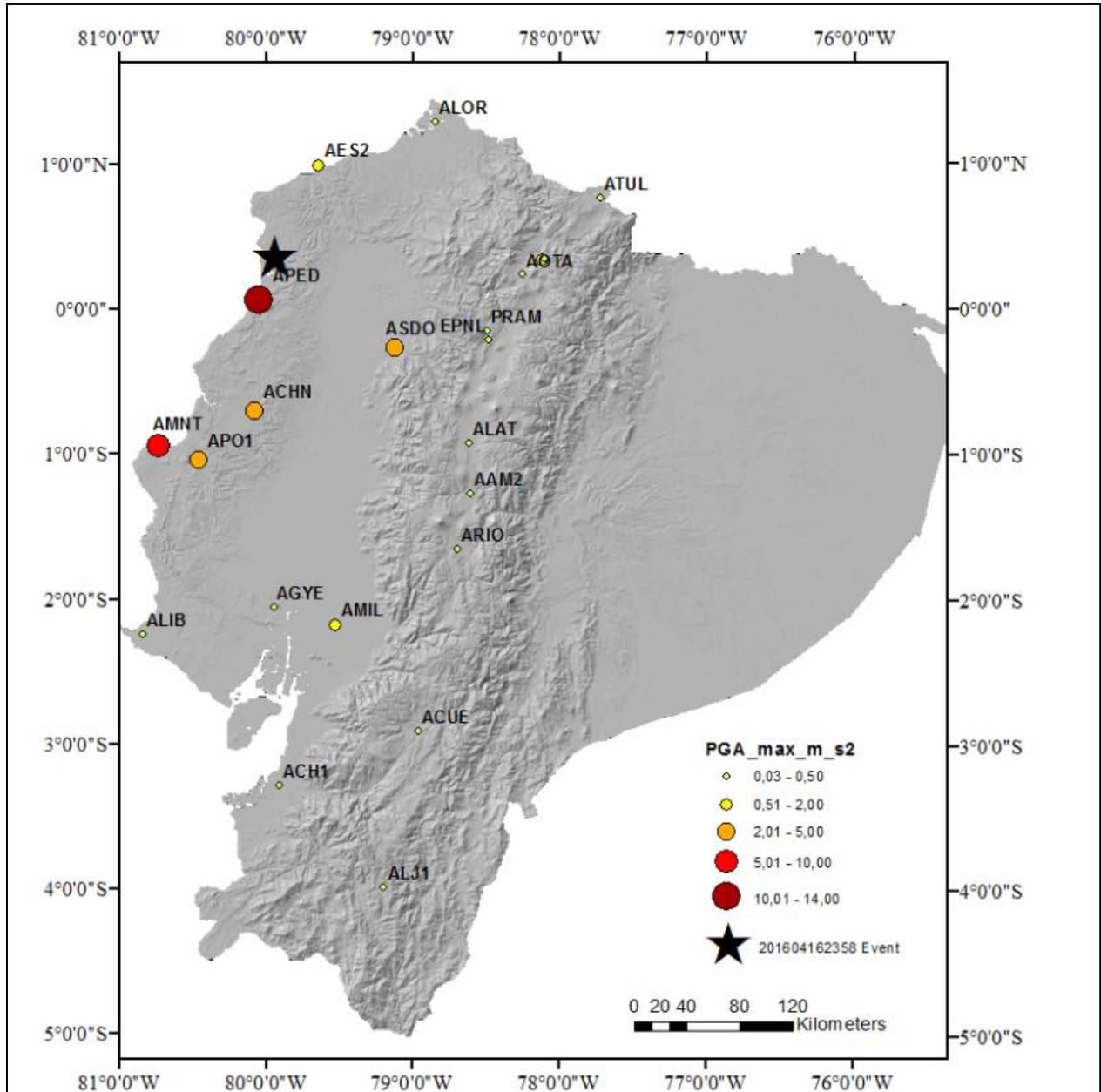


Ilustración 2.8: Distribución, Red de acelerógrafos (Instituto Geofísico, 2016)

Se puede ver la distribución de las estaciones y también rangos de PGA máximos obtenidos en m/s^2 . La estación APED que es la de Pedernales registro un valor máximo de $13.803 m/s^2$ (Instituto Geofísico, 2016).

2.1.5 Sismicidad y fallas en la ciudad de Loja -Ecuador

Un estudio elaborado por el Municipio y publicado en el documento Perfil Urbano Ambiental determinó que en Loja existen 11 zonas de alto riesgo y otras 11 de muy alto riesgo. La mayor incidencia se registra en el norte y en el sur al estar caracterizados por suelos arcillosos (El Comercio, 2012).

La hoya de Loja, cuya extensión es de 20 kilómetros de longitud (norte-sur) por nueve de ancho (oriente-occidente), se encuentra asentada sobre marcadas fallas geológicas de tipo tectónico, formadas hace millones de años, y que en la actualidad están generando una problemática. Las cuales atraviesan por el costado este de la urbe y la otra en el contacto a la altura del cerro El Villonaco, éstas dos corren paralelas de norte a sur, adicionalmente a ellas existen fallas transversales o perpendiculares que hacen de la urbe un mosaico de estructuras o microplacas que generan una serie de problemas para el desarrollo urbanístico, industrial y ambiental de la ciudad (Guamán, 2014).

La ciudad de Loja está influenciada por diversas fallas tectónicas y estructuras geológicas debido a su ubicación en la convergencia de las placas tectónicas de Nazca y Sudamericana. El movimiento a lo largo de una falla es lo que causa un sismo
Falla de Girón-Méndez, Catamayo, Loja y Vilcabamba

Falla de Girón-Méndez

- Es una falla importante que atraviesa el sur del Ecuador y pasa cerca de la región de Loja.
- Forma parte del sistema de fallas relacionadas con la deformación tectónica activa de los Andes (Reyes, 2006).

Falla de Catamayo

- Se localiza al oeste de Loja y es una estructura importante en el sistema tectónico regional.
- Está asociada con movimientos de tipo compresivo que generan actividad sísmica moderada (Egüez, 2018).

Falla de Loja

- Es una falla local que atraviesa la ciudad o sus alrededores inmediatos.

- Puede presentar actividad tectónica que contribuye al riesgo sísmico en la zona (Egüez, 2018).

Falla de Vilcabamba

- Se encuentra cerca del valle de Vilcabamba, al sur de Loja.
- Está asociada con movimientos locales que pueden generar sismos de baja a moderada magnitud (Egüez, 2018).

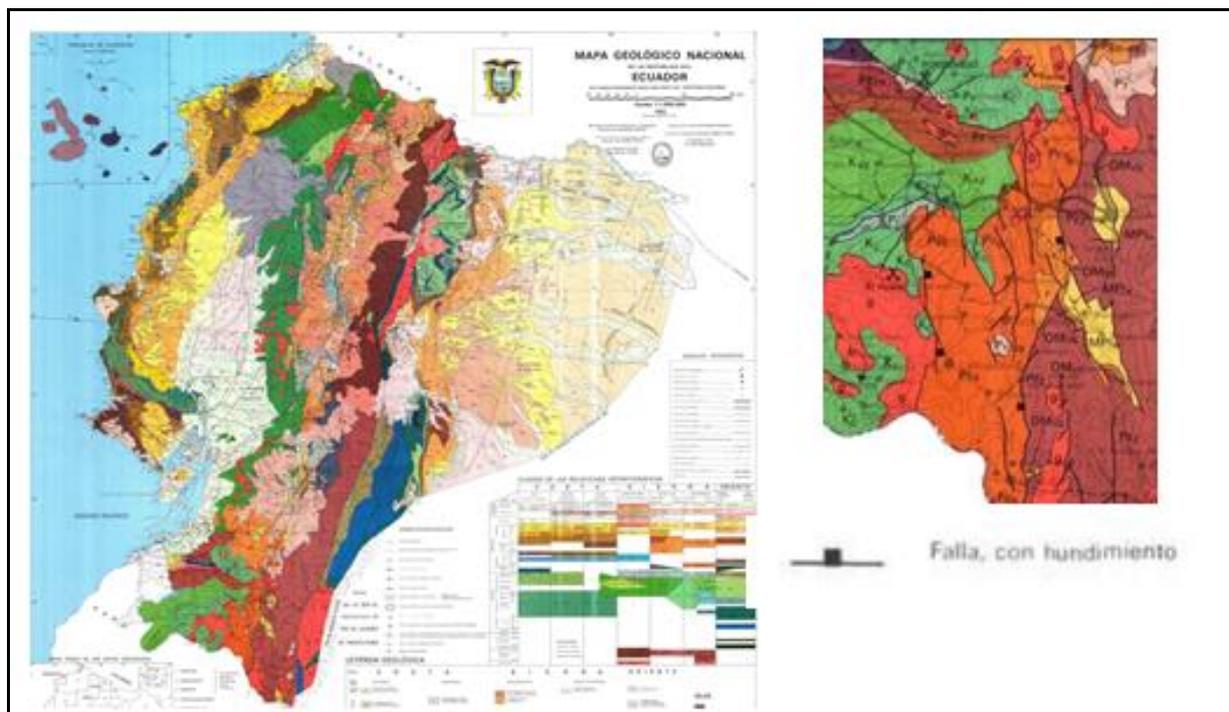


Ilustración 2.9: Mapa geológico del Ecuador (Guamán, 2014)

2.1.6 Riesgo sísmico

El riesgo sísmico se define como la combinación de dos factores de los que depende directamente: un factor es la peligrosidad sísmica que refleja la probabilidad de que ocurra un fenómeno físico como consecuencia de un terremoto, el otro factor es la vulnerabilidad sísmica que se define como un valor único que permite clasificar las estructuras de acuerdo con la calidad de composición estructural. Por lo tanto, las estructuras de una zona con cierta peligrosidad pueden verse afectadas dependiendo del grado de vulnerabilidad sísmica que presenten las mismas. (Angelis, 2015)

$$\text{RIESGO SISMICO} = \text{PELIGROSIDAD SISMICA} \times \text{VULNERABILIDAD SISMICA}$$

Ecuador se caracteriza por un alto nivel de peligro sísmico debido a su exposición a diversas amenazas naturales. Provincias como Esmeraldas, Santa Elena, Guayas, los Ríos, Santo Domingo, Manabí y más provincias de la Sierra han sido testigos de significativas destrucciones y por esta razón se torna de gran importancia el trabajo de la reducción de vulnerabilidad de las estructuras (Cunalata & Caiza, 2022). El riesgo sísmico se puede traducir para cuantificarlo como la cantidad de daño que una estructura, o un sector de construcción va a sufrir en el futuro cuando estén expuestas a escenarios sísmicos (Gavarini, 2023).

2.1.2 Peligrosidad sísmica

La peligrosidad sísmica se expresa generalmente en términos estadísticos y se basa en datos históricos de terremotos, así como en modelos geológicos y sismológicos. Este parámetro se utiliza para crear mapas de peligrosidad sísmica, que son herramientas cruciales para la planificación urbana, la construcción de infraestructuras y la gestión de emergencias. Al conocer la peligrosidad sísmica de una región, los ingenieros y arquitectos pueden diseñar edificios y otras estructuras tomando en cuenta las normativas sismorresistentes (Alicante, 2015).

2.1.3 Vulnerabilidad Sísmica

La vulnerabilidad sísmica es una característica inherente a las estructuras, determinada por la forma en que han sido diseñadas y construidas. Factores como el tipo de materiales, la calidad de la ingeniería, la geometría y el método de construcción juegan un papel crucial en su capacidad para resistir fuerzas sísmicas. Una estructura bien diseñada puede absorber y disipar la energía de un sismo, mientras que una mal construida puede sufrir daños significativos o colapsar. Por lo tanto, la vulnerabilidad sísmica se relaciona directamente con la composición estructural y la atención a las normativas de construcción (Caicedo, Barbat, Canas, & Aguiar, 1994).

Para caracterizar la vulnerabilidad de las estructuras a continuación se enlista los parámetros más importantes que permiten y dan pie a la vulnerabilidad en primer lugar depende del diseño y cálculo estructural, además de gran importancia es la calidad de los materiales de la construcción de la obra, además los procesos constructivos también participan en este análisis, y por último el mantenimiento de la infraestructura a lo largo de su servicio si alguno de estos elementos presenta deficiencia es probable que afecte al buen desempeño de la estructura (Páez & Hernández).

En otras palabras, (Gavarini, 2023) también menciona que la vulnerabilidad es la debilidad que presenta la estructura, es el punto frágil, para lo cual se debe hacer bien el diagnóstico y poder tomar medidas precisas.

2.1.4 Análisis Estático no lineal por el método de Pushover

La metodología Modal Pushover Analysis (MPA), desarrollada por A. K. Chopra y R. K. Goel en 2001, es una herramienta esencial para la evaluación del comportamiento sísmico de estructuras. Permite estimar la demanda sísmica y verificar el desempeño de edificaciones ante sismos, lo que es crucial para garantizar la seguridad y la integridad de las construcciones en áreas propensas a terremotos (Chopra & Goel, 2002).

Esta técnica se basa en un análisis estático no lineal de tipo Pushover, que utiliza distribuciones de fuerzas laterales equivalentes a lo largo de la altura de la estructura. Al incorporar las contribuciones de los modos de vibración del comportamiento elástico, la MPA ofrece una visión integral del rendimiento estructural. Utiliza de forma aproximada la teoría clásica de la dinámica de estructuras, lo que facilita su implementación en el diseño y la evaluación.

Mediante esta metodología, se determina no solo la capacidad de resistencia de la estructura, sino también se obtiene información valiosa sobre su comportamiento no lineal. Esto incluye la secuencia en que las secciones entran en el rango no lineal, los desplazamientos laterales durante cada incremento de carga, las derivas de entrepisos, la ductilidad de los elementos y las posibles fallas por flexión y corte, así como los esfuerzos generados en la estructura (Mendoza & Moreira, 2022).

También conocido como análisis estático no lineal (AENL), este enfoque permite determinar la capacidad resistente de una estructura y compararla con la demanda esperada en caso de un evento sísmico. La demanda está relacionada con la peligrosidad sísmica del área donde se ubica la estructura, incluyendo factores como la historia sísmica, la geología local y la proximidad a fallas tectónicas. Por otro lado, la capacidad de la estructura depende de su rigidez, resistencia y deformación de cada uno de los elementos que la conforman, así como de su diseño y materiales (Duarte, Martinez, & Santamaria, 2017).

2.1.4.1 Requerimientos para Hacer el analisis Pushover

Para llevar a cabo un análisis estático no lineal de manera efectiva, es fundamental recopilar información clave. Esta incluye:

- Características de los materiales.
- Geometría de las secciones de los elementos estructurales, así como la distribución del acero de refuerzo tanto longitudinal como transversal.
- Cargas permanentes y variables que actúen sobre la estructura.
- Resistencia de columnas y vigas.
- Identificar ubicación de posibles rotulas plásticas.
- Propiedades de esfuerzo-deformación de las rótulas plásticas en función del acero y las solicitaciones que actúan.
- Las cargas laterales que se aplican en el centro de masa de la estructura.

La magnitud de estas cargas para cada piso debe seguir la misma distribución que las cargas resultantes del primer modo de vibración. Esto significa que la distribución tiene forma de triángulo invertido, con un valor máximo en el piso superior y disminuyendo gradualmente hacia el nivel inferior, sin embargo depende de la altura (Motamedi & Nateghi, 2008). Para la definición de los umbrales se aplicará los criterios proporcionados por (Zoran & Goran, 2003).

2.1.4.2 Comportamiento no lineal de Estructuras

Hasta hace poco, muchos ingenieros se limitaban a usar un análisis lineal, que establece una relación proporcional entre fuerza y deformación. Aunque esto ha funcionado bien para calcular estructuras de concreto reforzado, a menudo ha resultado en sobredimensionamiento, ya que estas estructuras operan en el rango elástico. Aunque muchos problemas ingenieriles cotidianos pueden resolverse con este enfoque, algunos desafíos más complejos requieren un análisis no lineal (Duarte, Martinez, & Santamaria, 2017).

La principal distinción entre un análisis lineal y uno no lineal es el concepto de rigidez, que mide la resistencia de un material a las deformaciones elásticas. La rigidez de un elemento estructural puede verse afectada por su forma, el tipo de material y las condiciones de apoyo. Cuando un elemento de concreto reforzado se deforma debido a cargas externas, su rigidez puede cambiar. Si las deformaciones son significativas o si el material alcanza su límite elástico o de fallo, esto afecta sus propiedades. En el análisis lineal, se asume que la rigidez es constante, lo que significa que el elemento no experimentará cambios en sus propiedades o en su forma. En contraste, el análisis no lineal reconoce que la rigidez puede variar durante el proceso de deformación, lo que obliga a los diseñadores a ajustar su enfoque a medida que la estructura se deforma (Duarte, Martinez, & Santamaria, 2017).

2.1.4.3 No linealidad de rotulas y fibra

Tanto para las vigas como para las columnas en Opensees en este proyecto se las representara con la configuración de patch y layer para representar las fibras de concreto y las de acero corrugado. ¿Qué es una sección de fibra? Esto consiste en la descomposición de la sección transversal de un elemento en pequeñas áreas que se llaman fibras y el analista propone las divisiones en ambos sentidos del plano, donde cada fibra está asociada con un material uniaxial que representa su comportamiento esfuerzo deformación. La finalidad de esto es capturar el comportamiento no lineal de los elementos que estan sometidos a esfuerzos ya sean de tracción, compresión, etc.,(Celi, Pantoja , Sosa, & Ayala, 2018).

Como se sabe la sección de los elementos tiene áreas que son confinadas siendo esta la encerrada en el núcleo central, se tiene las áreas no confinadas que son prácticamente los recubrimientos y las barras longitudinales de acero, por lo tanto, cada uno de estos tendrá su propia definición conforme corresponda. Cada fibra se podrá calcular la posición tomando en consideración la posición con respecto al eje neutro (Mazzoni, McKenna, Scott, & Fenves, 2006).

El método de integración Gauss-Lobatto se utiliza en OpenSees para obtener una solución numérica precisa en los modelos de fibras y rótulas plásticas. Este método es particularmente útil cuando se manejan elementos no lineales o secciones compuestas con fibra, ya que permite una integración eficiente y precisa sobre una sección transversal (Kulatilake, 1999).

Características del Método Gauss-Lobatto:

Puntos de Integración: Utiliza puntos de integración en los extremos (Gauss-Lobatto), lo que lo hace ideal para problemas donde la solución en los bordes de la sección es crítica, como en los problemas de flexión no lineal.

Menos Puntos de Integración: En comparación con otros métodos como Gauss-Gauss, Gauss-Lobatto utiliza solo un número reducido de puntos de integración, pero es eficiente en términos de precisión.

Precisión: Para elementos no lineales, el método Gauss-Lobatto es particularmente preciso en la integración de materiales no lineales, ya que favorece las evaluaciones en los extremos de la sección, donde ocurren las mayores deformaciones (Kulatilake, 1999).

2.1.4.4 Curvas constitutivas de los materiales

Concreto confinado

El concreto confinado se define utilizando materiales como Concrete01, Concrete02 o Concrete04. Para considerar los efectos del confinamiento producido por el refuerzo transversal (estribos o anillos), es común emplear formulaciones como la propuesta por Mander et al. (1988), la cual ajusta la resistencia y ductilidad del concreto original (Mander, 1998).

Parámetros del Concreto Confinado

Los parámetros principales del concreto confinado son:

- **Resistencia máxima confinada f'_{cc} :** La resistencia del concreto aumenta debido a los esfuerzos laterales generados por el refuerzo transversal.
- **Deformación correspondiente al pico ϵ_{cc} :** La deformación a compresión máxima también se incrementa como efecto del confinamiento (Mander, 1998).

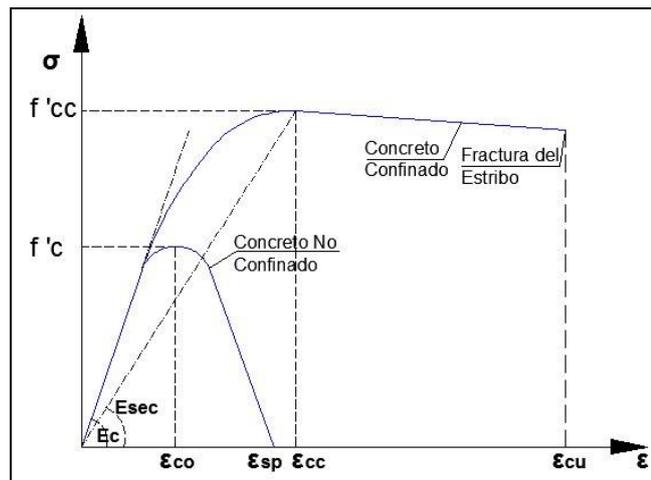


Ilustración 2.10: Modelo de Mander Concreto (Medina, 2015)

Concreto no confinado

El concreto no confinado en OpenSeesPy se modela utilizando materiales como Concrete01, que proporciona una representación básica de su comportamiento en compresión, considerando una pérdida lineal de resistencia después de alcanzar el máximo esfuerzo. Esta definición resulta adecuada para las zonas sin confinamiento lateral, como el recubrimiento de concreto en columnas y vigas (Mander, 1998).

Modelo de Mander

El modelo de Mander et al. (1988) es una herramienta fundamental para evaluar el comportamiento del concreto confinado en estructuras, ya que permite capturar el incremento de resistencia y ductilidad producido por el refuerzo transversal. Este modelo es ampliamente utilizado en el diseño sísmico y en simulaciones numéricas para evaluar la capacidad de deformación de elementos estructurales (Mander, 1998).

Acero de refuerzo

El acero de refuerzo se modela utilizando diversos materiales uniaxiales que simulan el comportamiento tensión-deformación del acero, especialmente en condiciones de carga estática o cíclica. Los modelos más comunes son Steel01, Steel02, y Reinforcing Steel, que permiten ajustar el comportamiento del acero dependiendo de las necesidades del análisis (Mander, 1998).

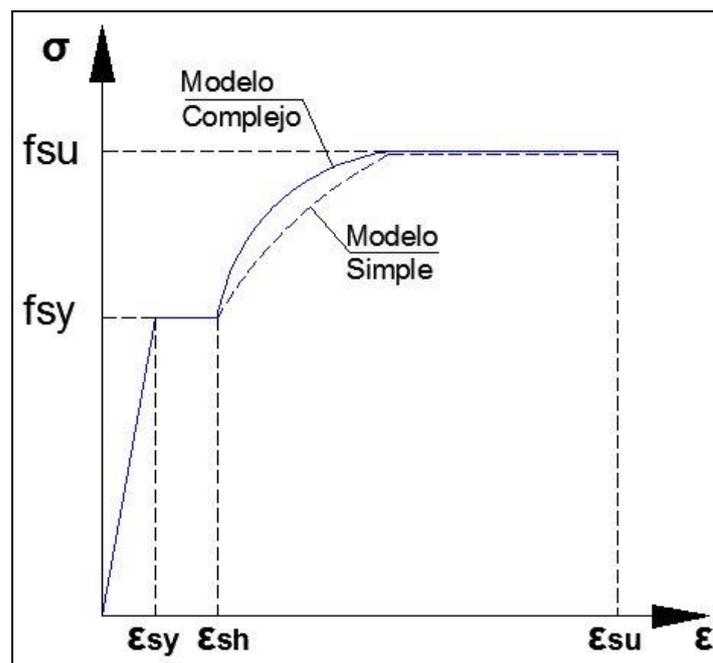


Ilustración 2.11: Modelo de Park para el acero (Medina, 2015)

Modelos Principales:

Steel01:

Es un modelo bilineal que representa el acero como elástico-perfectamente plástico. Es adecuado para simulaciones simples donde el comportamiento del acero no incluye endurecimiento por deformación.

Parámetros: Resistencia a la fluencia (f_y), módulo de elasticidad (EEE), y parámetro de endurecimiento cinemático (b) (Mander, 1998).

Steel02:

Utiliza una formulación más avanzada que captura el endurecimiento isotrópico y cinemático, permitiendo un comportamiento cíclico más realista, como el endurecimiento durante las deformaciones plásticas y la transición de la curva de esfuerzo-deformación.

Parámetros: Además de f_y y E , incluye parámetros para modelar el comportamiento cíclico y el endurecimiento isotrópico (Mander, 1998).

2.1.4.5 Diseño basado en el desempeño

El diseño basado en el desempeño, según la FEMA 349, es un enfoque de ingeniería estructural que establece niveles específicos de rendimiento para las edificaciones ante diversas condiciones de carga, especialmente sismos. Este método va más allá de los requisitos de diseño estándar al definir criterios claros que las estructuras deben cumplir, como el desempeño normal, que asegura el funcionamiento sin daños significativos; el desempeño de emergencia, que garantiza la integridad estructural tras un sismo moderado; y el desempeño en eventos severos, que permite la evacuación segura tras un terremoto intenso.

Utilizando análisis no lineales, este enfoque permite modelar la respuesta realista de los materiales y adaptarse a las características específicas de cada proyecto, considerando factores geológicos y condiciones del suelo. Al centrarse en la resiliencia y funcionalidad, el diseño basado en el desempeño busca optimizar la seguridad de las edificaciones y minimizar daños y costos de reparación en caso de sismos (FEMA-349, 2000).

Niveles de desempeño

Según la SEAOC (Asociación de Ingenieros Estructurales de California, 1995), los niveles de operatividad, o niveles de desempeño, definen condiciones límite de daño que son tolerables. Estos niveles se establecen en función de tres aspectos clave: ocupación inmediata, seguridad de vida y prevención de colapso. La ocupación inmediata (IO), correspondiente al nivel de desempeño S-1, se refiere a un estado en el que, tras un sismo, la estructura aún es segura y mantiene su rigidez y resistencia sísmica. La seguridad de vida (LS), que se clasifica como nivel S-3, describe un estado en el que hay daño en los elementos estructurales, pero se conserva cierta estabilidad y resistencia antes de que ocurra un colapso parcial o total.

Por último, la prevención de colapso (CP), identificada como nivel S-5, se refiere a una situación en la que, aunque la estructura presenta daño y puede soportar cargas gravitacionales, ya no tiene la estabilidad ni la resistencia necesarias para evitar un colapso (Mendoza & Moreira, 2022).

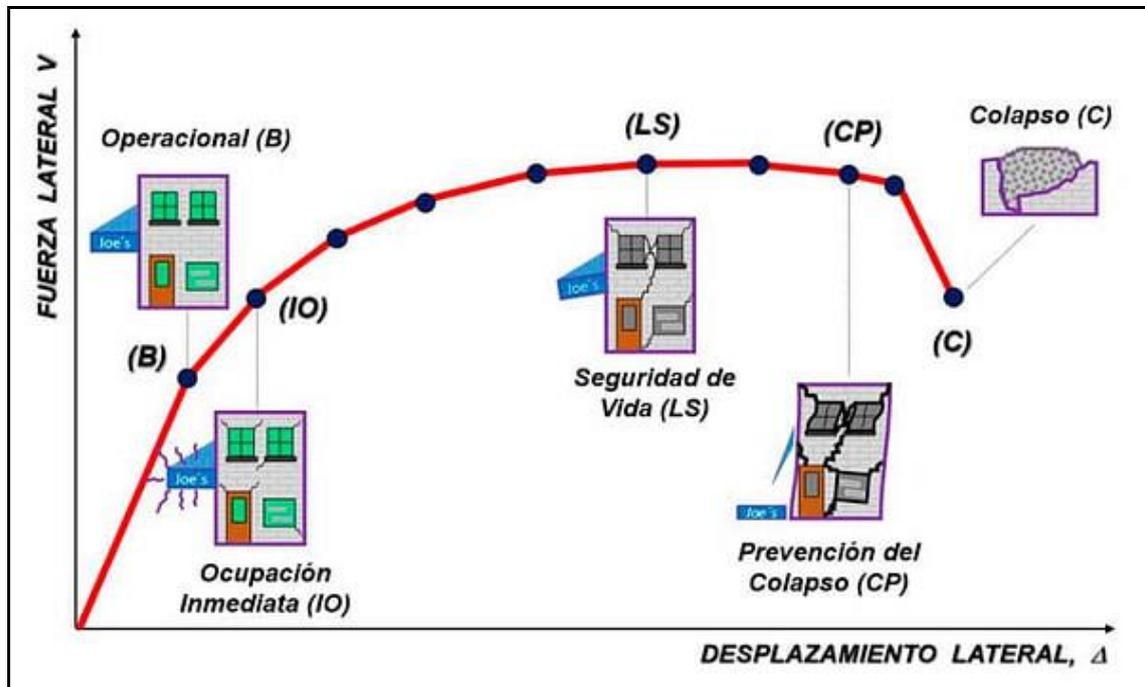


Ilustración 2.12: Niveles de desempeño (Institute, 2023)

Curva de Capacidad

La curva de capacidad sísmica es un gráfico que representa la relación entre el desplazamiento lateral de una estructura y la fuerza lateral que puede resistir durante un evento sísmico, como podemos observar en la ilustración anterior. En el eje horizontal se muestra el desplazamiento, mientras que el eje vertical indica la fuerza. La curva comienza en el origen, subiendo de manera casi lineal en el rango elástico, y luego se curva a medida que la estructura alcanza su punto de rendimiento, donde empiezan las deformaciones plásticas. Finalmente, se extiende hasta un punto máximo que representa el colapso, donde la estructura ya no puede soportar más carga. Esta curva es esencial para evaluar el desempeño sísmico de las edificaciones (Salcedo, 2017).

El resultado de hacer el análisis no lineal es la curva de capacidad, la cual nos indica dos puntos principales: el punto de fluencia y el punto último donde se relaciona la capacidad lateral a fuerza resistente de la estructura y también se relaciona el desplazamiento, por lo tanto con estos datos se identifica el rango no lineal, donde la estructura disipa la energía por medio del daño, y es en este punto donde se hace distinciones de los niveles de daño, y estos son los que se presentan las formulaciones correspondientes a los niveles de daño, como resultado de numerosas investigaciones que han desarrollado en estudios como es el de Risk.

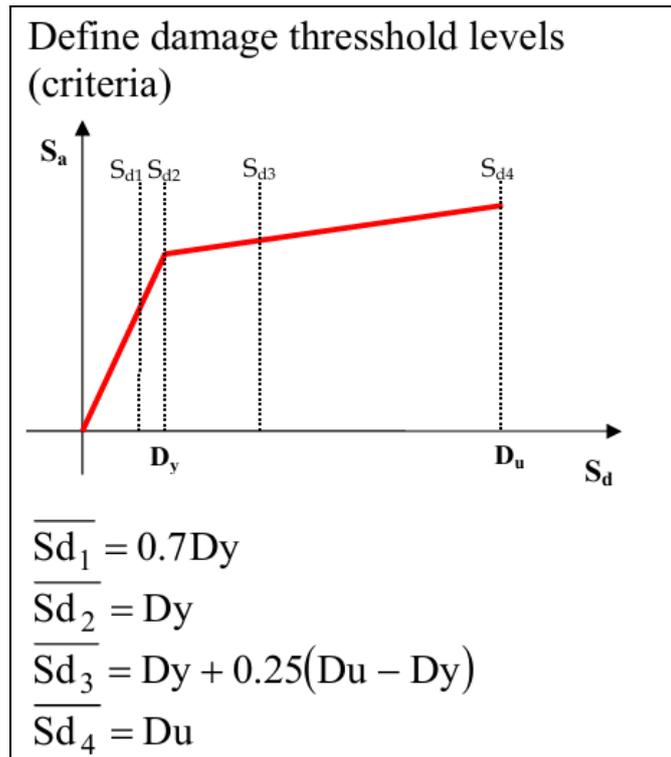


Ilustración 2.13: Umbrales para daño (Sousa, Marques, Silva, & Weatherill, 2018)

Son cuatro estados de daño, y cada uno tiene su descripción física del daño al que corresponde. En las siguientes líneas se encuentra el apartado de las curvas de fragilidad, en esta sección se muestra una tabla con los significados de los estados de daño a los que se está haciendo referencia.

2.1.5 Tiempo historia

2.1.6 Curvas de Fragilidad

Las curvas de fragilidad representan una distribución log-normal de la probabilidad de alcanzar o exceder ciertos niveles o estados de daño, para aplicar la función se requiere determinar los siguientes parámetros estadísticos de cada curva se requiere la media y la desviación estándar de la intensidad (IM) que se esté representando puede ser Peak ground acceleration PGA, aceleración espectral S_a , desplazamiento espectral S_d , etc.... (Hanus, 1999).

Estado de Daño		Descripción
	Leve	Grietas capilares por flexión o cortante en algunas vigas y columnas cerca de las juntas o dentro de las juntas.
	Moderado	La mayoría de las vigas y columnas muestran grietas finas. En los pórticos dúctiles, algunos de los elementos del pórtico han alcanzado la capacidad de fluencia indicada por grietas de flexión más grandes y algún desprendimiento del hormigón. Los pórticos no dúctiles pueden exhibir grietas de corte y desprendimientos más grandes.
	Severo	Algunos de los elementos del pórtico han alcanzado su máxima capacidad indicada por grandes grietas de flexión, desprendimiento de hormigón y flexión de la armadura; los elementos no dúctiles del pórtico pueden haber sufrido fallas por cortante o fallas por adherencia en los empalmes del refuerzo, pandeo del refuerzo principal en las columnas, lo que puede resultar en un colapso parcial.
	Colapso	La estructura está colapsada o en peligro inminente de colapsar debido a la falla por fragilidad de los elementos no dúctiles del pórtico o la pérdida de estabilidad del pórtico.

Ilustración 2.14: Estados de daño (Hanus, 1999)

2.1.6.1 Ajuste de las funciones de fragilidad

Según Baker el método de múltiples franjas permite obtener resultados más precisos de funciones de fragilidad en comparación al método incremental. Esto se debe a que facilita el uso de una variedad de registros sísmicos, lo cual genera una evaluación más realista.

Para calcular las funciones de fragilidad mediante la metodología de múltiples franjas, es fundamental contar con un modelo bidimensional o tridimensional adecuado de la estructura que permita capturar su respuesta a través de análisis dinámico no lineal tiempo historia. Durante este proceso, se registran las demandas máximas de desplazamiento en el techo, lo que permite conformar una base de datos junto con los parámetros representativos de intensidad que se haya elegido para cada uno de los registros seleccionados.

Con esta base de datos y siguiendo la metodología propuesta por Baker se obtienen los parámetros estadísticos necesarios para generar una función de fragilidad representativa. Es importante contar con información proveniente de estudios experimentales existentes, o en su defecto, realizar ensayos para identificar los diferentes niveles de daño que se desarrollan a medida que aumenta la intensidad sísmica. Por lo general estos niveles de daño se definen mediante cuatro umbrales específicos que permiten clasificar y trabajar los datos obtenidos de los análisis estructurales.

Para este caso de curvas con procesos analíticos, el analista tiene el control completo sobre los datos, desde la elección del número de registros con diferentes intensidades hasta el conteo de los colapsos, es decir el número de registros que sobrepasan cada umbral de daño.

Para representar una función de fragilidad, se utiliza una función de distribución normal acumulativa, que involucra los parámetros de media y desviación estándar de la data de intensidad considerada en el análisis. Esto se interpreta como que los diferentes movimientos del suelo que generan daño, hasta alcanzar el colapso de la estructura, siguen una distribución logarítmica a medida que aumenta la intensidad.

La dispersión también conocida como desviación estándar, refleja que diferentes registros con la misma intensidad pueden producir diferentes respuestas por parte de la estructura.

Existen dos enfoques principales para poder calcular parámetros estadísticos a partir de datos. El primero es el método de los momentos, que busca encontrar parámetros tales que la función resultante tenga los mismos momentos (media y desviación estándar), que los de la muestra de datos. El segundo enfoque es el método de máxima verosimilitud, que determina los parámetros que maximizan la probabilidad de que los datos observados provengan de la función ajustada.

En resumen, mientras que el método de los momentos iguala los momentos de la muestra, el método de máxima verosimilitud maximiza la correspondencia con los datos observados. Ambos enfoques permiten tomar decisiones informadas sin sobreestimar ni subestimar el valor verdadero de los parámetros. En la metodología de múltiples franjas, se toma el producto de las probabilidades binomiales, en cada nivel de intensidad para obtener la probabilidad de todo el conjunto de datos.

Por último, las curvas de fragilidad representan la probabilidad de alcanzar un estado de daño para cierto nivel de intensidad sísmica. Esta intensidad puede expresarse en términos como derivas, desplazamiento espectral, aceleración espectral, o PGA, entre otros parámetros.

2.1.6.2 Método de máxima verosimilitud

Los parámetros se obtienen maximizando esta función de verosimilitud, con estos ajustes lo interesante es que no necesariamente se requieren múltiples observaciones para cada intensidad, sino que puede ser uno incluso, por eso es tan útil estas formulaciones de ajustes porque no distorsionan los resultados.

Pasos para calcular las funciones de fragilidad por el método de franjas

Se supone que para iniciar a desarrollar las curvas de fragilidad ya se ha desarrollado el análisis no lineal estático en este caso por el método de Pushover, esto nos genera la curva de capacidad la cual nos brinda la concepción de la resistencia a fuerzas laterales de la estructura, además se puede ver cuál es el desplazamiento máximo que alcanza y cuál es el desplazamiento en el cual la estructura empieza la fluencia por lo tanto, podemos conocer la ductilidad, diferenciando el rango lineal y no lineal de la curva de capacidad.

De la misma forma como ya se ha estudiado o realizado los ensayos correspondientes a las muestras estructurales que se esté analizando generalmente pórticos, ya se ha identificado las diferentes fases de daños que va alcanzando conforme va aumentando la intensidad, entonces significa que ya se tiene los patrones reconocidos, las definiciones de daño reconocidas y a esto es que se le conoce como estados de daño o umbrales de daño, que también hay estudios que ya han desarrollado con muchas cantidades de ensayos donde se ha calibrado ecuaciones analíticas para cada uno de los estados de daño, mismas que permiten calcular el umbral para cada daño.

En este proyecto se hará uso de estas ecuaciones dadas para conseguir los umbrales de los cuatro estados de daño considerados. Y con esto cuando un resultado de análisis sobrepase cierto umbral será considerado como una fracción de colapso, normalmente estas ecuaciones calibradas están en función de desplazamiento ultimo y desplazamiento de fluencia, por esto se necesita tener la curva de capacidad de Pushover.

Una vez registrada las diferentes columnas de data, tanto de las intensidades (IM) de cada registro como los correspondientes resultados del análisis no lineal, se recomienda realizar una gráfica que muestra la intensidad (IM) vs el desplazamiento en el techo. Recordando que ciertas intensidades deben ser medidas en función del periodo de la estructura. De esta grafica primero se va a identificar cual es la gráfica que mejor representa la tendencia de aumentar el desplazamiento cuando aumenta la intensidad, ya que esta será la que mejor represente la data y nos generará mejor las curvas de fragilidad.

Como segundo paso se procederá a ordenar la data en función de la intensidad seleccionada (IM) de menor a mayor, para poder realizar las agrupaciones de datos. En otras palabras, la data se dividirá en un cierto número de intervalos o franjas, normalmente puede ser entre 6 a 8 franjas dependiendo de los datos que se tenga, donde en cada franja va a tener que calcularse el promedio de la intensidad (IM) como primera componente y será graficada nuevamente con el respectivo desplazamiento, cosa que la gráfica se verá como columnas verticales de cada franja seleccionada.

Como tercer paso se procederá a contar cuantos registros o cuantos análisis se tiene en cada franja o en cada intervalo, y cuantos registros sobrepasan cada uno de los estados de daño: leve moderado extenso y completo, siendo acumulativo cada conteo es decir cada vez que se cuente el número de datos que sobrepasen el umbral se debe contar todos. Los que superen dicho umbral, de esta forma se va obteniendo el número de análisis y la fracción o porcentaje de análisis que hacen ingresar a cierto estado de daño a la estructura.

Ejemplo ilustrativo:

Supongamos que contamos con 30 análisis estructurales en la franja es decir (30 registros) y hemos definido cuatro estados de daño con los siguientes umbrales de desplazamiento: leve 5cm, moderado 8cm, extenso 12cm y para completo 17cm. A partir de estos umbrales el proceso para calcular las fracciones de colapso se realiza de la siguiente manera:

Primero estado de daño leve: se contabiliza cuantos registros superan los 5cm de desplazamiento, supongamos que 15 registros sobrepasan este umbral, la fracción de colapso será: $15/30=0.5$, esta sería la primera fracción del primer estado.

La siguiente: cuantos registros sobrepasan los 8cm: supongamos que son 20 entonces la fracción de colapso sería: $20/30 = 0.667$ esta sería la segunda fracción del segundo estado de daño, la siguiente: cuantos registros sobrepasan los 12cm: supongamos que son 25 entonces la fracción de colapso sería: $25/30 = 0.83$ esta sería la tercera fracción del tercer estado de daño, la siguiente: cuantos registros sobrepasan los 17cm: supongamos que son 29 entonces la fracción de colapso sería: $29/30 = 0.96$ esta sería la última fracción del cuarto estado de daño y ya con esto se tiene todas las fracciones de datos claramente identificados, esto se deberá hacer para cada intervalo que se haya seleccionado y que se vea que se requiere dependiendo de la variedad de datos que se tenga.

Como tercer paso se deberá aplicar las funciones de distribución log normal, identificando los parámetros estadísticos para cada una y además se deberá aplicar las funciones de ajuste debido a que el análisis que se está haciendo no es como el incremental que se escala y conforme aumenta la intensidad aumenta también el desplazamiento, no en este caso no es así, dado que si revisamos la data no necesariamente se cumple que a mayor intensidad mayor desplazamiento y es por esta razón que se debe aplicar los ajustes a estas funciones de fragilidad y para esto se va a aplicar lo que indica el profesor Baker en su artículo "Ajuste eficiente de las curvas de fragilidad", incluso se va a usar el material de herramientas proporcionado de manera gratuita.

Finalmente se deberá juntar en una sola gráfica las cuatro funciones de fragilidad y ya se tendrá la herramienta necesaria para identificar la probabilidad que tiene la estructura de alcanzar o superar cierto estado de daño, es decir tendremos claro cuál es la vulnerabilidad de la estructura al ingresar a la gráfica calculada con la demanda de interés.

2.1.7 ¿Cómo hacer un análisis de vulnerabilidad para un sector o ciudad?

Se puede dar el caso que se requiera hacer el análisis de la vulnerabilidad de un sector de población, por lo tanto, se requiere saber como se debe proceder, para esto en esta sección se dará lineamientos e instrucciones recopiladas que se deben seguir para cumplir el objetivo.

Una vez que ya se tenga bien claro el sector de estudio, se recomienda realizar una inspección preliminar para tener un primer vistazo observando la mayor cantidad de todas las estructuras, identificando patrones como tipos de materiales, numero de pisos, estado visual si se ven antiguas o nuevas, etc. Ya con esta visualización se va preparando un cierto inventario, se puede ir realizando zonificaciones con el fin de ir enmarcando las diferentes estructuras en un numero aceptable de tipologías.

Lo siguiente que se recomienda es ya ir detalladamente recopilando la información, pero se debe hacer la elección de algún método apropiado que nos permita recabar y levantar la información adecuada de cada estructura como el numero de pisos, año de construcción, sistemas estructurales resistentes a momento, estado actual, material principal de construcción y las ocupaciones respectivas, para esto y mas se puede emplear la metodología de (GEM) Global Earthquake Model siendo esta la metodología empleada por esta institución en la evaluación de la vulnerabilidad sísmico de las ciudades.

Para poder enmarcar por tipologías también es importante considerar la forma de las estructuras en planta y en elevación y también los entrepisos, esto permitirá que al momento de realizar las modelaciones matemáticas de las estructuras para aplicar la no linealidad se pueda considerar lo mas acertado los diferentes parámetros imprescindibles para captar el comportamiento mas real, de esta forma para cada tipología se puede hacer copias donde se considere por ejemplo que unos tengan mas paredes, menos paredes, o que sean de misma tipología pero diferentes usos, etc. Logrando así evaluar eficientemente una ciudad o pueblo entero (Celi, Pantoja , Sosa, & Ayala, 2018).

Otro punto importante también es que de cada tipología se puede hacer combinaciones por ejemplo de casos cuando los materiales sean los ideales, cuando no sean tan buenos y cuando sean malos, para poder tener analíticamente respuesta en diferentes casos, también se varían las alturas de los pisos conforme a variaciones que se haya encontrado en sitio.

2.2 Marco metodológico

La presente investigación es de carácter analítico y descriptivo. En esta sección, se llevará a cabo, en primer lugar, una descripción detallada de las características y configuración de la estructura objeto de estudio. Esto incluye los usos y ocupaciones asignados a cada nivel para determinar las cargas correspondientes, así como la tipología de los elementos estructurales necesarios para el modelado en cada dirección, utilizando la herramienta Opensees.

Para alcanzar los objetivos planteados, se desarrollarán curvas de fragilidad basadas en los resultados obtenidos del análisis estructural mediante procedimientos no lineales, tanto estáticos (Pushover) como dinámicos (análisis de historia de tiempo). Finalmente, se realizará la interpretación de estos resultados, empleando parámetros de intensidad apropiados para garantizar conclusiones fundamentadas.

2.2.1 Características de la Estructura

2.2.1.1 Características Arquitectónicas

La estructura por analizar cuenta con un nivel subterráneo destinado a parqueaderos. En la planta baja, se ubicarán oficinas y locales comerciales, mientras que las cuatro plantas superiores están diseñadas como espacios residenciales, con áreas para dormitorios y comedores, y una losa destinada a terraza. La planta baja ocupa un área de implantación de 41.40 metros de longitud y 11.75 metros de ancho, lo que da como resultado un área total de 486.45 m².

En el sentido corto (eje Y), la estructura cuenta con tres ejes identificados como A, B y C. En el sentido largo (eje X), se distribuyen siete ejes numerados del 1 al 7. La estructura presenta una configuración regular en planta.

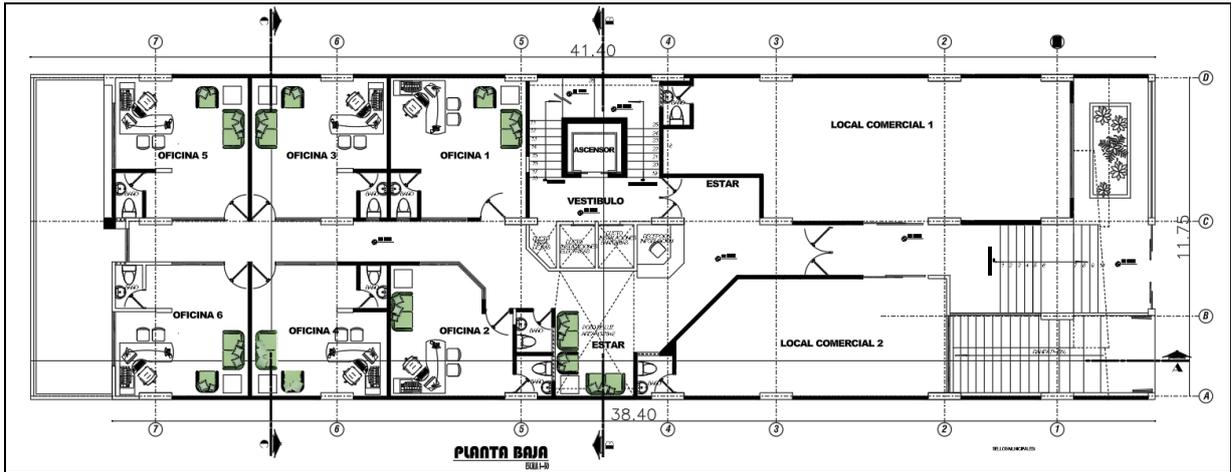


Ilustración 2.15: Planta Baja [CONSORCIO RP.LEGAL DR]

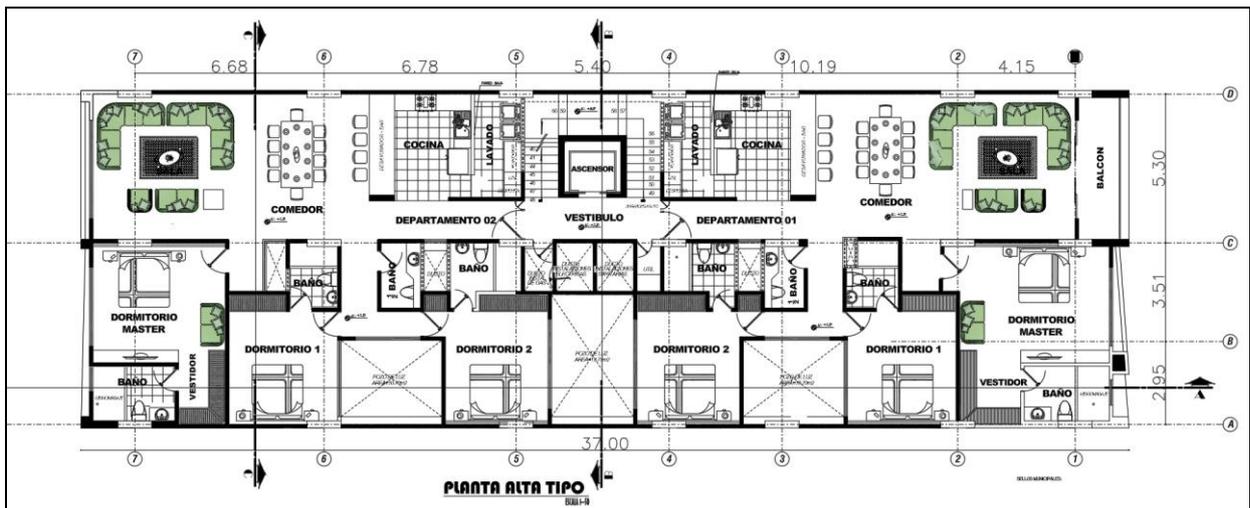


Ilustración 2.16: Plantas altas 1,2,3,4 tipo [CONSORCIO RP.LEGAL DR]

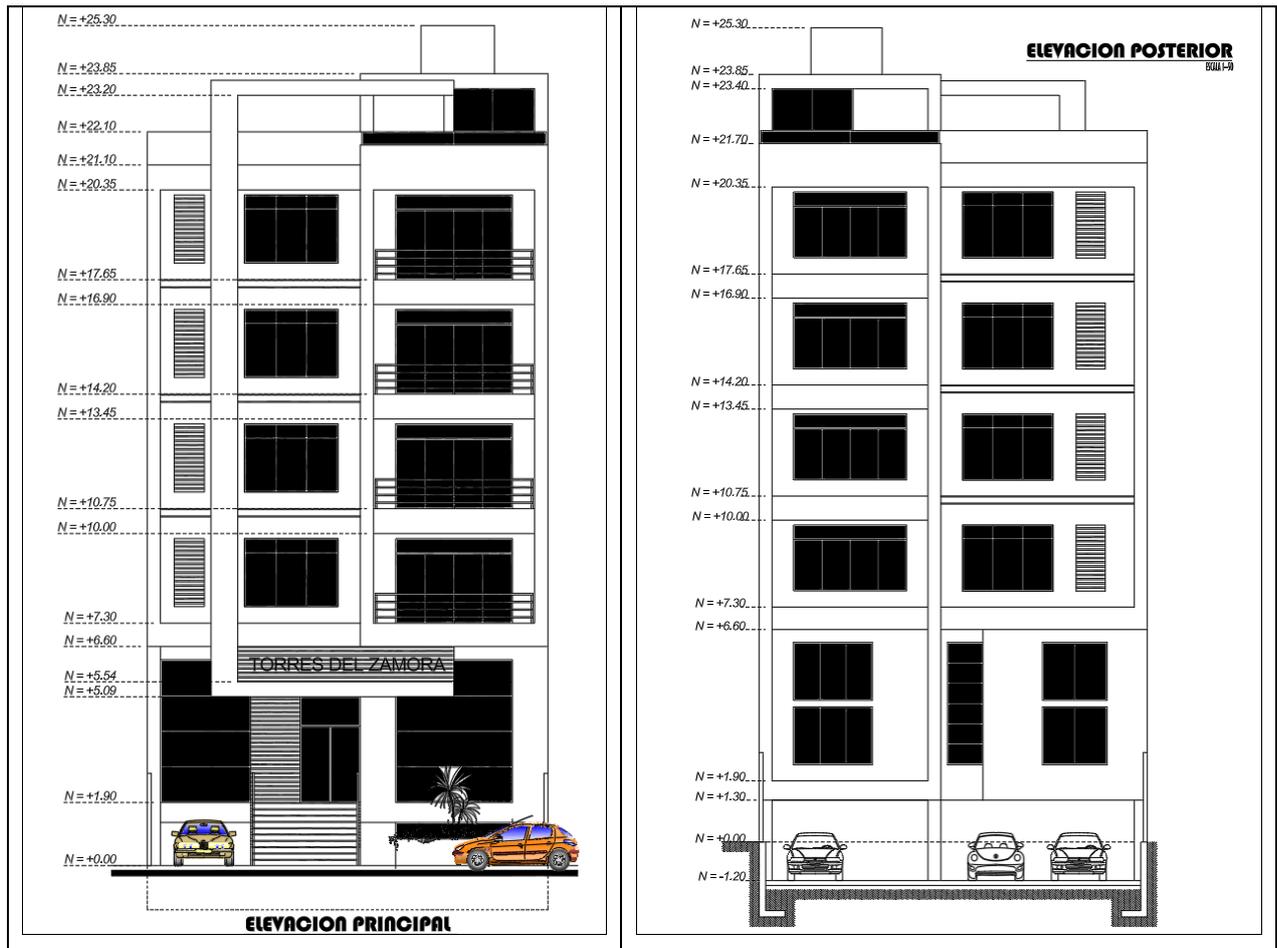


Ilustración 2.17: Fachada principal y posterior [CONSORCIO RP.LEGAL DR]

La tabla a continuación presenta un resumen de los niveles y la ocupación de los diferentes pisos.

Tabla 2.1: Resumen de niveles de losas [Barcia & Córdova, 2024]

NIVEL (m)	DESCRIPCIÓN	OCUPACIÓN
N+1.90	PLANTA BAJA	Oficinas y locales comerciales
N+4.40	VIGAS DE AMARRE	
N+7.30	PLANTA ALTA 1	Dedepartamentos y comedores
N+10.75	PLANTA ALTA 2	Dedepartamentos y comedores
N+14.20	PLANTA ALTA 3	Dedepartamentos y comedores
N+17.65	PLANTA ALTA 4	Dedepartamentos y comedores
N+21.10	PLANTA ALTA 5	Terraza

Tabla 2.2: Resumen de cargas para cada nivel [CONSORCIO RP.LEGAL DR]

NIVEL (m)	DESCRIPCIÓN	SCP (Kgf/m²)	LIVE (Kgf/m²)
N+1.90	PLANTA BAJA	587.312	480
N+4.40	VIGAS DE AMARRE	-	
N+7.30	PLANTA ALTA 1	587.312	200
N+10.75	PLANTA ALTA 2	587.312	200
N+14.20	PLANTA ALTA 3	587.312	200
N+17.65	PLANTA ALTA 4	587.312	200
N+21.10	PLANTA ALTA 5	380	200

2.2.2.2 Acción Lateral

Para realizar el análisis Pushover se utilizará el método de empuje modal espectral, el cual consiste en aplicar un patrón de carga lateral creciente de forma monótona hasta que la estructura alcance su punto de colapso. Este enfoque permite evaluar el comportamiento no lineal de la edificación bajo cargas sísmicas (ATC, 1996).

2.2.3 Modelado estructural

Utilizando la información proporcionada por los planos estructurales, se modelará en Python, empleando bibliotecas como OpenSeesPy, un pórtico representativo en 2D para cada dirección del edificio. Este modelo permitirá simular el comportamiento de la estructura bajo cargas sísmicas y obtener la curva de capacidad, la cual es esencial para evaluar el desempeño estructural.

2.2.3.1 Modelación en Software Estructural

A continuación, se presenta el modelo tridimensional de la estructura en un software de cálculo estructural; con el afán de dar un vistazo global a toda la estructura, ya que el desarrollo de todos los análisis que involucra este proyecto se realiza en modelos bidimensionales de los ejes C para sentido X y eje 6 para sentido Y respectivamente.

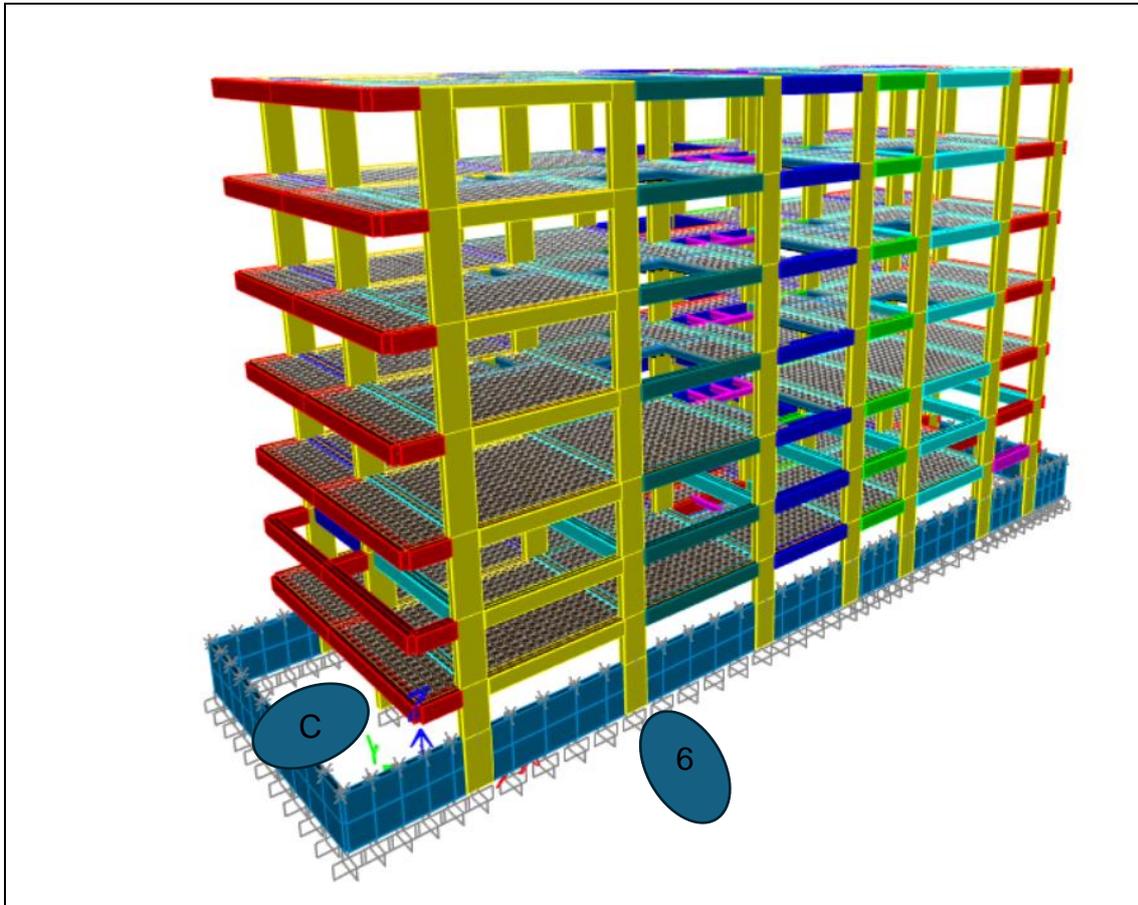


Ilustración 2.19: Modelación tridimensional [Barcia & Córdova, 2024]

Para la modelación y análisis en el software de código abierto Opensees, se seleccionaron los ejes C y 6 como referencia. Inicialmente, se realizó un análisis de la configuración en planta en ambas direcciones, evidenciando una distribución regular. Debido a esta regularidad, se puede suponer que el comportamiento estructural podrá ser representado adecuadamente mediante un modelo bidimensional, sin mayores complicaciones.

2.2.3.2 Modelación En Openses

La primera modelación presentada corresponde a la dirección X, que representa el eje longitudinal de mayor dimensión y en el cual las columnas están orientadas predominantemente. En esta modelación, se han detallado minuciosamente las secciones de cada tramo, incorporando la disposición específica de los aceros corrugados correspondientes. La representación de la no linealidad estructural se ha llevado a cabo mediante el método de fibras, aplicado tanto a las vigas como a las columnas, asegurando una caracterización precisa del comportamiento no lineal de los elementos estructurales

Dirección X

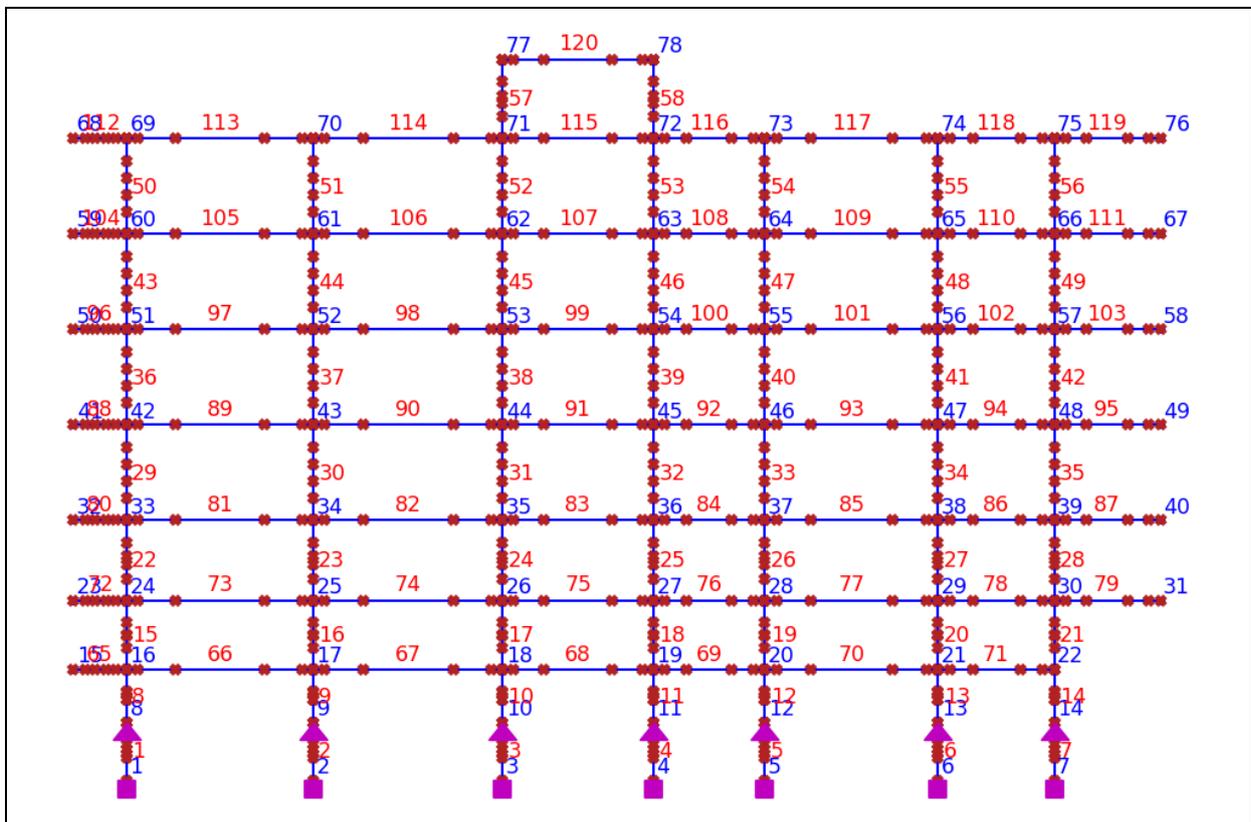


Ilustración 2.20: Modelado en Opensees Eje C [Barcia & Córdova, 2024]

Asimismo, se ha incorporado la calibración de los materiales de hormigón y acero, empleando sus respectivas leyes constitutivas. Este procedimiento se realizó con el objetivo de garantizar un comportamiento estructural que represente de manera precisa y realista las características físicas y mecánicas de los materiales.

Dirección Y

La siguiente modelación corresponde a la dirección Y, que representa el lado más corto de la estructura. En este eje, las columnas presentan su lado menor, y la estructura, en general, exhibe una menor inercia, dado que además únicamente cuenta con dos vanos. Al igual que en la dirección X, la no linealidad se ha modelado utilizando el enfoque de fibras, aplicado tanto a las columnas como a las vigas, asegurando consistencia en la representación del comportamiento estructural.

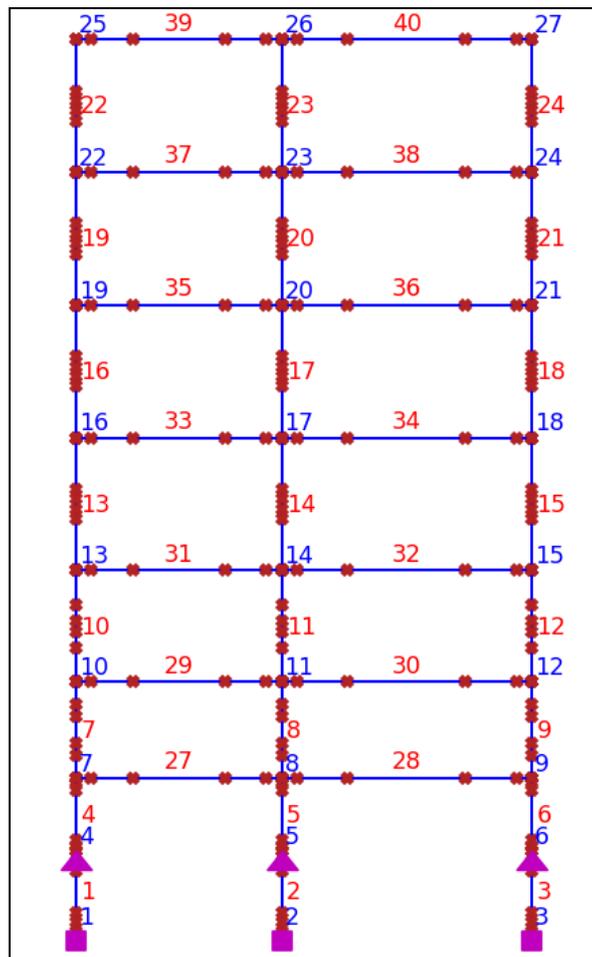


Ilustración 2.21: Modelado en Opensees eje 6 [Barcia & Córdova, 2024]

En la estructura objeto de modelación, se observa que, al nivel donde finaliza el muro correspondiente al sótano, se han aplicado restricciones al desplazamiento lateral. Esto se debe a las condiciones del suelo existente en la zona de implantación representando la pared del sótano, el cual limita los movimientos laterales de la estructura en dicho nivel.

2.2.4 Análisis para llevar a cabo en cada dirección

2.2.4.1 Análisis estático no lineal de Pushover

Debido a que se requiere conocer los diferentes niveles de daño conforme avanza la demanda sísmica lateral en la estructura, se optó por la realización de análisis de empuje lateral monotónico creciente. Para garantizar la confiabilidad, primero se realizó calibración de modelo numérico, lo que consistió en conseguir artículos de estudios experimentales con sistemas estructurales de pórticos de concreto armado que es lo que estamos estudiando, y se los ingreso con toda la información que proporcionan como geometría, armados de los elementos y materiales, y si la curva que genera el código es igual o muy cercana a la que han obtenido experimentalmente significa que el código que planteamos está bien. Después de realizar esto con al menos 4 artículos se pudo conseguir resultados satisfactorios, por lo tanto, se prosigue a aplicarlo a los pórticos de análisis correspondientes a este proyecto.

Continuando con el avance cronológico de los daños conforme aumenta el empuje, se requiere que haya una medida cuantitativa relacionando, ya sea por ejemplo en función de deriva, en función de la curva de capacidad con lo puntos últimos y de fluencia etc., siendo lo importante saber las fases o transiciones de un daño hacia otro daño, para de tal manera hacer una distinción entre un daño menor, hacia un daño mayor y colapso.

Debido a esto se requiere de estudios experimentales, sin embargo, como ya existen numerosos análisis y estudios de este tipo que se han realizado a sistemas estructurales de pórticos de concreto armado, se va aplicar calibraciones de resultados que ha obtenido y que recomienda Risk (Sousa, Marques, Silva, & Weatherill, 2018) y que en numerosos estudios hacen uso, ya que son ecuaciones que estan en función tanto del desplazamiento último, como del desplazamiento de fluencia y con esto se puede obtener límites para cada estado de daño, y eso también se aplicara en este trabajo.

2.2.4.2 Análisis estático no lineal tiempo historia

Se llevará a cabo un análisis dinámico no lineal en el dominio del tiempo (Time-History) para determinar los desplazamientos de demanda en la parte superior de la estructura en un punto central cerca al centro de masa. Sera sometida a una gran variedad de registros nacionales e internacionales para capturar la respuesta de la estructura ante

diferentes escenarios, los registros serán ingresados solamente corregidos, sin escalar, ya que la metodología que se empleara para calcular las curvas de fragilidad así lo indica.

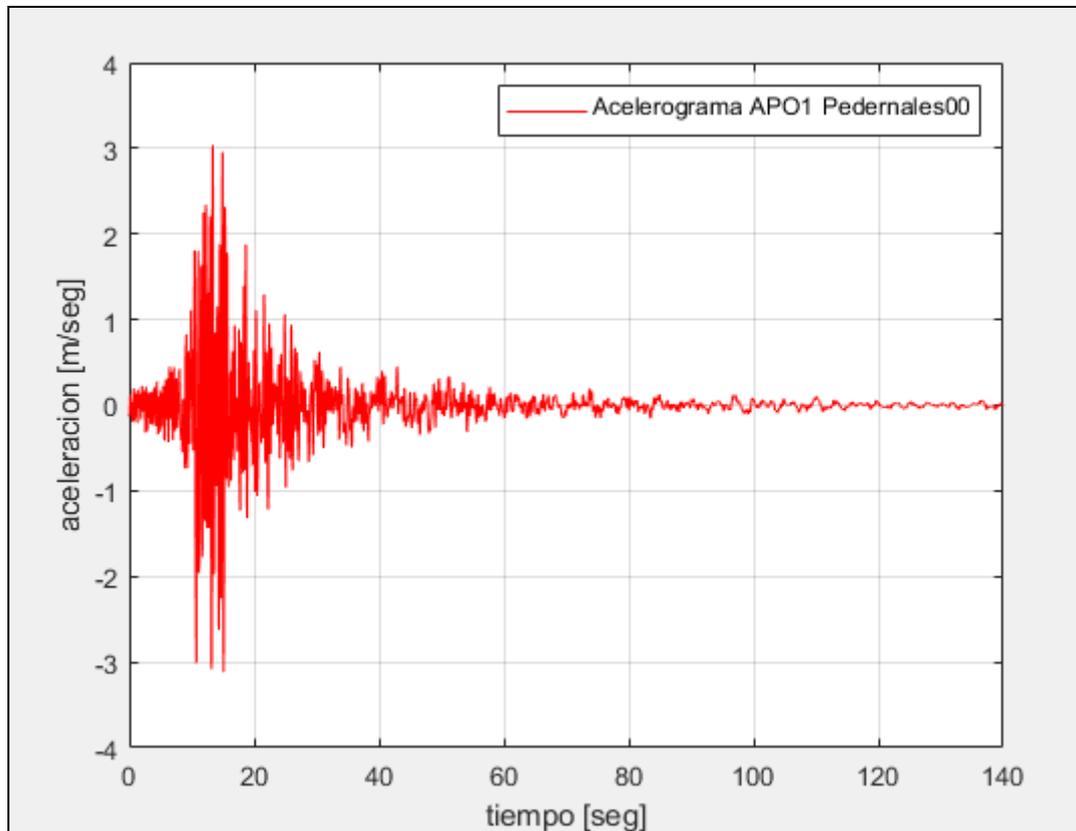


Ilustración 2.22: Registros sísmicos para análisis [Barcia & Córdova, 2024]

Como se puede apreciar en la ilustración para hacer el análisis no lineal dinámico se necesita como dato de entrada los registros sísmicos para cada una de las direcciones, mismos que se deben tomar en cuenta todas las correcciones por la línea de base, tomar en cuenta las unidades y los pasos de tiempo que cada registro es constante.

2.2.5 Tabulación de datos

Las respuestas de la estructura que se obtienen del análisis no lineal tiempo historia con cada uno de los registros que son los desplazamientos, se debe guardar, y almacenar para así conseguir una tabla de datos, donde se debe presentar el nombre del registro, parámetros de intensidad como (PGA, Sa, Sd) y la respuesta respectiva del desplazamiento en el techo de la estructura.

2.2.6 Solución para diseñar

En esta sección se llevarán a cabo análisis no lineales para identificar el comportamiento de la estructura, primero para la modelación se hará utilizando la información contenida en los planos estructurales. Los métodos no lineales son ampliamente reconocidos como la herramienta más adecuada para evaluar el desempeño estructural.

Para determinar el grado de vulnerabilidad de la estructura, se empleará la metodología de las curvas de fragilidad. Este enfoque permite estimar la probabilidad de que la estructura alcance o supere un determinado nivel de daño en función de un nivel específico de demanda, denominado intensidad.

La solución propuesta consiste en la generación de curvas de fragilidad para cada estado de daño definido, lo que permitirá identificar, la dirección más crítica que sería la que alcance mayor probabilidad de daño al ingresar con la misma intensidad en cada curva de fragilidad.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados

3.1.1 Curvas de Pushover del Edificio

A partir de la curva de capacidad obtenida por la metodología de Pushover, se determinarán los umbrales correspondientes a los cuatro estados de daño definidos: leve, moderado, extenso y completo. Estos umbrales serán fundamentales para la posterior evaluación de la vulnerabilidad estructural.

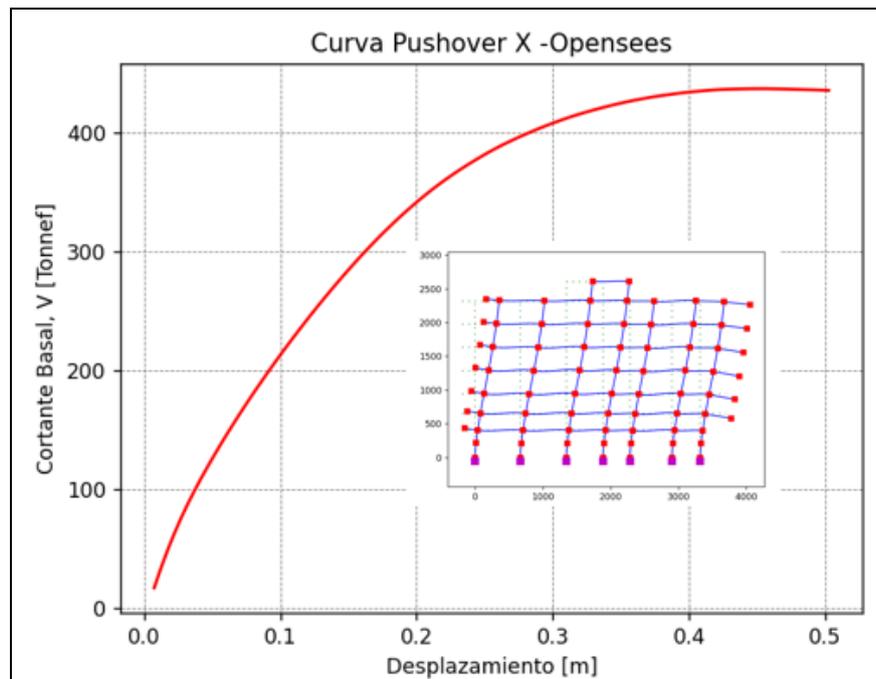


Ilustración 3.23: Curva de capacidad, dirección X [Barcia & Córdoba, 2024]

Cálculo de los estados de daño:

Puntos leídos de la curva de capacidad, unidades en (m):

$$D_U = 0.5$$

$$D_Y = 0.13$$

Estados de daño, unidades en (m):

$$SD_1 = 0.7 * D_Y = 0.091$$

$$SD_2 = D_Y = 0.13$$

$$SD_3 = D_Y + 0.25 * (D_U - D_Y) = 0.22$$

$$SD_4 = D_U = 0.5$$

Calculado los umbrales, más adelante se los graficará en la nube de datos junto con los resultados del análisis tiempo historia. A continuación, se muestra la dirección (y).

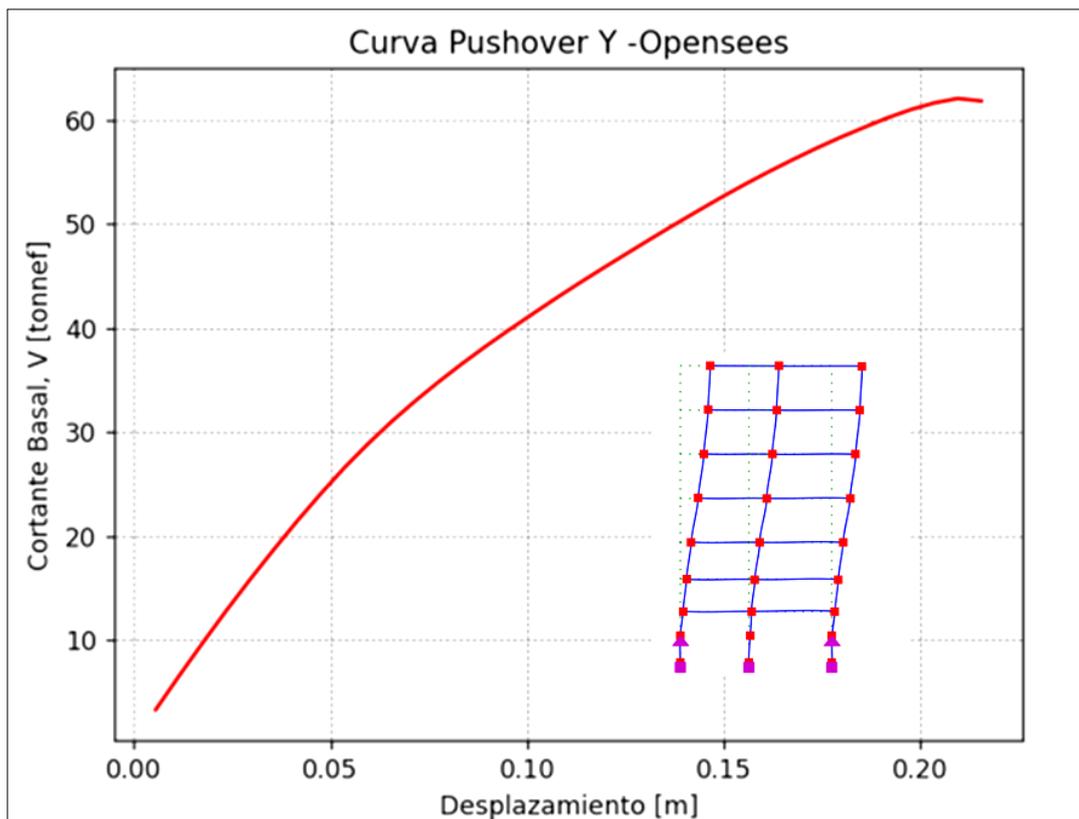


Ilustración 3.24: Curva de capacidad, dirección Y [Barcia & Córdova, 2024]

Cálculo de los estados de daño:

Puntos leídos de la curva de capacidad, unidades en (m):

$$D_U = 0.23$$

$$D_Y = 0.10$$

Estados de daño, unidades en (m):

$$SD_1 = 0.7 * D_Y = 0.07$$

$$SD_2 = D_Y = 0.10$$

$$SD_3 = D_Y + 0.25 * (D_U - D_Y) = 0.13$$

$$SD_4 = D_U = 0.23$$

SD, significa estado de daño, y cada número es el nivel cronológico en que va avanzando conforme a la demanda de empuje lateral, esto ha sido evaluado experimentalmente con gran variedad de pórticos de concreto, y estas fórmulas cumplen con los patrones que han observado en los ensayos, por lo tanto, estas ecuaciones son recomendadas y usadas ampliamente en estudios.

3.2 Respuesta de la estructura para tiempo historia

Para ambas direcciones se ha elaborado los análisis no lineal tiempo historia, donde se ha podido evidenciar que registros con similar intensidad producen diferentes respuestas en la estructura. Se ha analizado 88 pares de registros en total conformados entre nacionales (RENAC) Red Nacional de acelerógrafos e internacionales del (FEMA P695) Agencia federal de manejo de emergencias, donde se ha captado el comportamiento para cada dirección. Esto es lo que se va a mostrar en las siguientes nubes de puntos, en el eje de las abscisas esta la intensidad que el autor selecciona, que son parámetros de medida del sismo, y en el eje de las ordenadas estan los desplazamientos de tiempo historia calculados mediante Opensees. Todos los puntos azules denominados (TH) son los datos a los que se refiere.

Además, en la gráfica se puede apreciar que se ha trazado unas líneas horizontales siendo estos los umbrales a los que se venía haciendo referencia a lo largo de todo el proyecto, mismos que han sido calculados en la sección anterior. Para calcular las curvas de fragilidad será necesario considerar las fracciones de datos realizando conteos de cuantos registros sobrepasan los umbrales indicados, lo que significa es que si el registro sobrepasa el nivel seleccionado está alcanzando o superando cierto nivel de daño y esto representa las fracciones de colapso conocidas en el documento de (Baker, 2015).

En la dirección X, los resultados obtenidos no superan los umbrales de daño extenso y completo. Esto es consistente con el diseño estructural del edificio, ya que dicha dirección corresponde al sentido de mayor inercia. En consecuencia, se observa preliminarmente, que no se generan daños significativos en esta dirección. Además, la curva de capacidad en este sentido demuestra una notable ductilidad y alta capacidad a resistencia lateral.

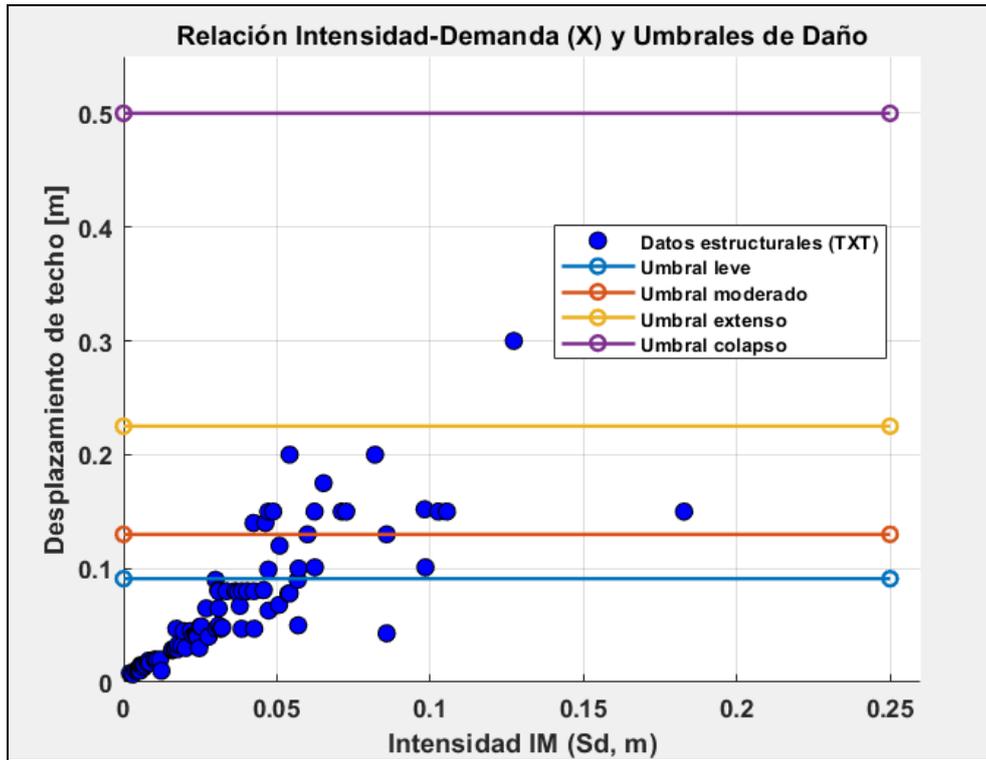


Ilustración 3.25: Desp. espectral vs tiempo historia (X) [Barcia & Córdova, 2024]

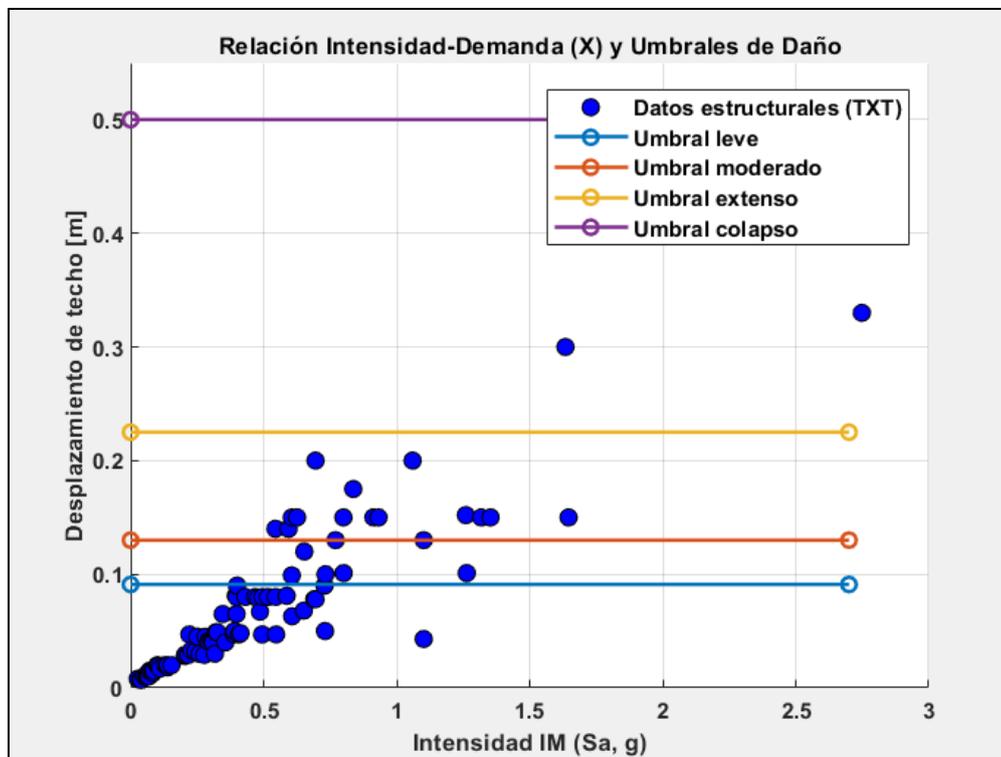


Ilustración 3.26: Acel. espectral vs tiempo historia (X) [Barcia & Córdova, 2024]

Es importante comenzar analizando la tendencia de la intensidad y la relación con los datos obtenidos. Como se observa en la ilustración de este caso, existe una representación coherente y bien definida de los datos, lo que sugiere que la curva de fragilidad presentara una adecuada correlación con la información disponible. Esto incluye tanto el desplazamiento espectral (S_d) como aceleración espectral (S_a).

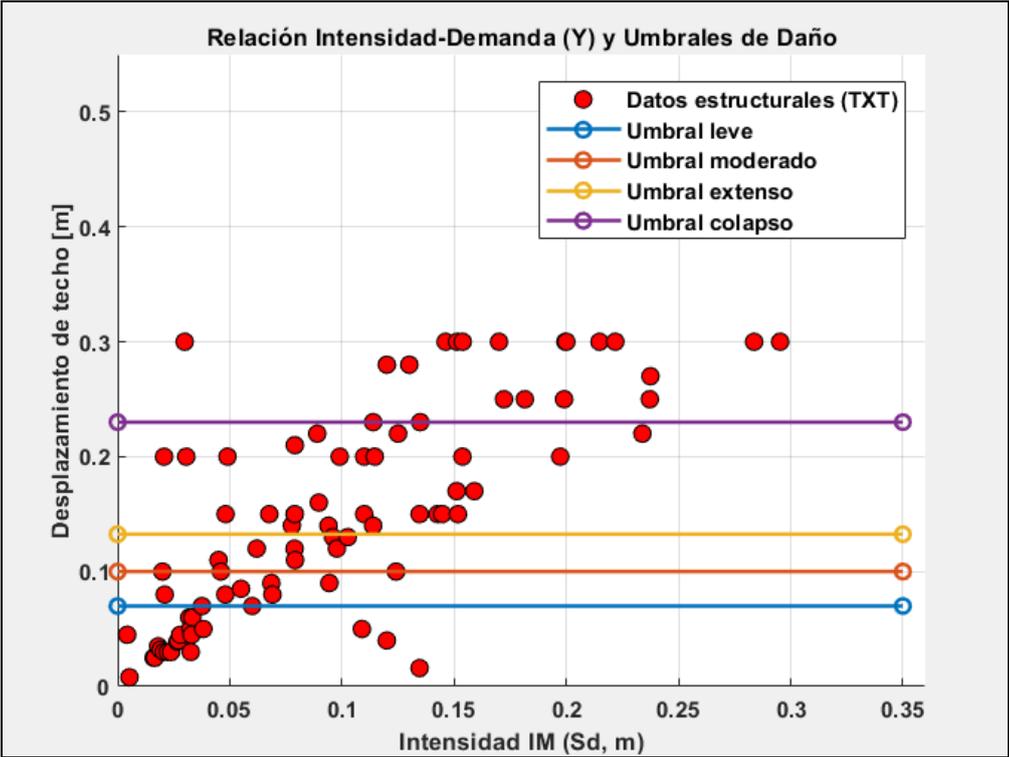


Ilustración 3.27: Desp. espectral vs tiempo historia (Y) [Barcia & Córdova, 2024]

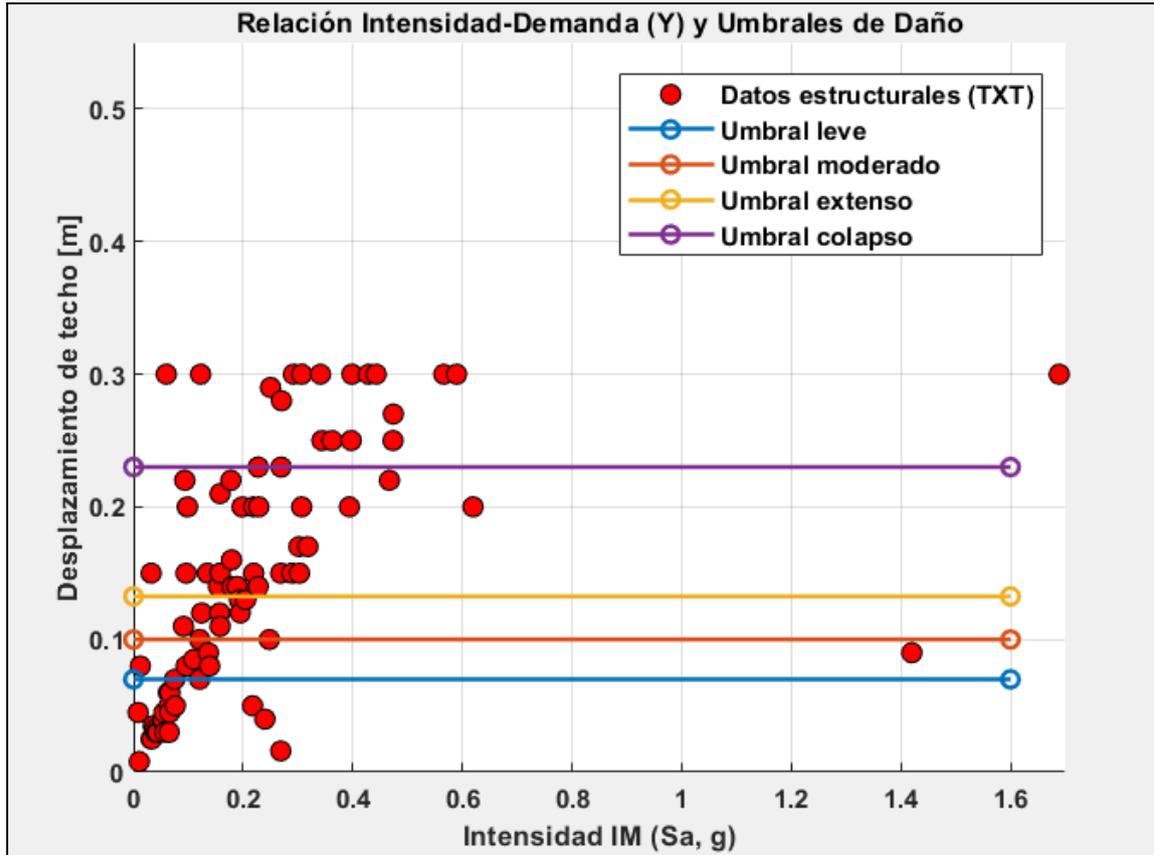


Ilustración 3.28: Acel. espectral vs tiempo historia (Y) [Barcia & Córdova, 2024]

En esta grafica también se aprecia una buena distribución de los datos, lo que permite realizar las curvas de fragilidad precisa. A diferencia de los resultados en la dirección x, en este sentido se observa que la estructura supera los umbrales de daño mayores, como el daño extenso y completo.

Para procesar esta información, se procederá primero a determinar la intensidad (IM) con lo que se trabajará. Posteriormente, los datos deberán agruparse por intervalos o franjas. Esto implica ordenar los datos en función de la intensidad y, a partir de allí, definir las franjas correspondientes para realizar el análisis y obtener las curvas de fragilidad.

En los anexos se muestra la información detallada de cada uno de los registros, sus respectivos valores representativos de la intensidad (IM), como el máximo movimiento del suelo (PGA), Pseudo aceleración (Sa), Desplazamiento espectral (Sd), y también

cada uno de los máximos valores de desplazamiento determinados en el análisis estructural tiempo historia.

Una vez que se haya realizado la alineación correspondiente se calcula la data estadística para cada intervalo realizando el conteo de las fracciones de datos de análisis que sobrepasan cada umbral, por lo tanto, cada intervalo aporta fracciones para cada uno de los estados de daño.

Y ya con esta data se procede a ingresar los conteos correspondientes en las hojas de cálculo de Baker, existe disponible este material tanto en Excel como en Matlab, en el presente proyecto se hará uso de ambas, pero para los reportes y anexos se presentará con la segunda alternativa antes mencionada.

3.2.1.1 Desarrollo de curvas de fragilidad

Con la información obtenida del análisis no lineal de tiempo historia y los umbrales de daño calculados, de igual forma con las intensidades como S_a y S_d definidas, se procederá a desarrollar las curvas de fragilidad. Estas curvas serán elaboradas utilizando las formulaciones y metodologías propuestas por Jack W. Baker, específicamente en su trabajo "Efficient Analytical Fragility Function Fitting" (M.EERI).

Para poder calcular las curvas de fragilidad se requiere de los siguientes parámetros en el programa mencionado ingresar: Primero establecer la tabla de datos de las intensidades que se van a graficar y con las cuales se va a calcular las probabilidades; como segundo parámetro se requiere que se haya realizado los conteos correspondientes de los análisis que sobrepasan cada uno de los umbrales que se esté trabajando respectivamente, en este caso cada umbral representa una curva de fragilidad, por lo tanto si son cuatro curvas serán cuatro diferentes fracciones que habrá que ingresar. Las curvas de fragilidad permitirán cuantificar la probabilidad de que la estructura experimente diferentes niveles de daño bajo distintos niveles de excitación sísmica.

Fragilidad en dirección X

Para el sentido x, se va a presentar las curvas de fragilidad con dos tipos de intensidades [Sa, Sd] respectivamente.

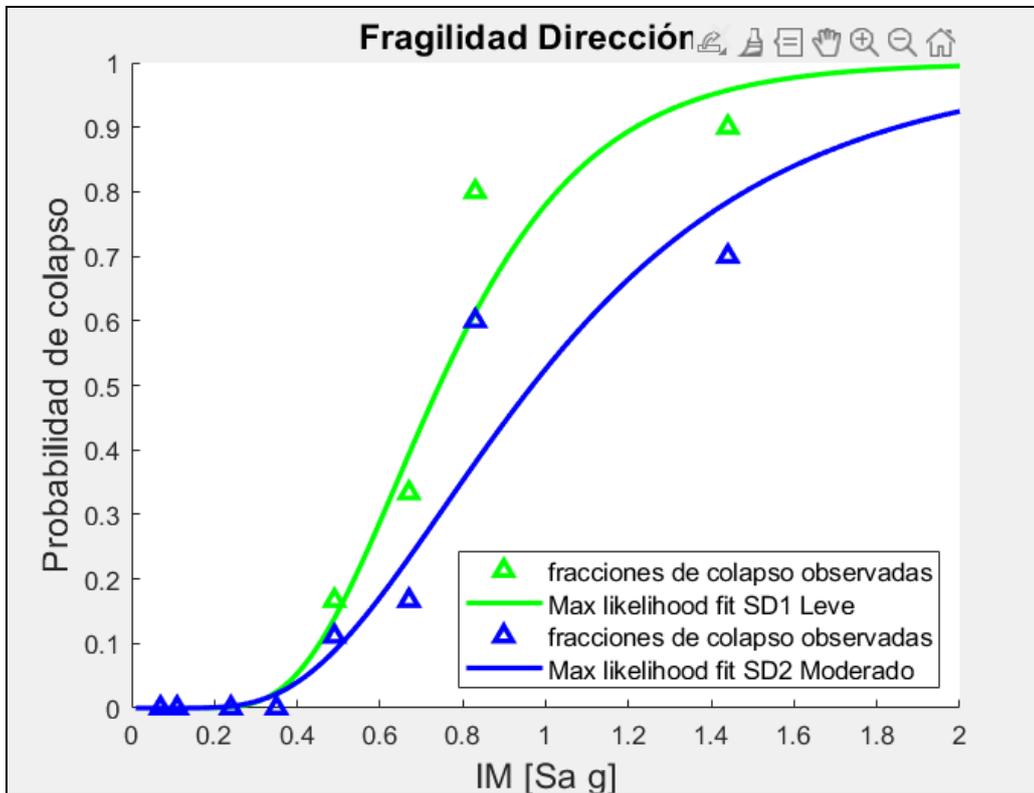


Ilustración 3.29: Curva de fragilidad dirección X (Sa g) [Barcia & Córdova, 2024]

Para el sentido X, se presentan dos curvas de fragilidad correspondientes a los primeros niveles de intensidad sísmica: leve y moderado. Es posible que surja la pregunta sobre la razón de incluir únicamente estas dos curvas. La explicación es sencilla: las curvas de fragilidad se calculan a partir de los resultados obtenidos de la respuesta estructural frente a diferentes escenarios sísmicos, los cuales permiten determinar las probabilidades asociadas a cada nivel de daño.

En este caso, para esta dirección, el sismo no genera desplazamientos significativos. Esto implica que la estructura posee una resistencia considerable, de manera que bajo las acciones sísmicas consideradas, no se alcanzan ni se superan los umbrales necesarios para clasificar los daños como extensos o completos. Por esta razón, no es posible elaborar curvas de fragilidad para estos niveles de daño.

En el apartado de anexos, se incluye una tabla con los resultados de la respuesta estructural para cada registro sísmico analizado, donde se puede corroborar la información aquí expuesta. En cada una de las ilustraciones de curvas de fragilidad se puede apreciar que hay datos gradicadas en forma de triangulos, estos son los graficos de la data observada o analizada analiticamente, como podemos notar la curva de fragilidad predice en forma clara los resultados de analisis.

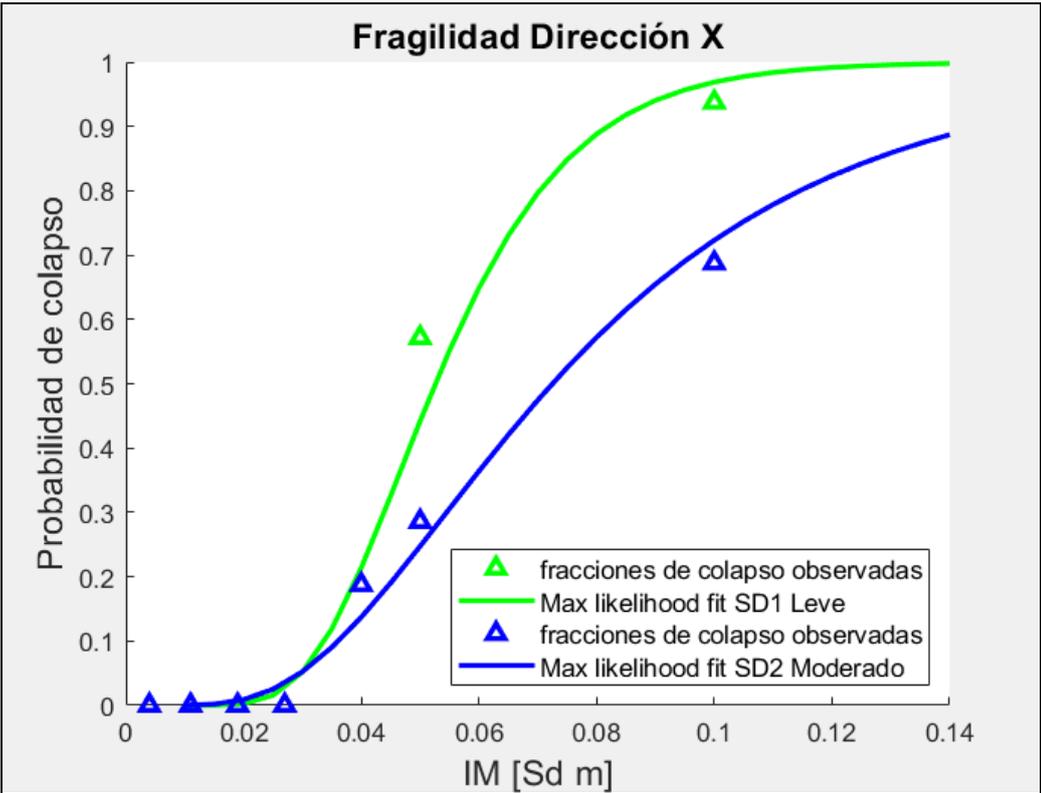


Ilustración 3.30: Curva de fragilidad dirección X (S_d m) [Barcia & Córdova, 2024]

En el sentido **X**, se observa que, tanto para las intensidades **Sa** como **Sd**, los comportamientos obtenidos son similares. Este hecho es un indicador positivo de la consistencia en los resultados, ya que las intensidades están directamente relacionadas con los niveles de daño. Cabe recordar que, en general, las curvas de fragilidad se desarrollan para un único tipo de intensidad; por lo tanto, este comportamiento evidencia la validez del análisis realizado.

Aunque las magnitudes de las intensidades son diferentes debido a la naturaleza de sus medidas, se aprecia coherencia en los patrones y comportamientos al alcanzar las probabilidades asociadas a los distintos niveles de daño. Esto es, en última instancia, el objetivo fundamental del estudio.

Fragilidad en dirección Y

Para el sentido y de la misma forma, se va a presentar las curvas de fragilidad con dos tipos de intensidades [S_a , S_d] respectivamente.

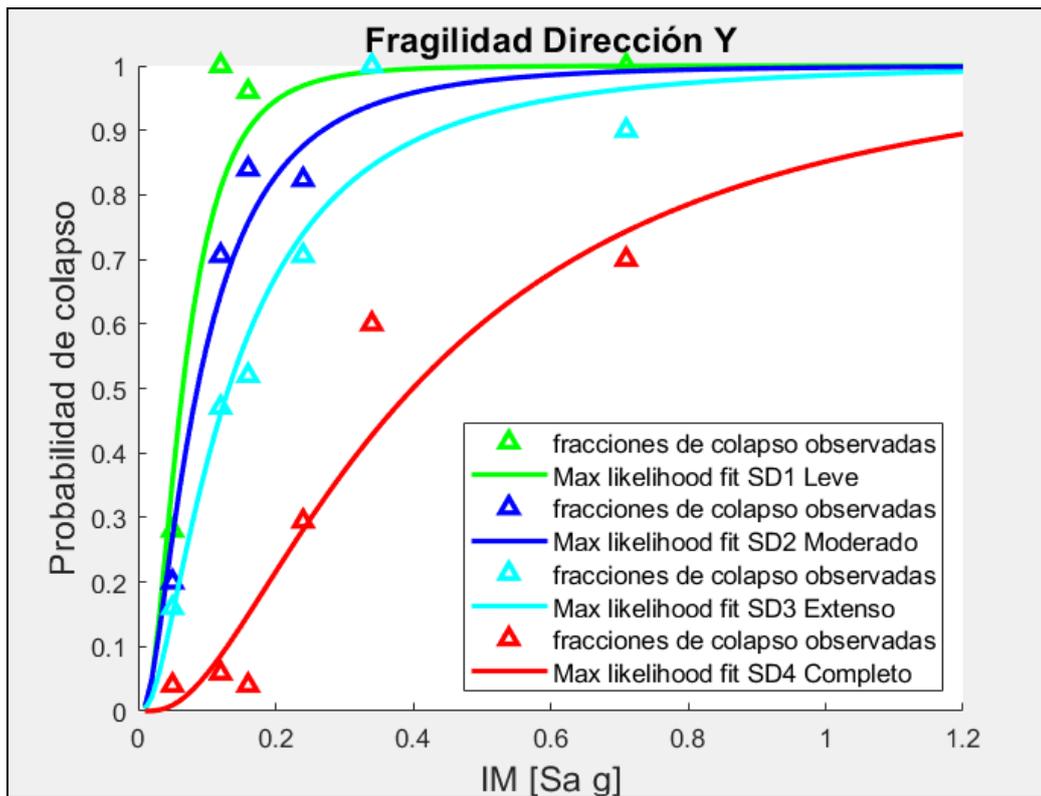


Ilustración 3.31: Curva de fragilidad dirección Y ($S_a g$) [Barcia & Córdova, 2024]

A diferencia del caso anterior, en la dirección Y de la estructura se obtienen todas las curvas de fragilidad de los cuatro niveles de daño que se ha establecido, lo que indica que la estructura responde significativamente, alcanzando en muchos casos el colapso total bajo los registros analizados. Por lo tanto, se insiste que, estas curvas de fragilidad predicen la respuesta esperada de la estructura cuando se somete a ciertos niveles de intensidad sísmica.

Estas simulaciones, basadas en análisis no lineales dinámicos en el dominio del tiempo, permiten observar cómo estas fracciones dan forma a las curvas de fragilidad para cada nivel de daño alcanzado por la estructura. Este comportamiento

generalmente está asociado con el incremento de la intensidad sísmica, aunque no siempre es lineal, ya que, bajo ciertos escenarios, es posible que un aumento en la intensidad no resulte en un daño proporcionalmente mayor.

La metodología empleada, conocida como análisis por franjas, considera estas variaciones y aplica ajustes y correcciones a las funciones de fragilidad. En este caso, los ajustes se realizan mediante el método de máxima verosimilitud, garantizando así una representación adecuada de las probabilidades asociadas a cada nivel de daño.

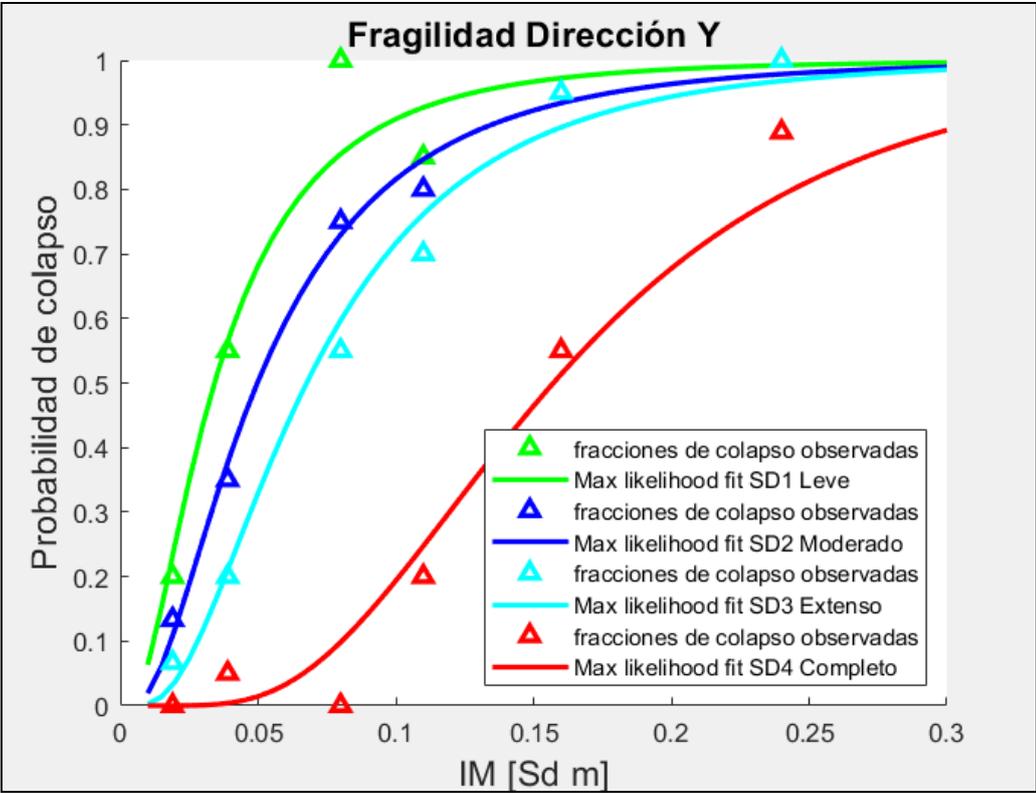


Ilustración 3.32: Curva de fragilidad dirección Y (Sd m) [Barcia & Córdova, 2024]

Como se observa en las curvas de fragilidad para esta dirección, el comportamiento es similar al de la dirección **X**. Tal como se mencionó anteriormente, el patrón de comportamiento es consistente, y la forma de las curvas de fragilidad se mantiene comparable. Esto indica que, independientemente de si se utiliza un nivel de intensidad **Sa** o **Sd**, las probabilidades de alcanzar ciertos niveles de daño pueden interpretarse de manera coherente, lo que refuerza la confiabilidad del análisis, incluso si se ha trabajado con una única intensidad.

Además, la forma de las curvas de fragilidad refleja de manera aproximada la respuesta de la estructura frente a distintos niveles de amenaza sísmica. Por ejemplo, en esta dirección, se observa que la estructura presenta altas probabilidades de alcanzar niveles significativos de daño cuando la intensidad supera los **0.1 m**. Esto subraya la utilidad de las curvas para predecir el comportamiento estructural ante diferentes escenarios sísmicos.

3.3 Análisis de resultados

- **Análisis estáticos no lineales**

En la dirección X, la estructura presenta una alta capacidad lateral, alcanzando:

Desplazamiento máximo: 50 cm.

Resistencia máxima: 430 tonf.

Punto de fluencia: 14 cm.

Estos valores evidencian una notable ductilidad estructural.

En la dirección Y, la capacidad lateral es considerablemente menor, con:

Desplazamiento máximo: 23 cm.

Resistencia máxima: 63 tonf.

Punto de fluencia: 10 cm.

Esto refleja una ductilidad limitada en comparación con la dirección X.

Tabla 3.3: Tabla comparativa de resultados Pushover [Barcia & Córdova, 2024]

Parámetro	Dirección X	Dirección Y
Desplazamiento máximo (cm)	50	23
Resistencia máxima (tonf)	430	63
Punto de fluencia (cm)	14	10
Ductilidad	Alta	Limitada

- Umbral de los niveles de daño y desplazamientos

Los desplazamientos asociados a los niveles de daño son los siguientes:

Dirección X: Daño leve a 9 cm, moderado a 13 cm, extenso a 22 cm y colapso a 50 cm.

Dirección Y: Daño leve a 7 cm, moderado a 10 cm, extenso a 13 cm y colapso a 23 cm.

Tabla 3.4: Umbrales de cada estado de daño [Barcia & Córdova, 2024]

Nivel de daño	Desplazamiento Dirección X (cm)	Desplazamiento Dirección Y (cm)
Leve	9	7
Moderado	13	10
Extenso	22	13
Colapso	50	23

La dirección Y es más crítica, ya que alcanza niveles significativos de daño con desplazamientos menores. Esto se debe a la configuración estructural, con menor inercia en planta y además columnas de dimensiones de menor longitud en ese sentido (25 cm), mientras que en la dirección X, la mayor inercia y el lado largo de las columnas mejoran su desempeño.

En contraste, en la dirección X, la estructura presenta una inercia significativamente mayor, lo cual está directamente relacionado con la disposición en planta y con el hecho de que las columnas tienen su lado más largo orientado en este sentido.

- Este comportamiento se confirma mediante las curvas de fragilidad, que muestran que, en la dirección X, la estructura no presenta vulnerabilidades significativas frente a los diferentes escenarios sísmicos analizados.

- **Análisis Tiempo historia**

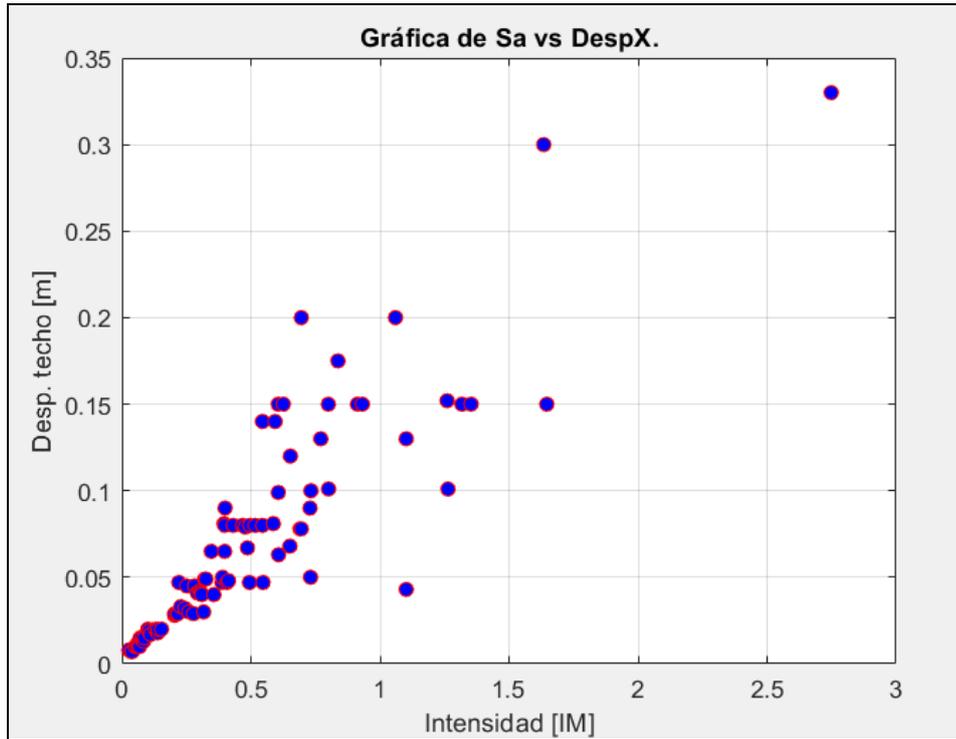


Ilustración 3.33: Dirección X [Barcia & Córdoba, 2024]

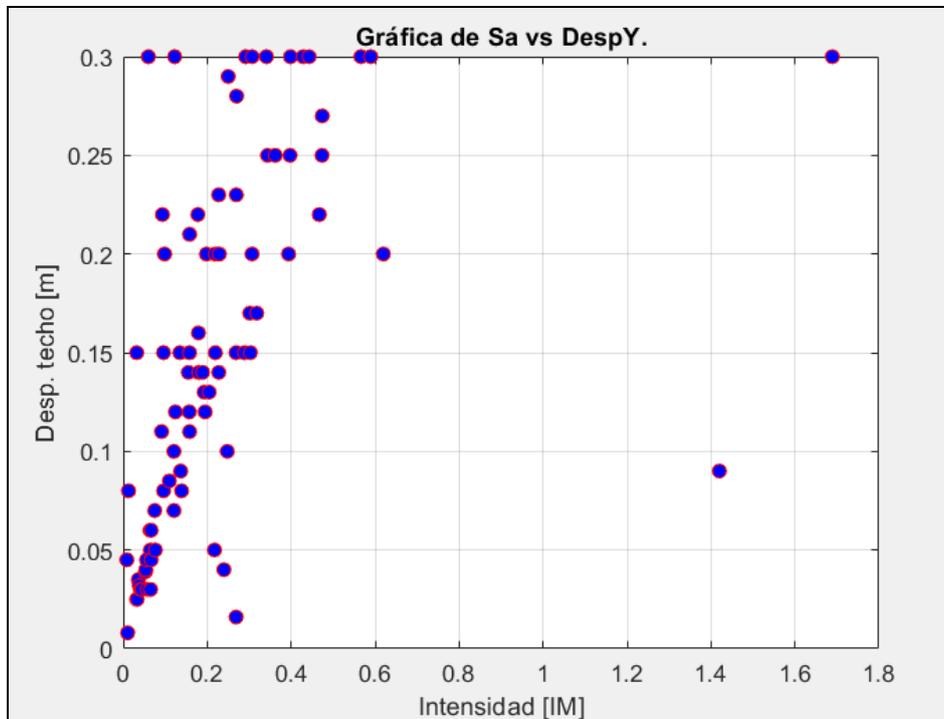


Ilustración 3.34: Dirección Y [Barcia & Córdoba, 2024]

Al revisar cuidadosamente los puntos que representan los resultados de los análisis no lineales, se observa que en la dirección X la mayoría de las respuestas se concentran en desplazamientos bajos, aproximadamente menores a 20 cm. Por el contrario, en la dirección Y, los desplazamientos obtenidos son significativamente mayores y abarcan un mayor número de resultados. Esto sugiere un comportamiento más frágil en dicha dirección y proporciona un indicio claro de la vulnerabilidad esperada.

- **Curvas de fragilidad**

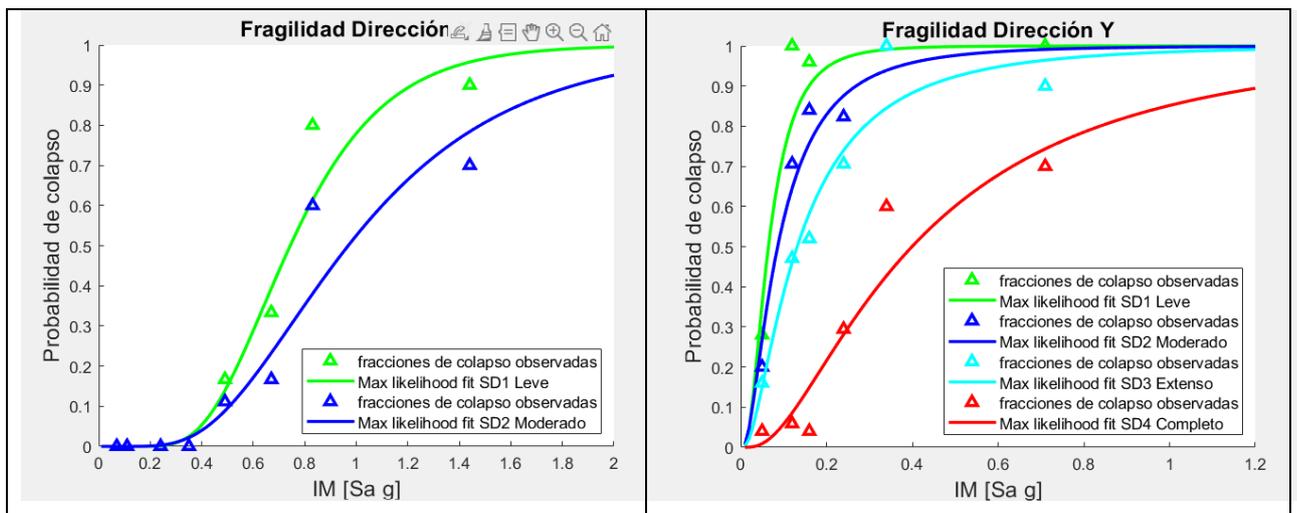


Ilustración 3.35: Comparación de fragilidad X [Barcia & Córdova, 2024]

Al comparar directamente las curvas de fragilidad con la misma intensidad (Sa g) para ambas direcciones se puede apreciar primero que para dirección X no se tiene curvas de fragilidad para daños moderados y extensos, lo que indica que no existe probabilidad de llegar a tener ese nivel de daños, lo que se ve es que las probabilidades de alcanzar daños moderados son las que gobiernan hasta una escala de 2g, por el contrario para el sentido Y se puede apreciar que están las cuatro curvas de fragilidad para cada estado de daño, por lo tanto, se va a tener probabilidad de superar o alcanzar todos los estados de daño.

Sin embargo, si profundizamos más notamos que desde 0.2g la probabilidad de conseguir daños mayores es la que gobierna, por lo tanto, esto es un gran resultado, estamos corroborando lo que establecimos al inicio que era la dirección más crítica, misma que se la denotaría como dirección vulnerable, misma que se le debe continuar con los análisis para establecer la mejor opción de refuerzo, implementación de sistema de protección etc.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Tras realizar los análisis no lineales estáticos tipo Pushover en ambas direcciones, se ha determinado que la estructura presenta una alta ductilidad en la dirección X, debido a la mayor inercia proporcionada tanto por la geometría en planta como por las columnas orientadas en esta dirección. En contraste, en la dirección Y, la estructura presenta una capacidad significativamente menor y una ductilidad reducida.

Como se puede observar, en la dirección Y, con desplazamientos relativamente bajos, la estructura experimenta niveles de daño considerablemente altos. En cambio, en la dirección X, la estructura necesita alcanzar desplazamientos mucho mayores para alcanzar daños significativos.

Tras realizar los análisis no lineales de tiempo historia con 88 registros para cada dirección, se compiló una tabla con los datos correspondientes a la respuesta de la estructura. En la dirección Y, gran parte de los desplazamientos registrados superan los umbrales correspondientes a los niveles de daño extenso y completo. En cambio, en la dirección X, la estructura solo alcanza los umbrales para los estados de daño leve y moderado, sin llegar a superar los niveles de daño más severos, ya que requiere desplazamientos mucho mayores para alcanzar tales daños.

Este comportamiento se atribuye a la menor ductilidad de la estructura en la dirección Y, lo que provoca que la estructura experimente daños significativos con desplazamientos relativamente pequeños. Esta vulnerabilidad observada se ve respaldada por las curvas de fragilidad, que muestran que, en la dirección X, únicamente se obtuvieron fracciones de colapso asociadas a daños leves y moderados, lo que se traduce en la presencia de solo dos curvas de daño que reflejan la probabilidad de dichos niveles de daño.

En cambio, en la dirección Y, se obtuvieron fracciones de colapso que superan los distintos umbrales de daño, lo que permite presentar una probabilidad más amplia de alcanzar diversos niveles de daño. En este caso, la probabilidad es considerablemente alta, ya que con intensidades de 0.1 m en Sd y 0.15 g en Sa, ya se alcanzan probabilidades elevadas de daños extensos, lo que hace que la estructura sea particularmente vulnerable a los sismos en esta dirección.

Para el sentido x solamente se tiene la probabilidad de alcanzar y superar daños leves y moderados, mientras que para la dirección Y se presenta la probabilidad de alcanzar y superar todos los niveles de daño, incluso con intensidades menores lo que gobierna es la probabilidad de tener daños extensos y completos.

El método de franjas ha permitido predecir excelentemente el comportamiento probabilístico de la estructura frente a las diferentes intensidades, por lo tanto, la metodología está bastante apegada a los datos que se observó, brindando confianza en los resultados.

Los resultados obtenidos mediante las curvas de fragilidad han sido fundamentales para validar las hipótesis iniciales. Durante la revisión detallada de los planos estructurales, se identificó que la dirección Y era la más crítica debido a su menor inercia, derivada de la geometría de la estructura, y a las dimensiones reducidas de las columnas en esta dirección.

En conclusión, los resultados confirman que la dirección Y es más vulnerable, destacando la necesidad de enfocarse en su reforzamiento tanto en capacidad lateral como en ductilidad, para este caso se podría evaluar la alternativa de colocar diagonales metálicas tubulares cuadrados roladas en calientes perfiles americanos HSS, con conexiones de placa Gusset a lo largo de toda la altura del edificio.

Recomendaciones

Se recomienda realizar una inspección más detallada en el sitio de la estructura, con el fin de identificar los tipos de paredes presentes. En caso de que el aporte de los muros sea significativo, se sugiere ajustar la capacidad lateral de la estructura en función de su contribución. De lo contrario, este paso puede ser omitido.

Se recomienda llevar a cabo pruebas no destructivas de esclerometría en el concreto para determinar su capacidad de resistencia a compresión. Además, se sugiere utilizar un escáner para verificar la separación de los estribos, especialmente en las zonas confinadas de las columnas para corroborar con los planos estructurales existentes.

Se recomienda realizar un análisis tridimensional de la estructura para validar los resultados obtenidos con Opensees con el análisis bidimensional. Se sugiere llevar a cabo este análisis utilizando el software SeismoStruct ya que con el Etabs si se ha realizado una comparación a pesar de que no se la muestra en el proyecto presente.

Después de que haya aplicado alguna alternativa de reforzamiento para la dirección Y del edificio, se recomienda que se desarrollen nuevas curvas de fragilidad con los reforzamientos planteados para la estructura, con el fin de demostrar la mejora de su desempeño.

BIBLIOGRAFÍA

- Motamedi, M., & Nateghi, A. (Octubre de 2008). A PROPOSED LATERAL LOAD PATTERN USING SEISMIC ENERGY DISTRIBUTION ALONG THE HEIGHT OF BUILDINGS. *14th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Alicante, U. d. (05 de 04 de 2015). Peligrosidad Sísmica. *Peligrosidad Sísmica*. Obtenido de <https://web.ua.es/es/urs/peligrosidad/peligrosidad-sismica.html>
- Alvarado, D. A. (18 de abril de 2018). 16 de Abril de 2016: Lecciones Aprendidas. *16 de Abril de 2016: Lecciones Aprendidas*. Obtenido de <https://www.igepn.edu.ec/interactuamos-con-usted/1574-16-de-abril-de-2016-lecciones-aprendidas-dra-alexandra-alvarado>
- Andrews, R. G. (23 de enero de 2014). National Geographic. *Explorando la enorme cicatriz que el megaterremoto de Japón de 2011 dejó en el fondo del mar*. Obtenido de <https://www.nationalgeographic.es/ciencia/2024/01/megaterremoto-japon-2011-explorando-enorme-cicatriz-dejo-fondo-mar>
- Angelis, G. D. (septiembre de 2015). ARQUITECTURA Y DESASTRES NATURALES. *ARQUITECTURA Y DESASTRES NATURALES*. España. Obtenido de <https://www.tdx.cat/handle/10803/6222>
- Ardiles, A. (25 de 04 de 2015). Terremoto de 9,5 grados se registró en Chile en 1960. *Terremoto de 9,5 grados se registró en Chile en 1960*. Obtenido de <https://elcomercio.pe/>
- Astroza, M., & Lazo, R. (2010). ESTUDIO DE LOS DAÑOS DE LOS TERREMOTOS DEL 21 Y 22 DE MAYO DE 1960 EN CHILE. *Asociación Chilena de Sismología*, 12.
- ATC, A. T. (1996). Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. Redwood City.
- Baker, J. (2015). *Efficient analytical fragility function fitting using dynamic structural analysis*. *Earthquake Spectra*, 31(1), 579-599.
- Caicedo, C., Barbat, A. H., Canas, J. A., & Aguiar, R. (1994). Vulnerabilidad sísmica de edificios. *Vulnerabilidad sísmica de edificios*. España. Obtenido de <https://recercat.cat/handle/2072/248165>
- Cantos, L. N. (2016). MTOP: Un 78% de escombros del sismo desalojados en Manabí. *MTOP: Un 78% de escombros del sismo desalojados en Manabí*. Obtenido de

<https://www.obraspublicas.gob.ec/mtop-un-78-de-escombros-del-sismo-desalojados-en-manabi/>

- Castañeda, Á. E., & Mielles Bravo, Y. (2017). Una mirada al comportamiento estructural de columnas, vigas, entrepiso y edificaciones durante el sismo de Ecuador de 2016. *Revista Ingeniería de Construcción*, 16.
- Celi, C., Pantoja, C., Sosa, D., & Ayala, C. (2018). VULNERABILIDAD SÍSMICA DE QUITO ECUADOR-FASE 1 CURVAS DE CAPACIDAD DE LAS TIPOLOGIAS ESTRUCTURALES PROYECTO GEM -SARA. *REVISTA PUCE. ISSN:*, 2-6.
- Chopra, A., & Goel, R. (2002). A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*.
- Cunlata, F., & Caiza, P. (2022). Estado del Arte de Estudios de Vulnerabilidad Sísmica en Ecuador. *Revista Politécnica*, 10.
- Delgado, J. (2011). Efectos geotécnicos de los terremotos. . *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*.
- Desastres, C. N. (05 de junio de 2019). Tsunami del 22 de mayo de 1960, Valdivia, Chile. *Tsunami del 22 de mayo de 1960, Valdivia, Chile*. Obtenido de <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/tsunami-del-22-de-mayo-de-1960-valdivia-chile#:~:text=El%2022%20de%20mayo%20de,periodos%20de%2030%20minutos%20aproximadamente.>
- Duarte, C., Martínez, M., & Santamaria, J. (junio de 2017). ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL (PUSHOVER) DEL. *ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL (PUSHOVER) DEL. Ecuador. Obtenido de <https://oldri.ues.edu.sv/id/eprint/13405/1/An%C3%A1lisis%20est%C3%A1tico%20no%20lineal%20%28Pushover%29%20del%20cuerpo%20central%20del%20edificio%20de%20la%20Facultad%20de%20Medicina%20de%20la%20Universidad%20de%20El%20Salvador.pdf>*
- Egüez, A. (2018). Fallas Activas Sismogénicas En El Sur Del Ecuador. *Revista Oro y Petróleo*, 3-13.
- El Comercio. (12 de Marzo de 2012). *En Loja hay 22 zonas con riesgos geológicos*.
- FEMA-349. (abril de 2000). Action plan for performance based seismic design. *Action plan for performance based seismic design*. Obtenido de https://mitigation.eeri.org/wp-content/uploads/fema_349.pdf
- Gavarini, C. (2023). Riesgo sísmico en centros históricos. *ELSEVIER*.

- Geofísico, I. (16 de agosto de 2017). El terremoto de Ibarra del 16 de Agosto de 1868. *El terremoto de Ibarra del 16 de Agosto de 1868*. Obtenido de <https://www.igepn.edu.ec/servicios/noticias/1505-el-terremoto-de-ibarra-del-16-de-agosto-de-1868>
- Guamán, J. (26 de Noviembre de 2014). *Scrib*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/248273385/Fallas-Geologicas-en-La-Ciudad-de-Loja>
- Hamilton, W. (06 de 08 de 2014). ¿Qué tipos de bordes de placas tectónicas existen? *¿Qué tipos de bordes de placas tectónicas existen?* San Jose, Costa Rica.
- Hazus. (1999). *EARTHQUAKE LOSS ESTIMATION METHODOLOGY*. Washington: FEMA . Washington: FEMA.
- Institute, S. (20 de 12 de 2023). Diseño Sísmico por Desempeño. *Diseño Sísmico por Desempeño*. Obtenido de <https://sismica-institute.com/disenio-sismico-por-desempeno/>
- Instituto Geofísico. (2016). Observaciones del sismo del 16 de abril de 2016 de magnitud Mw 7.8: Intensidades y aceleraciones. *Escuela Politécnica Nacional*, 20.
- Japan, M. o. (2011). Artículo especial sobre el terremoto y el tsunami de Tōhoku de 2011 - Parte 1: Prevención de catástrofes. *Artículo especial sobre el terremoto y el tsunami de Tōhoku de 2011 - Parte 1: Prevención de catástrofes*. Obtenido de https://web-japan.org/trends/es/tech-life/tec202102_great-east-japan-earthquake-disaster-prevention_es.html
- López, O., & Ruiz, G. (2008). Evaluación de los métodos de análisis estático no-lineal para determinar la demanda sísmica en estructuras aporticadas de concreto armado. *BOLETÍN TÉCNICO IMME VOLUMEN 46 Nº 3*.
- Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M., & Fenves, G. (2006). OpenSees Command Language Manual.
- Mendoza, A., & Moreira, D. (diciembre de 2022). Análisis no lineal por el método Pushover del edificio de docentes nº1 de la Universidad Técnica de Manabí. *Análisis no lineal por el método Pushover del edificio de docentes nº1 de la Universidad Técnica de Manabí*. Ecuador. Obtenido de <https://dominiodelasciencias.com/ojs/index.php/es/article/view/3038/7115>
- NEC-15. (2015). *Riesgo Sísmico, Evaluación y Rehabilitación de Estructuras*. Quito, Ecuador: MIDUVI.

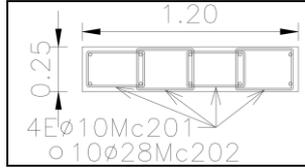
- Oterino, B. B. (2020). GEOLOGÍA, TERREMOTOS Y RIESGO SÍSMICO: AVANCES Y PERSPECTIVAS. *GEOLOGÍA, TERREMOTOS Y RIESGO SÍSMICO: AVANCES Y PERSPECTIVAS*. Madrid, Madrid, España. Obtenido de https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/678735/EM_45_8.pdf
- Páez, D., & Hernández, H. (s.f.). Metodología para el estudio de la vulnerabilidad estructural de edificaciones. *Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia*, 13.
- Patel , N., & Vasanwala, S. (2020). Propagating fragility curve for RC buildings via HAZUS methodology. *Science Direct*, 7.
- Phillips, S. (4 de agosto de 2017). Cómo un terremoto de 9,2 grados en Alaska en 1964 cambió nuestra comprensión se explica en 'El Gran Terremoto'. *Cómo un terremoto de 9,2 grados en Alaska en 1964 cambió nuestra comprensión se explica en 'El Gran Terremoto'*. Obtenido de <https://www.latimes.com/books/jacketcopy/la-ca-jc-great-quake-20170804-story.html>
- Reyes, P. (2006). Nuevos Estudios de Campo en la Cuencas de Gonzanamá, Catamayo y Malacatos - Vilcabamba: Resultados Preliminares. *Sexta Jornada en Ciencia de la Tierra*, 53-56.
- Rodríguez, D. T., & CENAIS, C. (2013). UNA RESPONSABILIDAD COMPARTIDA. *SISMOS Ciencia y Comunidad en la gestión de los Riesgos Naturales*. Santiago de Cuba. Obtenido de https://eird.org/pr14/cd/documentos/espanol/CaribeHerramientasydocumentos/Capacitacion/CARE_CENAIS_Cuba_SismoCienciaycomunidadenlagestiondelosriesgosnaturales.pdf
- Salcedo, Y. (2017). DESEMPEÑO SISMICO POR EL MÉTODO PUSH-OVER DE UN EDIFICIO. *DESEMPEÑO SISMICO POR EL MÉTODO PUSH-OVER DE UN EDIFICIO*. Colombia. Obtenido de <https://repositorio.cuc.edu.co/server/api/core/bitstreams/d211e33f-b3f6-4b13-b0a0-3a533b769a25/content>
- Sánchez, F. V. (1994). Los terremotos y sus causas. En El estudio de los terremotos en Almería. *Instituto de Estudios Almerienses*, 24.
- Sandip, V. (2019). Propagating fragility curve for RC buildings via HAZUS methodology. *Civil Engineering Department, Navrachana University Vadodara, Gujarat, India*, 27.

- SOMOZA, R., & GHIDELLA, M. (2005). Convergencia en el margen occidental de América del Sur. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 13. Recuperado el 11 de Noviembre de 2024, de <https://www.scielo.org.ar/pdf/raga/v60n4/v60n4a16.pdf>
- Sousa, L., Marques, M., Silva, V., & Weatherill, G. (2018). EPISTEMIC UNCERTAINTY IN HAZARD AND FRAGILITY MODELING FOR EARTHQUAKE RISK ASSESSMENT. *THESSALONIKI*, 12.
- USGS. (2010). Terremoto y tsunami de magnitud 9,2 en Alaska del 27 de marzo de 1964. *Terremoto y tsunami de magnitud 9,2 en Alaska del 27 de marzo de 1964*. Obtenido de <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/events/alaska1964/>
- Yepes, H. (1994). Estudio del riesgo sísmico por los 20 años del ORSTOM en Ecuador. *Estudio del riesgo sísmico en el Ecuador* (págs. 161-164). ResearchGate.
- Zoran, M., & Goran, T. (2003). *WP4: Vulnerability of current buildings. Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology (IZIIS)*. Paris.

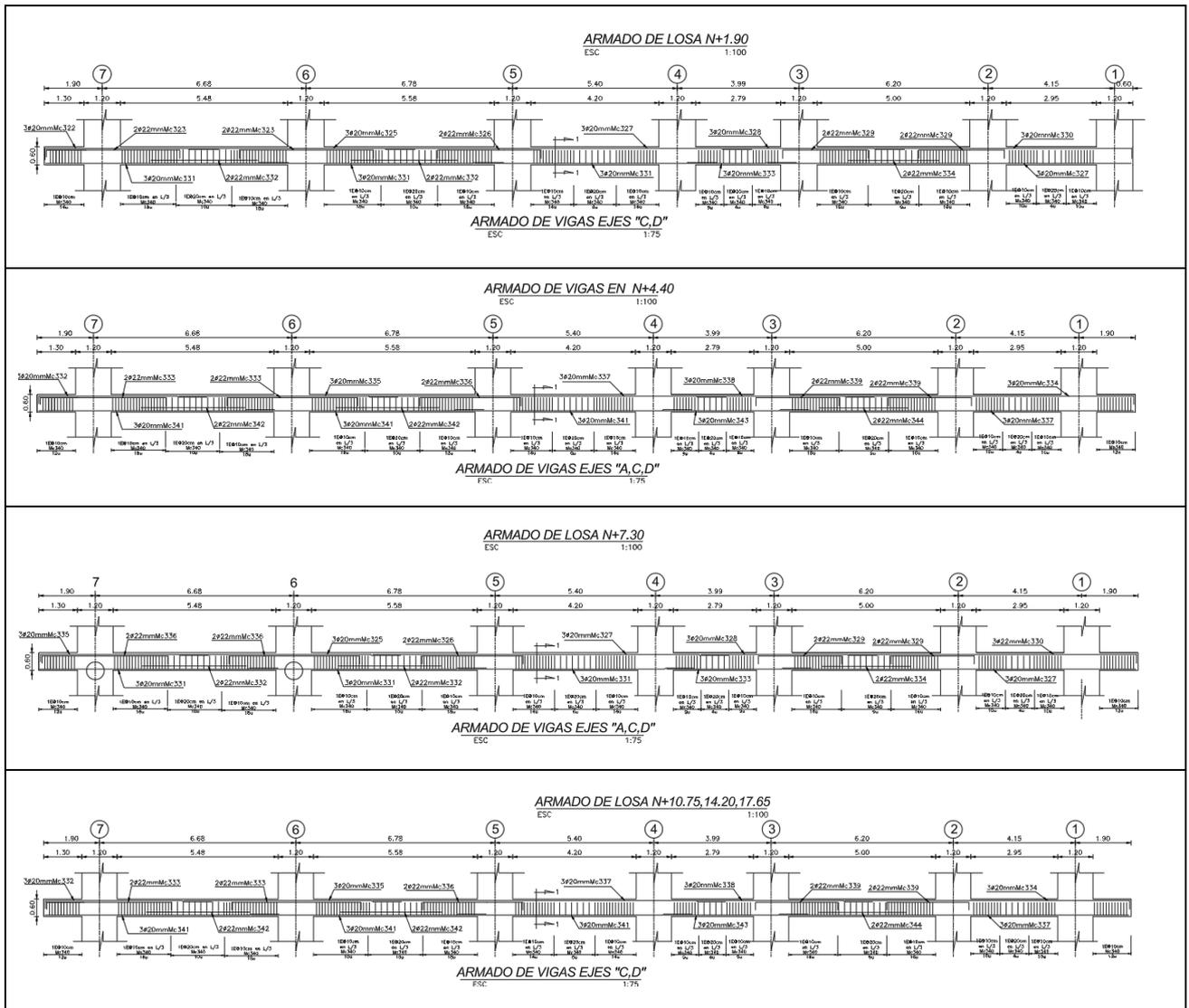
PLANOS Y ANEXOS

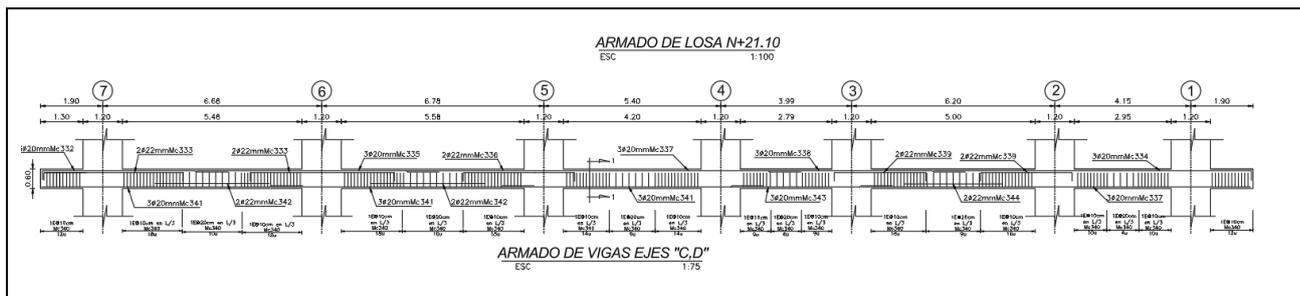
ANEXO A: Planos estructurales

Columnas: Cabe resaltar que según el diseño estructural es constante el tipo de columna para todos los ejes y a lo largo de su altura.

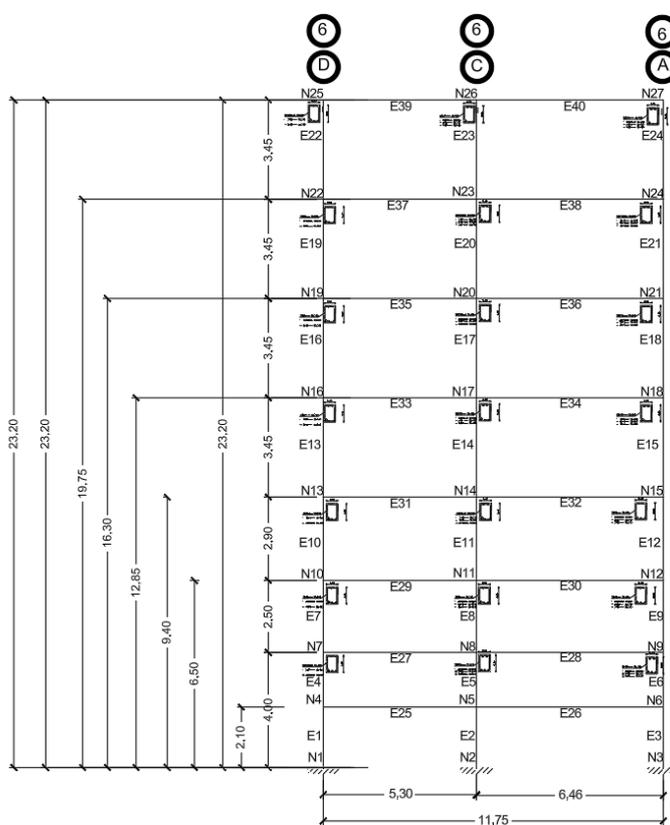


Vigas: Se presenta la elevación de vigas del portico en direccion X que se esta analizando que corresponde al eje C.

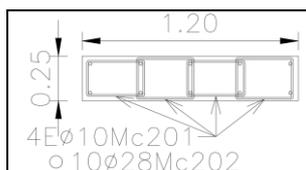


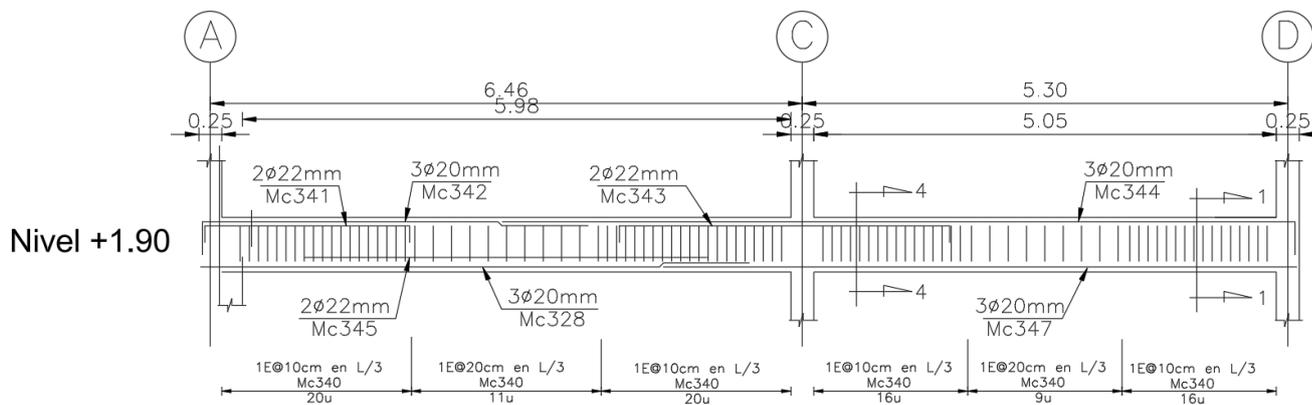
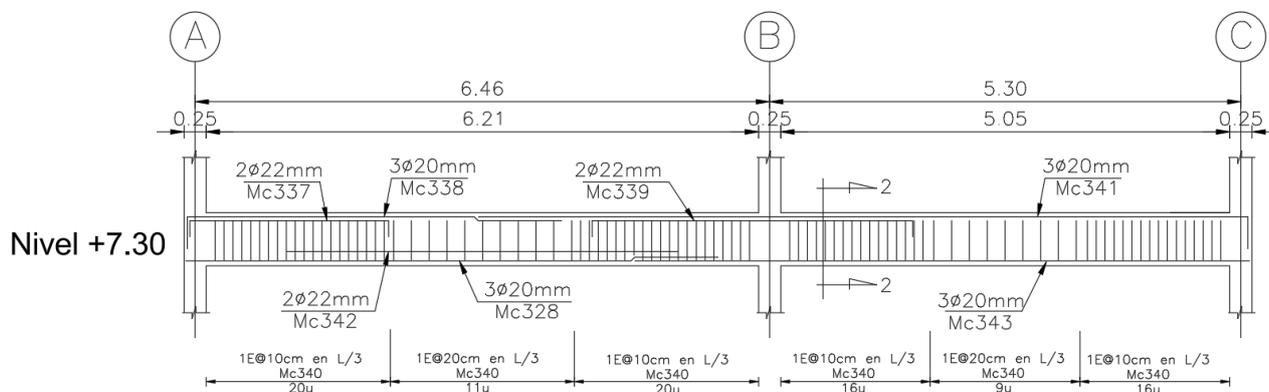
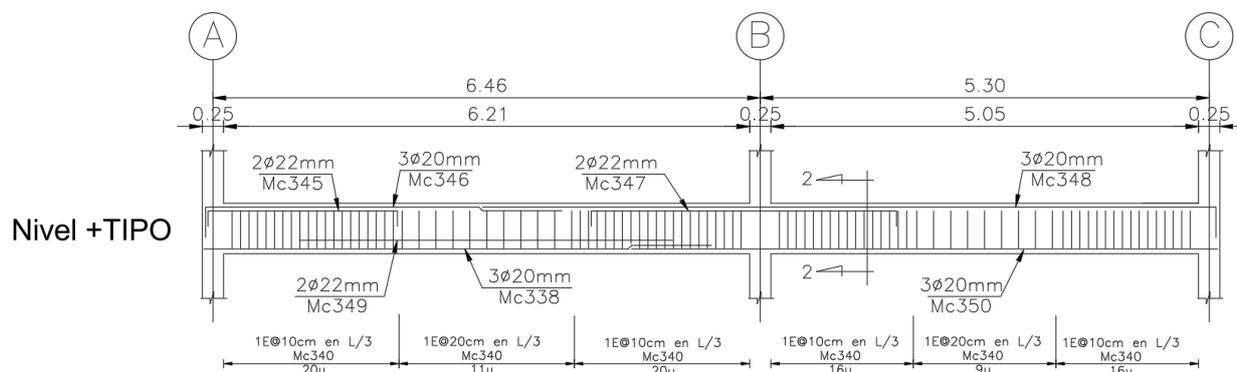
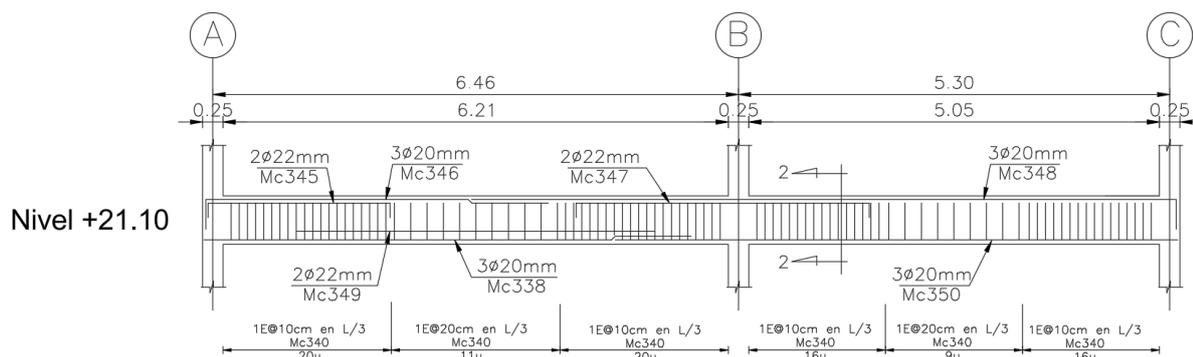


3. Elevación del pórtico 6: Se presenta la elevación del portico 6 en direccion Y que se esta analizando.



Columnas: Cabe resaltar que según el diseño estructural es constante el tipo de columna para todos los ejes y a lo largo de su altura.





ANEXO B: Medrado de cargas de pórticos

Metrado de cargas para sentido X

```
clc;
clear;
close all;

% Establecer el directorio al archivo actual
cd(fileparts(matlab.desktop.editor.getActiveFilename));

% METRADOS PARA PÓRTICOS
% SENTIDO X

% Longitud tributaria promedio (ancho en metros)
Lt = (6.46 + 5.30) / 2; % m

% Carga muerta total en el entrepiso (paredes, pisos, tumbado, losa)
WSCP_total = 587.31; % kgf/m^2

% Carga muerta tributaria
Q_SCP = WSCP_total * Lt; % kgf/m

% Carga viva repartida
Qv = 480 * Lt; % kgf/m

% Planta Baja (PB): carga distribuida total
Q_PB = 1.1 * Q_SCP + 0.25 * Qv + 1.1 * 3227; % kgf/m

% Nivel de amarre: carga distribuida
C = 180 * 5.88 + 1.1 * 3227; % kgf/m

% Carga viva repartida para plantas tipo
Qv2 = 200 * Lt; % kgf/m

% Plantas Altas Tipo (PAT): carga distribuida total
Q_PT = 1.1 * Q_SCP + 0.25 * Qv2 + 1.1 * 3227; % kgf/m

% Carga viva repartida para la cubierta
Qv3 = 200 * Lt; % kgf/m

% Carga muerta total para la cubierta
Q_SCPC = 380 * Lt; % kgf/m

% Cubierta (PC): carga distribuida total
Q_PC = 1.1 * Q_SCPC + 0.25 * Qv3 + 1.1 * 3227; % kgf/m

% Mostrar resultados en consola
disp('Resultados del metrados:');
Resultados del metrados:
disp(['Carga distribuida Planta Baja (Q_PB): ', num2str(Q_PB), ' kgf/m']);
Carga distribuida Planta Baja (Q_PB): 8054.0211 kgf/m
disp(['Carga distribuida Nivel de Amarre (C): ', num2str(C), ' kgf/m']);
Carga distribuida Nivel de Amarre (C): 4608.1 kgf/m
disp(['Carga distribuida Plantas Altas Tipo (Q_PT): ', num2str(Q_PT), ' kgf/m']);
Carga distribuida Plantas Altas Tipo (Q_PT): 7642.4211 kgf/m
disp(['Carga distribuida Cubierta (Q_PC): ', num2str(Q_PC), ' kgf/m']);
Carga distribuida Cubierta (Q_PC): 6301.54 kgf/m
```

Metrado de cargas para sentido Y

```

% SENTIDO Y

% Longitud tributaria promedio (ancho en metros)
Lt = (6.68 + 6.78) / 2; % m

% Carga muerta total en el entrepiso (paredes, pisos, tumbado, losa)
WSCP_total = 587.31; % kgf/m^2

% Carga muerta tributaria
Q_SCP = WSCP_total * Lt; % kgf/m

% Carga viva repartida
Qv = 480 * Lt; % kgf/m

% Planta Baja (PB): carga distribuida total
Q_PB = 1.1 * Q_SCP + 0.25 * Qv + 1.1 * 2933; % kgf/m

% Carga viva repartida para plantas tipo
Qv2 = 200 * Lt; % kgf/m

% Plantas Altas Tipo (PAT): carga distribuida total
Q_PT = 1.1 * Q_SCP + 0.25 * Qv2 + 1.1 * 2933; % kgf/m

% Carga viva repartida para la cubierta
Qv3 = 200 * Lt; % kgf/m

% Carga muerta total para la cubierta
Q_SCPC = 380 * Lt; % kgf/m

% Cubierta (PC): carga distribuida total
Q_PC = 1.1 * Q_SCPC + 0.25 * Qv3 + 1.1 * 2933; % kgf/m

% Mostrar resultados en consola
disp('Resultados del metrados (Sentido Y):');
Resultados del metrados (Sentido Y):
disp(['Carga distribuida Planta Baja (Q_PB): ', num2str(Q_PB), ' kgf/m']);
Carga distribuida Planta Baja (Q_PB): 8381.7559 kgf/m
disp(['Carga distribuida Plantas Altas Tipo (Q_PT): ', num2str(Q_PT), ' kgf/m']);
Carga distribuida Plantas Altas Tipo (Q_PT): 7910.6559 kgf/m
disp(['Carga distribuida Cubierta (Q_PC): ', num2str(Q_PC), ' kgf/m']);
Carga distribuida Cubierta (Q_PC): 6375.94 kgf/m

```

ANEXO C: Códigos de Pushover

1. Análisis no lineal de Pushover Sentido X

```

#####
#                               Pórtico Sentido X No Lineal - Análisis Pushover                               #
#                               Unidades: kgf, cm, segundos                                             #
#                                                                                                     #
# Descripción:                                                                                           #
# Este código realiza el análisis no lineal de un pórtico utilizando el método Pushover.                #
# Se considera un modelo estático no lineal para determinar las capacidades de carga lateral            #
# del pórtico bajo diferentes niveles de carga aplicada.                                             #
#                                                                                                     #
# Autor:      Alex Córdova y Kerlly Barcia                                                            #
# Fecha:      22 de Diciembre de 2024                                                                #
# Proyecto:   Tesis de Ingeniería Estructural                                                         #
#                                                                                                     #
# Instrucciones:                                                                                       #
# - Asegúrese de tener las librerías necesarias instaladas.                                         #
# - Verifique la correcta definición del modelo antes de ejecutar el análisis.                       #
# - Modifique los parámetros de entrada según los requisitos del proyecto.                         #
#####

# Modelo
import openseespy.opensees as ops
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import opsvs as opsv

ops.wipe()
# model('basic', '-ndm', ndm, '-ndf', ndf=ndm*(ndm+1)/2)¶
ops.model('basic', '-ndm', 2, '-ndf', 3)
# ~~~~~

```

<pre> ##### x1, x2, x3, x4, x5, x6, x7 = 0, 668, 1346, 1886, 2285, 2985, 3320 h1, h2, h3, h4, h5, h6, h7, h8, h9, h10 = 0, 210, 400, 650, 940, 1285, 1630, 1975, 2320, 2685 ops.node(1, x1, h1) ops.node(2, x2, h1) ops.node(3, x3, h1) ops.node(4, x4, h1) ops.node(5, x5, h1) ops.node(6, x6, h1) ops.node(7, x7, h1) ops.node(8, x1, h2) ops.node(9, x2, h2) ops.node(10, x3, h2) ops.node(11, x4, h2) ops.node(12, x5, h2) ops.node(13, x6, h2) ops.node(14, x7, h2) ops.node(15, -190, h3) ops.node(16, x1, h3) ops.node(17, x2, h3) ops.node(18, x3, h3) ops.node(19, x4, h3) ops.node(20, x5, h3) ops.node(21, x6, h3) ops.node(22, x7, h3) ops.node(23, -190, h4) ops.node(24, x1, h4) ops.node(25, x2, h4) ops.node(26, x3, h4) ops.node(27, x4, h4) ops.node(28, x5, h4) ops.node(29, x6, h4) ops.node(30, x7, h4) ops.node(31, 3700, h4) ops.node(32, -190, h5) ops.node(33, x1, h5) ops.node(34, x2, h5) ops.node(35, x3, h5) ops.node(36, x4, h5) ops.node(37, x5, h5) ops.node(38, x6, h5) ops.node(39, x7, h5) ops.node(40, 3700, h5) ops.node(41, -190, h6) ops.node(42, x1, h6) ops.node(43, x2, h6) ops.node(44, x3, h6) ops.node(45, x4, h6) ops.node(46, x5, h6) ops.node(47, x6, h6) ops.node(48, x7, h6) ops.node(49, 3700, h6) </pre>	<pre> ##### ops.node(50, -190, h7) ops.node(51, x1, h7) ops.node(52, x2, h7) ops.node(53, x3, h7) ops.node(54, x4, h7) ops.node(55, x5, h7) ops.node(56, x6, h7) ops.node(57, x7, h7) ops.node(58, 3700, h7) ops.node(59, -190, h8) ops.node(60, x1, h8) ops.node(61, x2, h8) ops.node(62, x3, h8) ops.node(63, x4, h8) ops.node(64, x5, h8) ops.node(65, x6, h8) ops.node(66, x7, h8) ops.node(67, 3700, h8) ops.node(68, -190, h9) ops.node(69, x1, h9) ops.node(70, x2, h9) ops.node(71, x3, h9) ops.node(72, x4, h9) ops.node(73, x5, h9) ops.node(74, x6, h9) ops.node(75, x7, h9) ops.node(76, 3700, h9) ops.node(77, x3, h10) ops.node(78, x4, h10) ops.fixY(0.0, 1,1,1) # opsv.plot_model(1) # plt.title('Nodos') </pre>	<pre> ##### ### Diafragmas ### equalDOF(Node primario, Nodo secundario, DGL) ops.equalDOF(18, 15, 1) ops.equalDOF(18, 16, 1) ops.equalDOF(18, 17, 1) ops.equalDOF(18, 19, 1) ops.equalDOF(18, 20, 1) ops.equalDOF(18, 21, 1) ops.equalDOF(18, 22, 1) ops.equalDOF(26, 23, 1) ops.equalDOF(26, 24, 1) ops.equalDOF(26, 25, 1) ops.equalDOF(26, 27, 1) ops.equalDOF(26, 28, 1) ops.equalDOF(26, 29, 1) ops.equalDOF(26, 30, 1) ops.equalDOF(26, 31, 1) ops.equalDOF(35, 32, 1) ops.equalDOF(35, 33, 1) ops.equalDOF(35, 34, 1) ops.equalDOF(35, 36, 1) ops.equalDOF(35, 37, 1) ops.equalDOF(35, 38, 1) ops.equalDOF(35, 39, 1) ops.equalDOF(35, 40, 1) ops.equalDOF(44, 41, 1) ops.equalDOF(44, 42, 1) ops.equalDOF(44, 43, 1) ops.equalDOF(44, 45, 1) ops.equalDOF(44, 46, 1) ops.equalDOF(44, 47, 1) ops.equalDOF(44, 48, 1) ops.equalDOF(44, 49, 1) ops.equalDOF(53, 50, 1) ops.equalDOF(53, 51, 1) ops.equalDOF(53, 52, 1) ops.equalDOF(53, 54, 1) ops.equalDOF(53, 55, 1) ops.equalDOF(53, 56, 1) ops.equalDOF(53, 57, 1) ops.equalDOF(53, 58, 1) </pre>
---	---	--



```
ops.equalDOF(62, 59, 1)
ops.equalDOF(62, 60, 1)
ops.equalDOF(62, 61, 1)
ops.equalDOF(62, 63, 1)
ops.equalDOF(62, 64, 1)
ops.equalDOF(62, 65, 1)
ops.equalDOF(62, 66, 1)
ops.equalDOF(62, 67, 1)

ops.equalDOF(71, 68, 1)
ops.equalDOF(71, 69, 1)
ops.equalDOF(71, 70, 1)
ops.equalDOF(71, 72, 1)
ops.equalDOF(71, 73, 1)
ops.equalDOF(71, 74, 1)
ops.equalDOF(71, 75, 1)
ops.equalDOF(71, 76, 1)

ops.equalDOF(77, 78, 1)
```

```
# =====
# Masas
Mpiso_PB = (80.54) #Masa del piso en kgf*s^2/cm
Mpiso_P1 = (76.42) #Masa del piso en kgf*s^2/cm
Mpiso_P2 = (76.42) #Masa del piso en kgf*s^2/cm
Mpiso_P3 = (76.42) #Masa del piso en kgf*s^2/cm
Mpiso_P4 = (76.42) #Masa del piso en kgf*s^2/cm
Mpiso_TERR = (76.42) #Masa del piso en kgf*s^2/cm
Mpiso_CUB = (63.01) #Masa del piso en kgf*s^2/cm
#mass(nodeTag, mX, mY, mZ)
ops.mass(10, Mpiso_PB, 1e-12, 1e-12)
ops.mass(35, Mpiso_P1, 1e-12, 1e-12)
ops.mass(44, Mpiso_P2, 1e-12, 1e-12)
ops.mass(53, Mpiso_P3, 1e-12, 1e-12)
ops.mass(62, Mpiso_P4, 1e-12, 1e-12)
ops.mass(71, Mpiso_TERR, 1e-12, 1e-12)
ops.mass(77, Mpiso_CUB, 1e-12, 1e-12)

# # =====
```



```
#Materiales
# Hormigón No confinado
fpc = 240 # kgf/cm2 Resistencia a compresion
Ec = 15100*np.sqrt(fpc) # Modulo de elasticidad
epsc0 = 2*fpc/Ec # Deformción unitaria de compresión máxima
fpcu = 0.2*fpc # Resistencia post pico
epsU = 0.006 # Deformación unitaria última
lambdaC = 0.5 # Parametro de ablandamiento pendiente en rama descendente
ft = 2*np.sqrt(fpc) # Resistencia a tracción del concreto
Ets = 0.1*(2*fpc)/epsc0 # Pendiente de tracción
#uniaxialMaterial('Concrete02', matTag, fpc, epsc0, fpcu, epsU, lambdaC, ft, Ets)
ops.uniaxialMaterial('Concrete02', 1, -fpc, -epsc0, -fpcu, -epsU, lambdaC, ft, Ets)

# Hormigón Confinado
k = 1.4 # Factor de confinamiento
fpcc = k*fpc # Mpa Resistencia a compresión confinada
epscc0 = 2*fpcc/Ec # Deformación unitaria de compresión máxima
fpccu = 0.2*fpcc # Resistencia post pico
epsU = 0.02 # Deformación unitaria última
ops.uniaxialMaterial('Concrete02', 2, -fpcc, -epscc0, -fpccu, -epsU, lambdaC, ft, Ets)

# Acero de Refuerzo
#uniaxialMaterial('Steel01', matTag, Fy, E0, b)
Fy = 4200 #kgf/cm2 Esfuerzo de fluencia
E0 = 2.1e6 #kgf/cm2 Módulo de elasticidad
b = 0.001 # Coeficiente de endurecimiento por deformación

ops.uniaxialMaterial('Steel01', 3, Fy, E0, b)

'====='
```



```
# Sección de Viga
b1, h1 = 40, 60
y1 = h1/2
x1 = b1/2
c = 5.4
As20 = 3.14 #cm^2
As22 = 3.8 #cm^2

Vb1 = 1
#section('Fiber', secTag)
ops.section('Fiber', Vb1)
ops.patch('rect', 2, 10, 1, -y1+c, -x1+c, y1-c, x1-c)
ops.patch('rect', 1, 12, 1, -y1, -x1, y1, -x1+c)
ops.patch('rect', 1, 15, 1, -y1, x1-c, y1, x1)
ops.patch('rect', 1, 15, 1, -y1, x1-c, y1, x1)
ops.patch('rect', 1, 2, 4, y1-c, -x1+c, y1, x1-c)
ops.patch('rect', 1, 2, 4, -y1, -x1+c, -y1+c, x1-c)
ops.layer('straight', 3, 3, As20, y1-c, -x1+c, y1-c, x1-c)
ops.layer('straight', 3, 2, As22, y1-c, -8, y1-c, 8)
ops.layer('straight', 3, 3, As20, -y1+c, -x1+c, -y1+c, x1-c)

# # #####
# # Dibujo de sección
# seccion = [['section', 'Fiber', Vb1],
#            ['patch', 'rect', 2, 10, 1, -y1+c, -x1+c, y1-c, x1-c],
#            ['patch', 'rect', 1, 12, 1, -y1, -x1, y1, -x1+c],
#            ['patch', 'rect', 1, 15, 1, -y1, x1-c, y1, x1],
#            ['patch', 'rect', 1, 2, 4, y1-c, -x1+c, y1, x1-c],
#            ['patch', 'rect', 1, 2, 4, -y1, -x1+c, -y1+c, x1-c],
#            ['layer', 'straight', 3, 3, As20, y1-c, -x1+c, y1-c, x1-c],
#            ['layer', 'straight', 3, 2, As22, y1-c, -8, y1-c, 8],
#            ['layer', 'straight', 3, 3, As20, -y1+c, -x1+c, -y1+c, x1-c]]

# # # Los siguientes comandos dibujan la sección para saber que nos quedó bien
# matcolor = ['r', 'lightgrey', 'gold', 'w', 'w', 'w']
# plt.figure()
# opsv.plot_fiber_section(seccion, matcolor=matcolor)
# plt.axis('equal')
```



```
# Sección de Viga
b2, h2 = 40, 60
y1 = h2/2
x1 = b2/2
c = 5.4

# As14 = 1.54 #cm^2
# As16 = 2 #cm^2
Vb2 = 2
#section('Fiber', secTag)
ops.section('Fiber', Vb2)
ops.patch('rect', 2, 10, 1, -y1+c, -x1+c, y1-c, x1-c)
ops.patch('rect', 1, 12, 1, -y1, -x1, y1, -x1+c)
ops.patch('rect', 1, 12, 1, -y1, x1-c, y1, x1)
ops.patch('rect', 1, 2, 1, y1-c, -x1+c, y1, x1-c)
ops.patch('rect', 1, 2, 1, -y1, -x1+c, -y1+c, x1-c)
ops.layer('straight', 3, 3, As20, y1-c, -8, y1-c, 8)
ops.layer('straight', 3, 3, As20, -y1+c, -x1+c, -y1+c, x1-c)

# # #####
# # Dibujo de sección
# seccion = [['section', 'Fiber', Vb2],
#            ['patch', 'rect', 2, 10, 1, -y1+c, -x1+c, y1-c, x1-c],
#            ['patch', 'rect', 1, 12, 1, -y1, -x1, y1, -x1+c],
#            ['patch', 'rect', 1, 12, 1, -y1, x1-c, y1, x1],
#            ['patch', 'rect', 1, 2, 1, y1-c, -x1+c, y1, x1-c],
#            ['patch', 'rect', 1, 2, 1, -y1, -x1+c, -y1+c, x1-c],
#            ['layer', 'straight', 3, 3, As20, y1-c, -x1+c, y1-c, x1-c],
#            ['layer', 'straight', 3, 3, As20, -y1+c, -x1+c, -y1+c, x1-c]]

# # # Los siguientes comandos dibujan la sección para saber que nos quedó bien
# matcolor = ['r', 'lightgrey', 'gold', 'w', 'w', 'w']
# plt.figure()
# opsv.plot_fiber_section(seccion, matcolor=matcolor)
# plt.axis('equal')
```

```

# Sección de Viga
b2, h2 = 40 , 60
y1 = h2/2
x1 = b2/2
c = 5.4

# As14 = 1.54 #cm^2
# As16 = 2 #cm^2
Vb3 = 3
#section('Fiber', secTag)
ops.section('Fiber', Vb3)
ops.patch('rect', 2, 10, 1, -y1+c,-x1+c , y1-c,x1-c)
ops.patch('rect', 1, 12, 1, -y1,-x1 , y1,-x1+c)
ops.patch('rect', 1, 12, 1, -y1,x1-c , y1,x1)
ops.patch('rect', 1, 2, 1, y1-c,-x1+c , y1,x1-c)
ops.patch('rect', 1, 2, 1, -y1,-x1+c , -y1+c,x1-c)
ops.layer('straight', 3, 3, As20, y1-c,-x1+c, y1-c,x1-c)
ops.layer('straight', 3, 3, As20, -y1+c,-x1+c, -y1+c,x1-c)
ops.layer('straight', 3, 2, As22, -y1+c,-x1+c, -y1+c,x1-c)

#####
#Dibujo de sección
seccion = [['section','Fiber', Vb3],
           ['patch','rect', 2, 10, 1, -y1+c,-x1+c , y1-c,x1-c],
           ['patch','rect', 1, 12, 1, -y1,-x1 , y1,-x1+c],
           ['patch','rect', 1, 12, 1, -y1,x1-c , y1,x1],
           ['patch','rect', 1, 2, 1, y1-c,-x1+c , y1,x1-c],
           ['patch','rect', 1, 2, 1, -y1,-x1+c , -y1+c,x1-c],
           ['layer','straight', 3, 3, As20, y1-c,-x1+c, y1-c,x1-c],
           ['layer','straight', 3, 2, As22, -y1+c,-x1+c, -y1+c,x1-c],
           ['layer','straight', 3, 3, As20, -y1+c,-x1+c, -y1+c,x1-c]]

## Los siguientes comandos dibujan la sección para saber que nos quedó bien
matcolor = ['r', 'lightgrey', 'gold', 'w', 'w', 'w']
plt.figure()
opsv.plot_fiber_section(seccion, matcolor=matcolor)
plt.axis('equal')

```

```

#####
# Sección de Columna

# Sección de Columna
Coll = 4
bc1, hc1 = 25 , 120
y1c = hc1/2
x1c = bc1/2
c = 5.4
As28 = 6.154 #cm^2
# As18 = 2.54 #cm^2
#section('Fiber', secTag)
ops.section('Fiber', Coll)
#patch('rect', matTag, numSubdivY, numSubdivZ, *crdsI, *crdsJ)
ops.patch('rect', 2, 10, 1, -y1c+c,-x1c+c , y1c-c,x1c-c)
ops.patch('rect', 1, 12, 1, -y1c,-x1c , y1c,-x1c+c)
ops.patch('rect', 1, 12, 1, -y1c,x1c-c , y1c,x1c)
ops.patch('rect', 1, 2, 1, y1c-c,-x1c+c , y1c,x1c-c)
ops.patch('rect', 1, 2, 1, -y1c,-x1c+c , -y1c+c,x1c-c)
ops.layer('straight', 3, 5, As28, y1c-c,-x1c+c, y1c-c,x1c-c)
ops.layer('straight', 3, 2, As28, 30,-x1c+c, 30,x1c-c)
ops.layer('straight', 3, 2, As28, 0,-x1c+c, 0,x1c-c)
ops.layer('straight', 3, 2, As28, -30,-x1c+c, -30,x1c-c)
ops.layer('straight', 3, 5, As28, -y1c+c,-x1c+c, -y1c+c,x1c-c)

# Dibujo de sección
seccion = [['section','Fiber', Coll],
           ['patch','rect', 2, 10, 1, -y1c+c,-x1c+c , y1c-c,x1c-c],
           ['patch','rect', 1, 12, 1, -y1c,-x1c , y1c,-x1c+c],
           ['patch','rect', 1, 12, 1, -y1c,x1c-c , y1c,x1c],
           ['patch','rect', 1, 2, 1, y1c-c,-x1c+c , y1c,x1c-c],
           ['patch','rect', 1, 2, 1, -y1c,-x1c+c , -y1c+c,x1c-c],
           ['layer','straight', 3, 2, As28, y1c-c,-x1c+c, y1c-c,x1c-c],
           ['layer','straight', 3, 2, As28, 30,-x1c+c, 30,x1c-c],
           ['layer','straight', 3, 2, As28, 0,-x1c+c, 0,x1c-c],
           ['layer','straight', 3, 2, As28, -30,-x1c+c, -30,x1c-c],
           ['layer','straight', 3, 2, As28, -y1c+c,-x1c+c, -y1c+c,x1c-c]]

## Los siguientes comandos dibujan la sección para saber que nos quedó bien
matcolor = ['r', 'lightgrey', 'gold', 'w', 'w', 'w']
plt.figure()
opsv.plot_fiber_section(seccion, matcolor=matcolor)
plt.axis('equal')

```

```

=====
# # Elementos
ops.geomTransf('Linear', 1) #Para vigas
ops.geomTransf('PDelta', 2) #Para columnas
# Definición de Elementos
#beamIntegration('HingeRadau', tag, secI, lpI, secJ, lpJ, secE)
# secI (int): Sección para la rótula plástica I, previamente definida
# lpI (float): Longitud de la rótula plástica I
# secJ (int): Sección para la rótula plástica J, previamente definida
# lpJ (float): Longitud de la rótula plástica J
# secE (int): Sección para el tramo central, previamente definido
h1 = 60 # Altura de sección en viga

lpI1 = h1/4 # se adopta esta longitud de rótula plástica en vigas
lpJ1 = h1/4 # se adopta esta longitud de rótula plástica en vigas

hc1 = 120 # Altura de sección en columna
lpIc1 = hc1/4 # columnas
lpJc1 = hc1/4

ops.beamIntegration('HingeRadau', 1, Col1, lpIc1, Col1, lpJc1, Col1) #definido para columnas

```

```

#Columnas
#element('dispBeamColumn', eleTag, *eleNodes, transfTag, integrationTag)
ops.element('dispBeamColumn', 1, 1,8, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 2, 2,9, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 3, 3,18, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 4, 4,11, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 5, 5,12, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 6, 6,13, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 7, 7,14, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 8, 8,16, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 9, 9,17, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 10, 10,18, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 11, 11,19, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 12, 12,20, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 13, 13,21, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 14, 14,22, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 15, 16,24, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 16, 17,25, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 17, 18,26, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 18, 19,27, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 19, 20,28, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 20, 21,29, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 21, 22,30, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 22, 24,33, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 23, 25,34, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 24, 26,35, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 25, 27,36, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 26, 28,37, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 27, 29,38, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 28, 30,39, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 29, 33,42, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 30, 34,43, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 31, 35,44, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 32, 36,45, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 33, 37,46, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 34, 38,47, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 35, 39,48, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 36, 42,51, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 37, 43,52, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 38, 44,53, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 39, 45,54, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 40, 46,55, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 41, 47,56, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 42, 48,57, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 43, 51,60, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 44, 52,61, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 45, 53,62, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 46, 54,63, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 47, 55,64, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 48, 56,65, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 49, 57,66, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 50, 60,69, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 51, 61,70, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 52, 62,71, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 53, 63,72, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 54, 64,73, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 55, 65,74, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 56, 66,75, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 57, 71,77, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 58, 72,78, 2, 1)

```

```

ops.beamIntegration('HingeRada', 200, Vb1, lP11, Vb1, lP11, Vb1) #definido para viga
ops.beamIntegration('HingeRada', 201, Vb1, lP11, Vb1, lP11, Vb3) #definido para viga
ops.beamIntegration('HingeRada', 202, Vb1, lP11, Vb2, lP11, Vb3) #definido para viga
ops.beamIntegration('HingeRada', 203, Vb2, lP11, Vb2, lP11, Vb2) #definido para viga
ops.beamIntegration('HingeRada', 204, Vb1, lP11, Vb2, lP11, Vb2) #definido para viga

ops.element('dispBeamColumn', 65, 15,10, 1, 200)
ops.element('dispBeamColumn', 66, 16,17, 1, 201)
ops.element('dispBeamColumn', 67, 17,18, 1, 201)
ops.element('dispBeamColumn', 68, 18,19, 1, 202)
ops.element('dispBeamColumn', 69, 19,20, 1, 203)
ops.element('dispBeamColumn', 70, 20,21, 1, 201)
ops.element('dispBeamColumn', 71, 21,22, 1, 204)

ops.element('dispBeamColumn', 72, 23,24, 1, 200)
ops.element('dispBeamColumn', 73, 24,25, 1, 201)
ops.element('dispBeamColumn', 74, 25,26, 1, 201)
ops.element('dispBeamColumn', 75, 26,27, 1, 202)
ops.element('dispBeamColumn', 76, 27,28, 1, 203)
ops.element('dispBeamColumn', 77, 28,29, 1, 201)
ops.element('dispBeamColumn', 78, 29,30, 1, 204)
ops.element('dispBeamColumn', 79, 30,31, 1, 204)

ops.element('dispBeamColumn', 80, 32,33, 1, 200)
ops.element('dispBeamColumn', 81, 33,34, 1, 201)
ops.element('dispBeamColumn', 82, 34,35, 1, 201)
ops.element('dispBeamColumn', 83, 35,36, 1, 202)
ops.element('dispBeamColumn', 84, 36,37, 1, 203)
ops.element('dispBeamColumn', 85, 37,38, 1, 201)
ops.element('dispBeamColumn', 86, 38,39, 1, 204)
ops.element('dispBeamColumn', 87, 39,40, 1, 204)

ops.element('dispBeamColumn', 88, 41,42, 1, 200)
ops.element('dispBeamColumn', 89, 42,43, 1, 201)
ops.element('dispBeamColumn', 90, 43,44, 1, 201)
ops.element('dispBeamColumn', 91, 44,45, 1, 202)
ops.element('dispBeamColumn', 92, 45,46, 1, 203)
ops.element('dispBeamColumn', 93, 46,47, 1, 203)
ops.element('dispBeamColumn', 94, 47,48, 1, 204)
ops.element('dispBeamColumn', 95, 48,49, 1, 204)

ops.element('dispBeamColumn', 96, 50,51, 1, 200)
ops.element('dispBeamColumn', 97, 51,52, 1, 201)
ops.element('dispBeamColumn', 98, 52,53, 1, 201)
ops.element('dispBeamColumn', 99, 53,54, 1, 202)
ops.element('dispBeamColumn', 100, 54,55, 1, 203)
ops.element('dispBeamColumn', 101, 55,56, 1, 203)
ops.element('dispBeamColumn', 102, 56,57, 1, 204)
ops.element('dispBeamColumn', 103, 57,58, 1, 204)

ops.element('dispBeamColumn', 104, 59,60, 1, 200)
ops.element('dispBeamColumn', 105, 60,61, 1, 201)
ops.element('dispBeamColumn', 106, 61,62, 1, 201)
ops.element('dispBeamColumn', 107, 62,63, 1, 202)
ops.element('dispBeamColumn', 108, 63,64, 1, 203)
ops.element('dispBeamColumn', 109, 64,65, 1, 203)
ops.element('dispBeamColumn', 110, 65,66, 1, 204)
ops.element('dispBeamColumn', 111, 66,67, 1, 204)

ops.element('dispBeamColumn', 112, 68,69, 1, 200)
ops.element('dispBeamColumn', 113, 69,70, 1, 201)
ops.element('dispBeamColumn', 114, 70,71, 1, 201)
ops.element('dispBeamColumn', 115, 71,72, 1, 202)
ops.element('dispBeamColumn', 116, 72,73, 1, 203)
ops.element('dispBeamColumn', 117, 73,74, 1, 203)
ops.element('dispBeamColumn', 118, 74,75, 1, 204)
ops.element('dispBeamColumn', 119, 75,76, 1, 204)
ops.element('dispBeamColumn', 120, 77,78, 1, 202)

# para ver el modelo
opsv.plot_model()

```

```

# Cargas del modelo
## Primer Estado de Carga: Repartida
ops.timeSeries('Linear', 1)
ops.pattern('Plain', 1, 1)

vigas = [65,66,67,68,69,70,71]
Wvigas = 80.54 #8054 kgf/m convertidos a kgf/cm
ops.eleLoad('-ele', *vigas, '-type', '-beamUniform', -Wvigas)

vigas1 =
[80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100,101,102,103,104,105,106,107,108,109,110,111]
Wvigas1 = 76.42 #7183 kgf/m convertidos a kgf/cm
ops.eleLoad('-ele', *vigas1, '-type', '-beamUniform', -Wvigas1)

vigas2 = [112,113,114,115,116,117,118,119,120]
Wvigas2 = 63.01 #5298 kgf/m convertidos a kgf/cm
ops.eleLoad('-ele', *vigas2, '-type', '-beamUniform', -Wvigas2)

# Análisis del modelo
ops.constraints('Plain')
ops.numberer('RCM')
ops.system('UmfPack')
ops.test('NormUnbalance', 1e-5, 50)
ops.algorithm('Newton')
nPasos = 10
incr = 1/nPasos
ops.integrator('LoadControl', incr)
ops.analysis('Static')
ok = ops.analyze(nPasos)
if ok == 0:
    print('Primer estado de carga aplicado')
else:
    print('Error al aplicar el primer estado de carga')
ops.loadConst('-time', 0)
ops.wipeAnalysis()

```

```

# Análisis modal
num_modos = 6
OmegaSq = ops.eigen('-genBandArpack', num_modos)
OmegaSq = np.array(OmegaSq)
Omega = OmegaSq**0.5
Periodo = 2*np.pi/Omega

for i in range(num_modos):
    print('Modo ', i+1, 'T = ', Periodo[i], 's')

opsv.plot_mode_shape(1)
# plt.title('Modo 1')
# opsv.plot_mode_shape(2)
# plt.title('Modo 2')
# opsv.plot_mode_shape(3)
# plt.title('Modo 3')
# opsv.plot_mode_shape(4)
# plt.title('Modo 4')
# opsv.plot_mode_shape(5)
# plt.title('Modo 5')
# opsv.plot_mode_shape(6)
# plt.title('Modo 6')

# Representacion del modelo con cargas
# plt.figure()
# opsv.plot_loads_2d()
# plt.title('Cargas')

```

```

# Segundo Estado de carga: Carga incremental
if ok == 0:
    ops.timeSeries('Linear', 2)
    ops.pattern('Plain', 2, 2)
    ops.load(18, 1/28,0,0,0,0) #Para dar la forma
    ops.load(26, 2/28,0,0,0,0) #Para dar la forma
    ops.load(35, 3/28,0,0,0,0) #Para dar la forma
    ops.load(44, 4/28,0,0,0,0) #Para dar la forma
    ops.load(53, 5/28,0,0,0,0) #Para dar la forma
    ops.load(62, 6/28,0,0,0,0) #Para dar la forma
    ops.load(71, 7/28,0,0,0,0) #Para dar la forma
    ops.load(77, 8/28,0,0,0,0) #Para dar la forma

# Crear el analisis
Tol = 1e-6
maxNumIter = 80
ops.constraints('Plain')
ops.numberer('RCM')
ops.system('BandGeneral')
ops.test('EnergyIncr', Tol, maxNumIter)
ops.algorithm('Newton')
# Deriva maxima de techo, se considera el 4% de la altura total
Htot = 2310
maxDisp = 50
nPasos = 100
incr = maxDisp/nPasos
nodoControl = 78
ops.integrator('DisplacementControl', nodoControl, 1, incr)
ops.analysis('Static')

# Recorder almacena Cortante basal-Desplazamiento de techo
# recorder('Node', '-file', filename, '-node', *nodeTags=[], '-dof', *dofs=[], respType)
ops.recorder('Node', '-file', 'Load-Displacement.out', '-time', '-node',
nodoControl, '-dof', 1, 'disp')

while ops.nodeDisp(nodoControl, 1) <= maxDisp:
    ok = ops.analyze(1)
    if ok != 0:
        print('El análisis Pushover falló: ', ops.nodeDisp(nodoControl, 1), 'cm')
        break
if ok == 0:
    print('El análisis Pushover terminó exitosamente')

ops.wipeAnalysis()
ops.remove('recorders')

```

```

# Push = np.loadtxt('Load-Displacement.out')
# plt.figure()
# plt.plot(Push[:, 1], Push[:, 0], color='r')

# plt.title('Curva Pushover')
# plt.xlabel('Desplazamiento [cm]')
# plt.ylabel('Cortante Basal, V [kgf]')
# plt.grid()
# plt.savefig('Pushover.png')
# plt.show()
# Cargar datos
Push = np.loadtxt('Load-Displacement.out')
Push[:, 0] = Push[:, 0] / 1000 # Dividir la columna de desplazamientos por 1000
Push[:, 1] = Push[:, 1] / 100 # Dividir la columna de cortante basal por 1000

# Crear la figura
plt.figure()

# Plotear los datos en color rojo
plt.plot(Push[:, 1], Push[:, 0], color='r')

# Añadir título y etiquetas
plt.title('Curva Pushover X -Opensees')
plt.xlabel('Desplazamiento [m]')
plt.ylabel('Cortante Basal, V [Tonnes]')

# Añadir cuadrícula con líneas más tenues
plt.grid(color='gray', linestyle='--', linewidth=0.5)

# Guardar el gráfico
plt.savefig('Pushover.png')

# Mostrar el gráfico
plt.show()

```

2. Análisis no lineal de Pushover Sentido Y

```

#####
#                               Pórtico Sentido Y No Lineal - Análisis Pushover                               #
#                               Unidades: kgf, cm, segundos                                             #
#                                                                                                       #
# Descripción:                                                                                                       #
# Este código realiza el análisis no lineal de un pórtico utilizando el método Pushover. #
# Se considera un modelo estático no lineal para determinar las capacidades de carga lateral #
# del pórtico bajo diferentes niveles de carga aplicada. #
#                                                                                                       #
# Autor:      Alex Córdova y Kerlly Barcia #
# Fecha:      22 de Diciembre de 2024 #
# Proyecto:   Tesis de Ingeniería Estructural #
#                                                                                                       #
# Instrucciones: #
# - Asegúrese de tener las librerías necesarias instaladas. #
# - Verifique la correcta definición del modelo antes de ejecutar el análisis. #
# - Modifique los parámetros de entrada según los requisitos del proyecto. #
#####

# Modelo
import openseespy.opensees as ops
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import opsvs as opsv

ops.wipe()
# model('basic', '-ndm', ndm, '-ndf', ndf=ndm*(ndm+1)/2)¶
ops.model('basic', '-ndm', 2, '-ndf', 3)
# ~~~~~

```

```

# Nodos-Diafragmas-masas
#Nodos-Diafragmas-masas
ops.node(1, 0, 0)
ops.node(2, 530, 0)
ops.node(3, 1175, 0)
ops.node(4, 0, 210)
ops.node(5, 530, 210)
ops.node(6, 1175, 210)
ops.node(7, 0, 400)
ops.node(8, 530, 400)
ops.node(9, 1175, 400)
ops.node(10, 0, 650)
ops.node(11, 530, 650)
ops.node(12, 1175, 650)
ops.node(13, 0, 940)
ops.node(14, 530, 940)
ops.node(15, 1175, 940)
ops.node(16, 0, 1285)
ops.node(17, 530, 1285)
ops.node(18, 1175, 1285)
ops.node(19, 0, 1630)
ops.node(20, 530, 1630)
ops.node(21, 1175, 1630)
ops.node(22, 0, 1975)
ops.node(23, 530, 1975)
ops.node(24, 1175, 1975)
ops.node(25, 0, 2320)
ops.node(26, 530, 2320)
ops.node(27, 1175, 2320)

ops.fixY(0, 0, 1, 1, 1) # Empotramiento para cuando la coordenada Y es cero
# En los nodos donde termina el muro de sotano, se restringe los desplazamientos (x,y)
ops.fix(4, 1, 1, 0)
ops.fix(6, 1, 1, 0)

opsv.plot_model(1)
plt.title('Nodos')

```

```

# # Diafragmas
# ops.equalDOF(5, 4, 1) # Diafragma en nivel donde finaliza el muro de sotano
ops.equalDOF(8, 7, 1) # Diafragma de planta baja
ops.equalDOF(8, 9, 1) # Diafragma de planta baja
ops.equalDOF(11, 10, 1) # Diafragma en nivel de vigas de amarre
ops.equalDOF(11, 12, 1) # Diafragma en nivel de vigas de amarre
ops.equalDOF(14, 13, 1) # Diafragma de PA1
ops.equalDOF(14, 15, 1) # Diafragma en nivel de vigas de amarre
ops.equalDOF(17, 16, 1) # Diafragma de PA2
ops.equalDOF(17, 18, 1) # Diafragma en nivel de vigas de amarre
ops.equalDOF(20, 19, 1) # Diafragma de PA3
ops.equalDOF(20, 21, 1) # Diafragma en nivel de vigas de amarre
ops.equalDOF(23, 22, 1) # Diafragma de PA4
ops.equalDOF(23, 24, 1) # Diafragma en nivel de vigas de amarre
ops.equalDOF(26, 25, 1) # Diafragma de Terraza
ops.equalDOF(26, 27, 1) # Diafragma en nivel de vigas de amarre

# =====
# Masas
Mpis0_PB = (83.81) #Masa del piso en kgf*s^2/cm
Mpis0_P1 = (79.10) #Masa del piso en kgf*s^2/cm
Mpis0_P2 = (79.10) #Masa del piso en kgf*s^2/cm
Mpis0_P3 = (79.10) #Masa del piso en kgf*s^2/cm
Mpis0_P4 = (79.10) #Masa del piso en kgf*s^2/cm
Mpis0_TERR = (63.75) #Masa del piso en kgf*s^2/cm
#mass(nodeTag, mX, mY, mZ)
ops.mass(8, Mpis0_PB, 1e-12, 1e-12)
ops.mass(14, Mpis0_P1, 1e-12, 1e-12)
ops.mass(17, Mpis0_P2, 1e-12, 1e-12)
ops.mass(20, Mpis0_P3, 1e-12, 1e-12)
ops.mass(23, Mpis0_P4, 1e-12, 1e-12)
ops.mass(26, Mpis0_TERR, 1e-12, 1e-12)

# =====

```

```

# Materiales
# Hormigón No confinado
fpc = 240 # kgf/cm2 Resistencia a compresion
Ec = 15100*np.sqrt(fpc) # Modulo de elasticidad
epsc0 = 2*fpc/Ec # Deformación unitaria de compresión máxima
fpcu = 0.2*fpc # Resistencia post pico
epsU = 0.006 # Deformación unitaria última
lambdaC = 0.5 # Parametro de ablandamiento pendiente en rama descendente
ft = 2*np.sqrt(fpc) # Resistencia a tracción del concreto
Ets = 0.1*(2*fpc)/epsc0 # Pendiente de tracción
#uniaxialMaterial('Concrete02', matTag, fpc, epsc0, fpcu, epsU, lambdaC, ft, Ets)
ops.uniaxialMaterial('Concrete02', 1, -fpc, -epsc0, -fpcu, -epsU, lambdaC, ft, Ets)

# Hormigón Confinado
k = 1.6 # Factor de confinamiento
fpcC = k*fpc # Mpa Resistencia a compresión confinada
epscC = 2*fpcC/Ec # Deformación unitaria de compresión máxima
fpcCU = 0.2*fpcC # Resistencia post pico
epsCU = 0.02 # Deformación unitaria última
ops.uniaxialMaterial('Concrete02', 2, -fpcC, -epscC, -fpcCU, -epsCU, lambdaC, ft, Ets)

# Acero de Refuerzo
#uniaxialMaterial('Steel01', matTag, Fy, E0, b)
Fy = 4200 #kgf/cm2 Esfuerzo de fluencia
E0 = 2.1e6 #kgf/cm2 Módulo de elasticidad
b = 0.001 # Coeficiente de endurecimiento por deformación
ops.uniaxialMaterial('Steel01', 3, Fy, E0, b)

```

```

# Sección de Viga
b1, h1 = 40, 60
y1 = h1/2
x1 = b1/2
c = 5.4
As20 = 3.14 #cm^2
As22 = 3.8 #cm^2

Vb1 = 1
#section('Fiber', secTag)
ops.section('Fiber', Vb1)
ops.patch('rect', 2, 14, 1, -y1+c, -x1+c, y1-c, x1-c)
ops.patch('rect', 1, 15, 1, -y1, -x1, y1, -x1+c)
ops.patch('rect', 1, 15, 1, -y1, x1-c, y1, x1)
ops.patch('rect', 1, 2, 4, y1-c, -x1+c, y1, x1-c)
ops.patch('rect', 1, 2, 4, -y1, -x1+c, -y1+c, x1-c)
ops.layer('straight', 3, 3, As20, y1-c, -x1+c, y1-c, x1-c)
ops.layer('straight', 3, 2, As22, y1-c, -8, y1-c, 8)
ops.layer('straight', 3, 3, As20, -y1+c, -x1+c, -y1+c, x1-c)

# # # # #
# Dibujo de sección
# seccion = [['section', 'Fiber', Vb1],
#            ['patch', 'rect', 2, 10, 1, -y1+c, -x1+c, y1-c, x1-c],
#            ['patch', 'rect', 1, 12, 1, -y1, -x1, y1, -x1+c],
#            ['patch', 'rect', 1, 12, 1, -y1, x1-c, y1, x1],
#            ['patch', 'rect', 1, 2, 1, y1-c, -x1+c, y1, x1-c],
#            ['patch', 'rect', 1, 2, 1, -y1, -x1+c, -y1+c, x1-c],
#            ['layer', 'straight', 3, 3, As20, y1-c, -x1+c, y1-c, x1-c],
#            ['layer', 'straight', 3, 2, As22, y1-c, -8, y1-c, 8],
#            ['layer', 'straight', 3, 3, As20, -y1+c, -x1+c, -y1+c, x1-c]]

# # # Los siguientes comandos dibujan la sección para saber que nos quedó bien
# matcolor = ['r', 'lightgrey', 'gold', 'w', 'w', 'w']
# plt.figure()
# opsv.plot_fiber_section(seccion, matcolor=matcolor)
# plt.axis('equal')

```



```

# Sección de viga
b2, h2 = 40 , 60
y1 = h2/2
x1 = b2/2
c = 5.4

# As14 = 1.54 #cm^2
# As16 = 2 #cm^2
Vb2 = 2
#section('Fiber', secTag)
ops.section('Fiber', Vb2)
ops.patch('rect', 2, 10, 1, -y1+c, -x1+c , y1-c, x1-c)
ops.patch('rect', 1, 12, 1, -y1, -x1 , y1, -x1+c)
ops.patch('rect', 1, 12, 1, -y1, x1-c , y1, x1)
ops.patch('rect', 1, 2, 1, y1-c, -x1+c , y1, x1-c)
ops.patch('rect', 1, 2, 1, -y1, -x1+c , -y1+c, x1-c)
ops.layer('straight', 3, 3, As20, y1-c, -x1+c, y1-c, x1-c, 8)
ops.layer('straight', 3, 3, As20, -y1+c, -x1+c, -y1+c, x1-c)

#####
# # Dibujo de sección
# seccion = [['section', 'Fiber', Vb2],
#            ['patch', 'rect', 2, 10, 1, -y1+c, -x1+c , y1-c, x1-c],
#            ['patch', 'rect', 1, 12, 1, -y1, -x1 , y1, -x1+c],
#            ['patch', 'rect', 1, 12, 1, -y1, x1-c , y1, x1],
#            ['patch', 'rect', 1, 2, 1, y1-c, -x1+c , y1, x1-c],
#            ['patch', 'rect', 1, 2, 1, -y1, -x1+c , -y1+c, x1-c],
#            ['layer', 'straight', 3, 3, As20, y1-c, -x1+c, y1-c, x1-c, 8],
#            ['layer', 'straight', 3, 3, As20, -y1+c, -x1+c, -y1+c, x1-c]]

# # Los siguientes comandos dibujan la sección para saber que nos quedó bien
matcolor = ['r', 'lightgrey', 'gold', 'w', 'w', 'w']
plt.figure()
# opsv.plot_fiber_section(seccion, matcolor=matcolor)
# plt.axis('equal')

# Sección de viga
b2, h2 = 40 , 60
y1 = h2/2
x1 = b2/2
c = 5.4

```



```

# As14 = 1.54 #cm^2
# As16 = 2 #cm^2
Vb3 = 3
#section('Fiber', secTag)
ops.section('Fiber', Vb3)
ops.patch('rect', 2, 10, 1, -y1+c, -x1+c , y1-c, x1-c)
ops.patch('rect', 1, 12, 1, -y1, -x1 , y1, -x1+c)
ops.patch('rect', 1, 12, 1, -y1, x1-c , y1, x1)
ops.patch('rect', 1, 2, 1, y1-c, -x1+c , y1, x1-c)
ops.patch('rect', 1, 2, 1, -y1, -x1+c , -y1+c, x1-c)
ops.layer('straight', 3, 3, As20, y1-c, -x1+c, y1-c, x1-c)
ops.layer('straight', 3, 3, As20, -y1+c, -x1+c, -y1+c, x1-c)
ops.layer('straight', 3, 2, As22, -y1+c, -x1+c, -y1+c, x1-c)

#####
# # Dibujo de sección
# seccion = [['section', 'Fiber', Vb3],
#            ['patch', 'rect', 2, 10, 1, -y1+c, -x1+c , y1-c, x1-c],
#            ['patch', 'rect', 1, 12, 1, -y1, -x1 , y1, -x1+c],
#            ['patch', 'rect', 1, 12, 1, -y1, x1-c , y1, x1],
#            ['patch', 'rect', 1, 2, 1, y1-c, -x1+c , y1, x1-c],
#            ['patch', 'rect', 1, 2, 1, -y1, -x1+c , -y1+c, x1-c],
#            ['layer', 'straight', 3, 3, As20, y1-c, -x1+c, y1-c, x1-c],
#            ['layer', 'straight', 3, 2, As22, -y1+c, -x1+c, -y1+c, 0],
#            ['layer', 'straight', 3, 3, As20, -y1+c, -x1+c, -y1+c, x1-c]]

# # Los siguientes comandos dibujan la sección para saber que nos quedó bien
matcolor = ['r', 'lightgrey', 'gold', 'w', 'w', 'w']
plt.figure()
# opsv.plot_fiber_section(seccion, matcolor=matcolor)
# plt.axis('equal')

```



```

Coll = 4
bc1, hc1 = 120 , 25
y1c = hc1/2
x1c = bc1/2
c = 5.4
As28 = 6.154 #cm^2
# As18 = 2.54 #cm^2
#section('Fiber', secTag)
ops.section('Fiber', Coll)
#patch('rect', matTag, numSubdivY, numSubdivZ, *crds1, *crds2)
ops.patch('rect', 2, 10, 1, -y1c+c, -x1c+c , y1c-c, x1c-c)
ops.patch('rect', 1, 12, 1, -y1c, -x1c , y1c, -x1c+c)
ops.patch('rect', 1, 12, 1, -y1c, x1c-c , y1c, x1c)
ops.patch('rect', 1, 2, 1, y1c-c, -x1c+c , y1c, x1c-c)
ops.patch('rect', 1, 2, 1, -y1c, -x1c+c , -y1c+c, x1c-c)
ops.layer('straight', 3, 2, As28, y1c-c, -x1c+c, y1c-c, x1c-c)
ops.layer('straight', 3, 2, As28, -8.5, 25, -8.5, -25)
ops.layer('straight', 3, 2, As28, -8.5, 0, 8.5, -0)
ops.layer('straight', 3, 2, As28, 8.5, 25, 8.5, -25)
ops.layer('straight', 3, 2, As28, -y1c+c, -x1c+c, -y1c+c, x1c-c)

# Dibujo de sección
seccion = [['section', 'Fiber', Coll],
           ['patch', 'rect', 2, 10, 1, -y1c+c, -x1c+c , y1c-c, x1c-c],
           ['patch', 'rect', 1, 12, 1, -y1c, -x1c , y1c, -x1c+c],
           ['patch', 'rect', 1, 12, 1, -y1c, x1c-c , y1c, x1c],
           ['patch', 'rect', 1, 2, 1, y1c-c, -x1c+c , y1c, x1c-c],
           ['patch', 'rect', 1, 2, 1, -y1c, -x1c+c , -y1c+c, x1c-c],
           ['layer', 'straight', 3, 2, As28, y1c-c, -x1c+c, y1c-c, x1c-c],
           ['layer', 'straight', 3, 2, As28, -8.5, 25, -8.5, -25],
           ['layer', 'straight', 3, 2, As28, -8.5, 0, 8.5, -0],
           ['layer', 'straight', 3, 2, As28, 8.5, 25, 8.5, -25],
           ['layer', 'straight', 3, 2, As28, -y1c+c, -x1c+c, -y1c+c, x1c-c]]

# # Los siguientes comandos dibujan la sección para saber que nos quedó bien
matcolor = ['r', 'lightgrey', 'gold', 'w', 'w', 'w']
plt.figure()
opsv.plot_fiber_section(seccion, matcolor=matcolor)
plt.axis('equal')
# -----

```



```

'-----'
# Elementos
ops.geomTransf('Linear', 1) #Para vigas
ops.geomTransf('PDelta', 2) #Para columnas
# Definición de Elementos

h1 = 60 # Altura de la viga

lpI1 = h1/4 # se adopta esta longitud de rótula plástica en vigas
lpJ1 = h1/4 # se adopta esta longitud de rótula plástica en vigas

hc1 = 120
lpIc1 = hc1/2 # se adopta esta longitud de rótula plástica en columna
lpJc1 = hc1/2 # se adopta esta longitud de rótula plástica en columna

ops.beamIntegration('HingeRadau', 1, Coll, lpIc1, Coll, lpJc1, Coll) #definido para columnas

```

```

#Columnas
#Element('dispBeamColumn', eleTag, *eleNodes, transfTag, integrationTag)
ops.element('dispBeamColumn', 1, 1,4, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 2, 2,5, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 3, 3,6, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 4, 4,7, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 5, 5,8, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 6, 6,9, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 7, 7,10, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 8, 8,11, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 9, 9,12, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 10, 10,13, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 11, 11,14, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 12, 12,15, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 13, 13,16, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 14, 14,17, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 15, 15,18, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 16, 16,19, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 17, 17,20, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 18, 18,21, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 19, 19,22, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 20, 20,23, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 21, 21,24, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 22, 22,25, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 23, 23,26, 2, 1)
ops.element('dispBeamColumn', 24, 24,27, 2, 1)

ops.beamIntegration('HingeRadau', 5, Vb2, lp11, Vb3, lpJ1, Vb1) #definido para vigas
ops.beamIntegration('HingeRadau', 6, Vb1, lp11, Vb3, lpJ1, Vb1) #definido para vigas
# ops.beamIntegration('HingeRadau', 7, Vb3, lp11, Vb2, lpJ1, Vb4) #definido para vigas
ops.beamIntegration('HingeRadau', 8, Vb5, lp11, Vb2, lpJ1, Vb4) #definido para vigas
# ops.beamIntegration('HingeRadau', 9, Vb4, lp11, Vb6, lpJ1, Vb7) #definido para vigas
# ops.beamIntegration('HingeRadau', 10, Vb7, lp11, Vb6, lpJ1, Vb8) #definido para vigas
ops.beamIntegration('HingeRadau', 11, Vb9, lp12, Vb10, lpJ2, Vb9) #definido para vigas
# ops.beamIntegration('HingeRadau', 12, Vb9, lp12, Vb10, lpJ2, Vb11) #definido para vigas
ops.beamIntegration('HingeRadau', 13, Vb11, lp12, Vb10, lpJ2, Vb9) #definido para vigas
# ops.beamIntegration('HingeRadau', 14, Vb12, lp13, Vb13, lpJ3, Vb12) #definido para vigas

```

```

#Vigas
ops.element('dispBeamColumn', 27, 7,8, 1, 5)
ops.element('dispBeamColumn', 28, 8,9, 1, 6)
# ops.element('dispBeamColumn', 29, 9,10, 1, 5)
ops.element('dispBeamColumn', 29, 10,11, 1, 6)
ops.element('dispBeamColumn', 30, 11,12, 1, 5)
# ops.element('dispBeamColumn', 32, 12,13, 1, 6)
ops.element('dispBeamColumn', 31, 13,14, 1, 5)
ops.element('dispBeamColumn', 32, 14,15, 1, 6)
# ops.element('dispBeamColumn', 35, 15,16, 1, 5)
ops.element('dispBeamColumn', 33, 16,17, 1, 6)
ops.element('dispBeamColumn', 34, 17,18, 1, 5)
# ops.element('dispBeamColumn', 38, 18,19, 1, 6)
ops.element('dispBeamColumn', 35, 19,20, 1, 5)
ops.element('dispBeamColumn', 36, 20,21, 1, 6)
# ops.element('dispBeamColumn', 41, 21,22, 1, 5)
ops.element('dispBeamColumn', 37, 22,23, 1, 6)
ops.element('dispBeamColumn', 38, 23,24, 1, 5)
# ops.element('dispBeamColumn', 44, 24,25, 1, 6)
ops.element('dispBeamColumn', 39, 25,26, 1, 5)
ops.element('dispBeamColumn', 40, 26,27, 1, 6)

opsv.plot_model()

```

```

# Cargas del modelo
## Primer Estado de Carga: Repartida
ops.timeSeries('Linear', 1)
ops.pattern('Plain', 1, 1)
vigas1 = [27,28]
Wvigas1 = 83.81 #7183 kgf/m convertidos a kgf/cm
ops.eleLoad('-ele', *vigas1, '-type', '-beamUniform', -Wvigas1)

vigas2 = [29,30,31,32,33,34,35,36,37,38]
Wvigas2 = 79.10 #5298 kgf/m convertidos a kgf/cm
ops.eleLoad('-ele', *vigas2, '-type', '-beamUniform', -Wvigas2)

vigas3 = [39,40]
Wvigas3 = 63.75 #5298 kgf/m convertidos a kgf/cm
ops.eleLoad('-ele', *vigas3, '-type', '-beamUniform', -Wvigas3)

# Análisis del modelo
ops.constraints('Plain')
ops.numberer('RCM')
ops.system('UmfPack')
ops.test('NormUnbalance', 1e-4, 150)
ops.algorithm('Newton')
nPasos = 50
incr = 1/nPasos
ops.integrator('LoadControl', incr)
ops.analysis('Static')
ok = ops.analyze(nPasos)
if ok == 0:
    print('Primer estado de carga aplicado')
else:
    print('Error al aplicar el primer estado de carga')
ops.loadConst('-time', 0)
ops.wipeAnalysis()

```

```

# Análisis modal
num_modos = 6
OmegaSq = ops.eigen('-fullGenLapack', num_modos)
OmegaSq = np.array(OmegaSq)
Omega = OmegaSq**0.5
Periodo = 2*np.pi/Omega

for i in range(num_modos):
    print('Modo ', i+1, 'T = ', Periodo[i], 's')

opsv.plot_mode_shape(1)
plt.title('Modo 1')
# opsv.plot_mode_shape(2)
# plt.title('Modo 2')
# opsv.plot_mode_shape(3)
# plt.title('Modo 3')
# opsv.plot_mode_shape(4)
# plt.title('Modo 4')
# opsv.plot_mode_shape(5)
# plt.title('Modo 5')
# opsv.plot_mode_shape(6)
# plt.title('Modo 6')

# Representacion del modelo con cargas
# plt.figure()
# opsv.plot_loads_2d()
# plt.title('Cargas')

```

```

# ~~~~~
# Segundo Estado de carga: Carga incremental
if ok == 0:
    ops.timeSeries('Linear', 2)
    ops.pattern('Plain', 2, 2)
    ops.load(11, 1/21,0.0,0.0)
    ops.load(14, 2/21,0.0,0.0)
    ops.load(17, 3/21,0.0,0.0)
    ops.load(20, 4/21,0.0,0.0) #Para dar la forma
    ops.load(23, 5/21,0.0,0.0) #Para dar la forma
    ops.load(26, 6/21,0.0,0.0)

# Crear el analisis
Tol = 1e-6
maxNumIter = 200
ops.constraints('Plain')
ops.numberer('RCM')
ops.system('BandGeneral')
ops.test('EnergyIncr', Tol, maxNumIter)
ops.algorithm('Newton')
# Deriva máxima de techo, se considera el 4% de la altura total
Htot = 2300
maxDisp = 22
nPasos = 100
incr = maxDisp/nPasos
nodoControl = 27
ops.integrator('DisplacementControl', nodoControl, 1, incr)
ops.analysis('Static')

# Recorder almacena Cortante basal-Desplazamiento de techo
# recorder('Node', '-file', filename, '-node', *nodeTags=[], '-dof', *dofs=[],
# resp@pp@recorder('Node', '-file', 'Load-Displacement.out', '-time', '-node',
# nodoControl, '-dof', 1, 'disp')

while ops.nodeDisp(nodoControl, 1) <= maxDisp:
    ok = ops.analyze(1)
    if ok != 0:
        print('El análisis Pushover falló: ', ops.nodeDisp(nodoControl, 1), 'cm')
        break
    if ok == 0:
        print('El análisis Pushover terminó exitosamente')

ops.wipeAnalysis()
ops.remove('recorders')
# ~~~~~

```

```

# ~~~~~
##### NO HACER NADA #####

Push = np.loadtxt('Load-Displacement.out')
Push[:, 0] = Push[:, 0] / 1000 # Dividir la columna de desplazamientos por 1000
Push[:, 1] = Push[:, 1] / 100 # Dividir la columna de cortante basal por 1000

# Crear la figura
plt.figure()

# Plotear los datos en color rojo
plt.plot(Push[:, 1], Push[:, 0], color='r')

# Añadir título y etiquetas
plt.title('Curva Pushover Y -Opensees')
plt.xlabel('Desplazamiento [m]')
plt.ylabel('Cortante Basal, V [tonnef]')

# Añadir cuadrícula con líneas más tenues
plt.grid(color='gray', linestyle='--', linewidth=0.5)

# Guardar el gráfico
plt.savefig('Pushover.png')

# Mostrar el gráfico
plt.show()

```

ANEXO D: Resultados de análisis tiempo historia

1. Resultados de tiempo historia sentido X

	REGISTRO	PGA(g)	Sa (g)	Sd(m)	TH m
1	A-ELEC180.AT2	0.13	0.1392	0.01085	0.018
2	EUR000.AT2	0.154	0.3017	0.023514	0.042
3	FOR000.AT2	0.116	0.204	0.0158	0.028
4	RIO270.AT2	0.385	0.7705	0.06	0.13
5	Y006-W.AT2	0.36	1.06	0.082	0.2
6	Y059-E.AT2	0.049	0.1049	0.008178	0.019
7	Y101-E.AT2	0.353	0.6256	0.048753	0.15
8	Y104-W.AT2	0.162	0.4	0.03	0.09
9	WA005-W.AT2	0.147	0.3983	0.031	0.08
10	WA015-E.AT2	0.105	0.277	0.0177	0.029
11	WA055-W.AT2	0.14	0.39	0.031	0.05
12	ILA027-E.AT2	0.101	0.321	0.025	0.049
13	ILA036-E.AT2	0.055	0.1535	0.0119	0.02
14	TAP006-E.AT2	0.105	0.2281	0.017778	0.033
15	TAP012-E.AT2	0.1	0.2438	0.0189	0.032
16	TAP100-E.AT2	0.057	0.2045	0.0159	0.029
17	TCU025-E.AT2	0.075	0.111	0.0086	0.017
18	TCU036-E.AT2	0.139	0.2819	0.0219	0.045
19	TCU039-E.AT2	0.206	0.4944	0.03852	0.047
20	TCU045-E.AT2	0.474	1.1016	0.0858	0.043
21	TCU059-E.AT2	0.165	0.4782	0.03726	0.079
22	TCU070-E.AT2	0.255	0.8	0.0623	0.15
23	TCU095-E.AT2	0.379	0.606	0.04722	0.099
24	TCU109-E.AT2	0.156	0.4315	0.0336	0.08
25	TCU110-E.AT2	0.18	0.3465	0.027	0.065
26	TCU117-E.AT2	0.119	0.2515	0.01959	0.045
27	TCU128-E.AT22	0.139	0.2593	0.0202	0.03
28	WGK-E.AT2	0.334	0.606	0.0472	0.15
29	BOL000.AT2	0.728	1.6462	0.1828	0.15
30	A-TMZ000.AT2	0.351	0.5468	0.0426	0.047
31	21081090.AT2	0.182	0.3561	0.0277	0.04
32	HEC000.AT2	0.266	0.3884	0.030267	0.047
33	CXO225.AT2	0.275	0.6071	0.0473	0.063
34	DLT262.AT2	0.238	0.4864	0.0379	0.067
35	E11140.AT2	0.364	0.3983	0.031	0.065
36	SHF000.AT2	0.287	0.4132	0.0322	0.048
37	TAF021.AT2	0.156	0.2207	0.0172	0.047
38	KAK000.AT2	0.251	0.4073	0.03174	0.047
39	KJM000.AT2	0.821	1.6345	0.1273	0.3
40	NIS000.AT2	0.509	1.1017	0.0858	0.13
41	SHI000.AT2	0.243	0.5447	0.0424	0.14
42	ARC000.AT2	0.219	0.2141	0.01668	0.029
43	DZC180.AT2	0.312	0.8007	0.06239	0.101

44	B-POE270.AT2	0.446	0.6951	0.05416	0.2
45	CLW-TR.AT2	0.417	1.2634	0.098455	0.101
46	JOS000.AT2	0.274	0.4679	0.03646	0.08
47	YER270.AT2	0.245	0.4961	0.03866	0.08
48	CAP000.AT2	0.529	0.9319	0.0726	0.15
49	CH12000.AT2	0.287	0.1583	0.01233	0.1
50	G03090.AT2	0.367	0.6512	0.0507	0.068
51	HCH090.AT2	0.247	0.5167	0.040267	0.08
52	HDA165.AT2	0.269	0.5867	0.0457	0.081
53	HSP000.AT2	0.371	1.26	0.098185	0.152
54	184057.AT2	0.132	0.3066	0.023893	0.041
55	ABBAR--L.AT2	0.515	0.5939	0.04628	0.14
56	LOS000.AT2	0.41	1.3174	0.102658	0.15
57	MU2035.AT2	0.617	0.545	0.04247	0.08
58	MUL009.AT2	0.416	1.353	0.105434	0.15
59	ORR090.AT2	0.568	0.9128	0.071135	0.15
60	STM090.AT2	0.883	0.3954	0.03081	0.081
61	STN020.AT2	0.474	0.6905	0.0538	0.078
62	PEL090.AT2	0.21	0.3089	0.024073	0.04
63	059v2009.AT2	0.083	0.2171	0.016918	0.029
64	059v2180.AT2	0.176	0.3255	0.025363	0.049
65	B-ICC000.AT2	0.358	0.7325	0.057084	0.1
66	B-POE270.AT2	0.446	0.6951	0.054167	0.078
67	B-WSM090.AT2	0.172	0.2922	0.022771	0.041
68	AAM2_201604162359E	0.025948012	0.06189725	0.00482345	0.012
69	ACH1_201604162359E	0.025498471	0.05115708	0.0039865	0.01
70	ACHN_201604162359E	0.32975739	0.65285841	0.050875	0.12
71	ACUE_201604162359E	0.035598369	0.08421539	0.0065626	0.013
72	AES2_201604162359E	0.154132518	0.31680601	0.02468	0.03
73	AGYE_201604162359E	0.018675841	0.02708634	0.00211	0.008
74	AIB1_201604162359E	0.049327217	0.13995127	0.010905	0.02
75	AIB2_201604162359E	0.021205912	0.06005464	0.0046798	0.01
76	ALAT_201604162359E	0.031641182	0.06739786	0.005252	0.013
77	ALIB_201604162359E	0.041926606	0.07139399	0.0055634	0.015
78	ALJ1_201604170000	0.015482161	0.0367787	0.002866	0.007
79	ALOR_201604162359E	0.026136595	0.06871356	0.005354	0.01
80	AMIL_201604162359E	0.052023445	0.08785454	0.006846	0.015
81	AMNT_201604162359E	0.404811417	0.72902029	0.0568	0.09
82	AOTA_201604162359E	0.042826707	0.1305316	0.010178	0.02
83	APED_201604162359E	1.407233435	2.74833048	0.2141682	0.33
84	APO1_201604162359E	0.317657492	0.83703741	0.06522753	0.175
85	ASDO_201604162359E	0.206141692	0.73075066	0.056944	0.05
86	ATUL_201604162359E	0.016288481	0.03960663	0.003086	0.007
87	EPNL_201604162359E	0.026825688	0.07920387	0.006169	0.015
88	PRAM_201604162300E	0.025055046	0.10036483	0.007821	0.017

2. Resultados de tiempo historia sentido Y

N	REGISTRO	PGA(g)	Sa (g)	Sd (m)	TH m
1	A-ELEC270.AT2	0.057	0.0125	0.021	0.08
2	EUR090.AT2	0.178	0.2889	0.1447	0.15
3	FOR090.AT2	0.114	0.139	0.069	0.08
4	RIC360.AT2	0.549	0.2688	0.1346	0.016
5	Y006-N.AT2	0.34	0.27	0.13	0.28
6	Y059-N.AT2	0.049	0.0961	0.048	0.08
7	Y101-N.AT2	0.44	0.3939	0.1973	0.2
8	Y104-N.AT2	0.187	0.25	0.12	0.29
9	WA005-N.AT2	0.139	0.1891	0.094	0.14
10	WA015-N.AT2	0.073	0.1368	0.0685	0.09
11	WA055-N.AT2	0.139	0.18	0.094	0.14
12	ILA027-N.AT2	0.062	0.1551	0.0777	0.14
13	ILA036-N.AT2	0.068	0.158	0.079	0.15
14	TAP006-N.AT2	0.071	0.158	0.0791	0.11
15	TAP012-N.AT2	0.055	0.1576	0.0789	0.15
16	TAP100-N.AT2	0.087	0.2478	0.1241	0.1
17	TCU025-N.AT2	0.059	0.0665	0.0333	0.06
18	TCU036-N.AT2	0.068	0.158	0.079	0.21
19	TCU039-N.AT2	0.145	0.2275	0.1139	0.23
20	TCU045-N.AT2	0.512	0.2275	0.1139	0.14
21	TCU059-N.AT2	0.172	0.1207	0.06	0.07
22	TCU070-N.AT2	0.169	0.1207	0.046	0.1
23	TCU095-N.AT2	0.633	0.1207	0.02	0.1
24	TCU109-N.AT2	0.154	0.0987	0.049	0.2
25	TCU110-N.AT2	0.18	0.0981	0.0306	0.2
26	TCU117-N.AT2	0.12	0.0599	0.0299	0.3
27	TCU128-N.AT22	0.17	0.0935	0.125	0.22
28	WGGK-N.AT2	0.484	0.1225	0.1513	0.3
29	BOL090.AT2	0.822	0.4428	0.2218	0.3
30	A-TM2270.AT2	0.052	0.1099	0.055	0.085
31	21081360.AT2	0.15	0.135	0.0676	0.15
32	HEC090.AT2	0.337	0.467	0.2339	0.22
33	CX0315.AT2	0.275	0.1777	0.089	0.22
34	DLT352.AT2	0.351	0.3411	0.17	0.3
35	E11230.AT2	0.38	0.193	0.096	0.13
36	SHF270.AT2	0.506	0.2398	0.12	0.04
37	TAF111.AT2	0.112	0.1243	0.062	0.12
38	KAK090.AT2	0.345	0.2688	0.1346	0.15
39	KJM090.AT2	0.599	0.3438	0.1722	0.25
40	NIS090.AT2	0.503	0.195	0.0977	0.12
41	SHI090.AT2	0.212	0.2287	0.1146	0.2
42	ARC090.AT2	0.15	1.42	0.0944	0.09
43	DZC270.AT2	0.356	0.6196	0.0207	0.2

44	B-POE360.AT2	0.3	0.2194	0.1099	0.2
45	CLW-LN.AT2	0.283	0.0322	0.1426	0.15
46	JOS090.AT2	0.284	0.3973	0.199	0.25
47	YER360.AT2	0.152	0.3029	0.1517	0.15
48	CAP090.AT2	0.443	0.3181	0.159	0.17
49	CH10270.AT2	0.268	0.4735	0.2372	0.25
50	G03000.AT2	0.555	0.1574	0.078879	0.12
51	HCH180.AT2	0.215	0.4741	0.2375	0.27
52	HDA255.AT2	0.13	0.179	0.0897	0.16
53	HSP090.AT2	0.177	0.1984	0.099	0.2
54	184327.AT2	0.247	0.1981	0.099	0.2
55	ABBAR-T.AT2	0.496	0.4287	0.2148	0.3
56	LOS270.AT2	0.482	0.3068	0.1537	0.2
57	MUJ2125.AT2	0.444	0.0959	0.0481	0.15
58	MUL279.AT2	0.516	0.5895	0.2953	0.3
59	ORR360.AT2	0.514	0.5663	0.2837	0.3
60	STM360.AT2	0.37	0.3017	0.1511	0.17
61	STN110.AT2	0.439	0.2173	0.10889	0.05
62	PEL180.AT2	0.174	0.0665	0.033	0.045
63	059V2090.AT2	0.099	0.0086	0.0043	0.045
64	059V2279.AT2	0.065	0.0913	0.045	0.11
65	B-ICCO90.AT2	0.258	0.307	0.1538	0.3
66	B-POE360.AT2	0.3	0.2194	0.1099	0.15
67	B-WSM180.AT2	0.211	0.3622	0.1815	0.25
68	AAM2_201604162359N	0.035433231	0.04459735	0.0223	0.03
69	ACH1_201604162359N	0.024108053	0.075015291	0.0376	0.07
70	ACHN_201604162359N	0.368664628	1.688939857	0.8462	0.3
71	ACUE_201604162359N	0.029673802	0.064923547	0.0325	0.05
72	AES2_201604162359N	0.110408767	0.398470948	0.1996	0.3
73	AGYE_201604162359N	0.020152905	0.010611621	0.00532	0.008
74	AIB1_201604162359N	0.057910296	0.063792049	0.03196	0.06
75	AIB2_201604162359N	0.033078491	0.032028542	0.01605	0.025
76	ALAT_201604162359N	0.027910296	0.036085627	0.01808	0.035
77	ALIB_201604162359N	0.029673802	0.065107034	0.0326	0.03
78	ALJ_201604170000N	0.016309888	0.05733945	0.0238	0.03
79	ALOR_201604162359N	0.026738022	0.055698267	0.0279	0.045
80	AMIL_201604162359N	0.045910296	0.05393476	0.027	0.04
81	AMNT_201604162359N	0.524223242	0.291814475	0.1462	0.3
82	ACTA_201604162359N	0.035086646	0.076360856	0.0382	0.05
83	APED_201604162359N	0.828430173	0.26922528	0.1349	0.23
84	APO1_201604162359N	0.380302752	0.204689093	0.1026	0.13
85	ASDO_201604162359N	0.110937819	0.05324159	0.0267	0.039
86	ATUL_201604162359N	0.021049949	0.041192661	0.0206	0.03
87	EPNL_201604162359N	0.020265036	0.033211009	0.0166	0.025
88	PRAM_201604162300N	0.023333333	0.038267074	0.0192	0.032

ANEXO E: Curvas de fragilidad de intensidades (S_a g; S_d m) para ambos sentidos

Procesamiento de datos para obtener las curvas de fragilidad

1. FRAGILIDAD SENTIDO X

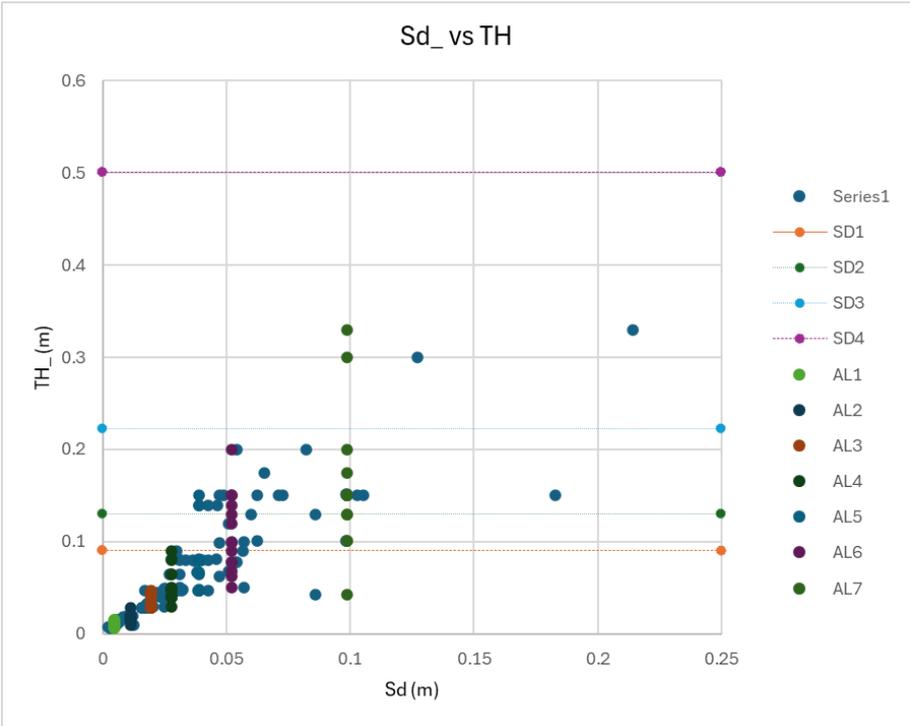
Primero se debe hacer intervalos de las datas respectivas, y de cada intervalo se calcula el promedio que es lo representativo de cada franja.

❖ Intensidad Sa g

<table border="1"> <thead> <tr> <th>Sd m</th> <th>THm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.002</td><td>0.008</td></tr> <tr><td>0.003</td><td>0.007</td></tr> <tr><td>0.003</td><td>0.007</td></tr> <tr><td>0.004</td><td>0.010</td></tr> <tr><td>0.005</td><td>0.010</td></tr> <tr><td>0.005</td><td>0.012</td></tr> <tr><td>0.005</td><td>0.013</td></tr> <tr><td>0.005</td><td>0.010</td></tr> <tr><td>0.006</td><td>0.015</td></tr> <tr><td>0.006</td><td>0.015</td></tr> <tr><td>0.007</td><td>0.013</td></tr> <tr><td>0.007</td><td>0.015</td></tr> <tr><td>0.005</td><td>0.011</td></tr> <tr><td>0.011</td><td>0.020</td></tr> </tbody> </table>	Sd m	THm	0.002	0.008	0.003	0.007	0.003	0.007	0.004	0.010	0.005	0.010	0.005	0.012	0.005	0.013	0.005	0.010	0.006	0.015	0.006	0.015	0.007	0.013	0.007	0.015	0.005	0.011	0.011	0.020	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Sd m</th> <th>THm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.007</td><td>0.013</td></tr> <tr><td>0.007</td><td>0.015</td></tr> <tr><td>0.008</td><td>0.017</td></tr> <tr><td>0.008</td><td>0.019</td></tr> <tr><td>0.009</td><td>0.017</td></tr> <tr><td>0.010</td><td>0.020</td></tr> <tr><td>0.011</td><td>0.018</td></tr> <tr><td>0.011</td><td>0.020</td></tr> <tr><td>0.012</td><td>0.020</td></tr> <tr><td>0.012</td><td>0.010</td></tr> <tr><td>0.016</td><td>0.028</td></tr> <tr><td>0.016</td><td>0.029</td></tr> <tr><td>0.017</td><td>0.029</td></tr> <tr><td>0.017</td><td>0.029</td></tr> <tr><td>0.011</td><td>0.020</td></tr> <tr><td>0.020</td><td>0.036</td></tr> </tbody> </table>	Sd m	THm	0.007	0.013	0.007	0.015	0.008	0.017	0.008	0.019	0.009	0.017	0.010	0.020	0.011	0.018	0.011	0.020	0.012	0.020	0.012	0.010	0.016	0.028	0.016	0.029	0.017	0.029	0.017	0.029	0.011	0.020	0.020	0.036	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Sd m</th> <th>THm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.016</td><td>0.029</td></tr> <tr><td>0.017</td><td>0.029</td></tr> <tr><td>0.017</td><td>0.029</td></tr> <tr><td>0.017</td><td>0.047</td></tr> <tr><td>0.018</td><td>0.029</td></tr> <tr><td>0.018</td><td>0.033</td></tr> <tr><td>0.019</td><td>0.032</td></tr> <tr><td>0.020</td><td>0.045</td></tr> <tr><td>0.020</td><td>0.030</td></tr> <tr><td>0.022</td><td>0.045</td></tr> <tr><td>0.023</td><td>0.041</td></tr> <tr><td>0.024</td><td>0.042</td></tr> <tr><td>0.024</td><td>0.041</td></tr> <tr><td>0.019</td><td>0.036</td></tr> <tr><td>0.036</td><td>0.108</td></tr> </tbody> </table>	Sd m	THm	0.016	0.029	0.017	0.029	0.017	0.029	0.017	0.047	0.018	0.029	0.018	0.033	0.019	0.032	0.020	0.045	0.020	0.030	0.022	0.045	0.023	0.041	0.024	0.042	0.024	0.041	0.019	0.036	0.036	0.108								
Sd m	THm																																																																																																									
0.002	0.008																																																																																																									
0.003	0.007																																																																																																									
0.003	0.007																																																																																																									
0.004	0.010																																																																																																									
0.005	0.010																																																																																																									
0.005	0.012																																																																																																									
0.005	0.013																																																																																																									
0.005	0.010																																																																																																									
0.006	0.015																																																																																																									
0.006	0.015																																																																																																									
0.007	0.013																																																																																																									
0.007	0.015																																																																																																									
0.005	0.011																																																																																																									
0.011	0.020																																																																																																									
Sd m	THm																																																																																																									
0.007	0.013																																																																																																									
0.007	0.015																																																																																																									
0.008	0.017																																																																																																									
0.008	0.019																																																																																																									
0.009	0.017																																																																																																									
0.010	0.020																																																																																																									
0.011	0.018																																																																																																									
0.011	0.020																																																																																																									
0.012	0.020																																																																																																									
0.012	0.010																																																																																																									
0.016	0.028																																																																																																									
0.016	0.029																																																																																																									
0.017	0.029																																																																																																									
0.017	0.029																																																																																																									
0.011	0.020																																																																																																									
0.020	0.036																																																																																																									
Sd m	THm																																																																																																									
0.016	0.029																																																																																																									
0.017	0.029																																																																																																									
0.017	0.029																																																																																																									
0.017	0.047																																																																																																									
0.018	0.029																																																																																																									
0.018	0.033																																																																																																									
0.019	0.032																																																																																																									
0.020	0.045																																																																																																									
0.020	0.030																																																																																																									
0.022	0.045																																																																																																									
0.023	0.041																																																																																																									
0.024	0.042																																																																																																									
0.024	0.041																																																																																																									
0.019	0.036																																																																																																									
0.036	0.108																																																																																																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Sd m</th> <th>THm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.024</td><td>0.042</td></tr> <tr><td>0.024</td><td>0.041</td></tr> <tr><td>0.024</td><td>0.040</td></tr> <tr><td>0.025</td><td>0.030</td></tr> <tr><td>0.025</td><td>0.049</td></tr> <tr><td>0.025</td><td>0.049</td></tr> <tr><td>0.027</td><td>0.065</td></tr> <tr><td>0.028</td><td>0.040</td></tr> <tr><td>0.030</td><td>0.090</td></tr> <tr><td>0.030</td><td>0.047</td></tr> <tr><td>0.031</td><td>0.081</td></tr> <tr><td>0.031</td><td>0.080</td></tr> <tr><td>0.031</td><td>0.050</td></tr> <tr><td>0.031</td><td>0.065</td></tr> <tr><td>0.032</td><td>0.047</td></tr> <tr><td>0.028</td><td>0.054</td></tr> </tbody> </table>	Sd m	THm	0.024	0.042	0.024	0.041	0.024	0.040	0.025	0.030	0.025	0.049	0.025	0.049	0.027	0.065	0.028	0.040	0.030	0.090	0.030	0.047	0.031	0.081	0.031	0.080	0.031	0.050	0.031	0.065	0.032	0.047	0.028	0.054	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Sd m</th> <th>THm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.031</td><td>0.065</td></tr> <tr><td>0.032</td><td>0.047</td></tr> <tr><td>0.032</td><td>0.048</td></tr> <tr><td>0.034</td><td>0.080</td></tr> <tr><td>0.036</td><td>0.080</td></tr> <tr><td>0.037</td><td>0.079</td></tr> <tr><td>0.038</td><td>0.067</td></tr> <tr><td>0.039</td><td>0.047</td></tr> <tr><td>0.039</td><td>0.080</td></tr> <tr><td>0.040</td><td>0.080</td></tr> <tr><td>0.042</td><td>0.140</td></tr> <tr><td>0.042</td><td>0.080</td></tr> <tr><td>0.043</td><td>0.047</td></tr> <tr><td>0.046</td><td>0.081</td></tr> <tr><td>0.046</td><td>0.140</td></tr> <tr><td>0.047</td><td>0.150</td></tr> <tr><td>0.039</td><td>0.082</td></tr> <tr><td>0.082</td><td>0.200</td></tr> </tbody> </table>	Sd m	THm	0.031	0.065	0.032	0.047	0.032	0.048	0.034	0.080	0.036	0.080	0.037	0.079	0.038	0.067	0.039	0.047	0.039	0.080	0.040	0.080	0.042	0.140	0.042	0.080	0.043	0.047	0.046	0.081	0.046	0.140	0.047	0.150	0.039	0.082	0.082	0.200	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Sd m</th> <th>THm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.046</td><td>0.140</td></tr> <tr><td>0.047</td><td>0.150</td></tr> <tr><td>0.047</td><td>0.099</td></tr> <tr><td>0.047</td><td>0.063</td></tr> <tr><td>0.049</td><td>0.150</td></tr> <tr><td>0.051</td><td>0.068</td></tr> <tr><td>0.051</td><td>0.120</td></tr> <tr><td>0.054</td><td>0.078</td></tr> <tr><td>0.054</td><td>0.200</td></tr> <tr><td>0.054</td><td>0.078</td></tr> <tr><td>0.057</td><td>0.090</td></tr> <tr><td>0.057</td><td>0.050</td></tr> <tr><td>0.057</td><td>0.100</td></tr> <tr><td>0.060</td><td>0.130</td></tr> <tr><td>0.052</td><td>0.108</td></tr> </tbody> </table>	Sd m	THm	0.046	0.140	0.047	0.150	0.047	0.099	0.047	0.063	0.049	0.150	0.051	0.068	0.051	0.120	0.054	0.078	0.054	0.200	0.054	0.078	0.057	0.090	0.057	0.050	0.057	0.100	0.060	0.130	0.052	0.108
Sd m	THm																																																																																																									
0.024	0.042																																																																																																									
0.024	0.041																																																																																																									
0.024	0.040																																																																																																									
0.025	0.030																																																																																																									
0.025	0.049																																																																																																									
0.025	0.049																																																																																																									
0.027	0.065																																																																																																									
0.028	0.040																																																																																																									
0.030	0.090																																																																																																									
0.030	0.047																																																																																																									
0.031	0.081																																																																																																									
0.031	0.080																																																																																																									
0.031	0.050																																																																																																									
0.031	0.065																																																																																																									
0.032	0.047																																																																																																									
0.028	0.054																																																																																																									
Sd m	THm																																																																																																									
0.031	0.065																																																																																																									
0.032	0.047																																																																																																									
0.032	0.048																																																																																																									
0.034	0.080																																																																																																									
0.036	0.080																																																																																																									
0.037	0.079																																																																																																									
0.038	0.067																																																																																																									
0.039	0.047																																																																																																									
0.039	0.080																																																																																																									
0.040	0.080																																																																																																									
0.042	0.140																																																																																																									
0.042	0.080																																																																																																									
0.043	0.047																																																																																																									
0.046	0.081																																																																																																									
0.046	0.140																																																																																																									
0.047	0.150																																																																																																									
0.039	0.082																																																																																																									
0.082	0.200																																																																																																									
Sd m	THm																																																																																																									
0.046	0.140																																																																																																									
0.047	0.150																																																																																																									
0.047	0.099																																																																																																									
0.047	0.063																																																																																																									
0.049	0.150																																																																																																									
0.051	0.068																																																																																																									
0.051	0.120																																																																																																									
0.054	0.078																																																																																																									
0.054	0.200																																																																																																									
0.054	0.078																																																																																																									
0.057	0.090																																																																																																									
0.057	0.050																																																																																																									
0.057	0.100																																																																																																									
0.060	0.130																																																																																																									
0.052	0.108																																																																																																									

Sdm	THm
0.060	0.130
0.062	0.150
0.062	0.101
0.065	0.175
0.071	0.150
0.073	0.150
0.082	0.200
0.086	0.043
0.086	0.130
0.098	0.152
0.098	0.101
0.103	0.150
0.105	0.150
0.127	0.300
0.183	0.150
0.214	0.330
0.099	0.160

La siguiente tabla muestra graficados los datos por intervalos según el método de franjas.



La información de esta tabla es la que se va a usar como parámetros de ingreso a la hoja de cálculo dada por Baker.

IM(Sd m)	0.0047749	0.01139061	0.01945723	0.02780267	0.03901606	0.0522345	0.0985158
N analisis	12	14	13	15	16	14	16
Fraciones de colapso para cada estado de daño							
SD1	0	0	0	0	3	8	15
SD2	0	0	0	0	3	4	11
SD3	0	0	0	0	0	0	2
SD4	0	0	0	0	0	0	0

```

% Curvas de fragilidad
% functions. Calculos basados fielmente en el siguiente articulo:
%
% Baker, J. W. (2015). "Efficient analytical fragility function fitting
% using dynamic structural analysis." Earthquake Spectra, 31(1), 579-599.
%
% Created by Jack Baker
%
% Modified by Jack Baker, 1/25/2017, to update citation information
%Hoja de cálculo adoptada y usada por: Ing. Alex Córdova en colaboracion con Ing. Kerlly Barcia
cd(fileparts(matlab.desktop.editor.getActiveFilename))

% PARAMETROS DE INGRESO
%IM= Es la intensidad en este caso [Sa,Pseudo aceleracion espectral]
% example data: IM levels, number of analyses, and number of collapses

```

DAÑO LEVE SD1

```

IM =          [0.004    0.011    0.019    0.027    0.04    0.05    0.1];
num_collapse = [0      0      0      0      3      8      15];
num_gms =      [12     14     13     15     16     14     16];

% estimate fragility function using MLE method (equation 11)
[theta_hat_mle, beta_hat_mle] = fn_mle_pc(IM, num_gms, num_collapse);

% compute fragility functions using estimated parameters
x_vals = 0.01:0.005:0.14; % IM levels to plot fragility function at

p_collapse_mle = normcdf((log(x_vals/theta_hat_mle))/beta_hat_mle); % compute fragility function
using equation 1 and estimated parameters

% plot resulting fragility functions
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%ESTADO DE DAÑO LEVE
figure
hold on
plot(IM,num_collapse./num_gms, '^g', 'linewidth', 2)

plot(x_vals,p_collapse_mle, '-g', 'linewidth', 2)

axis([0 2 0 1])

```

DAÑO MODERADO SD2

```

IM = [0.004 0.011 0.019 0.027 0.04 0.05 0.1];
num_collapse = [0 0 0 0 3 4 11];
num_gms = [12 14 13 15 16 14 16];

% estimate fragility function using MLE method (equation 11)
[theta_hat_mle, beta_hat_mle] = fn_mle_pc(IM, num_gms, num_collapse);

% compute fragility functions using estimated parameters
x_vals = 0.01:0.005:0.14; % IM levels to plot fragility function at

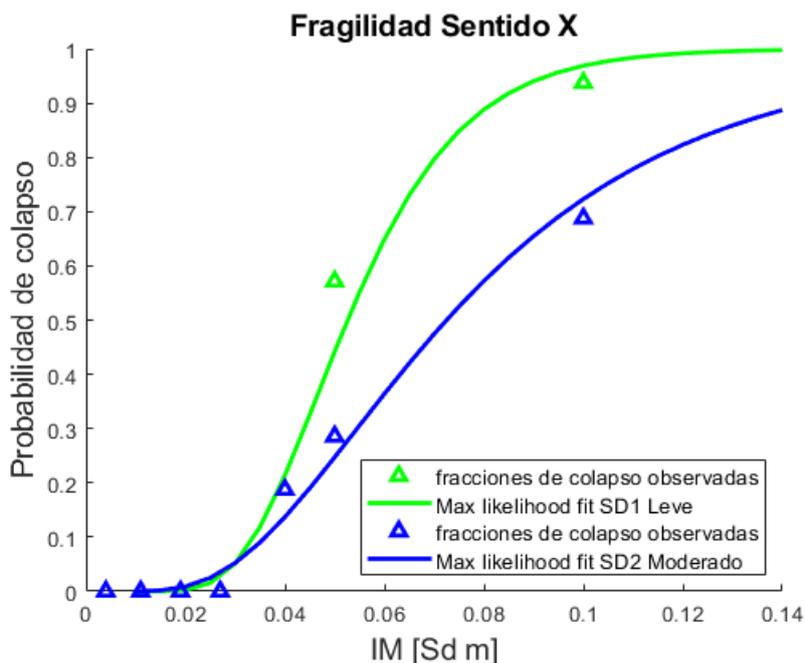
p_collapse_mle = normcdf((log(x_vals/theta_hat_mle))/beta_hat_mle); % compute fragility function
using equation 1 and estimated parameters

% plot resulting fragility functions
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%ESTADO DE DAÑO MODERADO
% figure
hold on
plot(IM,num_collapse./num_gms, 'Ab', 'linewidth', 2)

plot(x_vals,p_collapse_mle, '-b', 'linewidth', 2)

leg2 = legend('fracciones de colapso observadas', 'Max likelihood fit SD1 Leve','fracciones de
colapso observadas','Max likelihood fit SD2 Moderado', 'location', 'southeast');
set(leg2, 'fontSize', 10)
hx = xlabel('IM [Sd m]', 'FontSize', 14);
hy = ylabel('Probabilidad de colapso', 'FontSize', 14);
axis([0 0.14 0 1])
title('Fragilidad Sentido X','FontSize',14)

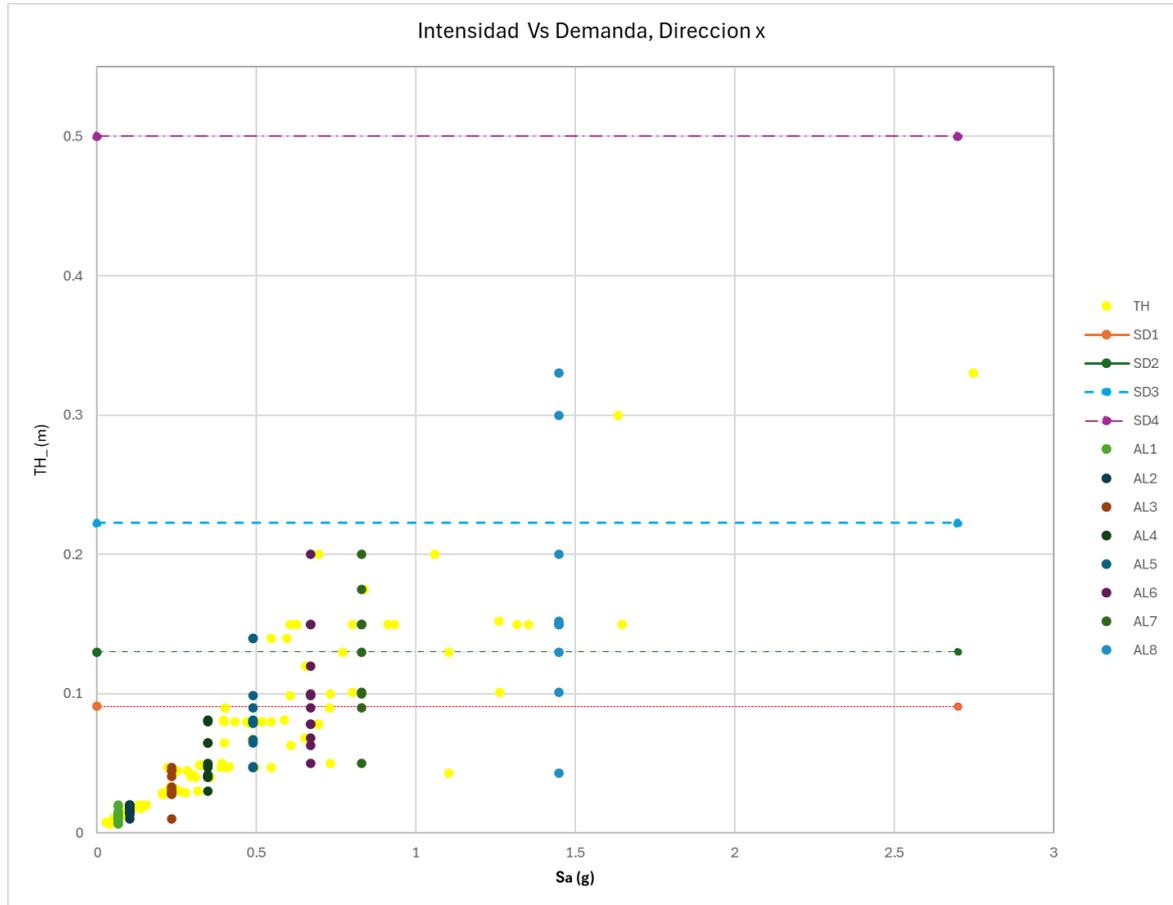
```



❖ Intensidad aceleración espectral (Sa g)

<table border="1"> <thead> <tr> <th>Sa (g)</th> <th>THcm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.027</td><td>0.008</td></tr> <tr><td>0.037</td><td>0.007</td></tr> <tr><td>0.040</td><td>0.007</td></tr> <tr><td>0.051</td><td>0.010</td></tr> <tr><td>0.051</td><td>0.010</td></tr> <tr><td>0.060</td><td>0.010</td></tr> <tr><td>0.062</td><td>0.012</td></tr> <tr><td>0.067</td><td>0.013</td></tr> <tr><td>0.069</td><td>0.010</td></tr> <tr><td>0.071</td><td>0.015</td></tr> <tr><td>0.079</td><td>0.015</td></tr> <tr><td>0.084</td><td>0.013</td></tr> <tr><td>0.088</td><td>0.015</td></tr> <tr><td>0.100</td><td>0.020</td></tr> <tr><td>0.105</td><td>0.019</td></tr> <tr><td>0.066</td><td>0.012</td></tr> </tbody> </table>	Sa (g)	THcm	0.027	0.008	0.037	0.007	0.040	0.007	0.051	0.010	0.051	0.010	0.060	0.010	0.062	0.012	0.067	0.013	0.069	0.010	0.071	0.015	0.079	0.015	0.084	0.013	0.088	0.015	0.100	0.020	0.105	0.019	0.066	0.012	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Sa (g)</th> <th>TH cm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.069</td><td>0.010</td></tr> <tr><td>0.071</td><td>0.015</td></tr> <tr><td>0.079</td><td>0.015</td></tr> <tr><td>0.084</td><td>0.013</td></tr> <tr><td>0.088</td><td>0.015</td></tr> <tr><td>0.100</td><td>0.020</td></tr> <tr><td>0.105</td><td>0.019</td></tr> <tr><td>0.111</td><td>0.017</td></tr> <tr><td>0.131</td><td>0.020</td></tr> <tr><td>0.139</td><td>0.018</td></tr> <tr><td>0.140</td><td>0.020</td></tr> <tr><td>0.102</td><td>0.017</td></tr> </tbody> </table>	Sa (g)	TH cm	0.069	0.010	0.071	0.015	0.079	0.015	0.084	0.013	0.088	0.015	0.100	0.020	0.105	0.019	0.111	0.017	0.131	0.020	0.139	0.018	0.140	0.020	0.102	0.017	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Sa (g)</th> <th>TH cm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.158</td><td>0.010</td></tr> <tr><td>0.204</td><td>0.028</td></tr> <tr><td>0.205</td><td>0.029</td></tr> <tr><td>0.214</td><td>0.029</td></tr> <tr><td>0.217</td><td>0.029</td></tr> <tr><td>0.221</td><td>0.047</td></tr> <tr><td>0.228</td><td>0.033</td></tr> <tr><td>0.244</td><td>0.032</td></tr> <tr><td>0.252</td><td>0.045</td></tr> <tr><td>0.259</td><td>0.030</td></tr> <tr><td>0.277</td><td>0.029</td></tr> <tr><td>0.282</td><td>0.045</td></tr> <tr><td>0.292</td><td>0.041</td></tr> <tr><td>0.235</td><td>0.033</td></tr> </tbody> </table>	Sa (g)	TH cm	0.158	0.010	0.204	0.028	0.205	0.029	0.214	0.029	0.217	0.029	0.221	0.047	0.228	0.033	0.244	0.032	0.252	0.045	0.259	0.030	0.277	0.029	0.282	0.045	0.292	0.041	0.235	0.033										
Sa (g)	THcm																																																																																																					
0.027	0.008																																																																																																					
0.037	0.007																																																																																																					
0.040	0.007																																																																																																					
0.051	0.010																																																																																																					
0.051	0.010																																																																																																					
0.060	0.010																																																																																																					
0.062	0.012																																																																																																					
0.067	0.013																																																																																																					
0.069	0.010																																																																																																					
0.071	0.015																																																																																																					
0.079	0.015																																																																																																					
0.084	0.013																																																																																																					
0.088	0.015																																																																																																					
0.100	0.020																																																																																																					
0.105	0.019																																																																																																					
0.066	0.012																																																																																																					
Sa (g)	TH cm																																																																																																					
0.069	0.010																																																																																																					
0.071	0.015																																																																																																					
0.079	0.015																																																																																																					
0.084	0.013																																																																																																					
0.088	0.015																																																																																																					
0.100	0.020																																																																																																					
0.105	0.019																																																																																																					
0.111	0.017																																																																																																					
0.131	0.020																																																																																																					
0.139	0.018																																																																																																					
0.140	0.020																																																																																																					
0.102	0.017																																																																																																					
Sa (g)	TH cm																																																																																																					
0.158	0.010																																																																																																					
0.204	0.028																																																																																																					
0.205	0.029																																																																																																					
0.214	0.029																																																																																																					
0.217	0.029																																																																																																					
0.221	0.047																																																																																																					
0.228	0.033																																																																																																					
0.244	0.032																																																																																																					
0.252	0.045																																																																																																					
0.259	0.030																																																																																																					
0.277	0.029																																																																																																					
0.282	0.045																																																																																																					
0.292	0.041																																																																																																					
0.235	0.033																																																																																																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Sa (g)</th> <th>TH cm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.292</td><td>0.041</td></tr> <tr><td>0.302</td><td>0.042</td></tr> <tr><td>0.307</td><td>0.041</td></tr> <tr><td>0.309</td><td>0.040</td></tr> <tr><td>0.317</td><td>0.030</td></tr> <tr><td>0.321</td><td>0.049</td></tr> <tr><td>0.326</td><td>0.049</td></tr> <tr><td>0.347</td><td>0.065</td></tr> <tr><td>0.356</td><td>0.040</td></tr> <tr><td>0.388</td><td>0.047</td></tr> <tr><td>0.390</td><td>0.050</td></tr> <tr><td>0.395</td><td>0.081</td></tr> <tr><td>0.398</td><td>0.080</td></tr> <tr><td>0.398</td><td>0.065</td></tr> <tr><td>0.346</td><td>0.051</td></tr> </tbody> </table>	Sa (g)	TH cm	0.292	0.041	0.302	0.042	0.307	0.041	0.309	0.040	0.317	0.030	0.321	0.049	0.326	0.049	0.347	0.065	0.356	0.040	0.388	0.047	0.390	0.050	0.395	0.081	0.398	0.080	0.398	0.065	0.346	0.051	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Sa (g)</th> <th>THcm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.398</td><td>0.080</td></tr> <tr><td>0.398</td><td>0.065</td></tr> <tr><td>0.400</td><td>0.090</td></tr> <tr><td>0.407</td><td>0.047</td></tr> <tr><td>0.413</td><td>0.048</td></tr> <tr><td>0.432</td><td>0.080</td></tr> <tr><td>0.468</td><td>0.080</td></tr> <tr><td>0.478</td><td>0.079</td></tr> <tr><td>0.486</td><td>0.067</td></tr> <tr><td>0.494</td><td>0.047</td></tr> <tr><td>0.496</td><td>0.080</td></tr> <tr><td>0.517</td><td>0.080</td></tr> <tr><td>0.545</td><td>0.140</td></tr> <tr><td>0.545</td><td>0.080</td></tr> <tr><td>0.547</td><td>0.047</td></tr> <tr><td>0.587</td><td>0.081</td></tr> <tr><td>0.594</td><td>0.140</td></tr> <tr><td>0.606</td><td>0.099</td></tr> <tr><td>0.490</td><td>0.079</td></tr> </tbody> </table>	Sa (g)	THcm	0.398	0.080	0.398	0.065	0.400	0.090	0.407	0.047	0.413	0.048	0.432	0.080	0.468	0.080	0.478	0.079	0.486	0.067	0.494	0.047	0.496	0.080	0.517	0.080	0.545	0.140	0.545	0.080	0.547	0.047	0.587	0.081	0.594	0.140	0.606	0.099	0.490	0.079	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Sa (g)</th> <th>THcm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.606</td><td>0.099</td></tr> <tr><td>0.606</td><td>0.150</td></tr> <tr><td>0.607</td><td>0.063</td></tr> <tr><td>0.626</td><td>0.150</td></tr> <tr><td>0.651</td><td>0.068</td></tr> <tr><td>0.653</td><td>0.120</td></tr> <tr><td>0.691</td><td>0.078</td></tr> <tr><td>0.695</td><td>0.200</td></tr> <tr><td>0.695</td><td>0.078</td></tr> <tr><td>0.729</td><td>0.090</td></tr> <tr><td>0.731</td><td>0.050</td></tr> <tr><td>0.733</td><td>0.100</td></tr> <tr><td>0.668</td><td>0.104</td></tr> </tbody> </table>	Sa (g)	THcm	0.606	0.099	0.606	0.150	0.607	0.063	0.626	0.150	0.651	0.068	0.653	0.120	0.691	0.078	0.695	0.200	0.695	0.078	0.729	0.090	0.731	0.050	0.733	0.100	0.668	0.104
Sa (g)	TH cm																																																																																																					
0.292	0.041																																																																																																					
0.302	0.042																																																																																																					
0.307	0.041																																																																																																					
0.309	0.040																																																																																																					
0.317	0.030																																																																																																					
0.321	0.049																																																																																																					
0.326	0.049																																																																																																					
0.347	0.065																																																																																																					
0.356	0.040																																																																																																					
0.388	0.047																																																																																																					
0.390	0.050																																																																																																					
0.395	0.081																																																																																																					
0.398	0.080																																																																																																					
0.398	0.065																																																																																																					
0.346	0.051																																																																																																					
Sa (g)	THcm																																																																																																					
0.398	0.080																																																																																																					
0.398	0.065																																																																																																					
0.400	0.090																																																																																																					
0.407	0.047																																																																																																					
0.413	0.048																																																																																																					
0.432	0.080																																																																																																					
0.468	0.080																																																																																																					
0.478	0.079																																																																																																					
0.486	0.067																																																																																																					
0.494	0.047																																																																																																					
0.496	0.080																																																																																																					
0.517	0.080																																																																																																					
0.545	0.140																																																																																																					
0.545	0.080																																																																																																					
0.547	0.047																																																																																																					
0.587	0.081																																																																																																					
0.594	0.140																																																																																																					
0.606	0.099																																																																																																					
0.490	0.079																																																																																																					
Sa (g)	THcm																																																																																																					
0.606	0.099																																																																																																					
0.606	0.150																																																																																																					
0.607	0.063																																																																																																					
0.626	0.150																																																																																																					
0.651	0.068																																																																																																					
0.653	0.120																																																																																																					
0.691	0.078																																																																																																					
0.695	0.200																																																																																																					
0.695	0.078																																																																																																					
0.729	0.090																																																																																																					
0.731	0.050																																																																																																					
0.733	0.100																																																																																																					
0.668	0.104																																																																																																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Sa (g)</th> <th>THcm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.729</td><td>0.090</td></tr> <tr><td>0.731</td><td>0.050</td></tr> <tr><td>0.733</td><td>0.100</td></tr> <tr><td>0.771</td><td>0.130</td></tr> <tr><td>0.800</td><td>0.150</td></tr> <tr><td>0.801</td><td>0.101</td></tr> <tr><td>0.837</td><td>0.175</td></tr> <tr><td>0.913</td><td>0.150</td></tr> <tr><td>0.932</td><td>0.150</td></tr> <tr><td>1.060</td><td>0.200</td></tr> <tr><td>0.831</td><td>0.130</td></tr> </tbody> </table>	Sa (g)	THcm	0.729	0.090	0.731	0.050	0.733	0.100	0.771	0.130	0.800	0.150	0.801	0.101	0.837	0.175	0.913	0.150	0.932	0.150	1.060	0.200	0.831	0.130	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Sa (g)</th> <th>TH cm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1.060</td><td>0.200</td></tr> <tr><td>1.102</td><td>0.043</td></tr> <tr><td>1.102</td><td>0.130</td></tr> <tr><td>1.260</td><td>0.152</td></tr> <tr><td>1.263</td><td>0.101</td></tr> <tr><td>1.317</td><td>0.150</td></tr> <tr><td>1.353</td><td>0.150</td></tr> <tr><td>1.635</td><td>0.300</td></tr> <tr><td>1.646</td><td>0.150</td></tr> <tr><td>2.748</td><td>0.330</td></tr> <tr><td>1.449</td><td>0.171</td></tr> </tbody> </table>	Sa (g)	TH cm	1.060	0.200	1.102	0.043	1.102	0.130	1.260	0.152	1.263	0.101	1.317	0.150	1.353	0.150	1.635	0.300	1.646	0.150	2.748	0.330	1.449	0.171																																																					
Sa (g)	THcm																																																																																																					
0.729	0.090																																																																																																					
0.731	0.050																																																																																																					
0.733	0.100																																																																																																					
0.771	0.130																																																																																																					
0.800	0.150																																																																																																					
0.801	0.101																																																																																																					
0.837	0.175																																																																																																					
0.913	0.150																																																																																																					
0.932	0.150																																																																																																					
1.060	0.200																																																																																																					
0.831	0.130																																																																																																					
Sa (g)	TH cm																																																																																																					
1.060	0.200																																																																																																					
1.102	0.043																																																																																																					
1.102	0.130																																																																																																					
1.260	0.152																																																																																																					
1.263	0.101																																																																																																					
1.317	0.150																																																																																																					
1.353	0.150																																																																																																					
1.635	0.300																																																																																																					
1.646	0.150																																																																																																					
2.748	0.330																																																																																																					
1.449	0.171																																																																																																					

		IM(Sd m)	0.066	0.102	0.235	0.346	0.490	0.668	0.831	1.449
		Nanalisis	15	11	13	14	18	18	10	10
Fracciones de colapso para cada estado de daño	SD1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	SD2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	SD3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	SD4	0	0	0	0	0	0	0	0	0



DAÑO LEVE SD1..... 107

DAÑO MODERADO SD2..... 107

```

% Curvas de fragilidad
% functions. Calculos basados fielmente en el siguiente articulo:
%
% Baker, J. W. (2015). "Efficient analytical fragility function fitting
% using dynamic structural analysis." Earthquake Spectra, 31(1), 579-599.
%
% Created by Jack Baker
%
% Modified by Jack Baker, 1/25/2017, to update citation information
%Hoja de cálculo adoptada y usada por: Ing. Alex Córdova en colaboracion con Ing. Kerlly Barcia
cd(fileparts(matlab.desktop.editor.getActiveFilename))

% PARAMETROS DE INGRESO
%IM= Es la intensidad en este caso [Sa,Pseudo aceleracion espectral]
% example data: IM levels, number of analyses, and number of collapses

```

DAÑO LEVE SD1

```
IM = [0.070 0.11 0.24 0.35 0.49 0.67 0.83 1.44 ];
num_collapse = [0 0 0 0 3 6 8 9];
num_gms = [15 11 13 14 18 18 10 10];

% estimate fragility function using MLE method (equation 11)
[theta_hat_mle, beta_hat_mle] = fn_mle_pc(IM, num_gms, num_collapse);

% compute fragility functions using estimated parameters
x_vals = 0.01:0.01:2; % IM levels to plot fragility function at

p_collapse_mle = normcdf((log(x_vals/theta_hat_mle))/beta_hat_mle); % compute fragility function
using equation 1 and estimated parameters

% plot resulting fragility functions
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%ESTADO DE DAÑO LEVE
figure
hold on
plot(IM,num_collapse./num_gms, '^g', 'linewidth', 2)

plot(x_vals,p_collapse_mle, '-g', 'linewidth', 2)
axis([0 2 0 1])
```

DAÑO MODERADO SD2

```
IM = [0.070 0.11 0.24 0.35 0.49 0.67 0.83 1.44 ];
num_collapse = [0 0 0 0 2 3 6 7];
num_gms = [15 11 13 14 18 18 10 10];

% estimate fragility function using MLE method (equation 11)
[theta_hat_mle, beta_hat_mle] = fn_mle_pc(IM, num_gms, num_collapse);

% compute fragility functions using estimated parameters
x_vals = 0.01:0.01:2; % IM levels to plot fragility function at

p_collapse_mle = normcdf((log(x_vals/theta_hat_mle))/beta_hat_mle); % compute fragility function
using equation 1 and estimated parameters

% plot resulting fragility functions
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%ESTADO DE DAÑO MODERADO
% figure
hold on
plot(IM,num_collapse./num_gms, '^b', 'linewidth', 2)
plot(x_vals,p_collapse_mle, '-b', 'linewidth', 2)

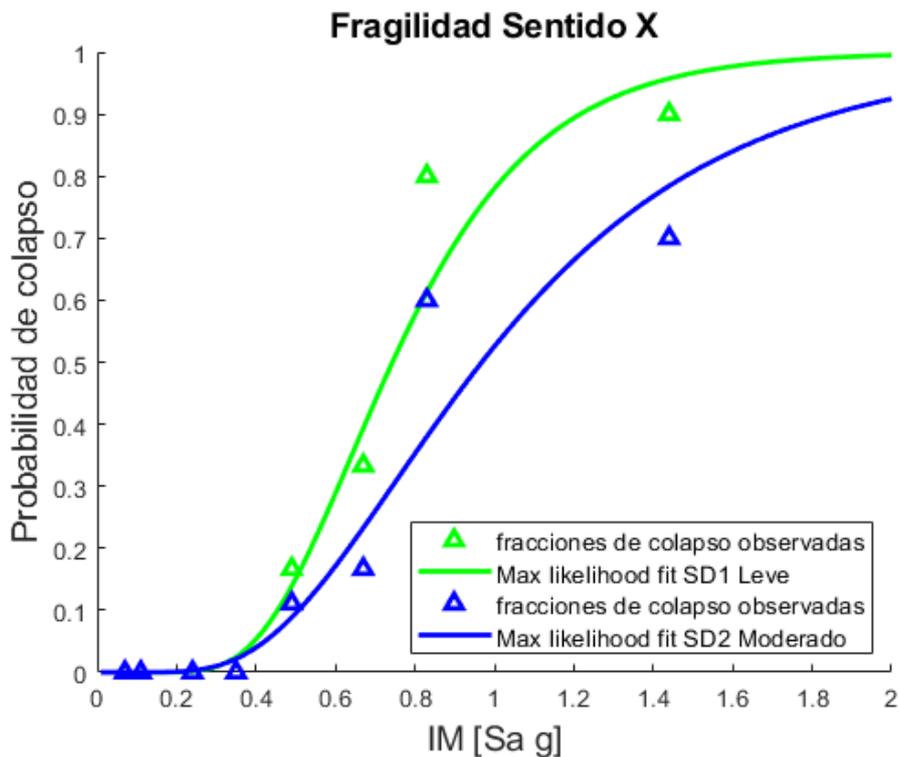
% %% DAÑO EXTENSO SD3
```

```

% IM = [0.070 0.11 0.24 0.35 0.49 0.67 0.83 1.44 ];
% num_collapse = [0 0 0 0 0 0 0 2];
% num_gms = [15 11 13 14 18 18 10 10];
%
%
% % estimate fragility function using MLE method (equation 11)
% [theta_hat_mle, beta_hat_mle] = fn_mle_pc(IM, num_gms, num_collapse);
%
%
% % compute fragility functions using estimated parameters
% x_vals = 0.01:0.01:2; % IM levels to plot fragility function at
%
% p_collapse_mle = normcdf((log(x_vals/theta_hat_mle))/beta_hat_mle); % compute fragility
function using equation 1 and estimated parameters
%
% % plot resulting fragility functions
% %XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
% %ESTADO DE DAÑO MODERADO
% % figure
% hold on
% plot(IM,num_collapse./num_gms, '^c', 'linewidth', 2)
% plot(x_vals,p_collapse_mle, '-c', 'linewidth', 2)

leggh2 = legend('fracciones de colapso observadas', 'Max likelihood fit SD1 Leve','fracciones de
colapso observadas','Max likelihood fit SD2 Moderado', 'location', 'southeast');
set(leggh2, 'fontsize', 10)
hx = xlabel('IM [Sa g]', 'FontSize', 14);
hy = ylabel('Probabilidad de colapso', 'FontSize', 14);
axis([0 2 0 1])
title('Fragilidad Sentido X','FontSize',14)

```



2. FRAGILIDAD SENTIDO Y

Se muestra los conjuntos de datos por franjas que se ha seleccionado.

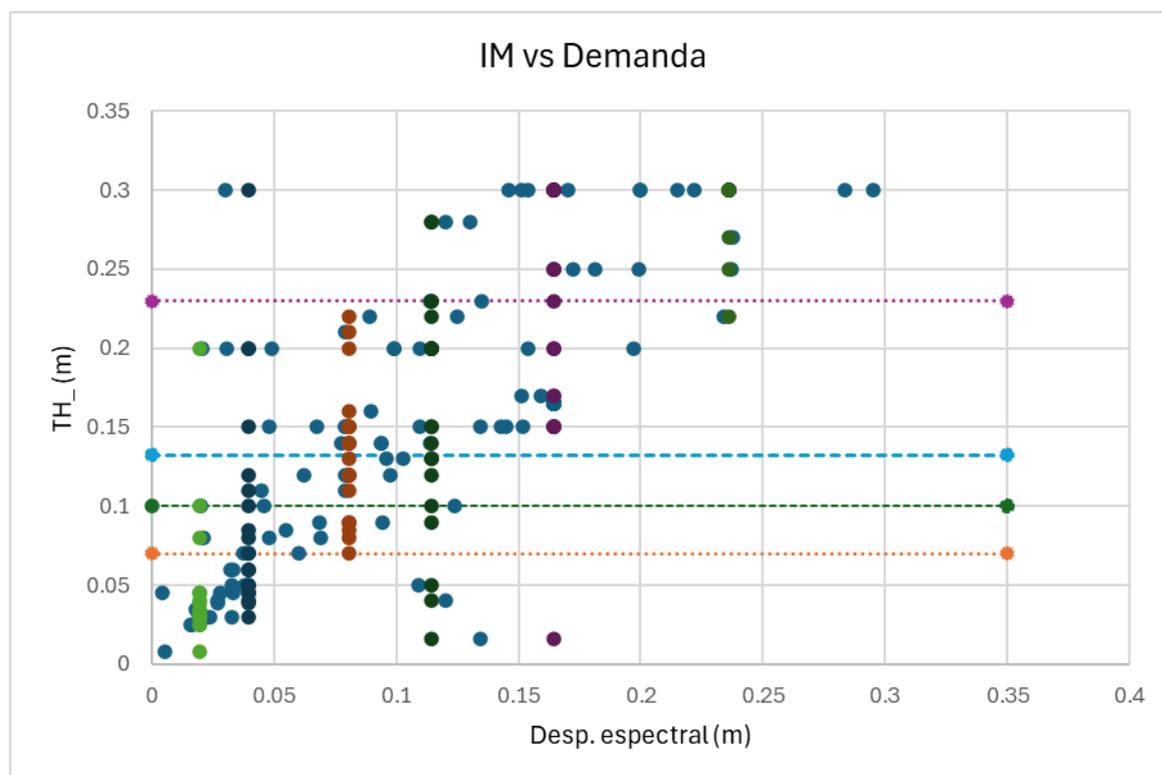
❖ Intensidad Sd m

Sd (m)	TH m	Sd (m)	TH m	Sd (m)	TH m
0.004	0.045	0.027	0.039	0.055	0.085
0.005	0.008	0.027	0.040	0.060	0.070
0.016	0.025	0.028	0.045	0.062	0.120
0.017	0.025	0.030	0.300	0.068	0.150
0.018	0.035	0.031	0.200	0.069	0.090
0.019	0.032	0.032	0.060	0.069	0.080
0.020	0.100	0.033	0.050	0.078	0.140
0.021	0.030	0.033	0.030	0.079	0.120
0.021	0.200	0.033	0.045	0.079	0.150
0.021	0.080	0.033	0.060	0.079	0.150
0.022	0.030	0.038	0.070	0.079	0.210
0.024	0.030	0.038	0.050	0.079	0.110
0.027	0.039	0.045	0.110	0.089	0.220
0.027	0.040	0.046	0.100	0.090	0.160
0.028	0.045	0.048	0.080	0.094	0.140
0.019	0.051	0.048	0.150	0.094	0.140
		0.049	0.200	0.094	0.090
		0.055	0.085	0.096	0.130
		0.060	0.070	0.098	0.120
		0.062	0.120	0.099	0.200
		0.040	0.095	0.080	0.134

Sd (m)	TH m
0.094	0.090
0.096	0.130
0.098	0.120
0.099	0.200
0.099	0.200
0.103	0.130
0.109	0.050
0.110	0.200
0.110	0.150
0.114	0.230
0.114	0.140
0.115	0.200
0.120	0.040
0.120	0.280
0.124	0.100
0.125	0.220
0.130	0.280
0.135	0.016
0.135	0.150
0.135	0.230
0.114	0.158

Sd (m)	TH m
0.13	0.02
0.13	0.15
0.13	0.23
0.14	0.15
0.14	0.15
0.15	0.30
0.15	0.17
0.15	0.30
0.15	0.15
0.15	0.20
0.15	0.30
0.16	0.17
0.17	0.30
0.17	0.25
0.18	0.25
0.20	0.20
0.20	0.25
0.20	0.30
0.20	0.30
0.20	0.30
0.21	0.30
0.16	0.22

Sd (m)	TH m
0.200	0.300
0.200	0.300
0.215	0.300
0.222	0.300
0.234	0.220
0.237	0.250
0.238	0.270
0.284	0.300
0.295	0.300
0.236	0.282



	IM(Sd m)	0.019	0.040	0.080	0.114	0.165	0.236
	N analisis	15	20	20	20	20	9
Fracciones de colapso para cada estado de daño	SD1	3	11	20	17	19	9
	SD2	2	7	15	16	19	9
	SD3	1	4	11	14	19	9
	SD4	0	1	0	4	11	8

DAÑO LEVE SD1..... 111

DAÑO MODERADO SD2..... 112

DAÑO EXTENSO SD3..... 112

DAÑO COMPLETO SD4..... 113

```
% Curvas de fragilidad
% functions. Calculos basados fielmente en el siguiente articulo:
%
% Baker, J. W. (2015). "Efficient analytical fragility function fitting
% using dynamic structural analysis." Earthquake Spectra, 31(1), 579-599.
%
% Created by Jack Baker
%
% Modified by Jack Baker, 1/25/2017, to update citation information
% Hoja de cálculo adoptada y usada por: Ing. Alex Córdova en colaboracion con Ing. Kerlly Barcia
cd(fileparts(matlab.desktop.editor.getActiveFilename))

% PARAMETROS DE INGRESO
% IM= Es la intensidad en este caso [Sa,Pseudo aceleracion espectral]
% example data: IM levels, number of analyses, and number of collapses
```

DAÑO LEVE SD1

```
IM = [0.019 0.039 0.08 0.11 0.16 0.24];
num_collapse = [3 11 20 17 19 9];
num_gms = [15 20 20 20 20 9];

% estimate fragility function using MLE method (equation 11)
[theta_hat_mle, beta_hat_mle] = fn_mle_pc(IM, num_gms, num_collapse);

% compute fragility functions using estimated parameters
x_vals = 0.01:0.005:0.25; % IM levels to plot fragility function at

p_collapse_mle = normcdf((log(x_vals/theta_hat_mle))/beta_hat_mle); % compute fragility function
using equation 1 and estimated parameters

% plot resulting fragility functions
%XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
```

```

%ESTADO DE DAÑO LEVE
figure
hold on
plot(IM,num_collapse./num_gms, '^g', 'linewidth', 2)
plot(x_vals,p_collapse_mle, '-g', 'linewidth', 2)

axis([0 0.25 0 1])

```

DAÑO MODERADO SD2

```

IM = [0.019 0.039 0.08 0.11 0.16 0.24];
num_collapse = [2 7 15 16 19 9];
num_gms = [15 20 20 20 20 9];

% estimate fragility function using MLE method (equation 11)
[theta_hat_mle, beta_hat_mle] = fn_mle_pc(IM, num_gms, num_collapse);

% compute fragility functions using estimated parameters
x_vals = 0.01:0.005:0.25; % IM levels to plot fragility function at
p_collapse_mle = normcdf((log(x_vals/theta_hat_mle))/beta_hat_mle); % compute fragility function
using equation 1 and estimated parameters

% plot resulting fragility functions
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%ESTADO DE DAÑO MODERADO
% figure
hold on
plot(IM,num_collapse./num_gms, '^b', 'linewidth', 2)
plot(x_vals,p_collapse_mle, '-b', 'linewidth', 2)

```

DAÑO EXTENSO SD3

```

IM = [0.019 0.039 0.08 0.11 0.16 0.24];
num_collapse = [1 4 11 14 19 9];
num_gms = [15 20 20 20 20 9];

% estimate fragility function using MLE method (equation 11)
[theta_hat_mle, beta_hat_mle] = fn_mle_pc(IM, num_gms, num_collapse);

% compute fragility functions using estimated parameters
x_vals = 0.01:0.005:0.25; % IM levels to plot fragility function at
p_collapse_mle = normcdf((log(x_vals/theta_hat_mle))/beta_hat_mle); % compute fragility function
using equation 1 and estimated parameters

% plot resulting fragility functions
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%ESTADO DE DAÑO EXTENSO
% figure

```

```

hold on
plot(IM,num_collapse./num_gms, '^c', 'linewidth', 2)
plot(x_vals,p_collapse_mle, '-c', 'linewidth', 2)

```

DAÑO COMPLETO SD4

```

IM = [0.019 0.039 0.08 0.11 0.16 0.24];
num_collapse = [0 1 0 4 11 8];
num_gms = [15 20 20 20 20 9];

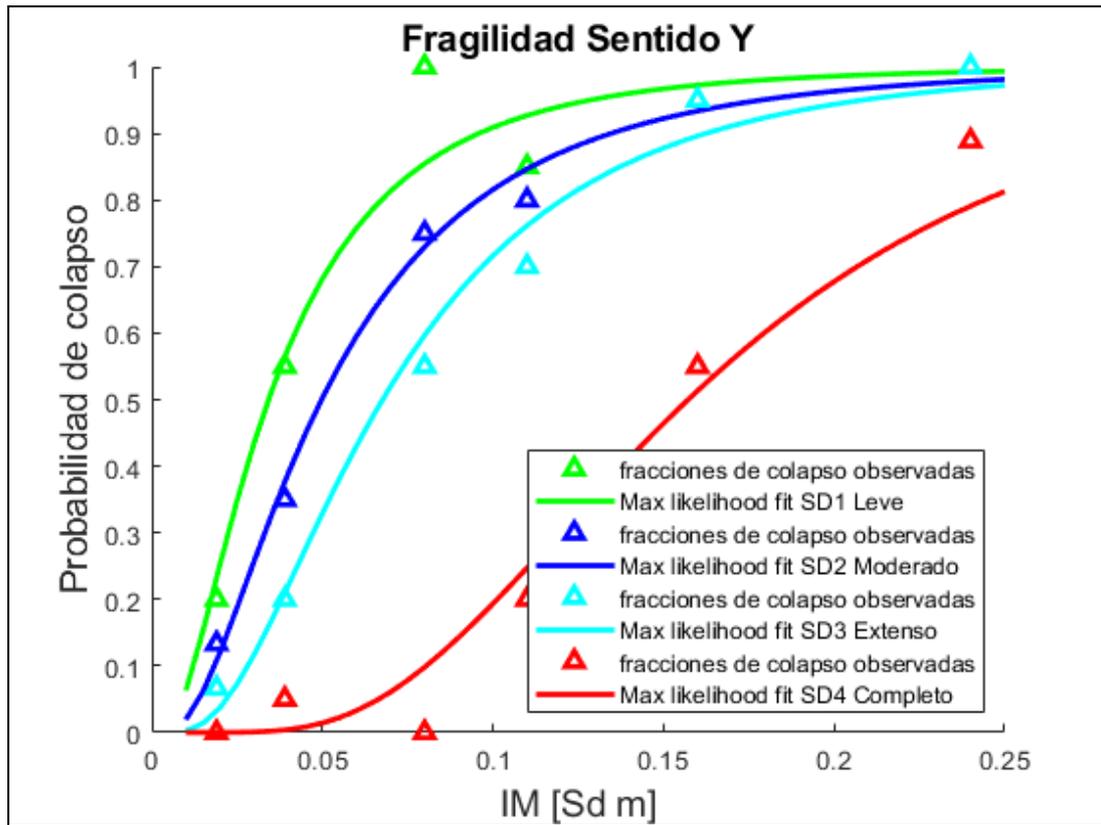
% estimate fragility function using MLE method (equation 11)
[theta_hat_mle, beta_hat_mle] = fn_mle_pc(IM, num_gms, num_collapse);

% compute fragility functions using estimated parameters
x_vals = 0.01:0.005:0.25; % IM levels to plot fragility function at
p_collapse_mle = normcdf((log(x_vals/theta_hat_mle))/beta_hat_mle); % compute fragility function
using equation 1 and estimated parameters

% plot resulting fragility functions
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%ESTADO DE DAÑO MODERADO
% figure
hold on
plot(IM,num_collapse./num_gms, '^r', 'linewidth', 2)
plot(x_vals,p_collapse_mle, '-r', 'linewidth', 2)

leggh2 = legend('fracciones de colapso observadas', 'Max likelihood fit SD1 Leve', 'fracciones de
colapso observadas', 'Max likelihood fit SD2 Moderado', ...
'fracciones de colapso observadas', 'Max likelihood fit SD3 Extenso', 'fracciones de colapso
observadas', 'Max likelihood fit SD4 Completo', 'location', 'southeast');
set(leggh2, 'fontsize', 9)
hx = xlabel('IM [Sd m]', 'FontSize', 14);
hy = ylabel('Probabilidad de colapso', 'FontSize', 14);
axis([0 0.25 0 1])
title('Fragilidad Sentido Y', 'FontSize', 14)

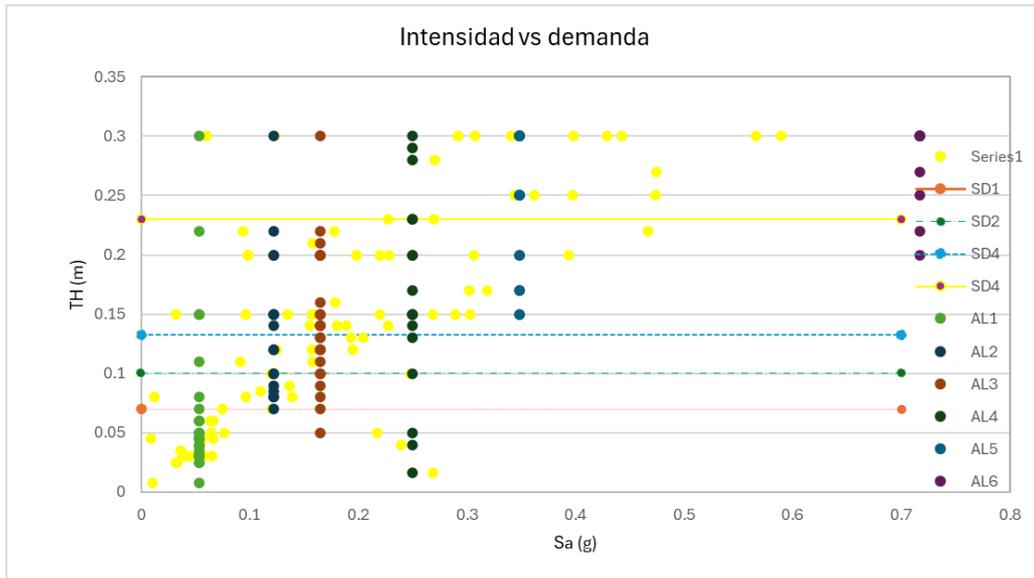
```



❖ **Intensidad Sd**

A continuación se presenta la tabla de los intervalos:

Sa (g)	THm	Sa (g)	THm	Sa (g)	THm
0.009	0.045	0.094	0.220	0.121	0.070
0.011	0.008	0.096	0.150	0.121	0.100
0.013	0.080	0.096	0.080	0.121	0.100
0.032	0.025	0.098	0.200	0.123	0.300
0.032	0.150	0.099	0.200	0.124	0.120
0.033	0.025	0.110	0.085	0.135	0.150
0.036	0.035	0.121	0.070	0.137	0.090
0.038	0.032	0.121	0.100	0.139	0.080
0.041	0.030	0.121	0.100	0.155	0.140
0.045	0.030	0.123	0.300	0.157	0.120
0.053	0.039	0.124	0.120	0.158	0.150
0.054	0.040	0.135	0.150	0.158	0.150
0.056	0.045	0.137	0.090	0.158	0.110
0.057	0.030	0.139	0.080	0.158	0.210
0.060	0.300	0.155	0.140	0.178	0.220
0.064	0.060	0.157	0.120	0.179	0.160
0.065	0.050	0.158	0.150	0.180	0.140
0.065	0.030	0.122	0.139	0.189	0.140
0.067	0.060			0.193	0.130
0.067	0.045			0.195	0.120
0.075	0.070			0.198	0.200
0.076	0.050			0.198	0.200
0.091	0.110			0.205	0.130
0.094	0.220			0.217	0.050
0.096	0.150			0.219	0.200
0.053	0.070			0.165	0.143
Sa (g)	THm	Sa (g)	THm	Sa (g)	THm
0.205	0.130	0.289	0.150	0.429	0.300
0.217	0.050	0.292	0.300	0.443	0.300
0.219	0.200	0.302	0.170	0.467	0.220
0.219	0.150	0.303	0.150	0.474	0.250
0.228	0.230	0.307	0.200	0.474	0.270
0.228	0.140	0.307	0.300	0.566	0.300
0.229	0.200	0.318	0.170	0.590	0.300
0.240	0.040	0.341	0.300	0.620	0.200
0.248	0.100	0.344	0.250	1.420	0.090
0.250	0.290	0.362	0.250	1.689	0.300
0.269	0.016	0.394	0.200	0.717	0.253
0.269	0.150	0.397	0.250		
0.269	0.230	0.398	0.300		
0.270	0.280	0.429	0.300		
0.289	0.150	0.443	0.300		
0.292	0.300	0.348	0.239		
0.302	0.170				
0.249	0.166				



DAÑO LEVE SD1..... 116

DAÑO MODERADO SD2..... 117

DAÑO EXTENSO SD3..... 117

DAÑO COMPLETO SD4..... 118

```
% Curvas de fragilidad
% functions. Calculos basados fielmente en el siguiente articulo:
%
% Baker, J. W. (2015). "Efficient analytical fragility function fitting
% using dynamic structural analysis." Earthquake Spectra, 31(1), 579-599.
%
% Created by Jack Baker
%
% Modified by Jack Baker, 1/25/2017, to update citation information
%Hoja de cálculo adoptada y usada por: Ing. Alex Córdova en colaboracion con Ing. Kerlly Barcia
cd(fileparts(matlab.desktop.editor.getActiveFilename))

% PARAMETROS DE INGRESO
%IM= Es la intensidad en este caso [Sa,Pseudo aceleracion espectral]
% example data: IM levels, number of analyses, and number of collapses
```

DAÑO LEVE SD1

```
IM = [0.05 0.12 0.16 0.24 0.34 0.71];
num_collapse = [7 17 24 14 15 10];
num_gms = [25 17 25 17 15 10];
```

```
% estimate fragility function using MLE method (equation 11)
[theta_hat_mle, beta_hat_mle] = fn_mle_pc(IM, num_gms, num_collapse);
```

```

% compute fragility functions using estimated parameters
x_vals = 0.01:0.01:1.2; % IM levels to plot fragility function at

p_collapse_mle = normcdf((log(x_vals/theta_hat_mle))/beta_hat_mle); % compute fragility function
using equation 1 and estimated parameters

% plot resulting fragility functions
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%ESTADO DE DAÑO LEVE
% figure
hold on
plot(IM,num_collapse./num_gms, '^g', 'linewidth', 2)

plot(x_vals,p_collapse_mle, '-g', 'linewidth', 2)
axis([0 2 0 1])

```

DAÑO MODERADO SD2

```

IM = [0.05 0.12 0.16 0.24 0.34 0.71];
num_collapse = [5 12 21 14 15 9];
num_gms = [25 17 25 17 15 10];

% estimate fragility function using MLE method (equation 11)
[theta_hat_mle, beta_hat_mle] = fn_mle_pc(IM, num_gms, num_collapse);

% compute fragility functions using estimated parameters
x_vals = 0.01:0.01:1.2; % IM levels to plot fragility function at

p_collapse_mle = normcdf((log(x_vals/theta_hat_mle))/beta_hat_mle); % compute fragility function
using equation 1 and estimated parameters

% plot resulting fragility functions
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%ESTADO DE DAÑO MODERADO
% figure
hold on
plot(IM,num_collapse./num_gms, '^b', 'linewidth', 2)

plot(x_vals,p_collapse_mle, '-b', 'linewidth', 2)

```

DAÑO EXTENSO SD3

```

IM = [0.05 0.12 0.16 0.24 0.34 0.71];
num_collapse = [4 8 13 12 15 9];
num_gms = [25 17 25 17 15 10];

```

```

% estimate fragility function using MLE method (equation 11)
[theta_hat_mle, beta_hat_mle] = fn_mle_pc(IM, num_gms, num_collapse);

% compute fragility functions using estimated parameters
x_vals = 0.01:0.01:1.2; % IM levels to plot fragility function at

p_collapse_mle = normcdf((log(x_vals/theta_hat_mle))/beta_hat_mle); % compute fragility function
using equation 1 and estimated parameters

% plot resulting fragility functions
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%ESTADO DE DAÑO MODERADO
% figure
hold on
plot(IM,num_collapse./num_gms, '^c', 'linewidth', 2)
plot(x_vals,p_collapse_mle, '-c', 'linewidth', 2)

```

DAÑO COMPLETO SD4

```

IM = [0.05 0.12 0.16 0.24 0.34 0.71];
num_collapse = [1 1 1 5 9 7];
num_gms = [25 17 25 17 15 10];

% estimate fragility function using MLE method (equation 11)
[theta_hat_mle, beta_hat_mle] = fn_mle_pc(IM, num_gms, num_collapse);

% compute fragility functions using estimated parameters
x_vals = 0.01:0.01:1.2; % IM levels to plot fragility function at

p_collapse_mle = normcdf((log(x_vals/theta_hat_mle))/beta_hat_mle); % compute fragility function
using equation 1 and estimated parameters

% plot resulting fragility functions
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%ESTADO DE DAÑO MODERADO
% figure
hold on
plot(IM,num_collapse./num_gms, '^r', 'linewidth', 2)
plot(x_vals,p_collapse_mle, '-r', 'linewidth', 2)

leggh2 = legend('fracciones de colapso observadas', 'Max likelihood fit SD1 Leve', 'fracciones de
colapso observadas', 'Max likelihood fit SD2 Moderado', ...
'fracciones de colapso observadas', 'Max likelihood fit SD3 Extenso', 'fracciones de colapso
observadas', 'Max likelihood fit SD4 Completo', 'location', 'southeast');
set(leggh2, 'fontsize', 10)
hx = xlabel('IM [Sa g]', 'FontSize', 14);
hy = ylabel('Probabilidad de colapso', 'FontSize', 14);
axis([0 1.2 0 1])
title('Fragilidad Sentido Y', 'FontSize', 14)

```

