



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERIA CIVIL**

Comparación del comportamiento de un modelo de plastificación concentrada y un modelo de plastificación distribuida en elementos de hormigón armado.

Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero Civil

Autor:

Basantes Barrionuevo, Kevin Alexander

Tutor:

Ing. Andrea Natali Zarate Villacrés Mgs.

Riobamba, Ecuador. 2024

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, **Kevin Alexander Basantes Barrionuevo**, con cédula de ciudadanía 0604550657, autor del trabajo de investigación titulado: “**Comparación del comportamiento de un modelo de plastificación concentrada y un modelo de plastificación distribuida en elementos de hormigón armado**”, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 07 de agosto de 2024.



Kevin Alexander Basantes Barrionuevo
C.I: 0604550657

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, **Ing. Andrea Zarate Msc.** catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería, por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación **“Comparación del comportamiento de un modelo de plastificación concentrada y un modelo de plastificación distribuida en elementos de hormigón armado”**, bajo la autoría de Kevin Alexander Basantes Barrionuevo; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los 30 días del mes de julio de 2024.



Ing. Andrea Natali Zarate Villacrés Mgs.
TUTORA

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **Comparación del comportamiento de un modelo de plastificación concentrada y un modelo de plastificación distribuida en elementos de hormigón armado**, presentado por Kevin Alexander Basantes Barriónuevo, con cédula de identidad número 0604550657, bajo la tutoría de Mgs. Andrea Natali Zarate Villacrés; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 07 de agosto de 2024.

Mgs. Raúl Salazar

**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE
GRADO**



Firma

Mgs. Marcelo Guerra

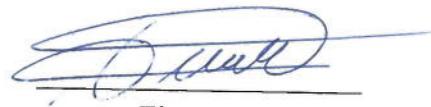
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE
GRADO**



Firma

Mgs. Andrés Marcillo.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Firma



CERTIFICACIÓN

Que, **Basantes Barrionuevo Kevin Alexander** con CC: **0604550657**, estudiante de la Carrera de **Ingeniería Civil**, Facultad de **Ingeniería**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**Comparación del comportamiento de un modelo de plastificación concentrada y un modelo de plastificación distribuida en elementos de hormigón armado**" cumple con el 9 %, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **TURNITIN**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 30 de julio de 2024

Mgs. Andrea Zarate
TUTORA

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mis seres queridos quienes han influido de manera positiva en mi vida, guiándome, brindándome consejos y su apoyo incondicional, ayudándome a ser una mejor persona. Con mucho amor y afecto dedico especialmente a mi madre, Sonia, y a mi hermana Karen, personas especiales que son el pilar fundamental y mayor motivación en mi vida. A mi padre Luis que me ha apoyado en este camino. A mis amados abuelitos Manuel y Matilde que, con su sabiduría, valores y principios, han dejado una huella imborrable en mí. A mis ángeles en el cielo, mis abuelitos Ramiro e Hilda, sé que estarían muy orgullosos. Agradezco a los guías docentes que han sabido impartir cátedra con su dedicación y esfuerzo. A mis familiares y amigos de toda la vida que nunca me han dejado solo y siempre han estado conmigo en las situaciones buenas y malas. A mis compañeros que han hecho que la vida académica sea más alegre y llena de experiencias grandiosas e inolvidables.

Esta tesis es un humilde homenaje a todos aquellos que creyeron y confiaron en mí, como expresión de agradecimiento y gratitud eterna.

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradezco a mi Dios Todopoderoso, quien nunca me ha abandonado y me ha permitido vivir este viaje lleno de experiencias, con salud y amor, de la mano de mis principales motores de vida, mi mamá y mi hermana. Ellas han sido la principal fuente de fuerza e inspiración para seguir adelante en este camino de vida. Agradezco a mi círculo más cercano de familiares y seres queridos que me rodean, quienes siempre me han alentado a continuar con la lucha día a día, sin rendirme. También quiero expresar mi gratitud a todas las amistades que he hecho y me han acompañado en este tiempo, demostrándome el verdadero valor de la lealtad, llenándome de dicha y muchas vivencias. Agradezco a los docentes de mi carrera, en especial a mi tutora, la Ing. Andrea Zarate. Quienes han impartido catedra y compartido sus conocimientos con perseverancia y paciencia, demostrando el verdadero significado de la enseñanza. También expreso mi gratitud a las personas que hoy no están conmigo, pero me han enseñado y demostrado mucho, y a quienes nunca olvidaré. Por último pero no menos importante agradezco a Mily , mi fiel amiga de aventuras que me llena de muchas alegrías día tras día.

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

CERTIFICADO ANTIPLAGIO

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

RESUMEN

ABSTRACT

CAPÍTULO I. INTRODUCCION 17

1.1. Antecedentes 17

1.2. Planteamiento del Problema 18

1.3. Justificación 18

1.4. Objetivos 18

1.4.1. Objetivo General 18

1.4.2. Objetivos Específicos 19

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO 20

2.1. Análisis lineal 20

2.2. Análisis no-lineal 20

2.3. Teoría del análisis plástico 20

2.4. Normativa ASCE41-17 para procesos no lineales 21

2.5. Modelo de plasticidad concentrada 23

2.5.1. Rotula plástica 23

2.6. Modelo de plasticidad distribuida 24

2.6.1. Elemento con sección tipo fibra 24

2.7. Mecanismo de falla 26

2.8. Diagrama momento-curvatura 27

2.9. Ductilidad.....	28
2.10. Amortiguamiento.....	28
2.11. Niveles de desempeño sismorresistentes.....	29
2.12. Niveles de desempeño para sectorización de la curva de capacidad propuestos por el Comité Visión2000.....	29
2.13. Análisis estático no lineal (Análisis Pushover)	30
2.14. Curva de capacidad.....	31
2.15. Punto de desempeño.....	31
2.16. Análisis Dinámico no lineal.	32
2.17. Curva de Histéresis.....	32
2.18. Comportamiento bajo cargas cíclicas.....	33
2.19. Modelo de histéresis Inelástico.	34
2.20. Modelo de histéresis de Takeda.....	37
CAPÍTULO III. METODOLOGIA.....	36
3.1. Tipo de Investigación	36
3.2. Diseño de Investigación.	37
3.3. Técnicas de Recolección de Datos	37
3.4. Población de Estudio y Tamaño de Muestra	37
3.5. Hipótesis de Investigación.....	37
3.6. Métodos de Análisis y Procesamiento de Datos.....	37
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
4.1. Predimensionamiento.	39
4.2. Análisis gravitacional.....	39
4.3. Modelo de plastificación concentrada.	40
4.3.1. Rotulas plásticas en viga.....	40
4.3.2. Rotulas plásticas en columnas.	43
4.4. Modelo de plastificación distribuida.	47
4.4.1. Elementos de sección tipo fibra en la viga.	48

4.4.2. Elementos de sección tipo fibra en la columna.	50
4.5. Análisis estático no lineal (Pushover).	50
4.6. Análisis dinámico no lineal (Time-History).....	59
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	67
5.1. Conclusiones.....	67
5.2. Recomendaciones	69
BIBLIOGRAFÍA	70
ANEXOS	76

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Resumen de momentos para predimensionamiento de viga.	39
Tabla 2. Resumen de carga y área mínima de diseño para predimensionamiento de la sección de la columna.	39
Tabla 3. Resumen de las secciones de la estructura.....	39
Tabla 4. Resumen de resultados del análisis gravitacional de la estructura.	39
Tabla 5. Resultados conforme la Normativa ASCE41-17.....	41
Tabla 6. Comparación de resultados de rotula plástica automática y manual.	42
Tabla 7. Resultados de rotulas plásticas del elemento columna.	46
Tabla 8. Niveles de desempeño de rotulas plásticas en la estructura luego del análisis Pushover.	54
Tabla 9. Resultados máximos de las curvas de capacidad de los modelos concentrado y distribuido.	57
Tabla 10. Cálculo para sectorización de la curva de capacidad.....	58
Tabla 11. Resultados histeréticos del análisis dinámico no lineal del elemento columna.....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Grafica esfuerzo-deformación típica del concreto	21
Figura 2. Parámetros de modelación de vigas de hormigón armado para procedimientos no lineales.	22
Figura 3. Parámetros de modelación de columnas de hormigón armado para procedimientos no lineales.	22
Figura 4. Rotulas plásticas cerca a los extremos de las vigas.	23
Figura 5. Relaciones momento-curvatura y modelo según ASCE41-17.	24
Figura 6. Modelos idealizados de elementos de viga-columna.	24
Figura 7. Modelos de plasticidad distribuida idealizados.	25
Figura 8. Discretización de la sección con el comando Quadrilateral Patch.	25
Figura 9. Elemento con plasticidad distribuida con sección de fibras.	26
Figura 10. Representación del mecanismo de falla en una viga hiperestática.	26
Figura 11. Diagrama momento-curvatura.	27
Figura 12. Amortiguamiento para varios materiales.	29
Figura 13. Sectorización de la curva de capacidad.	30
Figura 14. Reparto de cargas Push-Over.	31
Figura 15. Representación del Pushover y de la Curva de Capacidad.	31
Figura 16. Punto de desempeño.	32
Figura 17. Comportamiento histérico del concreto sometido a cargas cíclicas.	33
Figura 18. Curvas de histéresis de una viga de hormigón doblemente armada sometida a una carga cíclica.	34
Figura 19. Modelo histerético inelástico.	34
Figura 20. Modelo histerético de Takeda	35
Figura 21. Diagrama de flujo.	36
Figura 22. Diagrama momento-curvatura de la rótula plástica automática para la viga.	43
Figura 23. Diagrama de momento-curvatura del elemento columna.	45
Figura 24. Rotula plástica automática para el elemento columna.	47
Figura 25. Modelación e interfaz de OpenSeesNavigator.	48
Figura 26. Interfaz del comando Quadrilateral Patch para creación de sección y discretización en fibras.	49
Figura 27. Interfaz del comando Straight para aceros de refuerzo.	49

Figura 28. Código para determinación de sección tipo fibra en viga para el pórtico de análisis.	49
Figura 29. Código para creación de sección tipo fibra en columnas para el pórtico de análisis.	50
Figura 30. Configuración del caso de carga Gravitacional no lineal	51
Figura 31. Configuración de rotulas plásticas para la viga.	51
Figura 32. Configuración de rotulas plásticas para columnas.	52
Figura 33. Asignación de rotulas plásticas automáticas en la estructura.	52
Figura 34. Configuración del caso Pushover.	53
Figura 35. Configuración del punto de control y desplazamiento en el análisis Pushover.	53
Figura 36. Configuración de results saved en el análisis Pushover	54
Figura 37. Estados en las rotulas plásticas respectivamente a) Aparición de rotulas plásticas en columnas, b) Estado final de daño en rotulas.	55
Figura 38. Curva de capacidad del pórtico aplicado el modelo de plastificación concentrado.	56
Figura 39. Comparación de curvas de capacidad de los modelos concentrado y distribuido..	57
Figura 40. Sectorización de las curvas de capacidad de los modelos concentrado y distribuido.	58
Figura 41. Registro Tiempo-Historia del sismo Pedernales 2016.	59
Figura 42. Configuración de time-history para el sismo Pedernales 2016.	60
Figura 43. Configuración de load case time-history para el sismo Pedernales 2016.	61
Figura 44. a) Aparición de rotulas plásticas en columnas del pórtico, b) Daños en rotulas plásticas en las columnas del pórtico c) Estado final de daños en rotulas plásticas en las columnas del pórtico.	62
Figura 45. Registro de daños notables en los diferentes modelos.	62
Figura 46. Estado de histéresis de rotulas plásticas en el elemento viga.....	63
Figura 47. Estado de histéresis de rotulas plásticas en el elemento columna.....	64
Figura 48. Comparación de ciclos de histéresis del elemento columna.	65

ÍNDICE DE ANEXOS.

Anexo 1. Predimensionamiento.....	76
Anexo 2. Código OpenSees -Análisis gravitacional.....	85
Anexo 3. Código OpenSees -Análisis estatico no lineal Pushover.....	87
Anexo 4. Código OpenSees -Análisis dinamico no lineal.....	90

RESUMEN

Muchas estructuras resultan en severas afectaciones post-sísmicas, esto hace que la evaluación estructural sea crucial para determinar su nivel de vulnerabilidad, que resulta ante el evento, mismo que es complejo de anticipar, debido al alto nivel de incertidumbre, por ende, existe la necesidad de predecir el comportamiento de las estructuras, lo que conlleva a la creación de análisis y procedimientos, en base a registros sísmicos. Un proceso que ayuda a simular el comportamiento estructural de forma realista, es el análisis plástico, el cual consta de dos modelos de plastificación. Cada modelo tiene diferente nivel de fiabilidad, resultando más exacto que otro. Por tal razón el presente trabajo de investigación tiene como propósito principal, comparar el modelo de plastificación concentrada (rotulas plásticas) con el modelo de plastificación distribuida (elementos con sección tipo fibra) en elementos viga y columna de hormigón armado, a través del software ETABS y OpenSees. Se realizó el predimensionamiento de las secciones, en base a normativas NEC15, ACI318-19, y los procedimientos no lineales en base a ASCE41-17. El objeto de estudio es una estructura aporticada de dos niveles de hormigón armado. Posteriormente se realizó el procesamiento de datos, análisis gravitacional, análisis estático no lineal y análisis dinámico no lineal. Los resultados del análisis estático se presentaron en curvas de capacidad, mientras que el análisis dinámico se comparó en curvas de histéresis, verificándose con normas y varias postulaciones de autores. Los resultados obtenidos demuestran que el modelo de plastificación distribuido es más exacto y representa de manera más realista el comportamiento estructural, ante eventos sísmicos.

Palabras claves: análisis no lineal, concentrado, distribuido, hormigón armado, plasticidad.

ABSTRACT

Anticipating a seismic event is a complex task, given the high level of uncertainty involved. To address this, we have developed analyses and procedures based on records, such as plastic analysis, which involves two plasticization models. Each model offers a different level of reliability, with one being more precise than the other. In this research, we compare the concentrated plasticization model (plastic hinges) with the distributed plasticization model (elements with fiber-type sections) in the context of concrete reinforcement beams and columns using the ETABS software and OpenSees. The pre-sizing of the sections was carried out based on NEC15, ACI318-19 standards, and nonlinear procedures based on ASCE41-17. Our object of study is a two-level reinforced concrete porticoed structure. We then conducted a thorough analysis, including data processing, gravitational analysis, nonlinear static analysis, and nonlinear dynamic analysis. The static analysis results were presented in capacity curves, while the dynamic analysis was compared in hysteresis curves, fully verified with standards and postulates of various authors. Our thorough analysis reassures us that the distributed plasticization model is more accurate and more realistically represents the structural behavior during seismic events.

Keywords: nonlinear analysis, concentrated, distributed, reinforced concrete, plasticity.



Reviewed by:

Mgs. Kerly Cabezas
ENGLISH PROFESSOR
I.D. 0604042382

CAPÍTULO I. INTRODUCCION.

1.1. Antecedentes

Con la reciente aparición de la ingeniería sísmica se ha puesto mayor énfasis en simular la respuesta no lineal de un sistema estructural a las excitaciones sísmicas (Fenes & Filippou, 2004)

Dentro del ámbito de Estructuras en la Ingeniería Civil, la definición de un parámetro que pueda describir la severidad de un movimiento telúrico ha sido constantemente estudiada desde los inicios de la ingeniería sísmica (Bojórquez, Chávez, Ruiz, & Reyes, 2014) . Además de la creación de softwares especializados, con el fin de conocer el comportamiento de los elementos ante distintas solicitudes.

Un tema de especial importancia es lograr predecir, para luego intentar simular el comportamiento no lineal en elementos estructurales de hormigón armado. Además, para conocer de manera correcta los efectos generados por la acción sísmica sobre una estructura de hormigón armado, se debe realizar desde un punto de vista analítico no lineal. Por ende, algunos conceptos se relacionan con el comportamiento de plastificación de una sección (giro de plastificación, curvatura de plastificación, momento de plastificación y giro último), lo cual es esencial para obtener diagramas de momento vs curvatura, mucho más exactos, como la principal base para describir la manera de actuación del deterioro en los diferentes mecanismos de disipación de energía generados en la estructura.

Siendo la simulación sísmica de estructuras de hormigón armado, una forma eficaz la cual exige recursos y un elevado tiempo computacional, de manera que el uso de los diferentes modelos numéricos, deben ser lo más rápidos posibles, pero manteniendo un nivel aceptable de precisión (López, 2014).

La importancia del análisis no lineal, radica en evaluar los diferentes métodos para determinar la demanda sísmica, ya que es necesario la precisión en las respuestas ante dichas acciones. Factores como determinar el historial de respuestas, propiedades plásticas de los materiales, requieren un análisis dinámico no lineal.

En investigaciones se presentan hipótesis en los cuales, los elementos se encuentran en equilibrio estable, además que los materiales son homogéneos e isotrópicos. También se identificó que el límite elástico del material permanece estable y finalmente se sugirió la hipótesis de los pequeños desplazamientos, esto quiere decir que los desplazamientos son proporcionalmente pequeños, lo cual permite la aplicación de las ecuaciones de equilibrio en su posición indeformada.

La teoría plástica puede ser utilizada con objeto de obtener, de un modo simple, en entramados planos de edificación, la carga de colapso cuando sus elementos (barras) están sometidos principalmente a esfuerzos (Sánchez, 2023) . Además, se comprende la necesidad de utilizar un análisis elasto-plástico, en grandes movimientos, en una determinación adecuada de la carga última de una estructura y se debe de considerar que dentro del diseño de elementos la característica de la función plástica permite la formación de la rótula plástica con la capacidad de rotación suficiente para la redistribución de momentos (Samartín & Gutiérrez, 1982)

Cabe mencionar estos procesos garantizan la máxima exactitud y precisión en sus resultados, de ahí surgen criterios a considerarse como la imprecisión de los modelos, el tiempo de cálculo y su aplicabilidad en el análisis de los resultados obtenidos de modelos como: plastificación concentrada y de plastificación distribuida.

1.2. Planteamiento del Problema

La imprecisión de los modelos, el tiempo de cálculo y su aplicabilidad variable plantean una dificultad práctica de la ingeniería estructural, específicamente en el análisis no lineal lo cual limita la confianza en los resultados obtenidos, por ende se espera que estos procesos garanticen la máxima exactitud y precisión, de ahí surgen criterios a considerarse dentro del campo del movimiento sísmico, apareciendo modelos importantes como: plastificación concentrada y de plastificación distribuida, además de programas especializados como ETABS y OpenSees que ayudan a su modelación.

En esta investigación se pretende relacionar y comparar los modelos mencionados en elementos de hormigón armado a través de un análisis estático y dinámico no lineal, permitiendo conocer el comportamiento y nivel de confiabilidad.

1.3. Justificación

Los resultados de esta investigación podrán ser utilizados por profesionales en áreas afines, para que se tome en cuenta en próximas investigaciones e incluso en análisis estructurales. De manera que se considere los aspectos de importancia para llevar a próximos diseños y construcciones, a niveles de desempeño operativos.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

- Comparar el comportamiento de un modelo de plastificación concentrada y un modelo de plastificación distribuida en elementos de hormigón armado.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Diseñar un elemento tipo viga y columna en Hormigón armado para comparar los modelos de plastificación.
- Generar un modelo de plastificación concentrada en elementos tipo viga y columna de hormigón armado usando ETABS.
- Generar un modelo de plastificación distribuida en elementos tipo viga y columna de hormigón armado usando OpenSees-Matlab.
- Analizar e Interpretar los resultados obtenidos en OpenSees y ETABS

2. CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.

El presente marco teórico aborda conceptos fundamentales en ingeniería estructural y análisis sísmico. Comenzando con el análisis lineal y no lineal, se exploran las diferencias clave en la respuesta estructural frente a cargas estáticas y dinámicas. La teoría del análisis plástico y los modelos de plasticidad concentrada y distribuida ofrecen un entendimiento profundo de cómo los materiales y las estructuras deforman y redistribuyen energía durante eventos extremos. El estudio de los mecanismos de falla y los diagramas momento-curvatura proporciona herramientas cruciales para evaluar la capacidad resistente y predecir el comportamiento estructural. La ductilidad y el amortiguamiento se presentan como propiedades esenciales que influyen en la capacidad de absorber energía y disipar vibraciones, contribuyendo a la evaluación de niveles de desempeño y al análisis pushover. Finalmente, se explora la importancia del análisis dinámico y la curva de histéresis en la caracterización del comportamiento cíclico de las estructuras ante cargas sísmicas.

2.1. Análisis lineal.

Según López & Muñoz (1996) el análisis lineal favorece la rapidez de los cálculos en elementos y estructuras complejas, porque simplifica los procesos, pero no indica resultados completamente precisos, ya que asume que los elementos son isotrópicos y homogéneos. Además, cuando se analizan los sistemas, las respuestas cambian de manera lineal y proporcional a las cargas y las deformaciones proporcionales a las mismas. De una manera más sencilla se entiende que el comportamiento es lineal y no varía con el tiempo.

2.2. Análisis no-lineal.

Según Sastre & Gimferrer (2018) , el análisis no lineal presenta respuestas que no son proporcionales a las cargas aplicadas y por ende sus deformaciones tampoco. Es decir, el comportamiento del sistema es no lineal, anisotrópico, las propiedades como la rigidez provienen de cambios de formas, y que además varían con el tiempo. Es difícil predecir la respuesta en este método de análisis, ya que las magnitudes de las cargas, esfuerzos y las deformaciones varían de forma no lineal y no proporcional.

El análisis estructural no lineal es realmente importante ya que permite predecir mejor el comportamiento de una estructura o elemento contemplando la posibilidad de que tenga deformaciones fuera del rango elástico lineal.

2.3. Teoría del análisis plástico

Según McCormac & Csernac (2012) ,la teoría tiene que ver con la forma en la que se distribuyen los esfuerzos a lo largo de un elemento o en una estructura, luego de alcanzar el

esfuerzo de fluencia en ciertas zonas de los mismos. Luego de alcanzar dicho esfuerzo, las partes ya no pueden resistir más esfuerzos adicionales, pero fluirá la cantidad necesaria que permitirá que la carga o esfuerzos adicionales, se transfieran a partes de la estructura donde los esfuerzos son menores que el esfuerzo de fluencia, los cuales podrán absorber esfuerzos adicionales. Se puede decir que, en casos de sobrecarga, la plasticidad sirve para igualar los esfuerzos.

En la Figura 1. se observa el diagrama esfuerzo-deformación de un elemento de concreto, donde puede alcanzar una deformación máxima, es lo que se llama límite de elasticidad. Una vez que se sobrepasa dicho límite las deformaciones del material son permanentes y las propiedades del mismo cambian. Si la sobrecarga continua y supera las fuerzas internas de cohesión del material, el elemento se fisura y termina con su ruptura.

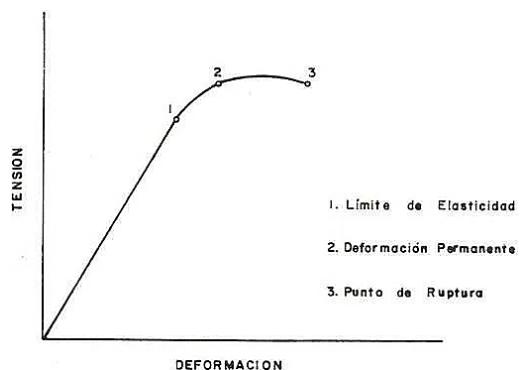


Figura 1. Grafica esfuerzo-deformación típica del concreto

Fuente (Osorio 2022)

2.4. Normativa ASCE41-17 para procesos no lineales.

López, Hernández, & Sunley (2020) menciona que la normativa ASCE41-17, define parámetros, criterios, objetivos y niveles de desempeño para estructuras, en base a categorías de riesgo y niveles de peligro sísmico. Se presentan las tablas 10-7 y 10-8 correspondientes a la normativa ASCE41-17 para vigas y columnas, en la Figura 2 Figura 3, respectivamente.

Table 10-7. Modeling Parameters and Numerical Acceptance Criteria for Nonlinear Procedures—Reinforced Concrete Beams

Conditions	Modeling Parameters ^a			Acceptance Criteria ^a		
	Plastic Rotations Angle (radians)		Residual Strength Ratio	Plastic Rotations Angle (radians)		
	a	b		IO	LS	CP
Condition i. Beams controlled by flexure^b						
$\rho - \rho'$	Transverse reinforcement ^c	$\frac{V}{b_w d / f'_y}$ ^d				
≤ 0.0	C	≤ 3 (0.25)	0.025	0.05	0.2	0.010
≤ 0.0	C	≥ 6 (0.5)	0.02	0.04	0.2	0.005
≥ 0.5	C	≤ 3 (0.25)	0.02	0.03	0.2	0.005
≥ 0.5	C	≥ 6 (0.5)	0.015	0.02	0.2	0.005
≤ 0.0	NC	≤ 3 (0.25)	0.02	0.03	0.2	0.005
≤ 0.0	NC	≥ 6 (0.5)	0.01	0.015	0.2	0.0015
≥ 0.5	NC	≤ 3 (0.25)	0.01	0.015	0.2	0.005
≥ 0.5	NC	≥ 6 (0.5)	0.005	0.01	0.2	0.0015
Condition ii. Beams controlled by shear^b						
Stirrup spacing ≤ $d/2$		0.0030	0.02	0.2	0.0015	0.01
Stirrup spacing > $d/2$		0.0030	0.01	0.2	0.0015	0.005
Condition iii. Beams controlled by inadequate development or splicing along the span^b						
Stirrup spacing ≤ $d/2$		0.0030	0.02	0.0	0.0015	0.01
Stirrup spacing > $d/2$		0.0030	0.01	0.0	0.0015	0.005
Condition iv. Beams controlled by inadequate embedment into beam-column joint^b						
		0.015	0.03	0.2	0.01	0.02
						0.03

Figura 2. Parámetros de modelación de vigas de hormigón armado para procedimientos no lineales.

Fuente: (American Society of Civil Engineers,2017).

Table 10-8. Modeling Parameters and Numerical Acceptance Criteria for Nonlinear Procedures—Reinforced Concrete Columns Other Than Circular with Spiral Reinforcement or Seismic Hoops as Defined in ACI 318

Modeling Parameters	Acceptance Criteria		
	Plastic Rotation Angle (radians)		
	IO	LS	CP
Plastic Rotation Angles, a and b (radians)			
Residual Strength Ratio, c			
Columns not controlled by inadequate development or splicing along the clear height ^a			
$a = \left(0.042 - 0.043 \frac{N_{UD}}{A_g f'_{cE}} + 0.63 \rho_t - 0.023 \frac{V_{yE}}{V_{ColOE}} \right) \geq 0.0$	$0.15 a \leq 0.005$	0.5 b ^b	0.7 b ^b
$b = \frac{0.5}{5 + \frac{N_{UD}}{0.8 A_g f'_{cE}} \frac{1}{\rho_t} \frac{f'_{cE}}{f_{yIE}}} - 0.01 \geq a^a$			
$c = 0.24 - 0.4 \frac{N_{UD}}{A_g f'_{cE}} \geq 0.0$			
Columns controlled by inadequate development or splicing along the clear height ^c			
$a = \left(\frac{1}{8} \frac{\rho_t f_{yIE}}{\rho_t f_{yIE}} \right) \geq 0.0 \leq 0.025^d$	0.0	0.5 b	0.7 b
$b = \left(0.012 - 0.085 \frac{N_{UD}}{A_g f'_{cE}} + 12 \rho_t^e \right) \geq a \leq 0.06$			
$c = 0.15 + 36 \rho_t \leq 0.4$			

Figura 3. Parámetros de modelación de columnas de hormigón armado para procedimientos no lineales.

Fuente: (American Society of Civil Engineers,2017).

2.5. Modelo de plasticidad concentrada.

Los modelos de plasticidad concentrada se emplean para el diseño estructuras sismo resistentes, asumiendo que donde se ubican las rótulas plásticas hay comportamiento no lineal, normalmente cerca a sus extremos, asignando propiedades mecánicas obtenidas de un análisis estructural (Zendaoui, Kadid, & Yahiaoui , 2016).

2.5.1. Rotula plástica.

Las rotulas plásticas aparecen cuando el momento aplicado a la sección, sobrepasa el momento plástico de la misma. García & Bairán (2018) explica que son mecanismos que ayudan a la dissipación de energía, los cuales se ubican al 5% de la longitud del elemento, cerca de sus extremos, como se muestran en la Figura 4 .

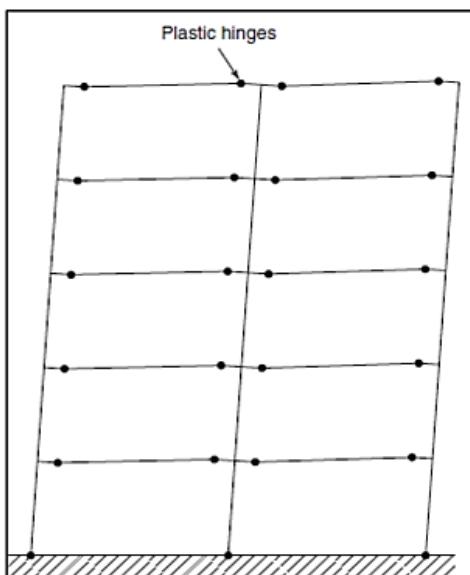


Figura 4. Rotulas plásticas cerca a los extremos de las vigas.

Fuente: (García & Bairán, 2018)

Cuando se emplea el método en columnas, se genera análisis adicionales por la presencia de la carga axial además de momentos flectores representados por medio del diagrama de interacción.

Este modelo depende de una serie de parámetros, incluida la definición de curvaturas de rendimiento, geometría de sección, propiedades del material, compresión y refuerzo de tensión, refuerzo transversal, agrietamiento y endurecimiento de tensión además de la curva tensión-deformación para el hormigón en tensión y compresión. Para definir los diagramas de momento-curvatura en la zona no lineal se adopta el modelo que se plantea en Figura 5 .

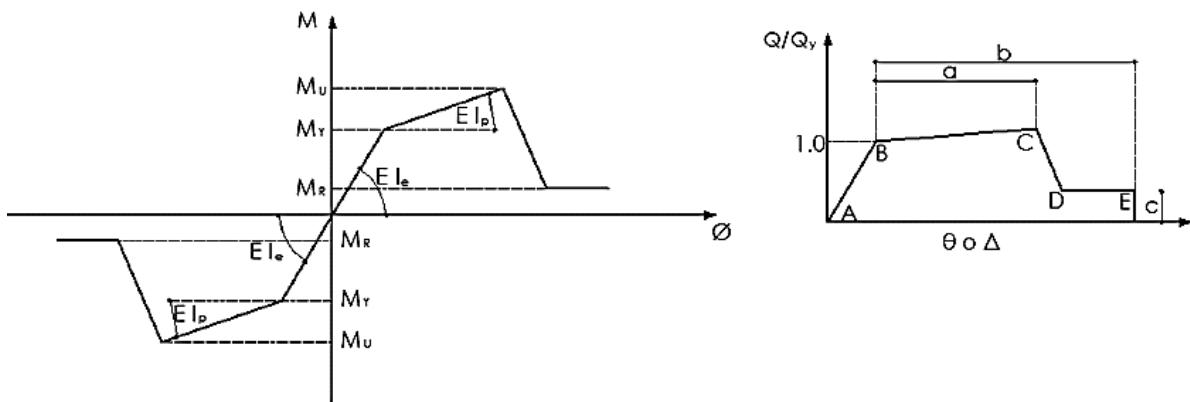


Figura 5. Relaciones momento-curvatura y modelo según ASCE41-17.

Fuente: (Aguilar, Mora, & Rodríguez, 2015)

Los modelos de plasticidad concentrada tienen la desventaja de separar la interacción fuerza-momento y la interacción rigidez axial del comportamiento del elemento, y la necesidad de realizar un análisis momento-curvatura para determinar la rigidez elástica y post-elástica, y la interacción axial no lineal fuerza-momento envolvente (Zendaoui et al., 2016).

La Figura 6 muestra los modelos idealizados: rótula plástica modelo de plastificación concentrado en los extremos de los dos elementos (a) y rotula de resorte no lineal(b).

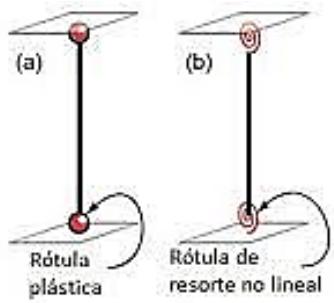


Figura 6. Modelos idealizados de elementos de viga-columna.

Fuente: (McCormac & Csernac, 2012)

2.6. Modelo de plasticidad distribuida

2.6.1. Elemento con sección tipo fibra

McCormac & Csernac (2012) , indica que en este modelo todo el miembro se modela como un elemento inelástico, la fuente de tal inelasticidad se define a nivel seccional. Una ventaja importante de tal modelo es la inexistencia de una longitud predeterminada donde puede ocurrir la inelasticidad, porque todas las secciones pueden tener excursiones en este campo de

respuesta. Aunque este enfoque es una aproximación más cercana a la realidad, también requiere más capacidad computacional; es decir, más tiempo de análisis, así como memoria y espacio en disco.

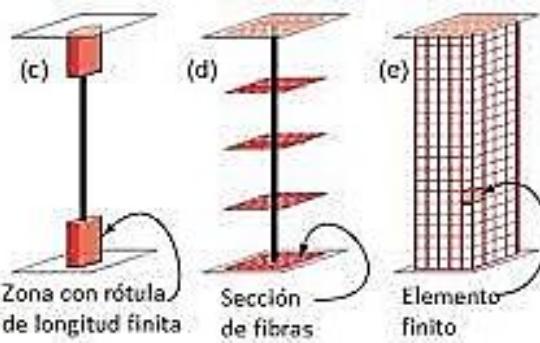


Figura 7. Modelos de plasticidad distribuida idealizados.

Fuente: (McCormac & Csernac, 2012)

Los modelos con plasticidad distribuida son muy útiles para estudiar el comportamiento no lineal de los elementos componentes de una estructura a lo largo de toda su longitud (Figura 7).

Se discretiza la estructura de manera que todos sus elementos se asemejen al comportamiento de un modelo concentrado, cada uno de estos debe estar compuesto por una única sección inelástica del elemento. En la Figura 8 se observa la manera en la que discretiza la sección, el comando Quadrilateral , el cual es uno de los comandos para determinar la sección tipo fibra en el uso de OpenSees .

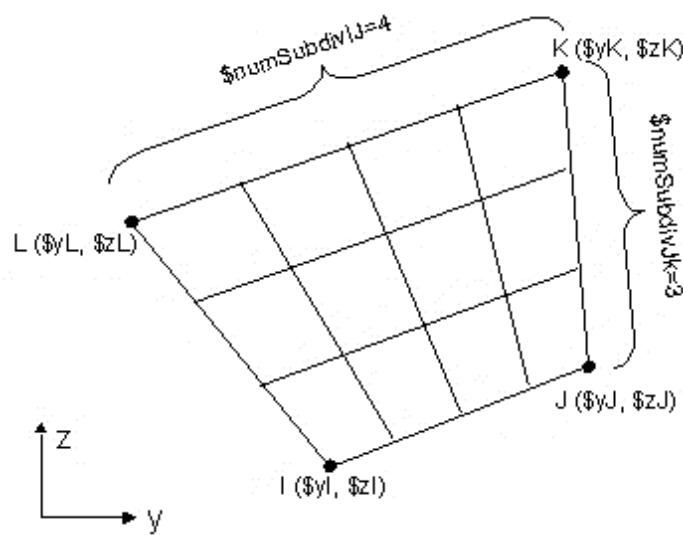


Figura 8. Discretización de la sección con el comando Quadrilateral Patch.

Fuente: (OpenSees Berkley, 2022)

Su comportamiento constitutivo se puede elaborar mediante la discretización de fibras paralelas a la sección de un elemento o con la relación de esfuerzos y deformaciones a través de la Teoría de plasticidad (Figura 9).

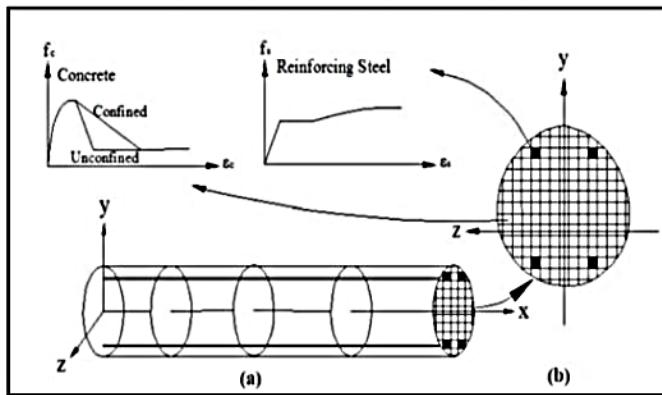


Figura 9. Elemento con plasticidad distribuida con sección de fibras.

Fuente: (Huang & Kwon, 2015)

2.7. Mecanismo de falla.

McCormac & Csernac (2012) explica que una estructura hiperestática falla, cuando se forman más de una articulación plástica, el número de articulaciones varía dependiendo de la estructura analizada, pero nunca suele ser menos de dos. En la viga empotrada en sus extremos, que se indica en la parte (a) de la Figura 10, no fallará si no se han formado las tres articulaciones plásticas indicadas en la parte (b) .

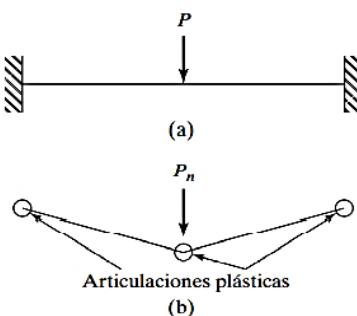


Figura 10. Representación del mecanismo de falla en una viga hiperestática.

Fuente: (McCormac & Csernac, 2012)

Cuando se ha formado una articulación plástica, la carga aún puede aumentar sin que el elemento falle, siempre y cuando la geometría de la estructura lo permita. La articulación plástica, con respecto al incremento de carga, genera una redistribución de momentos, ya que

no puede soportar mayor momento y actúa como una articulación real. A medida que aparecen más articulaciones plásticas, llegará el momento que cause la falla de la estructura.

2.8. Diagrama momento-curvatura.

Este diagrama indica la ductilidad que tiene la sección de un elemento, por medio de la incursión en el rango no lineal antes de la falla o ruptura (Mora & Aguiar, 2018).

En el hormigón armado hay propiedades que definen el comportamiento elástico y plástico de un elemento, de las cuales dependen dichos diagramas como:

- Sección de hormigón armado.
- Tipo de acero utilizado.
- Tipo y composición del Hormigón.
- Cantidad y posición de Armaduras.
- Clase de Esfuerzos en la sección.

El diagrama también es un instrumento para estimar las propiedades mecánicas del elemento. En la Figura 11 se puede observar varias zonas ABCD, las cuales Vortize (2020) representa como la correlación que existe entre el esfuerzo de flexión y la curvatura que se genera en la sección.

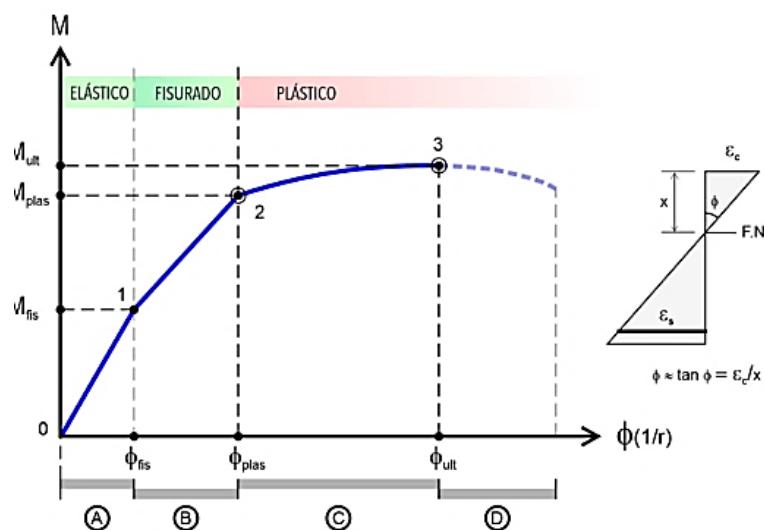


Figura 11. Diagrama momento-curvatura.

Fuente: (Vortize, 2020).

(A) – ZONA NO FISURADA

Cuando empieza la carga, la respuesta obtenida es elástica, la pendiente es constante, no hay fisuración del hormigón hasta que llega al límite (1) en el cual si la carga continua, se fisura en la zona traccionada.

(B) – ZONA FISURADA

Como su nombre indica esta zona del diagrama comienza en el momento que se fisura el hormigón (1), por ende, hay menor inercia, misma que pasa a ser de la sección fisurada, y como resultado la rigidez disminuye, se puede apreciar una variación de la pendiente del tramo. Esta zona sigue siendo elástica llegando al límite, el cual es el momento de plastificación de la armadura de acero (2).

(C) – ZONA PLASTIFICADA

Esta zona corresponde a la deformación plástica del acero, la cual determina la ductilidad de la sección del elemento. En esta parte aparecen rotulas plásticas y la deformación es permanente, la misma termina en el momento ultimo.

(D) – ZONA POST-ULTIMA

Esta zona indica el estado de la sección hasta su rotura.

2.9. Ductilidad.

Es una propiedad que poseen los elementos que forman una estructura, permite tener deformaciones inelásticas, para resistir eventos sísmicos fuertes, reduciendo la rigidez y resistencia del elemento (García & Bairán, 2018). La idea principal de un correcto diseño sismorresistente es desarrollar elementos dúctiles, que resistan las demandas y absorba la energía sísmica través de rotulas plásticas, sin que se generen daños estructurales graves. Polo (2021) indica que la ductilidad es la relación entre θ_u curvatura última y θ_y curvatura de fluencia.

$$\mu = \frac{\theta_u}{\theta_y} \quad (1)$$

2.10. Amortiguamiento.

García (2018), menciona que el amortiguamiento es una característica para disipar energía, la cual es dependiente principalmente del tipo del material de construcción, como se muestra en Figura 12, además de factores como la amplitud de vibración, periodos de vibración, modos y configuración estructural.

Material	Damping, ξ_m (%)
Reinforced concrete	
Small amplitudes (un-cracked)	0.7–1.0
Medium amplitudes (fully cracked)	1.0–4.0
High amplitudes (fully cracked) but no yielding of reinforcement	5.0–8.0
Pre-stressed concrete (un-cracked)	0.4–0.7
Partially stressed concrete (slightly cracked)	0.8–1.2
Composite	0.2–0.3
Steel	0.1–0.2

Figura 12. Amortiguamiento para varios materiales.

Fuente: (García & Bairán, 2018)

En base a esto, ETABS por defecto configura el análisis con 5% de amortiguamiento (KSSE Structural Engineers, 2022), siendo un valor típico para el hormigón armado, basado en mediciones de campo elástico, según Möller, Rubinstein, & Ascheri (2011). Debido a que las estructuras de hormigón ordinarias tienen rangos de amortiguamiento altos, por la mampostería no reforzada, y mampostería estructural se recomiendan valores entre 3% y 7%, la mayoría de códigos no reconocen la diferencia por lo que típicamente se usa el 5%, en estructuras de hormigón armado (Guevara, 2017).

2.11. Niveles de desempeño sismorresistentes

Sistema de Computación CEINCI-LAB (2020), menciona y describe que los niveles de desempeño son:

Ocupación Inmediata (IO).- etapa donde la edificación no presenta daños considerables, los cuales son menores al 10% del costo de reemplazo estructural, además puede haber posibles interrupciones en los servicios básicos.

Seguridad de vida (LS).- estado límite donde la estructura sufrió daños considerables, el costo de reparación llega hasta el 50% del costo de reemplazo.

Prevención del colapso (CP).- estado donde el daño presentado es crítico, el costo por reparación es igual al de reemplazo, normalmente los edificios en este estado son demolidos.

2.12. Niveles de desempeño para sectorización de la curva de capacidad propuestos por el Comité Visión2000.

Gallegos (2016) indica los niveles de desempeño de acuerdo al comité Visión2000, como se muestra en la Figura 13, los cuales son:

Totalmente operacional: El daño estructural es despreciable, la estructura continúa prestando servicios y es el 100% de la capacidad de la capacidad elástica.

Operacional: El daño es leve, hay agrietamientos en elementos estructurales y arquitectónicos, funciona con normalidad y representa el 30% de la capacidad inelástica.

Seguridad: Hay daño moderado en algunos elementos estructurales, pérdida de rigidez en sistemas de cargas laterales, se debe cerrar temporalmente y representa el 30% de la capacidad inelástica luego del nivel operacional.

Pre-Colapso: El daño es severo a nivel elemental y estructural, se debe demoler y pertenece al 20% de la capacidad de desplazamiento inelástico, luego del nivel de seguridad.

Colapso: El estado de daño es completo, daños severos en soportes, colapso parcial o completo, no hay reparación y representa el 20% luego del nivel pre-colapso.

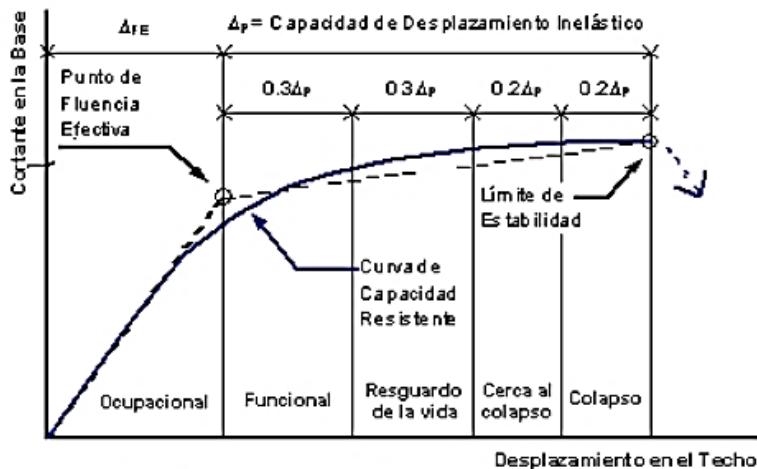


Figura 13. Sectorización de la curva de capacidad.

Fuente: (Borda & Pastor, 2011).

2.13. Análisis estático no lineal (Análisis Pushover)

Este análisis depende del tipo de cargas laterales aplicadas, las cuales aumentan de manera progresiva hasta que llega al fallo o colapso estructural (Valencia, 2018).

Sirve para estudiar la capacidad, resistencia y deformación de un elemento o estructura sometiéndolo a un ciclo de cargas laterales, cuya distribución puede ser triangular, uniforme, parabólica como se muestra en la Figura 14. Esto con el fin de representar de manera realista, los esfuerzos sísmicos (Moreno, 2006). A través de este proceso se obtiene resultados como el agrietamiento, cedencia y fallo, los cuales se representan a través de rotulas plásticas, estados límites de servicio, deformaciones y cortantes correspondientes a la curva de capacidad (Calla & Rosas, 2018).

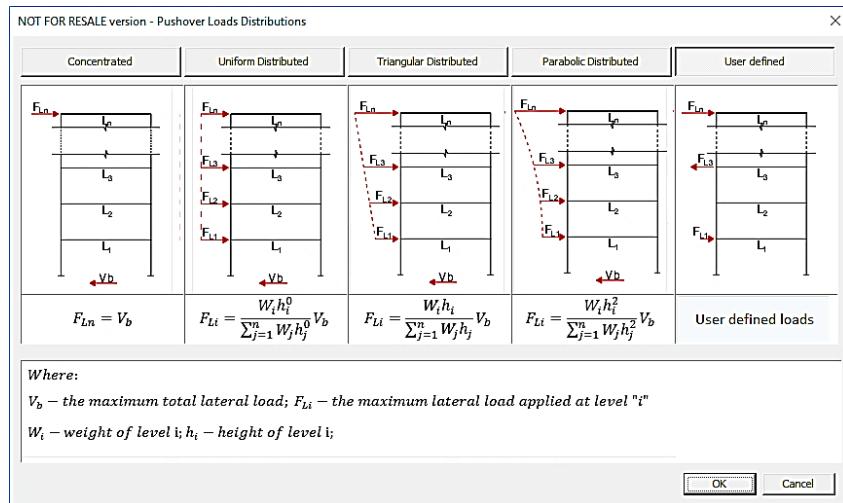


Figura 14. Reparto de cargas Push-Over.

Fuente: (Graitec, s.f.)

2.14. Curva de capacidad.

Indica el comportamiento del elemento o estructura. Esto se realiza cuando se incrementa las cargas, hasta su colapso, con el fin de monitorear el cortante basal y el desplazamiento a través de un punto de control, el cual suele ser el centro de masas en el último nivel sea el caso de una estructura. A medida que aumenta el desplazamiento la rigidez inicial, la cual es la pendiente disminuye y por ende menora la capacidad de soportar más cargas. Esta pendiente indica la rigidez inicial del elemento o estructura (Figura 15).

El diagrama de la curva de capacidad se obtiene con el cortante basal en el eje de las ordenadas y el desplazamiento lateral en el punto de control en el eje de las abscisas (Moreno, s.f.).

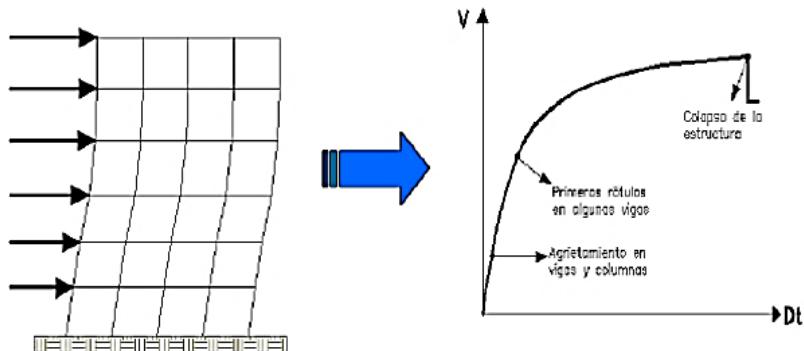


Figura 15. Representación del Pushover y de la Curva de Capacidad.

Fuente: (Jurado, 2012)

2.15. Punto de desempeño.

Representa el desplazamiento máximo u objetivo de la estructura luego de ser sometida a un determinado sismo. Se obtiene de la intersección entre la curva de capacidad, la cual se obtiene del análisis Pushover y espectro de demanda como se muestra en la Figura 16.

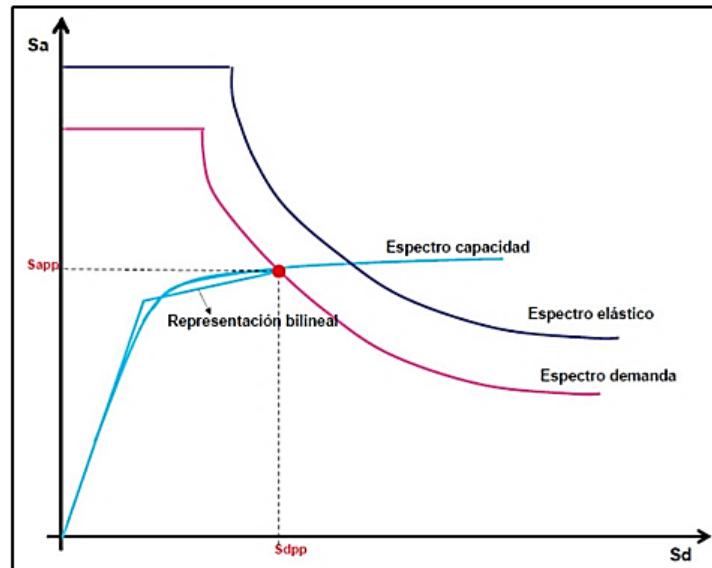


Figura 16. Punto de desempeño.

Fuente:(García & Bairán, 2018)

2.16. Análisis Dinámico no lineal.

El análisis dinámico no lineal indica los máximos desplazamientos y derivas a los que pueden llegar una estructura, por medio de sometimientos a diferentes demandas o registros sísmicos, esto con el fin de que se sobreponga el límite elástico, se plastifique y colapse (Valencia, 2018). Este método proporciona modelos ajustados a la respuesta estructural antes fuertes sismos (Núñez, Ruiz, & Cortés, 2021). Además, con este método se busca obtener la respuesta sísmica de una estructura (Barbat, Oller, & Vielma, 2005). Para poder modelar una respuesta dinámica no lineal, es necesario una evaluación paso a paso del comportamiento estructural, usando una función time-history. De este análisis se obtienen resultados como desplazamientos, distribución de esfuerzos y propagación de daños (García & Bairán, 2018).

2.17. Curva de Histéresis.

Según Orla (s.f.) el ejemplo más claro es en un nudo, el cual, al someterse a un ciclo de oscilación que generan rotaciones y torsiones en dirección horaria y antihoraria, situación que complica el comportamiento del material.

En la Figura 17 se muestra una viga en voladizo en la cual en su extremo libre se aplica una carga P , misma que puede variar su magnitud y dirección, de manera que puede generar

esfuerzos de tensión que superen la resistencia de fisuración del elemento, los cuales son transferidos al acero, y viceversa cuando se generan esfuerzos de compresión (Orla, s.f.).

Cuando se altera la dirección de las cargas y el valor es bajo, la gráfica indica un comportamiento lineal, tanto en su dominio positivo y negativo. Pero cuando la carga genera esfuerzos a compresión que superan el $0.5f'_c$, ocurren deformaciones permanentes en el acero y en el concreto, aquí es donde se desarrollan los ciclos de histéresis.

Los ciclos histeréticos, se generan cuando las cargas externas llevan al concreto y al acero a esfuerzos mayores a los lineales, además de que el factor adherencia entre el acero y el concreto es afectado. Cuando se combinan los esfuerzos normales con los transversales se forman grietas, mismas que al abrir y cerrar por el movimiento cíclico, aparece la fricción y segregación de material, lo cual debilita y lleva al colapso del elemento (Orla, s.f.).

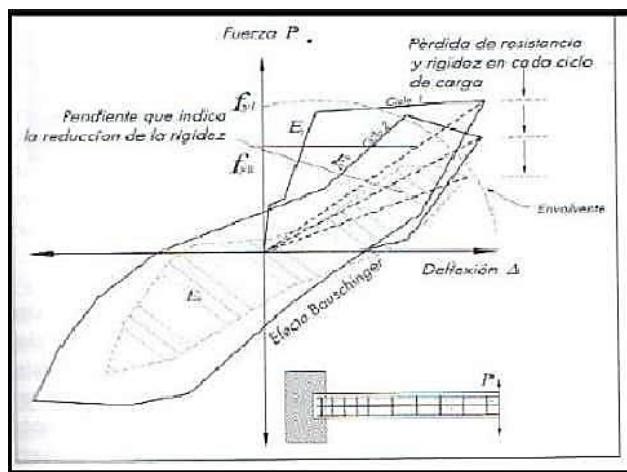


Figura 17. Comportamiento histérico del concreto sometido a cargas cíclicas.

Fuente: (Orla, s.f.).

2.18. Comportamiento bajo cargas cíclicas.

La respuesta a un sismo de una estructura aporticada de concreto armado, depende de su ductilidad. La correcta distribución de refuerzo longitudinal y transversal ayuda en el confinamiento de los elementos, ductilidad de los mismos, y esto se refleja en el comportamiento ante los ciclos histeréticos, ya que no hay perdida de resistencia ni degradación de rigidez, como lo explica Orla (s.f.) y se muestra en la Figura 18.

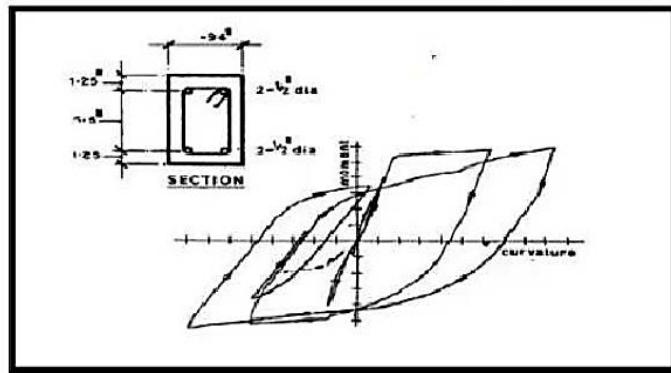


Figura 18. Curvas de histéresis de una viga de hormigón doblemente armada sometida a una carga cíclica.

Fuente: (Orla, s.f.)

2.19. Modelo de histéresis Inelástico.

Se caracteriza por su representación en un diagrama bilineal, en la primera parte, se describe un comportamiento elástico lineal que se extiende hasta alcanzar el momento de fluencia. En la segunda parte del diagrama, se representa el comportamiento elastoplástico. A diferencia de un modelo plástico, en esta región se conserva cierta rigidez después de alcanzar la fluencia. Esta rigidez post-fluencia se expresa como una fracción de la rigidez elástica inicial, como indica Capcha (2017) y se muestra en la Figura 19.

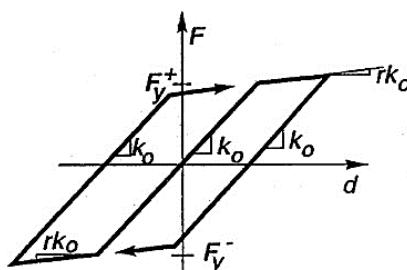


Figura 19. Modelo histerético inelástico.

Fuente: (Capcha, 2017)

2.20. Modelo de histéresis de Takeda.

Capcha (2017) indica a través de la Figura 20 que es un modelo bilineal más complejo y completo en el cual existe rigidez postfluencia, además hay degradación de rigidez en el ciclo de carga y descarga con diferentes pendientes, que se determinan mediante parámetros específicos.

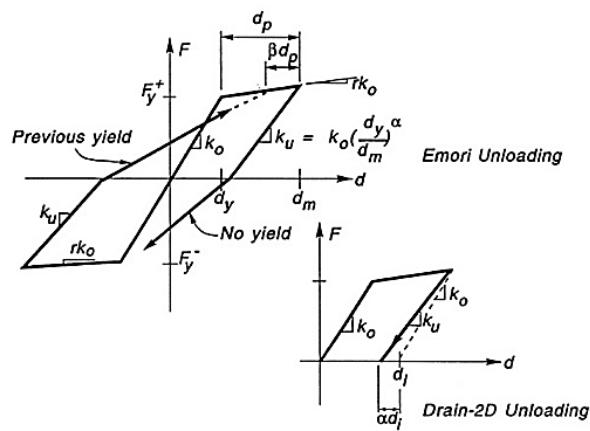


Figura 20. Modelo histerético de Takeda

Fuente: (Capcha, 2017)

3. CAPÍTULO III. METODOLOGIA.

3.1. Tipo de Investigación

La presente investigación tiene un enfoque mixto el cual integra el método cuantitativo y cualitativo, debido a que se requiere una mayor comprensión del tema por medio de la caracterización de los elementos que son objetos de estudio y por medio de gráficas, valores numéricos y lenguaje de programación TCL, contrastando con la teoría y normativa a fin de recabar un rango amplio de evidencia que sirva para robustecer y comprobar la hipótesis.

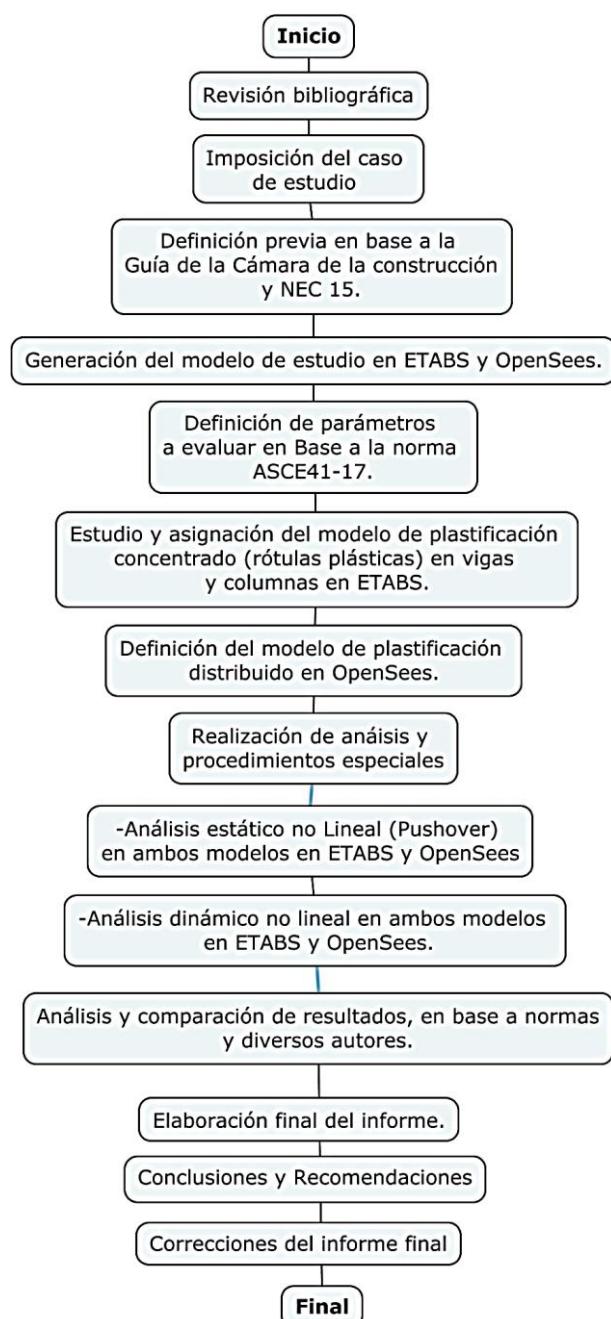


Figura 21. Diagrama de flujo.

3.2. Diseño de Investigación.

El diseño de la presente investigación es no experimental, con alcance de tipo correlacional que tiene como finalidad medir dos variables, con el fin de hallar la relación o grado de asociación que exista entre ellas, en este caso los modelos de plastificación concentrada y distribuida lo que lleva a la comprobación de la hipótesis planteada. De manera que los resultados presentados sean verificados, corroborados y considerados fiables.

3.3. Técnicas de Recolección de Datos

Para la recolección de datos se utilizó la Guía práctica de diseño de viviendas de hasta 2 pisos con luces de hasta 5 metros de conformidad a la par de la Norma de la Construcción NEC2015 (DS, HM, CG) y ACI318-14, guías, tesis y bases de datos académicas, de manera que se tenga una idea general más clara sobre el tema, para la elección del tipo de estructura, uso y materiales. Para realizar la programación y elección de tipo de elementos en OpenSees se usó como guía la documentación de usuario y la wiki de OpenSees. Para desarrollo del modelo de plastificación concentrado, se obtuvo información de las tablas de la normativa ASCE41-17. En el análisis dinámico no lineal, se usó el registro de aceleraciones del sismo Pedernales-Ecuador del 2016 con duración de 194 segundos, en unidades $\frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$ de la Estación E, en intervalos de tiempo (dt) de 0.01seg obtenidos de (IGEPN, 2016).

3.4. Población de Estudio y Tamaño de Muestra

Se realizó un muestreo por conveniencia el cual es no probabilístico ni aleatorio, se usa de acuerdo a la facilidad y disponibilidad de información.

3.5. Hipótesis de Investigación

Para esta investigación se planteó como hipótesis general Existe diferencia en precisión de resultados al analizar el modelo de plasticidad concentrada con el modelo de plasticidad distribuida.

3.6. Métodos de Análisis y Procesamiento de Datos.

Asumiendo una geometría y configuración de una estructura en la ciudad de Riobamba, el pórtico de análisis es de hormigón armado de $f'c$ de $210 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ en su totalidad y todas las varillas de refuerzo con F_y de $4200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$. Se realizó un predimensionamiento de las secciones de los elementos tipo viga y columna (Anexo 1), en Excel para revisar el comportamiento de las secciones de los elementos, además de luces y datos constructivos comunes existentes, asumiendo las mismas secciones en el pórtico de análisis. El pórtico a analizar consta de dos

columnas de 2.75 m de altura y una viga de 4 m de luz. Para el procesamiento de datos, modelación y simulación se usaron dos programas principalmente, ETABS el cual es un software de elementos finitos y OpenSees, que es un sistema de código abierto orientado a simulaciones de ingeniería sísmica. La modelación del pórtico, configuración de materiales y la definición de secciones, se realizó en ETABS19, aplicando las cargas (viva y muerta) con la combinación de carga 1.2D+1.6L, y se realizó el análisis gravitacional. Para conocer de manera más sencilla y didáctica el lenguaje de programación TCL, se usó OpenSeesNavigator, el cual es una herramienta-complemento de Matlab, esto ayudo a determinar el tipo de materiales, secciones, elementos, y procesos a realizar.

Cabe mencionar que ETABS se usó para el modelo de plasticidad concentrado y OpenSees para el modelo de plasticidad distribuido. La programación en OpenSees (OpenSees Berkley, 2019) se llevó a cabo usando softwares compatibles con el lenguaje de programación TCL, como: Matlab-OpenSeesNavigator, Notepad++. Para realizar la programación para el análisis gravitacional, se usó Notepad++(Anexo 2).

Se procedió a realizar el cálculo en Excel de rotulas plásticas con la combinación de carga antes dicha, para comprobar y verificar el proceso que ETABS hace al generar rotulas automáticas en los elementos. Posteriormente se realizó el análisis estático no lineal (Pushover), asignando cargas no lineales al modelo de plastificación concentrada automático, a sus respectivos elementos estructurales, para tener resultados que permitan obtener el nivel de desempeño y la curva de capacidad. De la misma manera se realizó la programación del análisis estático no lineal en OpenSees, con el modelo de plastificación distribuida, y de los resultados obtenidos en los análisis de ambos modelos, se presentó en un gráfico comparativo, validándose con de Vision2000. De este análisis se obtuvieron dos resultados principales, los niveles de desempeño en la estructura y la sectorización de la curva de capacidad

Finalmente, el análisis dinámico no lineal, se realizó con el evento Time-History, ingresando el registro sísmico de Pedernales-Ecuador 2016 en ambos softwares. Para realizar la programación en OpenSees, se requirió conocer herramientas de programación, modelos de materiales, elementos, secciones, procesos de convergencia, etc. Se obtiene la curva de histéresis de los elementos, la cual indicaría el comportamiento del elemento ante el sismo ingresado. Se elaboró un gráfico con los resultados de ambos modelos y posteriormente se analizó y comparó para discutir postulaciones de varios autores e identificar aspectos importantes de la respuesta que se obtuvo.

4. CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Predimensionamiento.

En la Tabla 1 se indica el momento de diseño utilizado para el predimensionamiento de la sección de la viga, además de los momentos de diseño para el acero de refuerzo a compresión y a tracción respectivamente (Anexo A1.4).

Tabla 1. Resumen de momentos para predimensionamiento de viga.

Elemento	Momento de diseño (T.m)	Momento compr. (T.m)	Momento trac. (T.m)
Viga	4.2541	4.7382	3.513

La Tabla 2 muestra la carga y área mínima para el diseño de la sección de la columna de lindero, misma que se aplica en ambas columnas del pórtico para verificar su comportamiento.

Tabla 2. Resumen de carga y área mínima de diseño para predimensionamiento de la sección de la columna.

Elemento	Carga de diseño (T)	Ag. de diseño(cm^2)
Columna	9.784	195.68

La Tabla 3 presenta el resumen de las secciones finales de los elementos, además de sus respectivos refuerzos, que serán aplicados para los análisis posteriores.

Tabla 3. Resumen de las secciones de la estructura.

Elementos	Base(cm)	Altura(cm)	As.comp (cm^2)	As.trac (cm^2)	As.cen (cm^2)
Viga	30	35	4.62	4.62	0
Columna	35	35	4.62	4.62	3.08

4.2. Análisis gravitacional.

Tabla 4. Resumen de resultados del análisis gravitacional de la estructura.

Elemento	Modelo de plastificación	Axial (T)	Cortante (T)	Momento (T.m)
Viga	Concentrado	2.5427	8.2695	4.7382
	Distribuido	2.426	7.504	4.3349
Columna	Concentrado	9.2408	2.5427	4.7382
	Distribuido	7.504	2.4257	4.3349

El análisis gravitacional realizado en base a la carga viva en combinación con la carga muerta, tomando en cuenta el peso propio de los elementos, resulta en los valores de la Tabla 4. Esto converge a lo que menciona Romero (2021), que los valores de los modelos de plastificación son muy similares, pero el modelo de plastificación distribuido presenta mayor precisión, debido a su comportamiento no lineal, esto difiere claramente en la precisión, a pesar de que se hayan tomado las mismas características, configuraciones, materiales, secciones y propiedades en ambos modelos.

4.3. Modelo de plastificación concentrada.

Se asignó las rotulas plásticas con los parámetros de carga de $1.2D+1.6L$, tanto para los elementos viga y columna de hormigón armado. Esto cambia, conforme sea el tipo de análisis que se realice como parámetros no lineales.

4.3.1. Rotulas plásticas en viga.

Los parámetros de modelación para las rotulas plásticas en vigas de hormigón armado se obtienen en base a la Figura 2. La condición en la que se encuentra el modelo de plastificación, se verifica al comparar la separación de estribos, en este caso es de 7cm como se muestra en el Anexo 1.14, obtenido con los parámetros indicados en el Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (2015).

American Society of Civil Engineers (2017) indica que, si la separación es menor o igual a $\frac{d}{2}$ y además es mayor o igual a $\frac{d}{3}$, entonces pertenece a la condición 2 Vigas controladas por cortante, si esto no se cumple pertenece a la condición 1 de Vigas controladas por flexión.

$$\text{sep} \leq \frac{d}{2} \wedge \text{sep} \geq \frac{d}{3} \therefore \text{Condición 2} \quad (2)$$

$$7\text{cm} \leq 14.67\text{cm} \quad 7\text{cm} \geq 9.77\text{cm} \rightarrow \text{No cumple} \therefore \text{Condición 1}$$

La condición 3 vigas controladas por un inadecuado desarrollo o empalmes a lo largo del tramo no aplica para este caso porque no se tienen empalmes, tampoco el caso 4 son Vigas controladas por un inadecuado empotramiento en la unión viga -columna ya que no analiza el elemento nudo.

- El primer parámetro de la condición 1 es analizar las cuantías de acero, a tracción y compresión, en este caso es igual, por lo tanto, es el resultado es 0.

$$\frac{\rho - \rho'}{\rho_{bal}} \quad (3)$$

- El segundo parámetro de reforzamiento transversal indica si es Confinado (C) o no confinado (NC). Si $\text{sep} \leq \frac{d}{3}$ es Confinado, además el cortante soportado por los refuerzos transversales V_s , debe ser mayor a $\frac{3}{4}V_u$. Aguiar et al. (2015) mencionan que:

$$V_s = d \times A_v \times \frac{f_y}{\text{sep}} \quad (4)$$

$$V_s = 12.981 \text{ T}$$

El resultado para el segundo parámetro se obtiene con la ecuación 4:

$$\text{sep} \leq \frac{d}{3} \wedge V_s > \frac{3}{4}V_u \therefore C \quad (5)$$

$$7 \text{ cm} \leq 9.77 \text{ cm} \wedge 12.981t > 7.3019t \therefore C$$

- Para el tercer parámetro, se usa la ecuación 5, en unidades de in y klb.

$$\frac{V}{b \times d \times (f'c)^{0.5}} \quad (6)$$

El resultado para el tercer parámetro es de 0.091, así que se tomó el valor mínimo de 0.25 de la Figura 2, equivalente a la primera fila. En este caso no se necesita interpolación y se presenta en la Tabla 5. Resultados conforme la Normativa ASCE41-17.Tabla 5.

Tabla 5. Resultados conforme la Normativa ASCE41-17.

a	b	c	IO	LS	CP
0.025	0.05	0.2	0.01	0.025	0.05

Para calcular los parámetros especiales para modelamiento de la rótula se usan las ecuaciones 6,7,8 de acuerdo a Sistema de Computación CEINCI-LAB (2020):

$$\Theta u = \Theta y + a \quad (7)$$

$$\Theta r = \Theta y + b \quad (8)$$

$$Mr = c \times My \quad (9)$$

Para el momento último (M_u) se obtiene de la Ecuación 9 compartida por American Society of Civil Engineers (2017)

$$Mu = My + a \times E \times I \times (\Theta u - \Theta y) \quad (10)$$

Velásquez , 2017. indica que las ecuaciones de 10,11 son:

$$\theta_y = \left(\frac{My}{EI} \right) L_p \quad (11)$$

$$L_p = 0.1l_n + 0.015 \times d_b \times f_y \quad (12)$$

$$My = f_y A_s \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (13)$$

$$My = 5.3318 \text{ T.m}$$

$$L_p = 0.37 \text{ m}$$

$$\theta_y = 0.001006 \text{ rad}$$

$$\theta_u = 0.0260061 \text{ rad}$$

$$\theta_r = 0.0510061 \text{ rad}$$

$$Mr = 1.0664 \text{ T.m}$$

$$Mu = 7.5550 \text{ T.m}$$

El software ETABS en base a la configuración previa del modelo, cargas, secciones y materiales, realiza los cálculos necesarios de manera automática, como relación de cuantía, cortante, obteniendo las rótulas para próximos procesos conforme sea la necesidad del análisis.

Tabla 6. Comparación de resultados de rotula plástica automática y manual.

Resultados ETABS Automático			Cálculo Manual		
Parámetro	Rot (rad)	M (T.m)	Parámetro	Rot (rad)	M (T.m)
A	0.0000	0.0000	A	0.0000	0.0000
B	0.0000	5.3583	B	0.0010	5.3318
C	0.0260	7.5246	C	0.0260	6.5550
D	0.0260	1.0717	D	0.0260	1.0664
E	0.0510	1.0717	E	0.0510	1.0664
IO	0.0100	7.8660	IO	0.0100	7.8660
LS	0.0250	7.8660	LS	0.0250	7.8660
CP	0.0500	7.8660	CP	0.0500	7.8660

Se determinaron para el caso de carga de la viga, considerando el momento de fluencia, que se obtiene de la condición ultima de la viga doblemente reforzada (Torres & Vásquez, 2021).

Los resultados presentados en la Tabla 6 ,muestran similitud sin mayor variación, en los valores calculados manualmente con la aplicación de la normativa ASCE41-17 en comparación con los resultados de la rótula plástica generada de manera automática en el software de elementos finitos.

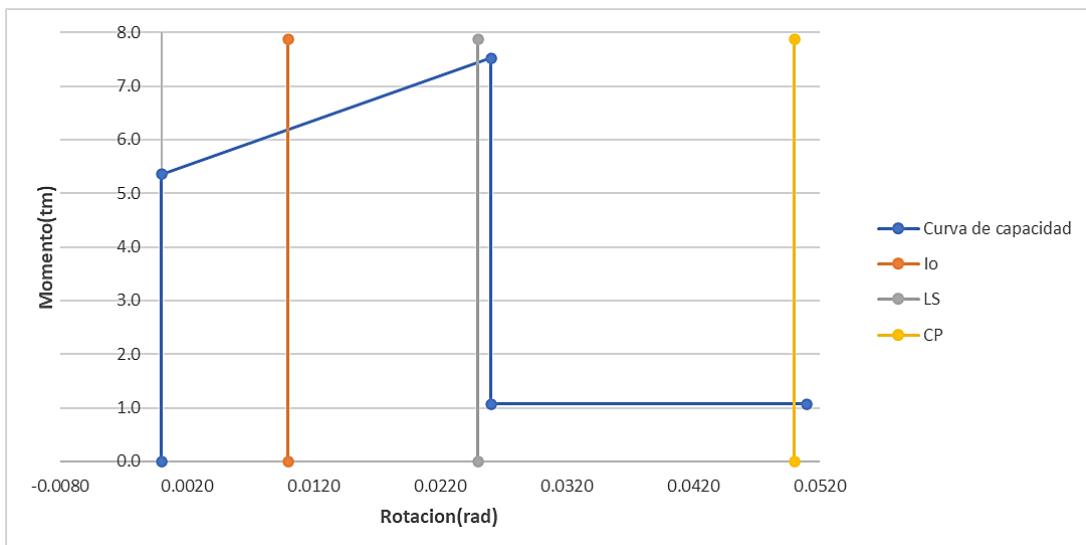


Figura 22. Diagrama momento-curvatura de la rótula plástica automática para la viga.

En la Figura 22, se puede observar el comportamiento de la sección mientras fue sometida a la combinación de cargas viva y muerta, el momento de fluencia es de 5.3583 T.m alcanzando un momento máximo de 7.5246 T.m en la zona de seguridad de vida , en este punto la sección se ha deformado 0.026 rad, continuando el análisis con momentos residuales de 1.0717 T.m, que alcanzan curvaturas de hasta 0.051 rad superando la zona de prevención de colapso, estas características dependen de la geometría y materiales de la sección (García & Bairán, 2018).

4.3.2. Rotulas plásticas en columnas.

Las rotulas plásticas en columnas de hormigón armado se obtienen en base a la Figura 3. Las ecuaciones no son válidas para columnas con cuantía ρ_t menor que 0,0005 (American Society of Civil Engineers,2017)

Según (Polo, 2021) se considera como columnas controladas por el inadecuado desarrollo o empalme a lo largo de la longitud cuando se cumple con:

$$F_s = \left(1.25 \left(\frac{Lb}{Ld} \right)^{2/3} \right) \times F_y L \leq \frac{F_y L}{E} \quad (14)$$

Donde

Lb es la longitud de traslape colocado

Ld longitud de traslape requerido.

En este caso al ser una estructura aporticada de 2 niveles con altura de entrepiso de 2.75 m, no se consideran empalmes, siendo lb igual a 0. Por lo tanto, resulta

$$\frac{0 \text{ kg}}{\text{cm}^2} \leq \frac{5250 \text{ kg}}{\text{cm}^2} \therefore \text{Columna no controlada por el inadecuado desarrollo a lo largo de la longitud}$$

Se definen los términos para las columnas no controladas por el inadecuado desarrollo a lo largo de la longitud, con la ecuación de:

$$a = \left(0.042 - 0.043 \left(\frac{NUD}{AgF'ce} \right) + 0.63\rho t - 0.023 \left(\frac{VyE}{VcolOE} \right) \right) (\text{Mpa units}) \geq 0.0 \quad (15)$$

Donde:

NUG=Carga a compresión del elemento bajo cargas gravitacionales.

NUD=Carga axial de diseño del elemento.

Ag=área de la sección de la columna.

F'ce=Resistencia a compresión esperada del concreto.

Según (ASCE/SEI, 2017) el resultado para esta relación $\left(\frac{NUD}{Ag \times F'ce} \right)$ debe ser como mínimo 0.1, en este caso es de 0.052 por lo que se toma el mínimo.

ρt : Cuantía de acero longitudinal, este valor no debe ser mayor a 0.0175 ni menor que 0,0075.

$$\rho t = \frac{As}{Ag} \quad (16)$$

$$\rho t = 0.0101 \therefore \text{Cumple}$$

VyE=Cortante en la columna de fluencia por flexión, obtenida de la división del cortante por cargas verticales sobre la relación de la sumatoria de los momentos en los extremos con la longitud de la columna.

$$VyE = \frac{Mudsup + Mudinf}{hentre} \quad (17)$$

$$VyE = 17089.2N$$

Vcol=Resistencia en las columnas en base a las propiedades de los materiales obtenida con:

$$Vcol0 = KnlxVcol0 = Knl[\alpha_{col} \times \frac{(AvfytL/E \times d)}{sepc} + \lambda \left(\frac{0.5 \times (f'cL/E)^{0.5}}{\frac{MuD}{VuD \times d}} \right) \times \left(1 + \left(\frac{NuG}{0.5Ag \times (f'cL/E)^{0.5}} \right) \right)^{0.5} \times 0.8Ag] \quad (18)$$

$$Vcol0 = 277998.99N$$

Donde:

knl=1.0 en regiones donde la ductilidad es menor o igual a 2, 0.7 en regiones donde es mayor o igual a 6, y varía linealmente para ductilidades entre 2 y 6. Del reporte generado por ETABS en la Figura 23 se muestra curva de momento-curvatura de la sección, se determinan los valores para calcular la ductilidad con la Ecuación 1, en este caso la ductilidad de la columna es de 10, por ende, se toma el valor 0.7 correspondiente al límite 6.

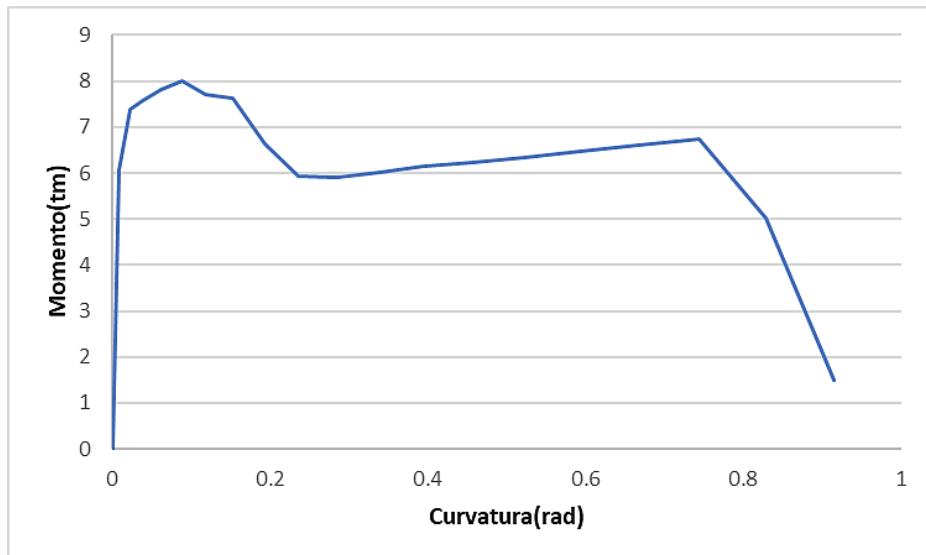


Figura 23. Diagrama de momento-curvatura del elemento columna.

α_{col} =Factor 1 para $sepc/d \leq 0.75$, 0 para $sepc/d \geq 1$ y varía linealmente $sepc/d$ entre 0.75 y 1.
Se obtiene que

$$\frac{sepc}{d} = 0.273 \leq 0.75 \therefore \alpha_{col} = 1$$

A_v =área de refuerzo transversal de la columna. Se determina a través del valor mayor entre la Ecuación 19 y 20 según la normativa (NEC,2015):

$$Ash1 = 0.3 \times bc \times sepc \times \left(\frac{Ag}{Ac} - 1 \right) \times \frac{f'_c}{f_y} \quad (19)$$

$$Ash1 = 2.204 \text{ cm}^2$$

$$Ash2 = 0.09 \times bc \times sepc \times \frac{f'_c}{f_y} \quad (20)$$

$$Ash2 = 0.972 \text{ cm}^2$$

En este caso se escoge Ash1 para el análisis.

f_ytL/E : Resistencia del acero transversal.

d = Distancia de la fibra de compresión al centroide del refuerzo.

$sepc$ =separación del refuerzo transversal.

f'_cL/E =Resistencia a compresión del concreto.

$MuD/(VuD \times d)$ =División entre momento y cortante de diseño de la columna, no puede ser mayor a 4 ni menor a 2, en este caso se obtiene 6.37, por lo tanto, se escoge el límite máximo de 4.

Además, se debe considerar que la relación de la Ecuación 21, no puede ser ≥ 0.2 , en este caso se obtuvo 0.1019 por lo que no cumple con el mínimo entonces se toma 0.2

$$\left(\frac{V_y E}{V_{colOE}} \right) \quad (21)$$

$$\left(\frac{N_u D}{A g' c E} \leq 0.5 \quad b = \frac{0.5}{5 + \frac{N_u D x f' c E}{0.8 A g' c E \rho t x f y t E}} - 0.01 \geq a \right) \quad (22)$$

$$c = \left(0.24 - 0.4 \frac{N_u D}{A g' c E} \right) \geq 0 \quad (23)$$

Se reemplazan los valores en la Ecuación 14 para encontrar el punto a obteniendo 0.03806 rad. En el punto b se obtuvo 0.07603 rad y c con 0.0571 rad, los cuales se encontraron con las Ecuaciones 22 y 23.

Tabla 7. Resultados de rotulas plásticas del elemento columna.

Calculo manual		Resultados ETABS		
		Automático		
	Rot (rad)	M (T.m)	Rot (rad)	M (T.m)
A	0.0000	0.0000	A	0
B	0.0014	7.1038	B	0.0000
C	0.0395	8.5982	C	0.0396
D	0.0395	1.1504	D	0.0400
E	0.0800	1.1504	E	0.0808
IO	0.0051	15.1690	IO	0.0050
LS	0.0381	15.1690	LS	0.0381
CP	0.0534	15.1690	CP	0.0534

Como se muestra en la Tabla 7, el momento de fluencia (M_y) del cálculo manual se consideró como el punto del diagrama de interacción, cuando la carga es igual a 0, ya que es el caso más crítico, ubicado en el eje neutro, y el momento que se genera es igual a 7.1038 T.m.

Hay variaciones especialmente en el momento de fluencia y momento último, esto se debe a que el cálculo manual fue realizado en base a la Figura 5, la cual presenta que el comportamiento empieza desde el origen y se extiende al punto de fluencia, mientras que ETABS considera un porcentaje menor al de fluencia, y la variación en el momento último que se calculó manualmente en base a ecuaciones experimentales, mientras que ETABS considera parámetros y propiedades no lineales como la curva de capacidad.

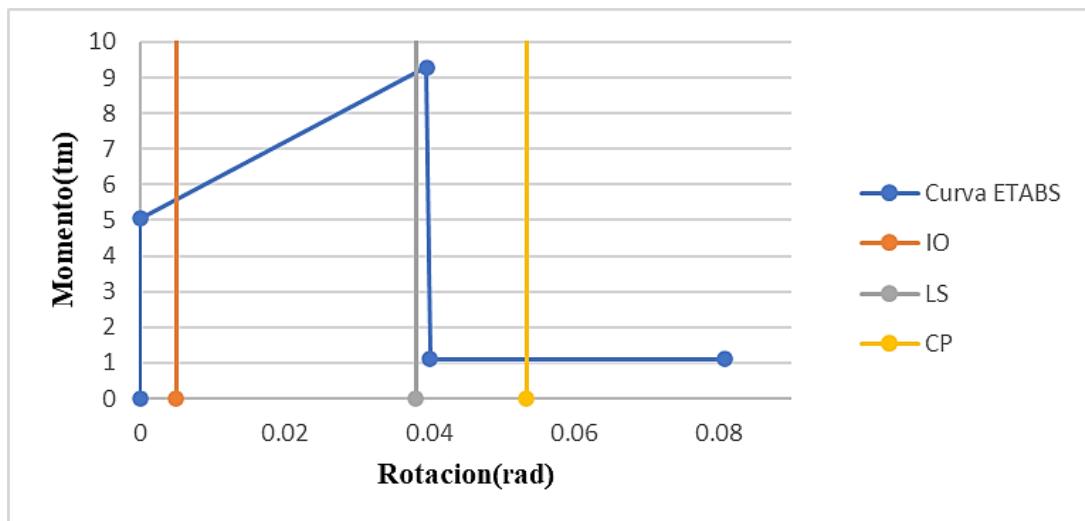


Figura 24. Rotula plástica automática para el elemento columna.

En la Figura 24, se puede observar el comportamiento de la sección mientras fue sometida a la combinación de cargas viva y muerta, el momento de fluencia es de 5.0549 T.m alcanzando un momento máximo de 9.2908 T.m en la zona de seguridad de vida , en este punto la sección se ha deformado 0.0396 rad, continuando el análisis con momentos residuales de 1.0954 T.m, que alcanzan curvaturas de hasta 0.0808 rad superando la zona de prevención de colapso, estas características dependen de la geometría y materiales de la sección (García & Bairán, 2018). En vista de que los resultados son similares, se optó por utilizar las rotulas plásticas automáticas generadas por el programa ETABS, para análisis posteriores en el modelo de plastificación concentrada en los elementos columnas y viga.

4.4. Modelo de plastificación distribuida.

El análisis para este modelo se realiza en OpenSeesNavigator , el cual ofrece un interfaz gráfico al usuario, como se muestra en la Figura 25, es un complemento para Matlab de código libre que es compatible con lenguaje TCL, cuyos análisis los realiza con OpenSees. Aun así es complicada su aplicación ya que es necesario conocer términos, comandos, análisis, lenguaje de programación, objetos, elementos, materiales, algoritmos,etc.

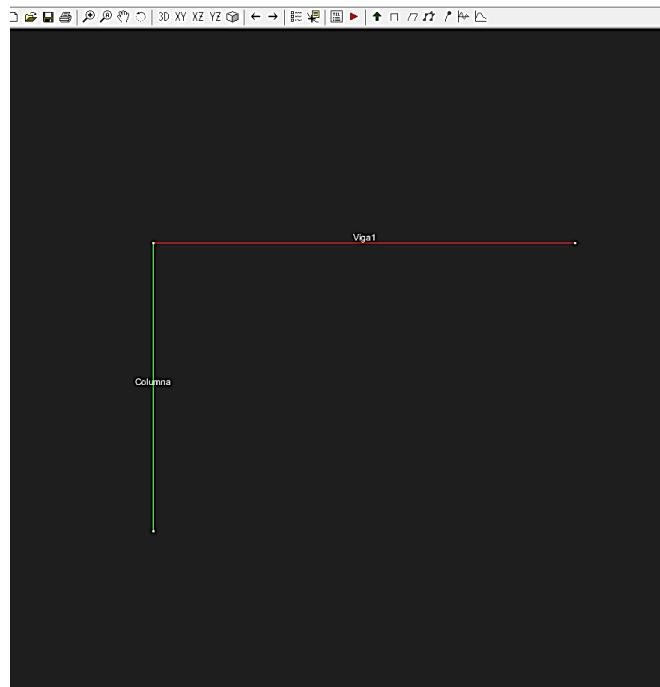


Figura 25. Modelación e interfaz de OpenSeesNavigator.

4.4.1. Elementos de sección tipo fibra en la viga.

En OpenSees los modelos de plastificación distribuida como los elementos de sección tipo fibra, se basan en modelos de elementos finitos, además de materiales que contienen parámetros no lineales previamente definidos. Esto hace que este modelo sea más preciso al determinar análisis con secciones, las cuales se pueden dividir en varias partes dependiendo de la necesidad (Velasco & Guerrero, 2020).

En base a la Figura 8 se determinan los parámetros en el comando Quadrilateral Patch, que presenta un interfaz como se observa en la Figura 26 y se ingresan los valores de acuerdo a las dimensiones de las secciones previamente predimensionadas, se coloca el número de 5 fibras en la dirección x, la cual es la que se desea analizar. Para colocar el acero de refuerzo se usa el comando straight el cual presenta un interfaz como se muestra en la Figura 27, mismo que permite colocar a lo largo de un eje el número de varillas, su área y material correspondiente,

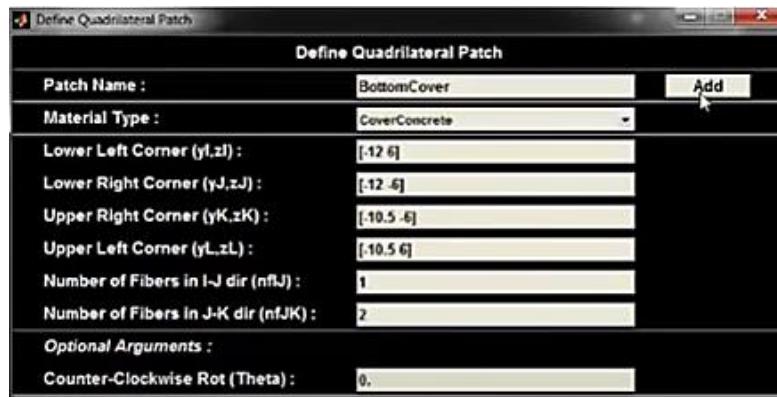


Figura 26. Interfaz del comando Quadrilateral Patch para creación de sección y discretización en fibras.

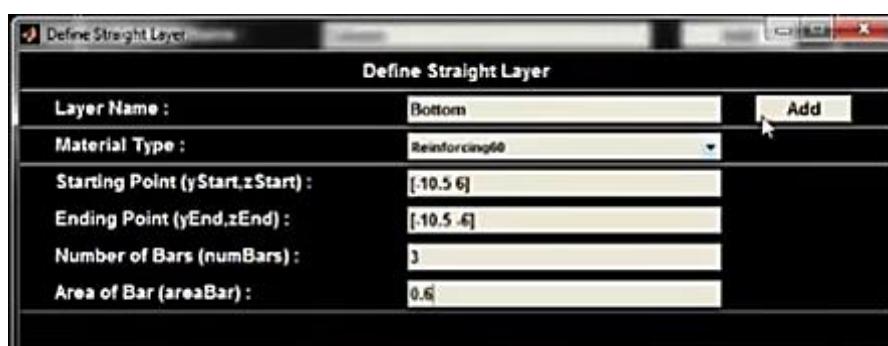


Figura 27. Interfaz del comando Straight para aceros de refuerzo.

Es importante realizar la discretización de secciones de acero, recubrimientos, ya que al analizar se considera como un solo elementos. De esta manera se define un elemento en secciones tipo fibra como se observa en la Figura 28.

```
#Secciones Viga
#elementos lineales Viga
set Aviga 1050;
set Iz 107187.5;
# Sección fibra-hormigón armado Viga
set Hvig [expr 30];
set Bvig [expr 35];

section fiberSec $BeamSecTag {};
#Patch Rectangular
#hormigon
#patch rect $matTag $SubdivY $SubdivZ $yi $zi $yj
patch rect $matIDHormigon 5 5 [expr -$Hvig/2] [expr -$Bvig/2] [expr $Hvig/2] [expr $Bvig/2];
#Refuerzo distribuido
layer straight $matIDAcero 3 $A_phil4 [expr $Hvig/2- $rec] [expr $Bvig/2- $rec] [expr $Hvig/2- $rec] [expr -$Bvig/2+$rec];
layer straight $matIDAcero 3 $A_phil4 [expr -$Hvig/2+$rec] [expr $Bvig/2- $rec] [expr -$Hvig/2+$rec] [expr -$Bvig/2+$rec];
};
```

Figura 28. Código para determinación de sección tipo fibra en viga para el pórtico de análisis.

4.4.2. Elementos de sección tipo fibra en la columna.

De la misma manera que en la configuración para la viga, se determinan los parámetros con el comando Quadrilateral Patch y se ingresan los valores de acuerdo a las dimensiones de la sección predimensionada, se coloca el número de 5 fibras en la dirección x, que es la que desea analizar, y se coloca el acero de refuerzo con el comando straight, definiendo los 3 ejes donde se colocan las varillas, su área y material correspondiente (Figura 29)

```
#Secciones columnas cm2
#elementos lineales Columna
set Acol [expr 35*35];
set Iz 107187.5;
#Secciones fibra
set sec_HA 1;
set sec_Acero 2;
# Sección fibra-hormigón armado Viga
set rec [ expr 4];
set Hcol 35;
set Bcol [expr 35];
)section fiberSec $ColSecTag {
#Patch Rectangular
#hormigon
#patch rect $matTag $SubdivY $SubdivZ $yi $zi $yj
patch rect $matIDHormigon 5 5 [expr -$Hcol/2] [expr -$Bcol/2] [expr $Hcol/2] [expr $Bcol/2];
#Refuerzo distribuido
layer straight $matIDAcero 3 $A_phil4 [expr $Hcol/2- $rec] [expr $Bcol/2- $rec] [expr $Hcol/2- $rec] [expr -$Bcol/2+$rec];
layer straight $matIDAcero 2 $A_phil4 [expr 0.5*($Hcol-2*$rec)/2.0] [expr $Bcol/2- $rec] [expr 0.5*($Hcol-2*$rec)/2.0] [expr -$Bcol/2+$rec];
layer straight $matIDAcero 3 $A_phil4 [expr -$Hcol/2+$rec] [expr $Bcol/2- $rec] [expr -$Hcol/2+$rec] [expr -$Bcol/2+$rec];
};
puts "Secciones fibra creadas"
```

Figura 29. Código para creación de sección tipo fibra en columnas para el pórtico de análisis.

4.5. Análisis estático no lineal (Pushover).

Este análisis ayuda a determinar el comportamiento inelástico de la estructura, por medio de la relación entre el cortante basal y el desplazamiento del nodo de control, el cual se ubica en el punto más alto del pórtico (Malo & Sempértegui, 2019).

Para realizar el análisis se debe configurar el caso de carga gravitacional no lineal (CGNL), esta configuración es importante para las rotulas plásticas. Esta carga no lineal, como se muestra en Figura 30, inicia desde condiciones cero y se determina con el caso especial de combinación de carga reactiva de 1CD+0.25CV según Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (2015).

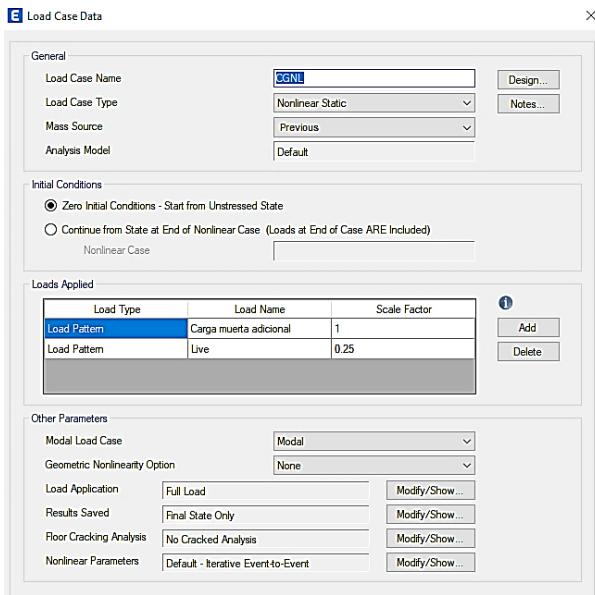


Figura 30. Configuración del caso de carga Gravitacional no lineal.

Previamente realizado el modelo, determinadas las propiedades, secciones y configuraciones de los elementos, se configuran las rotulas plásticas para la viga y las columnas, usando las tablas de la normativa ASCE41-17.

Éstas se asignan al 5% de la longitud al inicio y final de cada uno de los elementos, ya que se espera que estos mecanismos no se produzcan en los extremos de los mismos, porque aquí es donde se concentra mayormente el daño como menciona Flores (2015) , al ser un punto de disipación de energía de los elementos, que aparecen en zonas de mayor demanda por flexión, entrando al rango plástico y llegando a su máxima capacidad de deformación inelástica (Polo, 2021).

La Figura 31 y Figura 32 muestran las configuraciones de las rotulas plásticas tanto en viga como en columnas.

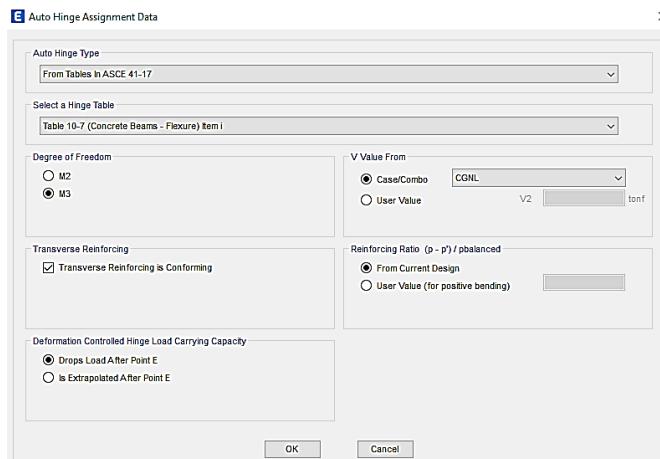


Figura 31. Configuración de rotulas plásticas para la viga.

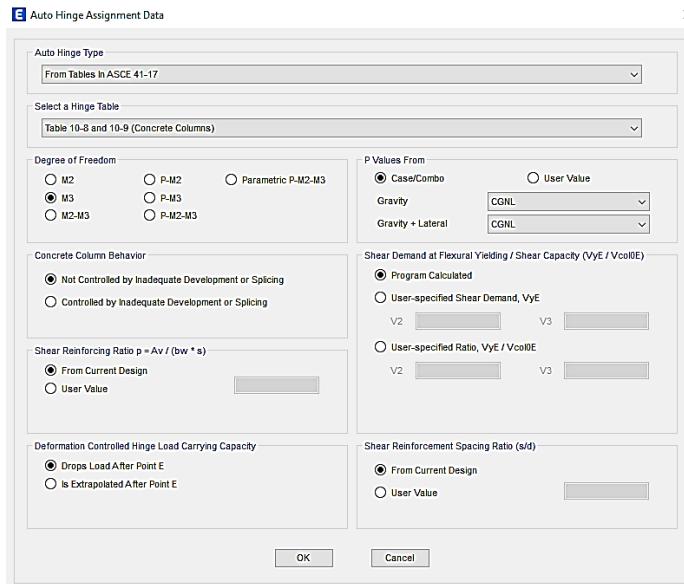


Figura 32. Configuración de rotulas plásticas para columnas.

En la Figura 33 se asignan las rotulas automáticas en los elementos estructurales del pórtico.

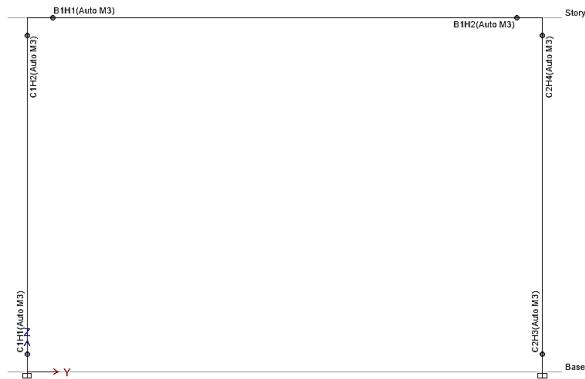


Figura 33. Asignación de rotulas plásticas automáticas en la estructura.

En la Figura 34 se encuentra el caso de carga Pushover y se analiza como un caso de carga no lineal, mismo que tiene como condición inicial continuar el proceso a partir del análisis gravitacional no lineal CGNL, ya que se pide considerar los esfuerzos y deformaciones asociadas del mismo (Polo, 2021) .Se define el parámetro de carga de aceleración en la dirección x (González, 2018).

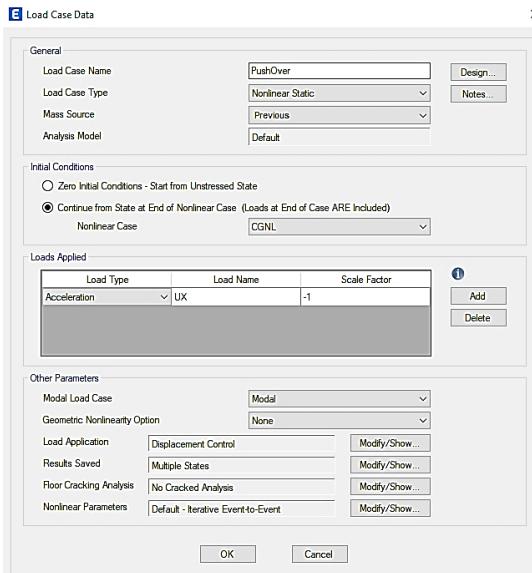


Figura 34. Configuración del caso Pushover.

Por otra parte este análisis se realizó por el método de control por desplazamiento en load application , como explica Computers and Structures Inc. (2021), el cual consiste en determinar un punto de control y asignar un desplazamiento objetivo, que pueda alcanzar la estructura, de manera que se pueda determinar la carga incremental necesaria, para llegar al desplazamiento especificado en el punto de monitoreo.

La forma en la que el software ETABS halla el desplazamiento máximo de la estructura es por medio de $0.04H$ donde H es la altura total de la estructura (Cesar, s.f.). Para este caso se obtiene 11 cm, pero se quiere visualizar lo que sucede con la estructura luego del fallo, por ese motivo se verifica el análisis con 12 cm (Figura 35).

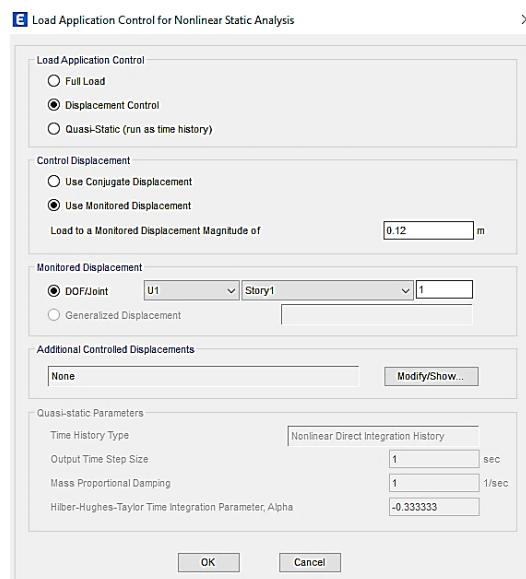


Figura 35. Configuración del punto de control y desplazamiento en el análisis Pushover.

Una vez definidos los parámetros de control de desplazamiento, se configura los estados múltiples con el número mínimo de 25 y máximo de 100 en results saved, los cuales son los puntos que se generan para realizar la curva de capacidad (Figura 36).

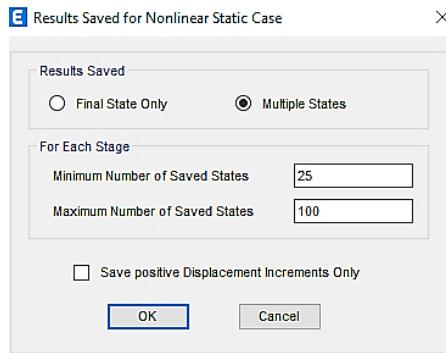


Figura 36. Configuración de results saved en el análisis Pushover .

De este análisis se obtiene resultados que se muestran en la Tabla 8 ,que ayudan a determinar el comportamiento estructural, como los niveles de desempeño en las rotulas plásticas y la curva de capacidad. Se realizó el análisis Pushover en un total de 30 steps, donde cada step representa un desplazamiento de 0.004 m.

Tabla 8. Niveles de desempeño de rotulas plásticas en la estructura luego del análisis Pushover.

Niveles de daño en rotulas plásticas					
Step/30	Desplazamiento(m)	Color	Nivel de desempeño	Elemento	Ubicación
5	0.0219	Verde	Operacional	Ambas	Extremo
				columnas	inferior
23	0.1083	Celeste	Pre-colapso	Ambas	Extremo
				columnas	inferior

En el estado final de las rotulas plásticas de la estructura, existe un daño considerable por lo que se encuentra en la zona Pre-colapso y si la carga aumenta, terminará fallando (Toapanta & Vélez, 2024). Esto se puede corroborar en la Figura 37.

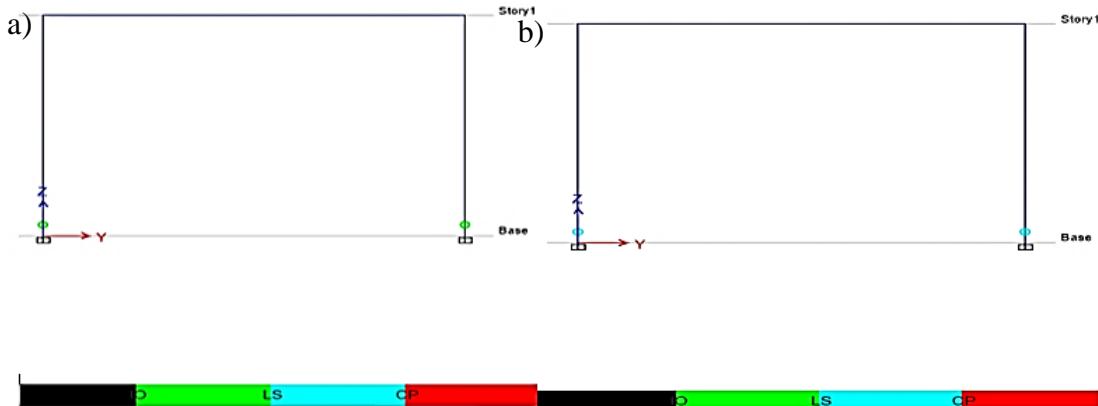


Figura 37. Estados en las rotulas plásticas respectivamente a) Aparición de rotulas plásticas en columnas, b) Estado final de daño en rotulas.

Esto indica que, para las secciones asignadas en la estructura aporticada, el diseño no presenta seguridad, ya que se generan daños graves en las rotulas plásticas de las columnas, cuando estas deberían aparecer en las vigas para asegurar y demostrar el criterio de columna fuerte-viga débil (Toapanta & Vélez, 2024).

El comportamiento obtenido podría deberse a varios aspectos y factores como que, se realizó un predimensionamiento, basado en dimensiones típicas existentes en la construcción, la sección de la viga presenta menos rigidez que las columnas. Las columnas al ser más rígidas, tienden a absorber mayor fuerza cortante y momentos flexores, los cuales son generados por las fuerzas laterales, además pueden no contar con el suficiente refuerzo transversal para soportar la demanda. Asimismo, es una estructura analizada en 2 dimensiones, por lo que no contiene diafragmas, que ayuden a distribuir las cargas laterales y axiales, sumado al caso de combinación de carga especial que se usó para definir y asignar las rotulas plásticas en los elementos.

También se presenta la Figura 38 correspondiente a la curva de capacidad de la estructura para la dirección x, la cual indica la relación entre el cortante basal y el desplazamiento hasta llegar a la falla de la estructura.

La capacidad de una estructura depende de factores como la resistencia de los materiales y la deformación de cada elemento que la constituye (Quinto & Chaverra, 2022).

La aplicación de cargas influye en la rigidez de la estructura según Medina & Galarza (2020), ya sea porque las cargas aplicadas, generan perdida de rigidez en los elementos y sumado a las

cargas laterales, hace que la estructura en su totalidad sufra degradación de rigidez en el punto de fluencia hasta llegar al límite de resistencia (Quinto & Chaverra, 2022)

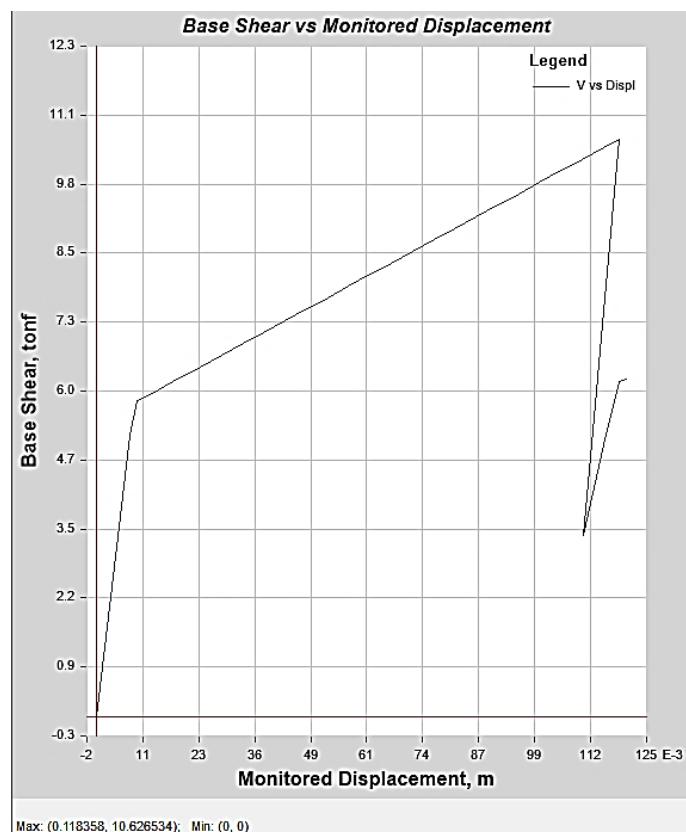


Figura 38. Curva de capacidad del pórtico aplicado el modelo de plastificación concentrado.

Con la curva de capacidad se evidencia que tan rígida es la estructura, de manera que se esperaría que soporte grandes cargas sin que se generen desplazamientos excesivos. Es importante mencionar que el análisis llega al punto máximo, pero el análisis continuo hasta cumplir con el desplazamiento objetivo de 12 cm, esto por medio de esfuerzos residuales, mostrando una evidente caída de rigidez en la estructura.

En la Figura 39, se observa la gráfica de la curva de capacidad generada en ETABS por medio del modelo de plastificación concentrada (rotulas plásticas), se compara con los resultados obtenidos de la programación en OpenSes, del modelo de plastificación distribuida (elementos con sección fibra) (Anexo3).

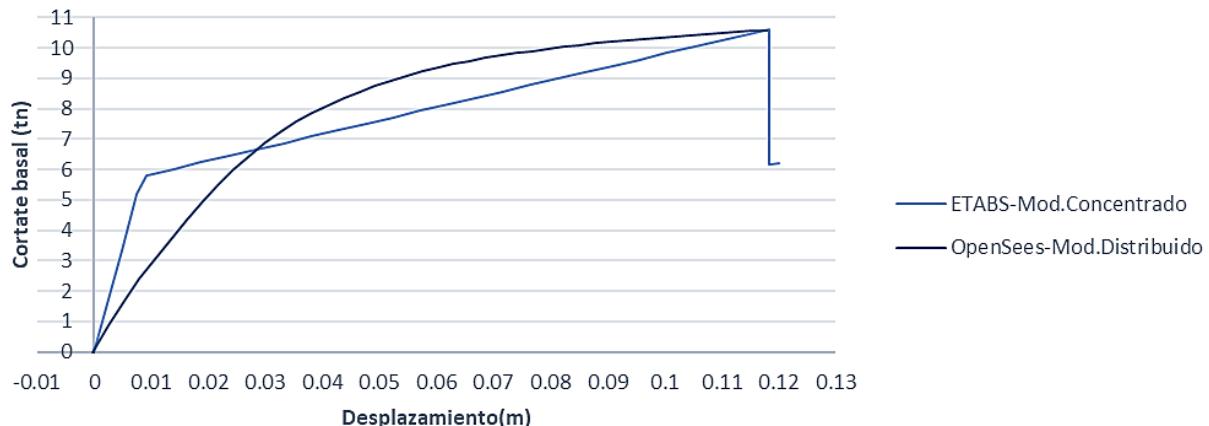


Figura 39. Comparación de curvas de capacidad de los modelos concentrado y distribuido.

Inicialmente se observa que el modelo concentrado tiene un comportamiento idealizado, debido a la linealización directa del ASCE 41-17 del diagrama momento-curvatura de las rotulas. En cambio, el modelo de plastificación distribuida, discretiza la sección transversal de los elementos que conforman la estructura, de manera que, al realizar el análisis estático no lineal, presenta mayor detalle y definición del comportamiento, siguiendo una tendencia idéntica al obtenido con el otro modelo y el punto de fallo es similar. El modelo de plastificación concentrada es más adecuado al analizar estructuras cercanas al colapso, mientras que el modelo de plastificación distribuida es mejor en estados iniciales o de daño reducido (Benavent, 2021).

Tabla 9. Resultados máximos de las curvas de capacidad de los modelos concentrado y distribuido.

Modelo de plastificación	Cortante Basal (T)	Desplazamiento (cm)
Concentrado	10.6265	11.8358
Distribuido	10.5814	11.7967

Finalmente, se han sectorizado los niveles de desempeño de la estructura de acuerdo al Comité VISION 2000 (SEAOC, 1995), como lo explica Poland et al. (1995) de acuerdo a lo citado en Gallegos (2016), para facilitar la comprensión del comportamiento de resistencia y nivel de respuesta de la estructura ante eventos sísmicos (Aguilar, 2023). Tabla 10 muestra los valores correspondientes a los rangos límites de desplazamientos que se ubicaron en la Figura 40 correspondiente a la sectorización de las curvas de capacidad de la estructura.

Tabla 10. Cálculo para sectorización de la curva de capacidad.

Zona.Vision2000	N. de desempeño ETABS	Parámetros	Desplazamiento (m)
Tot.Operacional	Ocupación Inmediata (IO)	$\Delta F E$	0.0091
Operacional	Ocupación Inmediata (IO)	$0.30\Delta P$	0.0424
Seguridad	Seguridad de vida (LS)	$0.30\Delta P$	0.0756
Pre-Colapso	Prevención del colapso (CP)	$0.20\Delta P$	0.0978
Colapso	Colapso	$0.20\Delta P$	0.1183

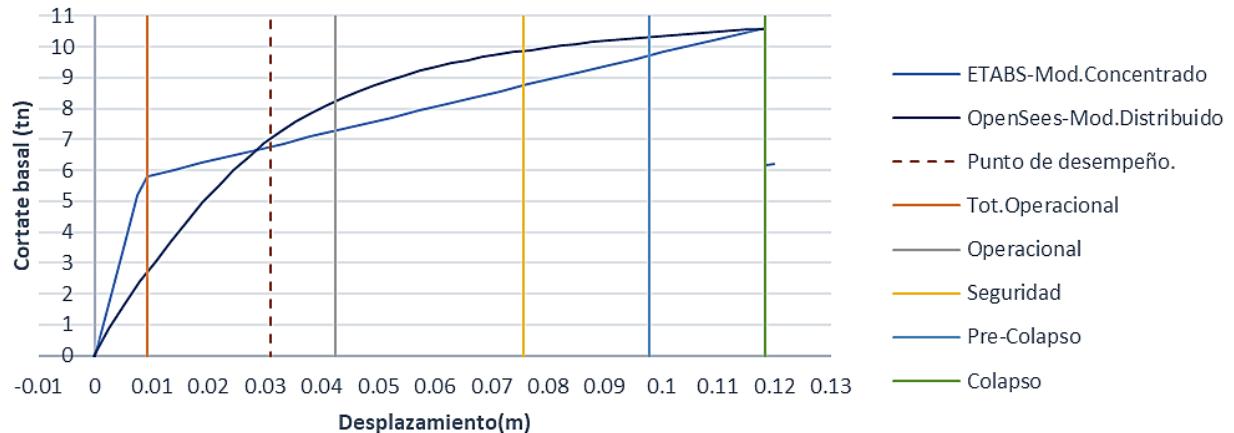


Figura 40. Sectorización de las curvas de capacidad de los modelos concentrado y distribuido.

En la Figura 40 la curva de capacidad del análisis estático no lineal, el modelo de plastificación concentrado presenta una pendiente constante hasta su punto de fluencia en 5.8075 T con un desplazamiento alcanzado de 0.009144 m en su nivel Totalmente operativo, a medida que avanza el desplazamiento, la carga crece hasta que aparecen las rótulas en los extremos inferiores de ambas columnas, evidenciando que no se está cumpliendo con el criterio de Columna fuerte-Viga débil, porque dichos elementos son los que están absorbiendo el daño. Una vez que se alcanza el desplazamiento de 0.0219 m aun en estado Totalmente operativo, en este punto la carga aumenta linealmente hasta que el nivel de desempeño de las rotulas llega a un estado de Pre-colapso, cuando se ha alcanzado un desplazamiento de 0.1083 m. El análisis continuó hasta que alcanza el cortante basal máximo de 10.6265 T con desplazamiento máximo de 0.1184 m, en este punto la estructura colapsa, pero continua hasta cumplir con el desplazamiento objetivo. Aquí hay una importante observación, en este modelo llegó a cumplir con el desplazamiento objetivo a pesar de su evidente falla por medio de esfuerzos residuales.

En el modelo de plastificación distribuida la curva de capacidad se presenta ligeramente con mayor capacidad inelástica, tiende a representar un comportamiento más real. Inicialmente alcanza un punto de fluencia ligeramente mayor que el modelo anterior, llegando a 7.248 T con 0.0327 m en su estado Operacional, la carga aumenta hasta que llega a su punto de cortante máximo de 10.5814 T con un desplazamiento máximo de 0.118 m, en este punto el análisis se detiene sin llegar al desplazamiento objetivo, ya que la estructura colapsó.

Además, se observa que el punto de desempeño o desplazamiento objetivo de la estructura según la ASCE41-13NPS, es de 0.031 m y se ubica en el rango de la zona totalmente operacional. Según Campos & Leandro (2022), este punto indica el equilibrio entre la demanda sísmica y la capacidad de la estructura.

Por medio de la comparación se considera que el modelo de OpenSees representa de mejor manera el comportamiento de la estructura conforme menciona Sánchez (2023), ya que obtiene los parámetros principales de la rótula concentrada y representa un enfoque más realista por medio de las características determinadas por las secciones (Caro & Arias, 2018).

4.6. Análisis dinámico no lineal (Time-History).

El análisis dinámico no lineal (tiempo-historia) es importante ya que las estructuras siempre están sujetas a acciones laterales, el mismo es más completo y realista porque durante el evento sísmico, el movimiento de una estructura tiene diversas direcciones, y su comportamiento cambia conforme el paso del tiempo (Merchán, 2010).

En la presente investigación se realizó un análisis dinámico bajo excitación sísmica uniforme Dynamic Uniform Earthquake Ground Motion . En este tipo de análisis se aplica un registro sísmico de aceleraciones en los nudos de la base de la estructura, en la misma dirección (Merchán, 2010).

El análisis dinámico se realizó únicamente en el sentido x, aplicando las aceleraciones del registro sísmico presentado en la Figura 41 y se configura en la Figura 42.

Figura 41. Registro Tiempo-Historia del sismo Pedernales 2016.

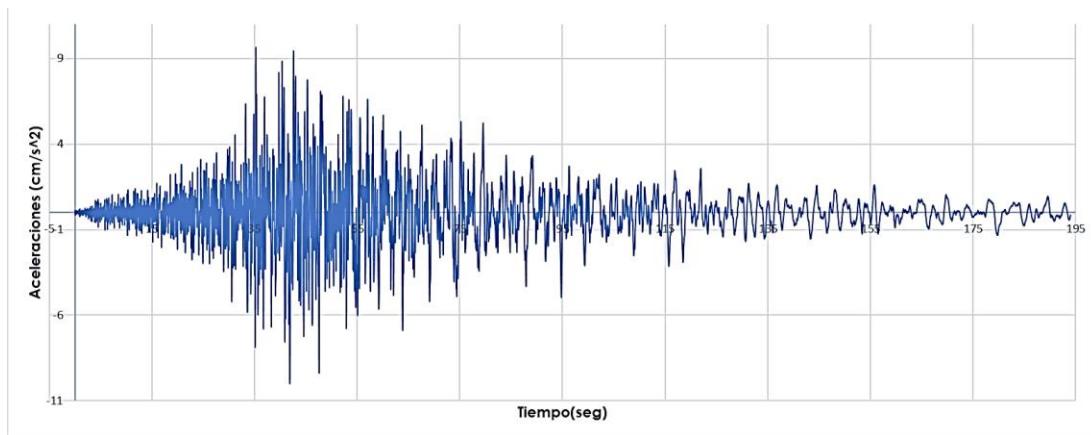
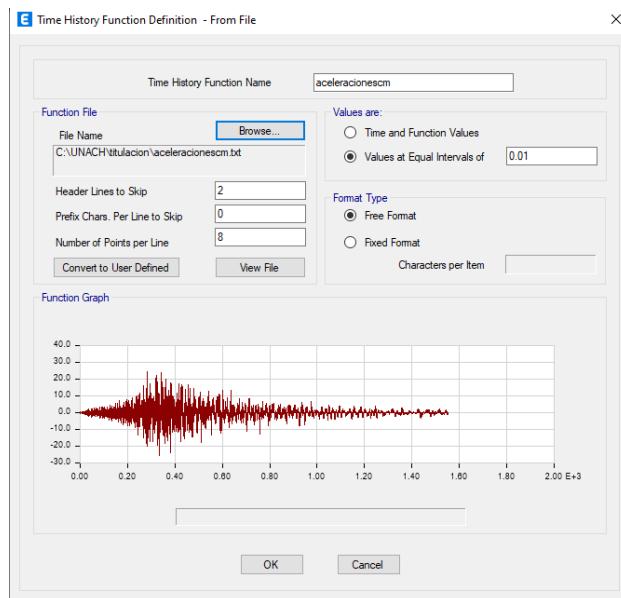


Figura 42. Configuración de time-history para el sismo Pedernales 2016.



En la Figura 43 se define el caso de carga "Sismo Pedernales" con load Case Type Time-History Nonlinear Modal (FNA), que inicia con la condición zero, y aplicando la carga en acceleration U1 con Function Sismo Pedernales 2016.

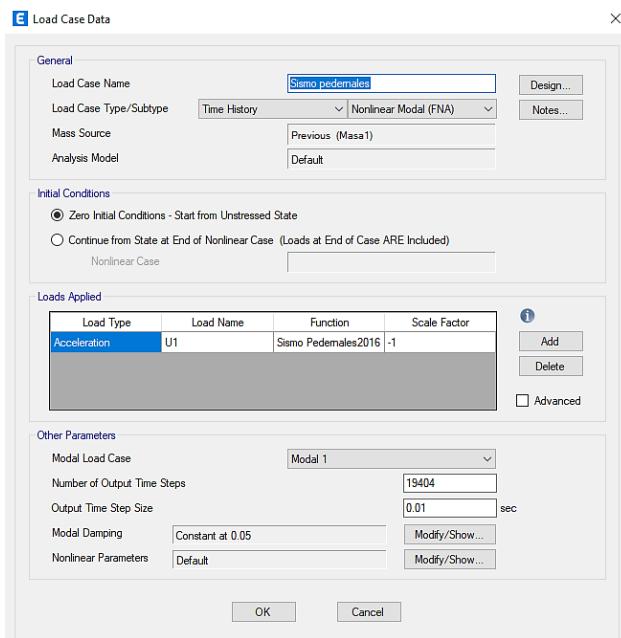


Figura 43. Configuración de load case time-history para el sismo Pedernales 2016.

Se configura el número total de pasos, en este caso 19404, con intervalos de 0.01 seg. Del análisis dinámico se obtienen resultados como la verificación del estado de daño en las rotulas. Al igual que en el análisis Pushover, aparecen rotulas plásticas de color verde, en los extremos inferiores de las columnas, indicando que se encuentra en la zona operacional (ver Figura 44a). Se demuestra que las rotulas sufren daños muy graves y supero la zona pre-colapso a través del cambio de color a rojo, indicando que la estructura, falló, además aparece una nueva rotula en el extremo superior de la columna derecha en estado operacional (ver Figura 44b). El análisis termina cuando aparece rotulas en los extremos superiores de las columnas en su estado operacional, pero fallando en las rotulas de sus extremos inferiores (ver Figura 44c).

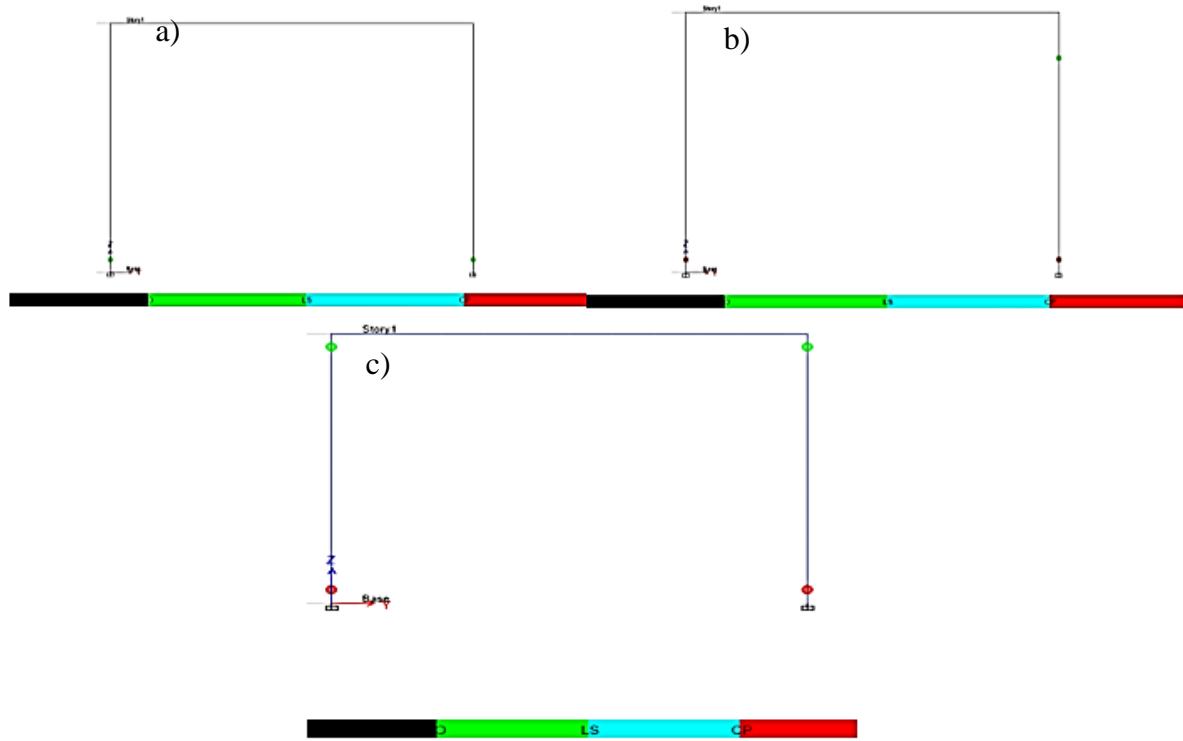


Figura 44. a) Aparición de rotulas plásticas en columnas del pórtico, b) Daños en rotulas plásticas en las columnas del pórtico c) Estado final de daños en rotulas plásticas en las columnas del pórtico.

En ETABS, conforme el sismo avanza, se observa que, afecta al pórtico, a partir los 193.65 seg, indicando el inicio de histéresis notable como se muestra en la Figura 47, ya que aquí ya hay curvatura diferente a 0. En cambio, en OpenSees, el daño visible aparece a partir de 193.01 seg, siendo este el mismo punto de inicio de histéresis notable, como se puede apreciar en la Figura 45. Al igual que en el análisis estático no lineal, se muestra nuevamente que el modelo de plastificación distribuida analiza comportamientos en estados iniciales anteriores a la falla.

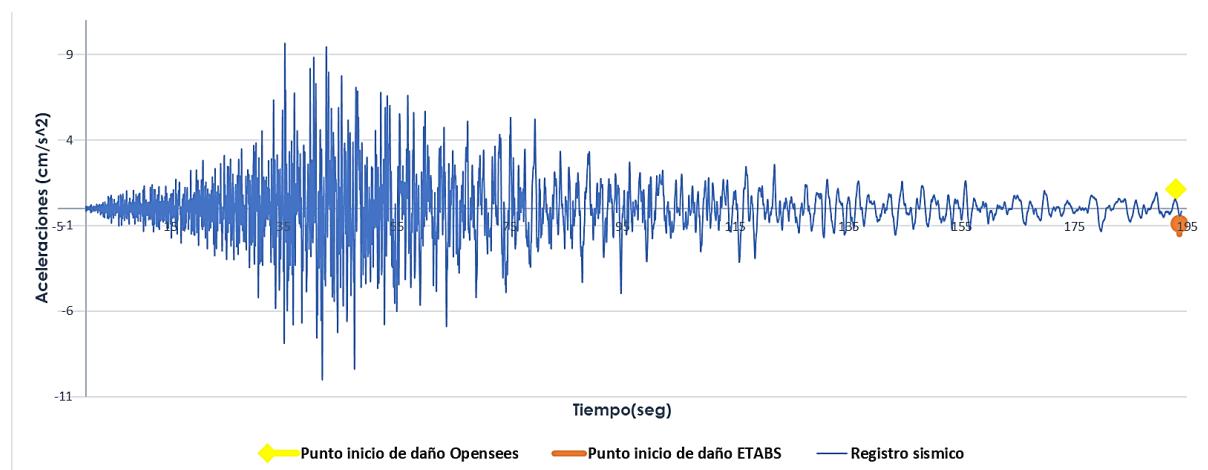


Figura 45. Registro de daños notables en los diferentes modelos.

Este comportamiento se puede evidenciar en la respuesta de las rótulas de cada elemento, a través del ciclo de histéresis en el diagrama momento curvatura.

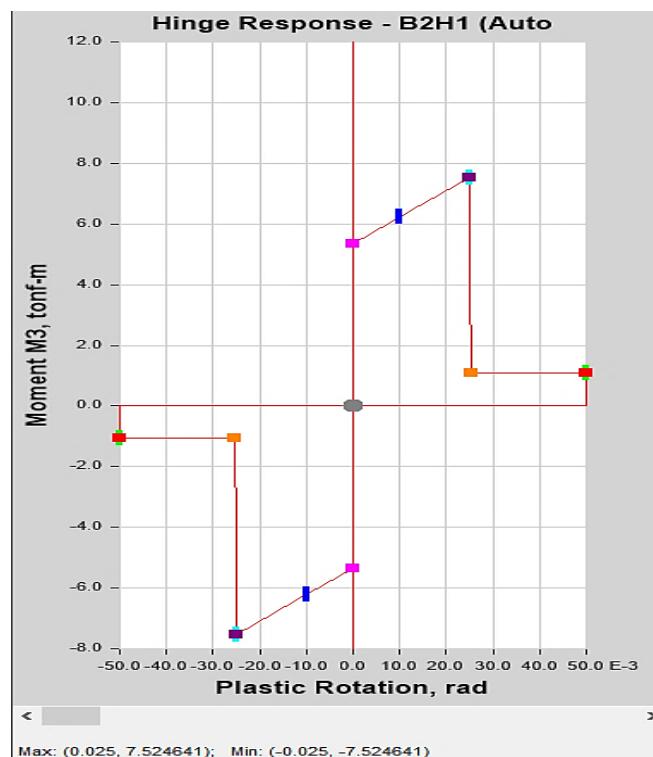


Figura 46. Estado de histéresis de rotulas plásticas en el elemento viga.

En la Figura 46 la viga no ha sufrido daño aparente ya que no muestra histéresis y no presenta ciclos de carga ni descarga, esto significa que no está disipando energía, ni se generan deformaciones por el evento cíclico (FasterCapital, 2024).

Al observar el estado de la rótula en el elemento columna, se puede evidenciar el comportamiento de la histéresis, en este caso, son las que están disipando energía. Esto refiere claramente a la Figura 47, confirmando que las columnas fueron las que absorbieron la energía por efecto del sismo.

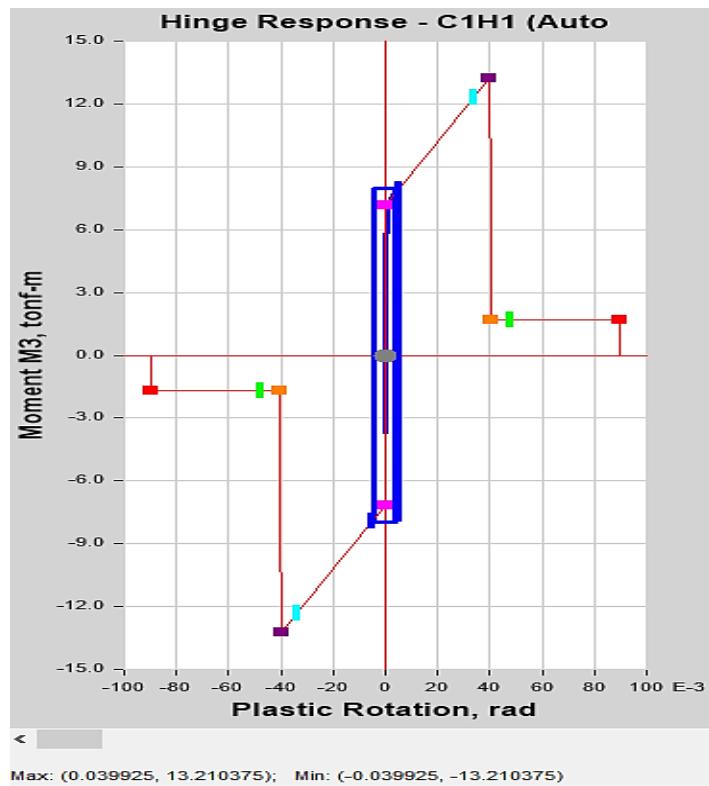


Figura 47. Estado de histéresis de rotulas plásticas en el elemento columna.

El modelo de plastificación concentrado evalúa la capacidad del pórtico ante un análisis dinámico por medio del comportamiento no lineal de los elementos como con la relación del diagrama momento-curvatura, en comparación con el modelo de plastificación distribuida, el cual realiza el análisis por medio del comportamiento de sus materiales, presentando una ventaja en el sentido que representa una respuesta más precisa (Romero, 2021).

La respuesta histerética en el modelo de plastificación concentrada se cataloga como un modelo inelástico (Figura 19), ya que hay curvaturas diferentes en cada ciclo, pero mantiene una pendiente similar en cada ciclo de carga y descarga, y la fluencia ocurre al mismo nivel de carga (Capcha, 2017).

El comportamiento histerético del modelo de plastificación distribuida, obtenido de la programación en OpenSees (Anexo 4), depende de variables como el tipo de elemento, sección transversal, cuantías de acero, propiedades de los materiales, magnitud de las cargas actuantes. Este comportamiento se cataloga como modelo Takeda principalmente porque las pendientes de carga y descarga son diferentes (Figura 20).

El resultado del modelo de plastificación distribuida muestra curvas de histéresis mejor definidas y con mayor área bajo la curva, simulando mayor disipación de energía en comparación al modelo concentrado.

Se presentan los resultados de la comparación de los ciclos de histéresis del elemento columna para el modelo de plastificación concentrada y distribuida, que se pueden observar en la Figura 48.

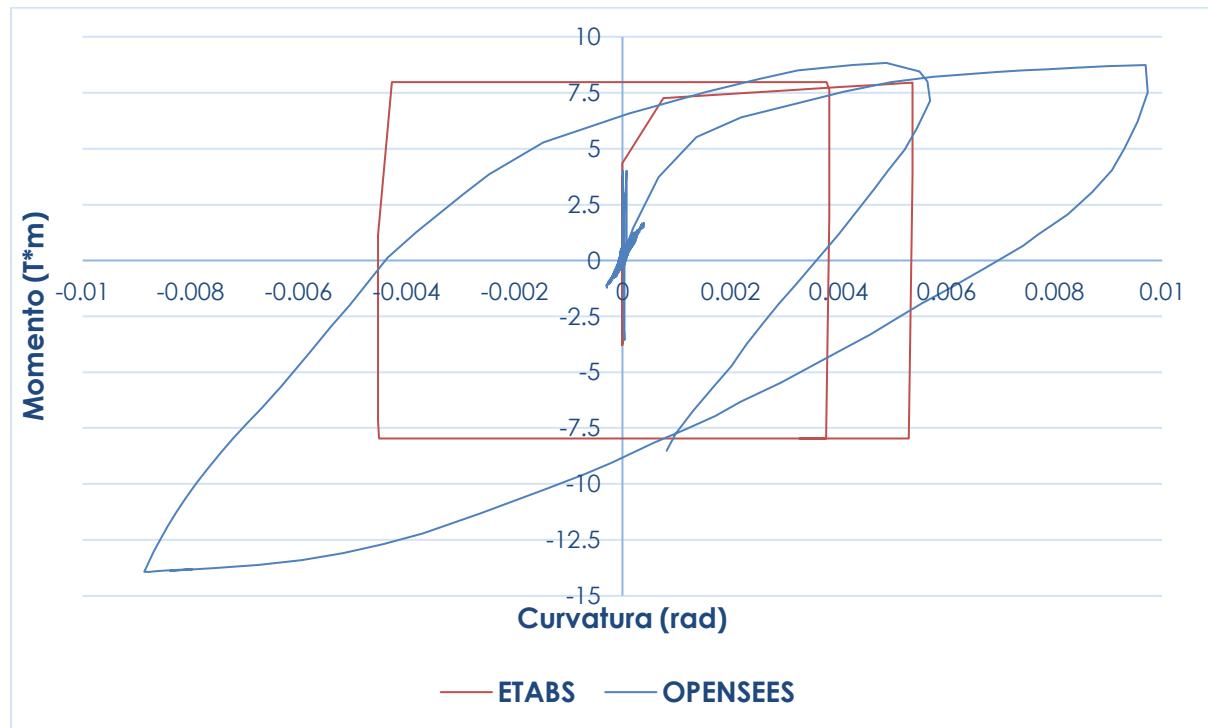


Figura 48. Comparación de ciclos de histéresis del elemento columna.

En ambos modelos, se puede observar que la sección entró en fluencia en numerosas ocasiones, generando ciclos en el origen, con un comportamiento caótico, que ocurre cuando las curvas se presentan de forma acumulativa, pero a medida que avanza el análisis, aparecen ciclos de carga y descarga mucho más evidentes en la zona plástica (Ortíz, 2022). Una vez que se cumple un ciclo posterior al segundo 193.65 para el modelo concentrado y el segundo 193.01 para el modelo distribuido, la definición de la curva es más notable y se evidencia perdida de rigidez del elemento.

Tabla 11. Resultados histeréticos del análisis dinámico no lineal del elemento columna.

Modelo de plastificación	M. máx. ciclo de carga. (T.m)	M. máx. ciclo de descarga (T.m)	Curvatura máx. (rad)	M.final (T.m)	Curvatura de final (rad)
Concentrado	7.9767	-7.9764	0.0053	7.9769	0.0027
Distribuido	8.8523	-13.935	0.0097	8.5123	0.00081

En la Figura 48 se puede observar que, en ambos modelos, hay absorción de energía solo en las columnas, indicando relación con el análisis estático no lineal. En el modelo de plastificación concentrada el comportamiento cíclico obtenido para el evento sísmico Pedernales-Ecuador 2016, determinó que, en la gran mayoría del registro, hay absorción de energía en el punto de origen, si bien no es notable, hay ciclos con curvaturas igual a cero y de comportamientos caóticos, además se catalogó a esta respuesta como modelo de histéresis inelástico de acuerdo a su forma, pendientes similares, puntos de fluencia al mismo nivel. Este comportamiento se hace evidente a partir del segundo 193.65 con ciclos de carga que llegan a un máximo momento de 7.9767 T.m y en descarga hasta -7.9764 T.m, como se muestra en la Tabla 11. El modelo alcanza una curvatura máxima de 0.0053 rad, y su rigidez se degrada hasta llegar al momento final de -7.9769 T.m con una curvatura de 0.0027 rad.

El comportamiento cíclico del modelo de plastificación distribuido, se catalogó como modelo de histéresis Takeda debido a que tiene pendientes diferentes en cada ciclo de carga máximo llegando a 8.8523 T.m y descarga con -13.935 T.m con curvatura máxima de 0.0097 rad, además presenta un lazo interno de histéresis dentro del lazo externo. En este punto hay degradación de resistencia y llega a un momento último de 8.5123 T.m con deformación de 0.00081rad.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Se han definido las secciones de los elementos estructurales que conforman el pórtico de estudio, para la viga se determinó una sección transversal de 30x35 con un área de acero a compresión de 4.62 cm^2 , correspondiente a 3 varillas de $\phi 14 \text{ mm}$ y de la misma manera a tracción, las columnas de sección 35x35 con de acero a compresión de 4.62 cm^2 correspondiente a 3 varillas de $\phi 14 \text{ mm}$, de la misma manera a tracción y en su centro un área de acero de 3.08 cm^2 correspondiente a 2 varillas de $\phi 14 \text{ mm}$.
- El modelo de plastificación concentrado realizado en ETABS, en el análisis estático no lineal, presenta la curva de capacidad que tiende a tener un comportamiento idealizado, con pendiente constante hasta su punto de fluencia de 5.8075 T con un desplazamiento alcanzado de 0.009144 m en su nivel Totalmente operativo, hasta llegar al cortante basal máximo de 10.6265 T con desplazamiento máximo de 0.1184 m. En el análisis dinámico, las curvas de histéresis en el diagrama Momento-Curvatura muestran que hay absorción de energía solo en las columnas. Inicialmente presenta ciclos con curvaturas de cero y de comportamientos caóticos en el origen, se catalogó a esta respuesta como modelo de histéresis inelástico de acuerdo a su forma, pendientes similares, puntos de fluencia al mismo nivel, llegando a un máximo momento 7.9767 T.m y en descarga hasta -7.9764 T.m. El modelo alcanza una curvatura máxima de 0.0053 rad, de ahí su rigidez se degrada hasta llegar al momento final de -7.9769 T.m con una curvatura de 0.0027 rad.
- El modelo de plastificación distribuida realizado en OpenSees, en el análisis estático no lineal, presenta la curva de capacidad ligeramente con mayor capacidad inelástica. Inicialmente alcanza un punto de fluencia, llegando a 7.248 T con 0.0327 m en su estado Operacional, la carga aumenta hasta que llega a su punto de cortante máximo de 10.5814 T con un desplazamiento máximo de 0.118 m. En el análisis dinámico, el comportamiento cíclico se catalogó como modelo de histéresis Takeda debido a que tiene pendientes diferentes en cada ciclo de carga máximo llegando a 8.8523 T.m y descarga con -13.935 T.m con curvatura máxima de 0.0097 rad. En este punto hay degradación de resistencia y llega a un momento ultimo de 8.5123 T.m con deformación de 0.00081 rad.
- El modelo de plastificación concentrada analiza mayormente el comportamiento que tiene la estructura cerca del colapso, mientras que el modelo de plastificación distribuida analiza desde sus estados iniciales hasta el colapso.

- El modelo de plastificación concentrada, asegura cierta precisión de cálculo debido a que tiene sencilla aplicabilidad al introducir comportamientos no lineales como el diagrama de momento-rotación en cambio el modelo de plastificación distribuida (elemento tipo fibra) presenta mayor precisión en sus resultados, tiende a representar un comportamiento más preciso al dividir el elemento en secciones de tipo fibra en la dirección longitudinal, aunque este modelo presenta dificultades por el grado de conocimiento de lenguaje de programación TCL, operaciones ,procesos especiales y costo computacional.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda realizar un análisis completo, luego de verificar que se cumplan con todos los controles normativos, para garantizar un diseño seguro, de manera que cuando se realice los análisis estático y dinámico, estos muestren los niveles de desempeño independientemente del modelo, en vigas antes que las columnas para garantizar el criterio de Columna fuerte-Viga débil.

Se recomienda realizar los dos tipos de análisis no lineales en otros tipos de estructuras, como puentes, estructuras metálicas, etc, cumpliendo con las normativas y verificando los controles, para evaluar y comparar comportamientos.

Se recomienda realizar el análisis dinámico no lineal, con el evento Time-History ya que es muy útil para verificar la degradación que existe en los materiales y en elementos estructurales, de manera que la respuesta que se espera que tenga la estructura, simule un comportamiento más preciso.

.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguiar, R., Mora, E., & Rodríguez, M. (2015). Diagrama momento-curvatura y momento-rotación para elementos de hormigón armado y acero con ASCE/SEI 41 y Sistema de Computación Ceinci-lab moment-rotation and moment-curvature diagram for reinforced concrete and steel elements with asce/sei 41 and Computer System Ceinci-lab. *Ciencia*, 17(2), 201–239. Recuperado de <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/ciencia/article/view/520>
- Aguilar, L. (2023). *Desempeño Sísmico Estructural en un Sistema Aporticado Mediante el Análisis Estático no Lineal* (tesis de grado). Universidad Señor de Sipán, Pimentel, Perú. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12802/11118>
- Barbat, A., Oller, S., & Vielma, J. C. (2005). *Cálculo y diseño sismorresistente de edificios. Aplicación de la norma NCSE-02*. doi: 10.13140/2.1.4142.6244. Recuperado de: <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.13140/2.1.4142.6244>
- Benavent, A. (2021). Modelos de plasticidad.
- Bojórquez, E., Chávez, R., Ruiz, S. E., & Reyes, A. (2014). Una medida de intensidad sísmica que predice el comportamiento no lineal y el efecto de los modos superiores. *Revista de Ingeniería Sísmica*, (90), 1–33. Recuperado de : <https://doi.org/10.18867/ris.90.12>
- Borda, L., & Pastor, A. (2011). *Desempeño sísmico de un edificio aporticado peruano de seis pisos* (tesis de grado). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú. Recuperado de <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/974>
- Calla, H., & Rosas, J. (2018). *Evaluación no Lineal de Edificios de Concreto Armado de 6 y 8 Pisos con y sin Muros de Corte* (tesis de grado). Universidad Católica de Santa María, Arequipa, Perú. Recuperado de <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/8407>
- Campos, C. D. C., & Leandro, D. A. (2022). *Evaluación del desempeño sísmico utilizando el análisis no lineal estático según la metodología ASCE 41-13 de un módulo de la Institución Educativa Andrés Avelino Cáceres, distrito de San Juan de Miraflores, provincia de Lima, Departamento de Lima* (tesis de grado). Universidad Continental, Huancayo. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12394/12123>
- Capcha, E. (2017). *Tipos de Histéresis en Elementos de Concreto Armado y Su Efecto en La Respuesta Estructural (Parte 1)*. Recuperado el 12 de julio de 2024, de Modelamiento por elementos finitos. website: <https://ceaingenieria.blogspot.com/2017/08/tipos-de-histeresis-en-elementos-de.html>
- Caro, K., & Arias, J. (2018). *Ánalisis no lineal estático de una edificación de muros cortantes con un modelo de fibras*. Recuperado de <https://es.slideshare.net/slideshow/anlisis-no-lineal-esttico-de-una-edificacin-de-muros-cortantes-con-un-modelo-de-fibras/108304196>

Cesar, J. (s.f.). Ejemplo de Análisis No Lineal en Etabs. Recuperado el 13 de julio de 2024, de Scribd website: <https://www.scribd.com/document/375529788/Ejemplo-de-Analisi-No-Lineal-en-Etabs>

Computers and Structures Inc. (2021). *ETABS - 28 Nonlinear Static Procedures – Pushover Analysis: Watch & Learn* [Video]. Recuperado de https://youtu.be/TqkDclt3JW8?si=IV_gkBW2L9tHrLBt

FasterCapital. (2024). *Histeresis y fluencia analisis de la deformacion del material a lo largo del tiempo*. Recuperado de <https://fastercapital.com/es/contenido/Histeresis-y-fluencia--analisis-de-la-deformacion-del-material-a-lo-largo-del-tiempo.html>

Fenves, G., & Filippou, F. (2004). Methods of Analysis for Earthquake- Resistant Structures. *Earthquake Engineering*.doi: 10.1201/9780203486245.ch6. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/292797496_Methods_of_Analysisfor_Earthquake-Resistant_Structures

Flores, A. (2015). *Modelo de Daño Concentrado para Estructuras Aporticadas en Hormigón Armado ante Cargas Sísmicas, utilizando el programa computacional SAP 2000* (tesis de grado). Universidad de las Fuerzas Armadas, Sangolquí. Recuperado de <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/10928>

Gallegos, B. (2016,). Diseño Basado en Desempeño Perfomance Based Desing Quito, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/315487018_Diseno_Basado_en_Desempeno_Performance_Based_Desing

García, M. A., & Bairán, J. (2018). *Estudio sobre la efectividad del factor de sobre-resistencia del criterio columna fuerte-viga débil en el diseño sísmico de pórticos de hormigón mediante el análisis dinámico no lineal* (tesis de masterado). Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya. Recuperado de <http://hdl.handle.net/2117/118142>

González, C. A. (2018). *Análisis estático no lineal (pushover) de estructura aporticada de hormigón armado con diferentes grados de ductilidad. Aplicando la Norma Sismorresistente Colombiana 2010 (NSR-10)* (tesis de masterado). Universitat Politècnica de València, Valencia. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10251/100307>

Graitec. (s.f.). *Familia de cargas Pushover*. Recuperado el 13 de julio de 2024, de Graitec website: https://www.graitec.com/Help/Advance_Design/Esp/Pushover_Loads_Family.htm#

Guevara, V. (2017). Amortiguamiento en Estructuras. Recuperado el 11 de julio de 2024, de Slideshare website: <https://es.slideshare.net/slideshow/amortiguamiento/75839168>

- Huang, X., & Kwon, O. (2015). Numerical models of RC elements and their impacts on seismic performance assessment. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44(2), 283–298. <https://doi.org/10.1002/eqe.2471>
- IGEPN. (2016, abril 16). *Informes de los Últimos Sismos*. Recuperado de Instituto Geofísico - EPN website: <https://www.igepn.edu.ec/portal/eventos/informes-ultimos-sismos.html>
- KSSE Structural Engineers. (2022). *Nonlinear Time history Analysis in ETABS Software v20* [Video]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=jCDz-CAIozE&t=2s>
- López, E., & Muñoz, M. (1996). Influencia de la no linealidad del material en la dinámica de estructuras articuladas de madera. *Informes de la Construcción*. Recuperado de <https://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/999/1083>
- López, M., Hernández, J., & Sunley, S. (2020). *Lineamientos para la evaluación de la vulnerabilidad y readecuación estructural*. Recuperado de <https://srt.snet.gob.sv/tallerdivulgacion/Amenaza/LINEAMIENTOS%20PARA%20LA%20EVALUACI%C3%93N%20DE%20LA%20VULNERABILIDAD%20Y%20READECUACI%C3%93N%20ESTRUCTURAL.pdf>
- López, O. A. (2014). *Guía para la evaluación de edificaciones existentes con fines de adecuación sísmica* (CAF, Ed.). Caracas: Geopolis. Recuperado de <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/895>
- Malo, J., & Sempértegui, J. (2019). *Análisis dinámico no lineal en 2D de la estructura del Hospital “Homero Castanier”, de la ciudad de Azogues, provincia del Cañar, mediante la utilización de rótulas plásticas* (tesis de grado). Universidad del Azuay, Cuenca. Recuperado de <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/9248>
- McCormac, J. C., & Csernac, S. F. (2012). *Diseño De Estructuras De Acero*. México: Alfaomega Grupo Editor S.A.
- Medina, C., & Galarza, D. (2020). Análisis sísmico comparativo de una estructura irregular torsionalmente flexible aplicando NSP, MPA, NLRHA. *Ingeniería de construcción*. Recuperado de https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-50732020000300257&script=sci_abstract
- Merchán, R. V. (2010). *Uso de opensses para generación de secciones con fibras para elementos (viga, columna) para el análisis no-lineal de una estructura* (tesis de grado). Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador. Recuperado de <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/1557>

Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2015). *Estructuras de Hormigón Armado. Normativa Ecuatoriana de la Construcción* (NEC-SE-HM). Recuperado de <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/2023/03/8.-NEC-SE-HM-Hormigon-Armado.pdf>

Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2015). *Peligro Sísmico - Diseño Sismorresistente. Normativa Ecuatoriana de la Construcción*. (NEC-SE-DS). Recuperado de <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/2023/03/2.-NEC-SE-DS-Peligro-Sismico-parte-1.pdf>

Möller, O., Rubinstein, M., & Ascheri, J. P. (2011). Análisis del Amortiguamiento Proporcional a la Rígidez Tangente en Sistemas Dinámicos No Lineales. *Mecánica Computacional*, 30(14), 1277–1293. Recuperado de <https://cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/view/3826>

Mora, E., & Aguiar, R. (2018). Modelación de diagrama momento-curvatura y momento-rotación en secciones de acero estructural. (Curvature Momentum and Rotational Momentum diagram modeling in structural steel sections). *Ciencia*, 17(1), 99–124. Recuperado de <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/ciencia/article/view/514>

Moreno, R. (2006). *Evaluación del riesgo sísmico en edificios mediante análisis estático no lineal: Aplicación a diversos escenarios sísmicos de Barcelona* (tesis doctoral). Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya. <https://doi.org/10.5821/dissertation-2117-93559>

Núñez, F., Ruiz, D., & Cortés, J. (2021). Análisis dinámico no lineal de edificios de acero sometidos a sismos. *Revista ingeniería de construcción*, 36(2), 173–196. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732021000200173>

OpenSees Berkley. (2019, noviembre 8). *OpenSees User*. Recuperado de OpenSeesWiki website: https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/OpenSees_User

OpenSees Berkley. (2022, junio 5). *Patch Command*. Recuperado de Command_Manual website: https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php?title=Patch_Command

Orla. (s.f.). *Averigüe La Curva de Histéresis Del Concreto y El Acero*. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/408067348/AVERIGUE-LA-CURVA-DE-HISTERESIS-DEL-CONCRETO-Y-EL-ACERO-docx>

Ortiz, R. F. (2022). *Modelación numérica de muros de hormigón armado prefabricados bajo la acción de cargas horizontales cíclicas* (tesis de grado). Universidad Politécnica Salesiana, Quito. Recuperado de <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/22963>

- Poland, C., Hill, J., Sharpe, R., Soulages, J., Structural Engineers Association of California, & California Office of Emergency Services. (1995). *Vision 2000: performance based seismic engineering of buildings*. Sacramento, Structural Engineers Association of California.
- Polo, G. (2021). *Base para una guía para análisis estático no lineal: aplicación en estructuras de pórticos en concreto reforzado* (tesis de masterado). Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá. <https://doi.org/10.1/JQUERY.MIN.JS>
- Quinto, W., & Chaverra, E. (2022). *Análisis estático no lineal (pushover) y punto de desempeño sísmico en una edificación de tres pisos existente – revisión bibliográfica y caso ejemplo* (tesis de grado). Universidad de Antioquia, Antioquia. Recuperado de https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/33261/4/QuintoWillman_2022_An%C3%A1lisisPushover.pdf
- Romero, G. (2021). *Comparación en la modelación de plasticidad concentrada y distribuida para el análisis pushover en un pórtico de concreto armado* (tesis de grado). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima. Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.12404/18889>
- Samartín, A., & Gutiérrez, G. (1982). Análisis elasto-plástico de estructuras porticadas con grandes movimientos. *Hormigón y Acero*, 145, 35–47. Recuperado de <https://oa.upm.es/32366/>
- Sánchez, C. A. (2023). *Hipótesis de la Teoría Plástica*. Recuperado de: <https://www.studocu.com/es-mx/document/instituto-politecnico-nacional/estructuras-de-concreto/5-hipotesis-de-la-teoria-plastica/69722891>
- Sánchez, J. C. (2023). Evaluación del desempeño de estructuras de hormigón frente a incendio y sismo. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- Sastre, R., & Gimferrer, X. (2018). Cálculo no lineal: ventajas e inconvenientes. *Actas del Simposio Latinoamericano De Tenso Estructuras 2018* Perú, 1–8. Red Latina de Tensoestructuras ; Universidad Ricardo Palma. Recuperado de <http://hdl.handle.net/2117/387778>
- Sistema de Computación CEINCI-LAB. (2020). *Clase O: Relación Momento Curvatura en Hormigón ASCE SEI 41 de 2017* [Video]. Recuperado de: <https://youtu.be/BZ0UvMK2Fo0?si=HQNguc5HPbpkXFj7>
- American Society of Civil Engineers. (2017). *ASCE standard, ASCE/SEI, 41-17: Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings* . Recuperado de <https://pubs.asce.org/Product?isbn=9780784414859>
- Toapanta, D. A., & Vélez, D. R. (2024). *Diseño estructural con análisis estático no lineal (Pushover) en una edificación de seis pisos de hormigón armado* (tesis de grado). Universidad

- Politécnica Salesiana, Cuenca. Recuperado de
<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/27029>
- Torres, J. J., & Vásquez, D. E. (2021). *Análisis de vulnerabilidad sísmica de una estructura especial de hormigón armado de 4 pisos ubicada en la ciudad de Cuenca-Ecuador* (tesis de grado). Universidad del Azuay, Cuenca. Recuperado de
<http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/10985>
- Valencia, S. P. (2018). Análisis dinámico no lineal de diferentes tipologías estructurales para edificaciones esenciales y su comparación en comportamiento, vulnerabilidad estructural y propuestas de mitigación (tesis de grado). Univesidad del Azuay, Cuenca. Recuperado de
<http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/7673>
- Velasco, L., & Guerrero, H. (2020). *Introducción al análisis estructural con OpenSees*. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Luis-Velasco4/publication/357575931_Introduccion_al_analisis_estructural_con_OpenSees/links/61d50276d4500608168cfab4/Introduccion-al-analisis-estructural-con-OpenSees.pdf
- Velásquez, C. (2017). *Evaluación experimental de la longitud de rotación plástica en vigas de hormigón parcialmente pretensadas* (tesis de masterado) Universitat Politécnica de Catalunya, Barcelona. Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/117001>
- Vortize. (2020). *Diagrama Momento-Curvatura*. Recuperado de Vortize website:
<https://www.vortize.com /diagramas-momento-curvatura/>
- Zendaoui, A., Kadid, A., & Yahiaoui, D. (2016). Comparison of Different Numerical Models of RC Elements for Predicting the Seismic Performance of Structures. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10(4), 461–478. <https://doi.org/10.1007/S40069-016-0170-7>

ANEXOS

Anexo 1. Predimensionamiento

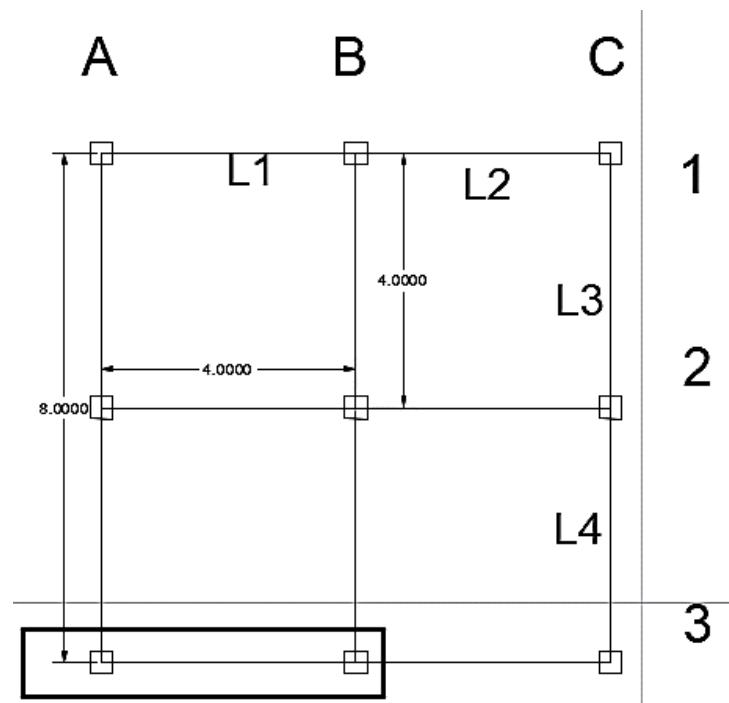


Figura A1.1. Vista en planta de la estructura y señalización del pórtico de análisis.

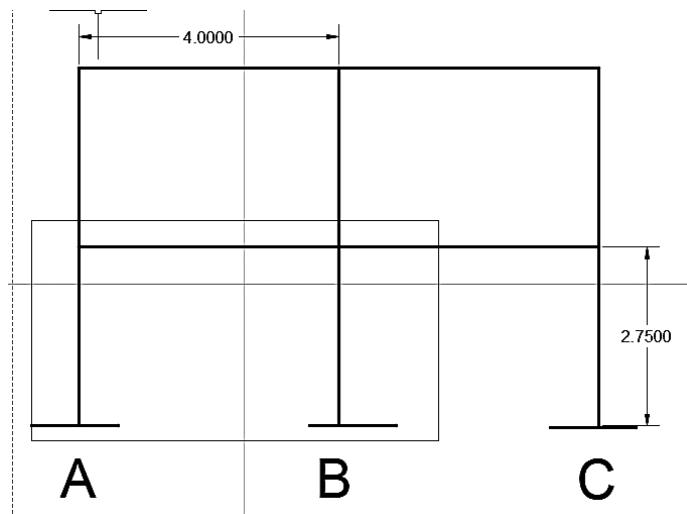


Figura A1.2. Vista en elevación de la estructura y señalización del pórtico de análisis

Tabla A1.1. Datos previos para predimensionamiento.

recubrimiento	4	cm
Φestribo	10	mm
Φlongitudinal	14	mm

f_y	4200	kg/cm ²
f'c	210	kg/cm ²
Longitud de viga	4	m
Num.pisos	2	
Altura de entrepiso	2.75	m
E	182591.347	kg/cm ²

Residencias			
Viviendas (unifamiliares y bifamiliares)		2.00	
Hoteles y residencias multifamiliares		2.00	
Habitaciones		4.80	
Salones de uso público y sus corredores			

Figura A1.3. Carga viva-residencias y viviendas (unifamiliares y bifamiliares).

Fuente: (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2015).

Tabla A1.2. Determinación de la Carga muerta (Cm).

Parámetro	Valor	Unidad
Longitud. promedio	12	m
H.vg.asum	0.35	m
V.mamp	4.32	m ³
Área prom	16	m ²
V.enlu	0.576	m ²
Y.enlu	2.2	t/m ³
P.mamp	6.48	T
P.enlu	1.27	T
P.total	7.75	T
Cm.pared	0.48	T/m ²
Y.horm	2.4	T/m ²
Y.bloq	1	T/m ²
PP.nervios	0.1728	T/m ²
P.loseta	0.12	T/m ²
P.bloques	0.128	T/m ²
P.macill y enlu	0.088	T/m ²
P.acab	0.02	T/m ²
P.insta	0.01	T/m ²

Cm.total	1.02	T/ m ²
----------	------	-------------------

Tabla A1.3. Cálculo para la sección viga.

Parámetro	Valor	Unidad
luz libre	3.65	m
ancho cooperante	2	m
B	30	cm
D+30%	1.330	T/m ²
L	0.2	T/m ²
C_u = 1, 2D + 1, 6L	1.9159	T/m ²
Cu/m	3.8318	T/m
Md	4.2541	T.m
d	22.7916	cm
ρ min	0.0033	
ρcal	0.00797	
ρbal	0.02125	
h	28.4916	cm
75%Bc	26.25	cm
L/12	33.3	cm
H.final	35	cm
dreal	29.3	cm

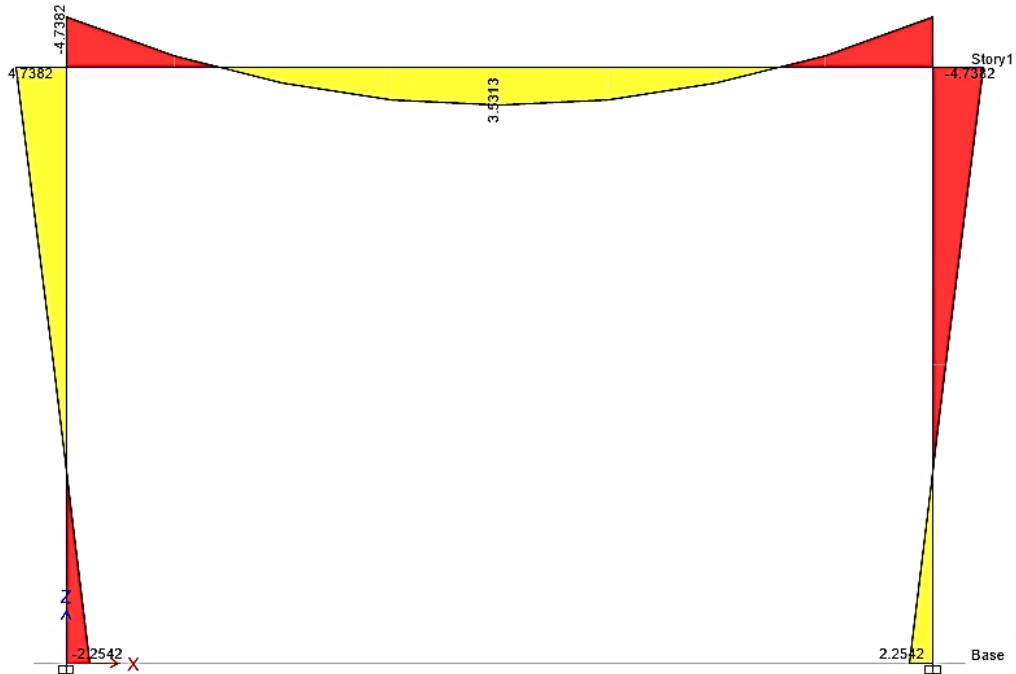


Figura A1.4. Resultados de momentos para diseño de vigas en la estructura, basado en combinación de cargas viva y muerta.

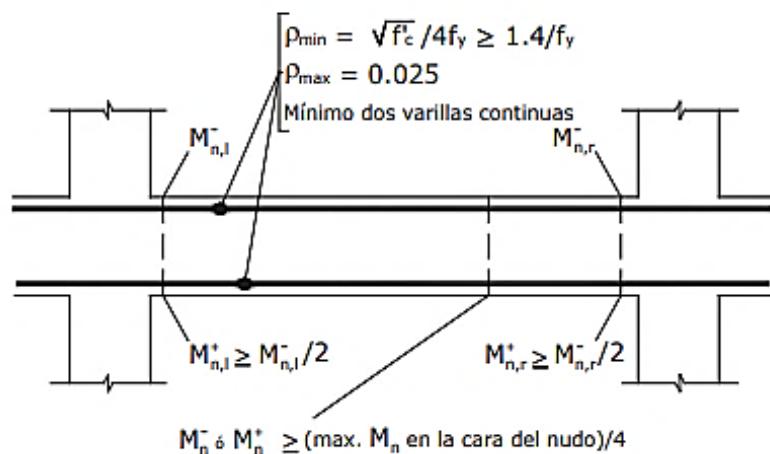


Figura A1.5. Requisitos del refuerzo longitudinal en elementos a flexión.

Fuente:(Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2015).

Tabla A1.4. Diseño del acero longitudinal de la viga.

Ubicación	Momento (T.m)	b (cm)	h (cm)	d (cm)	ρ calculado	ρ mínimo	ρ máximo	Control ρ máx	ρ necesario	As necesario (cm ²)	Nº Varillas	Φ (mm)	As usado	Control de capacidad 1 (en cualquier sección)	Control de capacidad 2 (en NUDOS)	Control acero	As mínimo (cm ²)	As máximo (cm ²)	ρ usado
A	4.7382	30	35	29.3	0.005183	0.003333	0.010625	OK	0.003485	4.5559	3	14	4.6181	OK	OK	OK	2.9300	9.3394	0.00525
B	4.7382	30	35	29.3	0.005183	0.003333	0.010625	OK	0.003485	4.5559	3	14	4.6181	OK	OK	OK	2.9300	9.3394	0.00525
Inferior centro	3.5313	30	35	29.3	0.003797	0.003333	0.010625	OK	0.003440	3.3375	3	14	4.6181	OK	OK	OK	2.9300	9.3394	0.00525

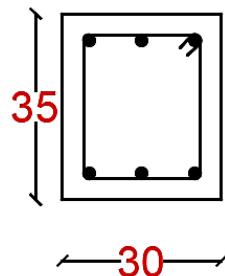


Figura A1.6. Sección transversal del elemento viga.

Tabla A1.5. Diseño por capacidad de la viga.

Parámetro	Valor	Unidad
a+	3.62	cm
a-	3.62	cm
M_{ri}i+	5.3318	T.m
M_{rij}i+	5.3318	T.m
M_{ri}-	5.3318	T.m
M_{rj}-	8.8899	T.m
V_{p1}	2.9215	T
V_{p2}	3.8964	T
V_p	3.8964	T
V_u	9.7359	T

Tabla A1.6. Parámetros para control por capacidad.

Ubicación	As superior (cm ²)	As inferior (cm ²)	Luz libre (m)	M cap sup (T.m)	M cap inf (T.m)	V cap (T)	V _u (CM) (T)	V _u cap	V _u cap/Ø (T)	B(cm)	0.5V _u (T)	Control	V _c (T)
A	4.6181	4.6181	3.65	6.5550	6.5550	3.5918	5.84	9.4318	12.575 ₇	30	4.87	OK	0
B	4.6181	4.6181	3.65	6.5550	6.5550	3.5918	5.84	9.4318	12.575 ₇	30	4.87	OK	0

Tabla A1.7. Parámetros para control de la demanda.

Parámetro	Valor	Unidad
V_s	12.981	T
V_c	6.751	T
V_n	19.732	T
φV_n	17.759	T
17.759	≥ 5.84	Cumple

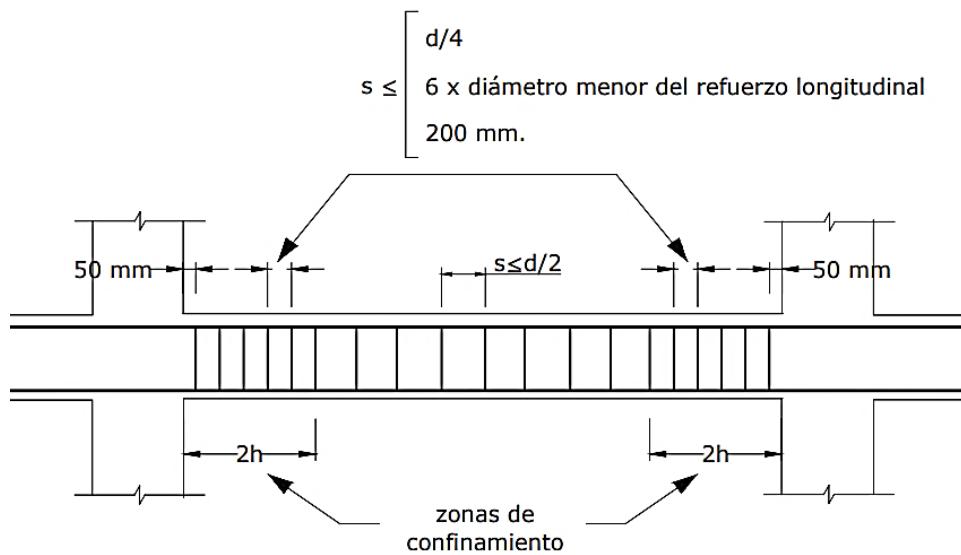


Figura A1.7. Separación de estribos para viga.

Fuente: (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2015).

Tabla A1.8. Diseño a cortante.

Parámetro	Valor	Unidad
Sep1	7	cm
Sep2	8.4	cm
Sep3	20	cm
Sep	7	cm
Av	0.7384	cm ²
N.ramales	2	

Tabla A1.9. Predimensionamiento de la sección para columnas.

Parámetro	Valor	Unidad
CM	1.02	T/m ²
CV	0.2	T/m ²
Pisos	2	
At	4	m ²
P	9.784	T
Ag	195.68	cm ²
b	35	cm
h	35	cm
Ag usada	1225	cm ²
Asmin	12.25	cm ²
As usado	12.32	cm ²
ρas	1.005	%
d	29.3	cm

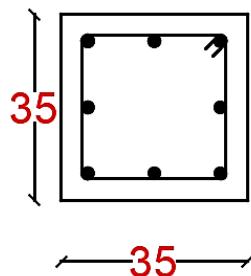


Figura A1.8. Sección transversal del elemento columna.

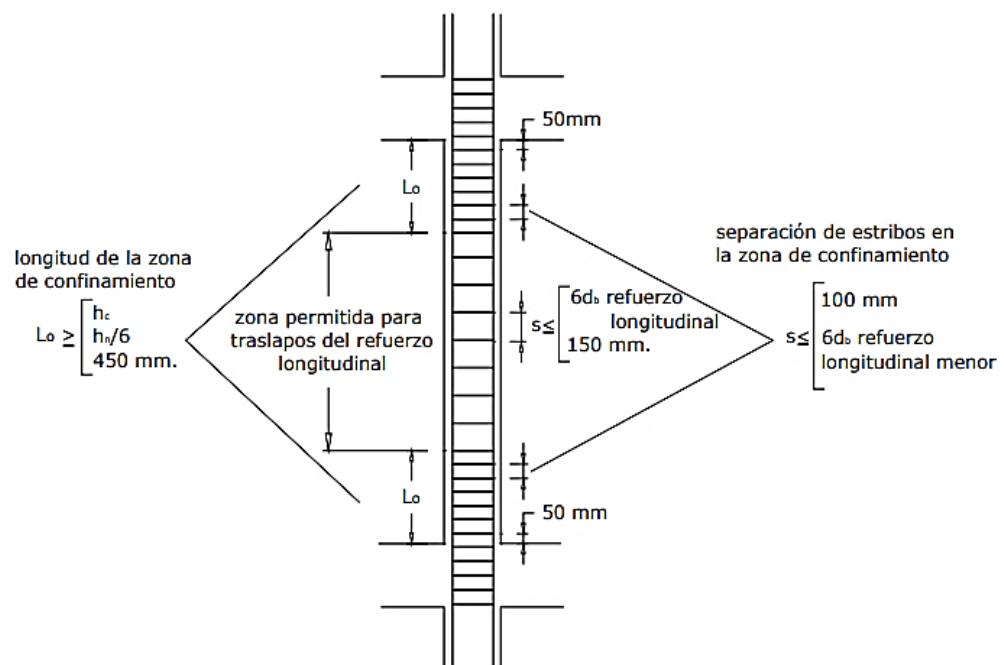


Figura A1.9. Diseño de separación de estribos.

Fuente: (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2015).

Tabla A1.10. Diseño por corte o resistencia.

Columna	V _a (T)	V _u Ø [T]	b [cm]	d [cm]	V _c [T]	S [cm]	Control
35x35	1.3934	1.8579	35	29.3	7.8763	8	OK

Tabla A1.11. Diseño por capacidad para la columna.

M cap sup.	M cap inf.	Luz libre	M cap.	Vu cap.	Vucap. /Ø	b	d	s	Vc	Control	Vs	Vs max	Av1	Av2	Av3	Av neces	Ø	# Ramales	# Ramales red	Ramales a colocar
[Tm]	[Tm]	[m]	[Tm]	[T]	[T]	[cm]	[cm]	[cm]	[T] 1		[T]	T	[cm ²]	[cm ²]	[cm ²]	[cm ²]	[mm]	u	u	
11.68	11.68	2.45	23.36	9.534	12.71	35	29.3	8	7.88	Necesita estribos	4.84	31.5051	0.2625	0.354	0.213	0.354	10	0.4503	1	2

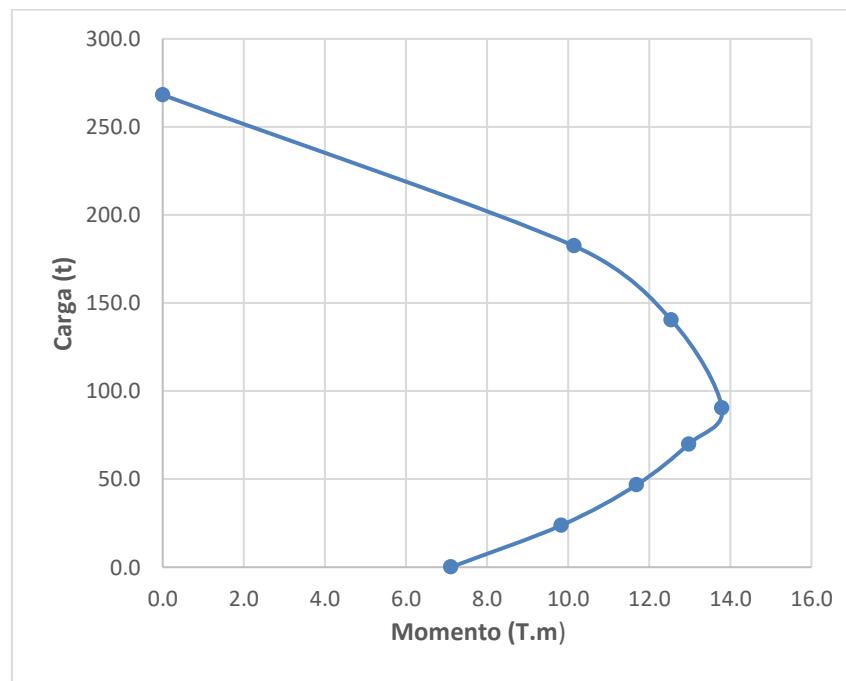


Figura A1.10. Curva de Interacción de la columna. .

Anexo 2. Código OpenSees -Análisis gravitacional.

```

#Definicion de tipo de dimensiones y grados de libertad
model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3 ;
#Definicion de nodos
set Hentre [expr 275];#Altura entrepiso cm
set Lv [expr 400]; # Longitud de viga
set g [expr 981]; #Gravedad m/s2
set Pcol 4900 ;
set PP 14000;
set Mass [expr $PP/$g];
set Izcol 125052.1;#inercia cm4
set Izviga 107187.5;

#Definicion de coordenadas
#node $tag_node $X $Y
node 1 0 0;
node 2 0 $Hentre;
node 3 $Lv $Hentre;
node 4 $Lv 0;
#Restricciones (empotramiento)
#fix $tag_node #fix_X #fix_Y #fix_RZ
fix 1 1 1 1;
fix 4 1 1 1;
fix 2 0 0 0;
fix 3 0 0 0;
#nodal masas
mass 2 $Mass 0. 0. ;
mass 3 $Mass 0. 0. ;
#Definir elementos y Secciones
set ColSecTag 1 ; # assign a tag number to the column section
set BeamSecTag 2; # assign a tag number to the beam section
# define section geometry
set rec [ expr 4];
set numbarscol 8;
set A_phil4 [expr 1.54];
#Definicion de los materiales (kg-cm)
set matIDAcero 1;
set matIDHormigon 2;
set Fy 4200.0;
set Es 2039432.4259559;
set epy [expr $Fy/$Es];
set labda 0.02; #Strain hardening ratio
set fc 210;
set ec0 -0.003;
set fcu [expr 0.85* $fc];
set ecu -0.05;
set b 0.015;
# Material "Hormigon210": matTag fc' epsc0 fcu' epsu
uniaxialMaterial Concrete01 $matIDHormigon $fc $ec0 $fcu $ecu ;
# Material "Refuerzo varilla G60": matTag Fy $Fy E0 bp bn R0 cR1 cR2
uniaxialMaterial SteelMPF $matIDAcero $Fy $Es $b $b 5.0 0.925 0.15;
#-----
#Secciones Viga
#elementos lineales Viga
set Aviga 1050;
set Iz 107187.5;
# Sección fibra-hormigon armado Viga
set Hvig [expr 30];
set Bvig [expr 35];

section fiberSec $BeamSecTag {};
#Patch Rectangular
$hormigon
#patch rect $matTag $SubdivY $SubdivZ $yi $zi $yj
patch rect $matIDHormigon 5 5 [expr -$Hvig/2] [expr -$Bvig/2] [expr $Hvig/2] [expr $Bvig/2];
#Refuerzo distribuido
layer straight $matIDAcero 3 $A_phil4 [expr $Hvig/2- $rec] [expr $Bvig/2- $rec] [expr $Hvig/2- $rec] [expr -$Bvig/2+$rec];
layer straight $matIDAcero 3 $A_phil4 [expr -$Hvig/2+$rec] [expr $Bvig/2- $rec] [expr -$Hvig/2+$rec] [expr -$Bvig/2+$rec];
};

```

```

#Secciones columnas cm2
#elementos lineales Columna
set Acol [expr 35*35];
set Iz 107187.5;
#Secciones fibra
set sec_HA 1;
set sec_Acero 2;
# Seccion fibra-hormigon armado Viga
set rec [ expr 4];
set Hcol 35;
set Bcol [expr 35];
)section fiberSec $ColSecTag {};
#Patch Rectangular
#hormigon
#patch rect $matTag $SubdivY $SubdivZ $yi $zi $yj
patch rect $matIDHormigon 5 5 [expr -$Bcol/2] [expr -$Bcol/2] [expr $Hcol/2] [expr $Bcol/2];
#Refuerzo distribuido
layer straight $matIDAcero 3 $A_phi14 [expr $Hcol/2- $rec] [expr $Bcol/2- $rec] [expr $Hcol/2- $rec] [expr -$Bcol/2+$rec];
layer straight $matIDAcero 2 $A_phi14 [expr 0.5*($Hcol-2*$rec)/2.0] [expr $Bcol/2- $rec] [expr 0.5*($Hcol-2*$rec)/2.0] [expr -$Bcol/2+$rec];
layer straight $matIDAcero 3 $A_phi14 [expr -$Hcol/2+$rec] [expr $Bcol/2- $rec] [expr -$Hcol/2+$rec] [expr -$Bcol/2+$rec];
};
puts "Secciones fibra creadas"
#Definicion de ELEMENTOS
-----
set IDColtransf 1;
set IDBeamtransf 2;
set ColTransfType Linear;
geomTransf $ColTransfType $IDColtransf;
geomTransf Linear $IDBeamtransf ;

#set sec_elements $sec_Acero
#columnas
# element elasticBeamColumn $eleTag $iNode $jNode $ip $sec_Tag $IDTransf
#Viga
element forceBeamColumn 23 2 3 5 $BeamSecTag $IDBeamtransf;
element forceBeamColumn 12 1 2 5 $ColSecTag $IDColtransf ;
element forceBeamColumn 34 3 4 5 $ColSecTag $IDColtransf ;

#Caso de carga-Gravedad
#Crea un patron de carga con time serie lineal
-----
#LoadPattern
pattern Plain 1 Linear {};
eleLoad -ele 23 -type beamUniform -38.32 ;sin peso propio
; # distributed superstructure-weight on beam
}
#recorder
recorder Node -file Data/reactionodo2col.out -time -node 2 -dof 1 reaction;
recorder Element -file Data/fuerzasbeam.out -time -ele 23 -dof 2 forces;
recorder Element -file Data/fuerzascolumna.out -time -ele 12 -dof 1 forces;
-----
#Creacion del analisis por Gravedad
constraints Plain;
numberer Plain;
system BandGeneral;
test NormDispIncr 1.0e-6 200 ;
algorithm Newton;
integrator LoadControl 0.1; #Carga aplicada en un paso
analysis Static;
analyze 10;
loadConst -time 0.0;

puts "Modelo construido"

#Fin de la generacion del analisis
print -file resultadosgravitacional.out

```

Anexo 3. Código OpenSees- Análisis estático no lineal Pushover.

```

#Definicion de tipo de dimensiones y grados de libertad
model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3 ;
#Definicion de nodos
set Hentre [expr 275];#Altura entrepiiso cm
set Lv [expr 400]; # Longitud de viga
set g [expr 981]; #Gravedad m/s2
set Pcol 4900 ;
set PP 14000;
set Mass [expr $PP/$g];
set Izcol 125052.1;#inercia cm4
set Izviga 107187.5;

#Definicion de coordenadas
#node $tag_node $X $Y
node 1 0 0;
node 2 0 $Hentre;
node 3 $Lv $Hentre;
node 4 $Lv 0;
#Restricciones (empotramiento)
#fix $tag_node #fix_X #fix_Y #fix_RZ
fix 1 1 1;
fix 4 1 1 1;
fix 2 0 0;
fix 3 0 0 0;
#nodal masas
mass 2 $Mass 0. 0. ;
mass 3 $Mass 0. 0. ;
#Definir elementos y Secciones
set ColSecTag 1 ; # assign a tag number to the column section
set BeamSecTag 2; # assign a tag number to the beam section
# define section geometry
set rec [ expr 4];
set numberscol 8;
set A_phi14 [expr 1.54];

#Definicion de los materiales (kg-cm)
set matIDAcero 1;
set matIDHormigon 2;
set Fy 4200.0;
set Es 2039432.4259559;
set epy [expr $Fy/$Es];
set labda 0.02; #Strain hardening ratio
set fc 210;
set ec0 -0.003;
set fcu [expr 0.85* $fc];
set ecu -0.05;
set b 0.015;
# Material "Hormigon210": matTag fc' epsc0 fcu' epsu
uniaxialMaterial Concrete01 $matIDHormigon $fc $ec0 $fcu $ecu ;
# Material "Refuerzo varilla G60": matTag Fy $Fyn E0 bp bn R0 cR1 cR2
uniaxialMaterial SteelMPF $matIDAcero $Fy $Fy $Es $b $b 5.0 0.925 0.15;
#-----
#Secciones Viga
#elementos lineales Viga
set Aviga 1050;
set Iz 107187.5;
# Sección fibra-hormigon armado Viga
set Hvig [expr 30];
set Bvig [expr 35];

|section fiberSec $BeamSecTag {};
#Patch Rectangular
#hormigon
#patch rect $matTag $SubdivY $SubdivZ $yi $zi $yj
patch rect $matIDHormigon 5 5 [expr -$Bvig/2] [expr -$Bvig/2] [expr $Bvig/2] [expr $Bvig/2];
#Refuerzo distribuido
layer straight $matIDAcero 3 $A_phi14 [expr $Hvig/2- $rec] [expr $Bvig/2- $rec] [expr $Hvig/2- $rec] [expr -$Bvig/2+$rec];
layer straight $matIDAcero 3 $A_phi14 [expr -$Hvig/2+$rec] [expr $Bvig/2- $rec] [expr -$Hvig/2+$rec] [expr -$Bvig/2+$rec];
};

#-----

```

```

#Secciones columnas cm2
#elementos lineales Columna
set Acol [expr 35*35];
set Iz 107187.5;
#Secciones fibra
set sec_HA 1;
set sec_Acero 2;
# Seccion fibra-hormigon armado Viga
set rec [expr 4];
set Hcol 35;
set Bcol [expr 35];
section fiberSec $ColSecTag {};
#Patch Rectangular
#hormigon
#patch rect $matTag $SubdivY $SubdivZ $yi $zi $yj
patch rect $matIDHormigon 5 5 [expr -$Hcol/2] [expr -$Bcol/2] [expr $Hcol/2] [expr $Bcol/2];
#Refuerzo distribuido
layer straight $matIDAcero 3 $A_phil4 [expr $Hcol/2- $rec] [expr $Bcol/2- $rec] [expr $Hcol/2- $rec] [expr -$Bcol/2+$rec];
layer straight $matIDAcero 2 $A_phil4 [expr 0.5*($Hcol-2*$rec)/2.0] [expr $Bcol/2- $rec] [expr 0.5*($Hcol-2*$rec)/2.0] [expr -$Bcol/2+$rec];
layer straight $matIDAcero 3 $A_phil4 [expr -$Hcol/2+$rec] [expr $Bcol/2- $rec] [expr -$Hcol/2+$rec] [expr -$Bcol/2+$rec];
};
puts "Secciones fibra creadas"
#Definicion de ELEMENTOS
#-----
set IDCColtransf 1;
set IDBeamtransf 2;
set ColTransfType Linear;
geomTransf $ColTransfType $IDColtransf;
geomTransf Linear $IDBeamtransf;

#set sec_elements $sec_Acero
#columnas
# element elasticBeamColumn $eleTag $iNode $jNode $ip $sec_Tag $IDTransf
#Viga
element dispBeamColumn 23 2 3 5 $BeamSecTag $IDBeamtransf;
#Columnas
element dispBeamColumn 12 1 2 5 $ColSecTag $IDColtransf;
element dispBeamColumn 34 3 4 5 $ColSecTag $IDColtransf;

#Caso de carga-Gravedad
#Crea un patron de carga con time serie lineal
#-----
#LoadPattern
pattern Plain 1 Linear {};
eleLoad -ele 23 -type -beamUniform -73.32 ;
; # carga distribuida tomando el peso de la estructura
}
#recorder
recorder Node -file Data/disp.out -time -node 2 -dof 1 disp;
#-----
#Creacion del analisis por Gravedad
constraints Plain;
numberer Plain;
system BandGeneral;
test NormDispIncr 1.0e-6 200 ;
algorithm Newton;
integrator LoadControl 0.1; #Carga aplicada en un paso
analysis Static;
analyze 10;
loadConst -time 0.0;

puts "Modelo construido"

#Fin de la generacion del analisis
#ANALISIS PUSHOVER
# execute this file after you have built the model, and after you apply gravity
# we need to set up parameters that are particular to the model.
set IDctrlNode 2; # node where displacement is read for displacement control
set IDctrlDOF 1; # degree of freedom of displacement read for displacement control
# characteristics of pushover analysis
set Dmax 12; # maximum displacement of pushover. push to 12cm.
set Dincr [expr 0.001*$hentre]; # displacement increment for pushover. you want this to be very small, but not too small to slow down the
# create load pattern for lateral pushover load
set Hload [expr 1]; # define the lateral load as a proportion of the weight so that the pseudo time equals the lateral-load coefficient
| # define nodes where lateral load is applied in static lateral analysis
pattern Plain 2 Linear {}; # define load pattern -- generalized
load 2 1 0.0 0.0 ;
| load 3 1 0.0 0.0;
};

constraints Plain;
numberer Plain

```

```

set systemTypeStatic BandGeneral;           # try UmfPack for large model
system $systemTypeStatic
set TolStatic 1.e-6;                      # Convergence Test: tolerance
set maxNumIterStatic 6;                   # Convergence Test: maximum number of iterations that will be performed before "failure to converge" is
set printFlagStatic 0;                    # Convergence Test: flag used to print information on convergence (optional)      # 1: print informati
set testTypeStatic EnergyIncr; # Convergence-test type
test $testTypeStatic $TolStatic $maxNumIterStatic $printFlagStatic;
set algorithm $algorithmTypeStatic;
set algorithmTypeStatic Newton;
algorithm $algorithmTypeStatic;
integrator DisplacementControl $IDctrlNode $IDctrlDOF $Dincr

set analysisTypeStatic Static
analysis $analysisTypeStatic

# ----- perform Static Pushover Analysis
set Nsteps [expr int($Dmax/$Dincr)];      # number of pushover analysis steps
set ok [analyze $Nsteps];                   # this will return zero if no convergence problems were encountered

# ----- in case of convergence problems
if {$ok != 0} {
# change some analysis parameters to achieve convergence
# performance is slower inside this loop
    set ok 0;
    set controlDisp 0.0;           # start from zero
    set D0 0.0;                  # start from zero
    set Dstep [expr {($controlDisp-$D0)/($Dmax-$D0)}]
    while {($Dstep < 1.0 && $ok == 0)} {
        set controlDisp [nodeDisp $IDctrlNode $IDctrlDOF]
        set Dstep [expr {($controlDisp-$D0)/($Dmax-$D0)}]
        set ok [analyze 1]
        if {$ok != 0} {
            puts "Trying Newton with Initial Tangent .."
            test NormDispIncr $Tol 2000 0
            algorithm Newton -initial
            set ok [analyze 1]
            test $testType $Tol $maxNumIter 0
            algorithm $algorithmType
        }
        if {$ok != 0} {
            puts "Trying Broyden .."
            algorithm Broyden 8
            set ok [analyze 1]
            algorithm $algorithmType
        }
        if {$ok != 0} {
            puts "Trying NewtonWithLineSearch .."
            algorithm NewtonLineSearch .8
            set ok [analyze 1]
            algorithm $algorithmType
        }
    }
}
};

puts "DonePushover"

```

Anexo 4. Código OpenSes - Análisis dinámico no lineal.

```

#ANALISIS DINAMICO NO LINEAL
#Definicion de tipo de dimensiones y grados de libertad
model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3 ;
#Definicion de nodos
set Hentre [expr 275];#Altura entre piso cm
set Lv [expr 400]; # Longitud de viga
set g [expr 981]; #Gravedad cm/s2
set Pcol 4900 ;
set PP 13000;
set Mass [expr $PP/$g];
set Izcol 125052.1;#inercia cm4
set Izviga 107187.5;

#Definicion de coordenadas
#node $tag_node $X $Y
node 1 0 0;
node 2 0 $Hentre;
node 3 $Lv $Hentre;
node 4 $Lv 0;
#Restricciones (empotramiento)
#fix $tag_node #fix_X #fix_Y #fix_RZ
fix 1 1 1;
fix 4 1 1 1;
fix 2 0 0 0;
fix 3 0 0 0;
#nodal masas
mass 2 $Mass 0.0.;
mass 3 $Mass 0.0.;
#Definir elementos y Secciones
set ColSecTag 1 ; # assign a tag number to the column section
set BeamSecTag 2; # assign a tag number to the beam section
# define section geometry
set rec [ expr 4];
set numbarscol 8;
set A_phi14 [expr 1.54];

#Definicion de los materiales (kg-cm)
set matIDAcero 1;
set matIDHormigon 2;
set Fy 4200.0;
set Es 2039432.4259559;
set epy [expr $Fy/$Es];
set labda 0.02; #Strain hardening ratio
set fc 210;
set ec0 -0.003;
set fcu [expr 0.85* $fc];
set ecu -0.05;
set b 0.015;
# Material "Hormigon210": matTag fc' epse0 fcu' epsu
uniaxialMaterial Concrete01 $matIDHormigon $fc $ec0 $fcu $ecu ;
# Material "Refuerzo varilla G60": matTag Fy $Fyn E0 bp bn R0 cR1 cR2
uniaxialMaterial SteelMPF $matIDAcero $Fy $Es $b 5.0 0.925 0.15;
-----
#Secciones Viga
#elementos lineales Viga
set Aviga 1050;
set Iz 107187.5;
# Sección fibra-hormigon armado Viga
set Hvig [expr 30];
set Bvig [expr 35];

section fiberSec $BeamSecTag {};
#Patch Rectangular
#hormigon
#patch rect $matTag $SubdivY $SubdivZ $yi $zi $yj
patch rect $matIDHormigon 5 5 [expr -$Hvig/2] [expr -$Bvig/2] [expr $Hvig/2] [expr $Bvig/2];
#Refuerzo distribuido

```

```

layer straight $matIDAcero 3 $A_phil4 [expr $Hvig/2- $rec] [expr $Bvig/2- $rec] [expr $Hvig/2- $rec] [expr -$Bvig/2+$rec];
layer straight $matIDAcero 3 $A_phil4 [expr -$Hvig/2+$rec] [expr $Bvig/2- $rec] [expr -$Hvig/2+$rec] [expr -$Bvig/2+$rec];
};

#-----
#Secciones columnas cm2
#elementos lineales Columna
set Acol [expr 35*35];
set Iz 107187.5;
#Secciones fibra
set sec_HA 1;
set sec_Acero 2;
# Seccion fibra-hormigon armado Viga
set rec [ expr 4];
set Hcol 35;
set Bcol [expr 35];
|section fiberSec $ColSecTag {};
#Patch Rectangular
#hormigon
#patch rect $matTag $SubdivY $SubdivZ $yi $zi $yj
patch rect $matIDHormigon 5 5 [expr -$Hcol/2] [expr -$Bcol/2] [expr $Hcol/2] [expr $Bcol/2];
#Refuerzo distribuido
layer straight $matIDAcero 3 $A_phil4 [expr $Hcol/2- $rec] [expr $Bcol/2- $rec] [expr $Hcol/2+$rec] [expr -$Bcol/2+$rec];
layer straight $matIDAcero 2 $A_phil4 [expr 0.5*($Hcol-2*$rec)/2.0] [expr $Bcol/2- $rec] [expr 0.5*($Hcol-2*$rec)/2.0] [expr -$Bcol/2+$rec];
layer straight $matIDAcero 3 $A_phil4 [expr -$Hcol/2- $rec] [expr $Bcol/2- $rec] [expr -$Hcol/2+$rec] [expr -$Bcol/2+$rec];
};

puts "Secciones fibra creadas"
#Definicion de ELEMENTOS
#-----
set IDColtransf 1;
set IDBeamtransf 2;
set ColTransfType Linear;
geomTransf $ColTransfType $IDColtransf;
geomTransf Linear $IDBeamtransf ;
#set sec_elements $sec_Acero
#columnas
# element elasticBeamColumn $eleTag $iNode $jNode $ip $sec_Tag $IDTransf
#Viga
element dispBeamColumn 23 2 3 5 $BeamSecTag $IDBeamtransf;
#Columnas
element dispBeamColumn 12 1 2 5 $ColSecTag $IDColtransf ;
element dispBeamColumn 34 3 4 5 $ColSecTag $IDColtransf;

#Caso de carga-Gravedad
#Crea un patron de carga con time serie lineal
#-----
#LoadPattern
pattern Plain 1 Linear {};
eleLoad -ele 23 -type -beamUniform -73.32 ;
; # distributed superstructure-weight on beam
}
#reorder
#-----
#Creacion del analisis por Gravedad
constraints Plain;
numberer Plain;
system BandGeneral;
test NormDispIncr 1.0e-6 200 ;
algorithm Newton;
integrator LoadControl 0.01; #Carga aplicada en un paso
analysis Static;
analyze 10;
loadConst -time 0.0;

puts "Modelo construido"
#-----

```

```

wipeAnalysis
#ANALISIS DINAMICO

# COLOCO PARÁMETROS PARA ANÁLISIS DE ACCIÓN SÍSMICA
# Se carga el patron de aceleraciones
set DtAnalysis 0.01; #paso del tiempo del acelerograma
set Npuntos 1940; #numero de puntos del acelerograma
set dix 1; # direccion en la que se aplica el registro
timeSeries Path 1 -dt $DtAnalysis -filePath aceleraciones(cmsobres2).txt -factor -1;
pattern UniformExcitation 2 $dix -accel 1;
# Registro de resultados
set nodocontrol 2;
#desplazamiento nodo de control
recorder Element -file "colsec1def.txt" -ele 12 section 1 deformation;
recorder Element -file "colsec1for.txt" -ele 12 section 1 force;
recorder Element -file "beamsec1def.txt" -ele 23 section 1 deformation;
recorder Element -file "beamsec1for.txt" -ele 23 section 1 force;
recorder Node -file "reactionodo2.txt" -time -node 2 -dof 1 reaction;
recorder Node -file "desplazamientoo2.txt" -time -node 2 -dof 1 disp;

# Definir el primer valor propio
set lambda [eigen 1];
set omega [expr sqrt(@lambda)];

# Definir el coeficiente de amortiguamiento modal deseado (por ejemplo, 5%)
set xDamp 0.05;

# Calcular los coeficientes de Rayleigh
set alphaM 0.0;
set betaKcurr [expr 2.0 * $xDamp / $omega];
set betaKcomm 0.0;
set betaKinit 0.0;
# Asignar los coeficientes de amortiguamiento de Rayleigh
rayleigh $alphaM $betaKcurr $betaKinit $betaKcomm;

variable constraintsTypeDynamic Transformation;
constraints $constraintsTypeDynamic ;

variable numbererTypeDynamic RCM
numberer $numbererTypeDynamic

variable systemTypeDynamic BandGeneral; # try UmfPack for large problems
system $systemTypeDynamic

# RelativeEnergyIncr --
set Tol 1.0e-4;
variable TolDynamic 1.0e-4;
set tolDynBasic 1.0e-4; # Convergence Test: tolerance
variable maxNumIterDynamic 2000; # Convergence Test: maximum number of iterations that will be performed before "failure to converge"
variable printFlagDynamic 0; # Convergence Test: flag used to print information on convergence (optional) # 1: print info
variable testTypeDynamic EnergyIncr; # Convergence-test type
test $testTypeDynamic $tolDynamic $maxNumIterDynamic $printFlagDynamic;
# for improved-convergence procedure:
variable maxNumIterConvergeDynamic 1000;
variable printFlagConvergeDynamic 0;

variable algorithmTypeDynamic ModifiedNewton
algorithm $algorithmTypeDynamic;

variable NewmarkGamma 0.5; # Newmark-integrator gamma parameter (also HHT)
variable NewmarkBeta 0.25; # Newmark-integrator beta parameter
variable integratorTypeDynamic Newmark;
integrator $integratorTypeDynamic $NewmarkGamma $NewmarkBeta
# Ajustar los parámetros de amortiguamiento
# Ejecutar análisis
set ok [analyze $Nsteps $DtAnalysis];
if {$ok != 0} {
    puts "Error en el análisis. Intentando con Newton con tangente inicial..";
    algorithm Newton -inicial;
    set ok [analyze $Nsteps $DtAnalysis];
    if {$ok != 0} {
        puts "Fallo en la convergencia tras múltiples intentos.";
    }
} else {
    puts "Análisis dinámico completado exitosamente.";
}

# Guardar resultados y limpiar
logFile -close;

variable analysisTypeDynamic Transient
analysis $analysisTypeDynamic
set ok 0;
while {ok == 0 && $tCurrent <=$totalAnalysisTime/$dtAnalysis} {
    set ok [analyze 11 $dtAnalysis];
    if {$ok == 0} {puts "Time: $tCurrent ($totalAnalysisTime)>> CONVERGED!"};
    #####
    if {$ok != 0} {
        puts "Intentando KrylovNewton con DispIncr";
        test NormDispIncr $tolDynDisp $maxNumIterDyn $showTest;
        algorithm KrylovNewton;
        set ok [analyze 1 $dtAnalysis];
        if {$ok == 0} {
            test $testBasic $tolDynBasic $maxNumIterDynBasic $showTestBasi;
        }
    }
}

```

```

        algorithm {*} $algorithBasic;
    };
};

if ($ok == 0) {
    puts "Try Newton initial with DispIncr";
    test NormDispIncr $tolDynBasic $maxNumIterDyn $showTest;
    algorithm Newton -initial;
    set ok [analyze 1 $dtAnalysis];
    if ($ok == 0) {
        test $testBasic $tolDynBasic $maxNumInterDynBasic $showTestBasi;
        algorithm {*} $algorithBasic;
    };
};

if ($ok != 0) {
    puts "Try Newton initial with DispIncr";
    test NormDispIncr $tolDynDisp $maxNumInterDyn $showTestBasi;
    algorithm Newton -initial;
    set ok [analyze 1 $dtAnalysis];
    if ($ok == 0) {
        test $testBasic $tolDynBasic $maxNumInterDynBasic $showTestBasi;
        algorithm {*} $algorithBasic;
    };
};

#UNBALANCE#####
if ($ok != 0) {
    puts "Try Newton -Hall 50-50 with Unbalance";
    test NormUnbalance $tolDynUnb $maxNumInterDyn $showTest;
    algorithm Newton -Hall 0.5 0.5;
    set ok [analyze 1 $dtAnalysis];

    if ($ok == 0) {
        test $testBasic $tolDynBasic $maxNumInterDynBasic $showTestBasi;
        algorithm {*} $algorithBasic;
    };
};

set TmaxAnalysis [expr $DtAnalysis*$Npuntos]; # duración de acción dinámica (seg)
set Nsteps [expr int($TmaxAnalysis/$DtAnalysis)]; #número de pasos
set ok [analyze $Nsteps $DtAnalysis]; # se realiza el análisis; retorna ok=0 si el
análisis fue exitoso
# ALGORITMO USADO EN CASO DE ANÁLISIS FALLIDO (Dra. Mazzoni)
if ($ok != 0) { : # si el análisis no es exitoso.
# Se cambia algunos parámetros de análisis para alcanzar la convergencia
# Proceso es más lento dentro de este lazo
# Análisis controlado por tiempo
set ok 0;
set controlTime [getTime];
while { $controlTime < $TmaxAnalysis && $ok == 0 } {
    set controlTime [getTime]
    set ok [analyze 1 $DtAnalysis]
    if ($ok != 0) {
        puts "Trying Newton with Initial Tangent .."
        test NormDispIncr $Tol 1000 0
        algorithm Newton -initial
        set ok [analyze 1 $DtAnalysis]
        test $TestType $Tol $maxNumIter 0
        algorithm $algorithmType
    }
    if ($ok != 0) {
        puts "Trying Broyden .."
        algorithm Broyden 8
        set ok [analyze 1 $DtAnalysis]
        algorithm $algorithmType
    }
    if ($ok != 0) {
        puts "Trying NewtonWithLineSearch .."
        algorithm NewtonLineSearch 0.8
        set ok [analyze 1 $DtAnalysis]
        algorithm $algorithmType
    }
};

# Finaliza si ok != 0
puts "ANALISIS DINAMICO REALIZADO: [getTime]"
if ($ok != 0) {
    puts "El análisis falló en converger"
} else {
    puts "Análisis dinámico completado exitosamente"
}
puts " análisis dinámico finalizado"
}

```