



UNIVERSIDAD
SAN SEBASTIAN

FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL
CONCEPCIÓN

**IMPLEMENTACIÓN DE ELEMENTO SHELL PARA LA MODELACIÓN DE
SPSW EN OPENSEES**

Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil

Profesor tutor : Dr. Ramón David Mata Lemus
Estudiante : Lucas Alberto Olave Aravena

© Lucas Alberto Olave Aravena

Se autoriza la reproducción parcial o total de esta de esta obra con fines académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento, siempre y cuando se incluye la cita bibliográfica del documento

Concepción, Chile

2025

En _____, el _____ de _____ de _____ los de abajo firmante
dejan constancia que el (la) estudiante _____
de la carrera o programa de _____
ha aprobado la tesis para optar al título o grado académico de

con una nota de _____

Profesor Evaluador

Profesor Evaluador

Profesor Evaluador

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han sido parte fundamental de este camino. En primer lugar, a mi familia, por su amor incondicional, apoyo inquebrantable y por ser mi pilar en cada paso de este proceso. Su confianza en mí ha sido la mayor motivación para seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles.

A mis profesores y tutores, quienes con su guía, paciencia y conocimientos me han inspirado y motivado a crecer tanto académica como personalmente. Su orientación y enseñanzas han sido esenciales en mi formación y les estaré eternamente agradecido(a).

A mis compañeros y amigos, por el apoyo constante, los momentos compartidos y por hacer de esta etapa una experiencia enriquecedora e inolvidable. A mi familia, por su amor incondicional, su apoyo inquebrantable y por creer en mí en cada paso del camino.

Este logro no es solo mío, sino el resultado del esfuerzo conjunto de todas las personas que de alguna manera han estado a mi lado en este camino. Gracias por su paciencia, su cariño y su confianza.

Con gratitud

Lucas Olave

Contenido

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1. Planteamiento del problema	1
2. Objetivos.....	3
2.1. Objetivo general	3
2.2. Objetivos específicos	3
3. Justificación	4
3.1. Justificación Social.....	4
3.2. Justificación Economica.....	4
3.3. Justificación Académica	5
4. Alcance del Proyecto	5
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	6
1. Conceptos	6
2. Estado del arte	8
2.1. Desempeño sísmico en sistemas de muro de placas	13
2.1.1. Sistema de placas a considerado evaluaciones sísmicas	14
2.1.2. Muro de placa de acero corrugada.....	29
3. Comparación y Análisis de Muros Estructurales.....	40
CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO.....	42
1. Contenido del marco metodológico	42
2. Metodología en OpenSees	43
2.1. Metodología de placa <i>shell</i>	43
2.1.1. Librería de placa <i>shell</i>	43
2.1.2. Definición de modelo	44
2.1.2.1. Definición de materiales no lineal	44
2.1.2.2. Definición de secciones.....	45
2.1.2.3. Definición de Shell.....	47
2.1.2.4. Elemento FRAME.....	49
2.1.2.5. Elementos <i>truss</i>	50
2.1.2.6. Restricciones de nodos	52

2.1.3.	Análisis modal	53
2.1.4.	Nodos de control para aplicar carga de empuje y gravedad	55
2.1.5.	Análisis Pushover	57
2.2.	Código de <i>truss</i>	58
2.2.1.	Inicia el Código.....	59
2.2.2.	Shell y <i>truss</i>	60
2.2.3.	Elementos <i>truss</i>	62
2.2.4.	Análisis pushover	63
CAPITULO IV: RESULTADOS		66
1.	Resultado de Modelo de Muro de Placa en OpenSees	68
2.	Resultado de Análisis Modal del Muro de Placa.....	69
3.	Resultado de análisis Pushover	71
4.	Resultados del Análisis del Muro Tipo Truss	74
5.	Descripción de los Resultados de las Curvas <i>Pushover</i>	76
6.	Comparación resultado obtenido vs resultado esperado.....	79
CAPITULO V: CONCLUSIÓN		82
Bibliografía		84
ANEXO.....		88

Contenido de figuras

Figura 1: Vista de muro de corte con placa de acero de tres niveles. (Totter & Crisafulli, 2018.)	7
Figura 2: Fallo final de los especímenes (Yu J, Huang J, Li B, Feng X, 2021).....	9
Figura 3: resumen grafico de (Lu J, Zhang H, Yu S, 2021)	10
Figura 4: Modelo de análisis simplificado de SPSW (He J, Lin S, Li Y, Dong X, Chen S, 2022).....	11
Figura 5: Nefograma de tensión de modelos de muros de corte de placas de acero con diferentes espesores (Yu J, Huang J, Li B, Feng X, 2021)	15
Figura 6: Tamaño de malla del modelo EF (Bypour M, Kioumars M, Yekrangnia M, 2021).....	18

Figura 7: Espécimen de SPSW antes y después del ensayo cíclico(Acosta Palacio Carlos Enrique, 2010)	19
Figura 8: Respuesta cíclica de modelo de franjas para SPSWs (Acosta Palacio Carlos Enrique, 2010)	21
Figura 9: Esquema del sistema en torre LACCHC (Acosta Palacio Carlos Enrique, 2010).....	22
Figura 10: Mecanismo de colapso plástico para SPSW de 1 piso (Acosta Palacio Carlos Enrique, 2010)	23
Figura 11: Esquema del modelo de franjas para análisis no lineal de SPSW (Acosta Palacio Carlos Enrique, 2010).....	25
Figura 12: Esquema general de un SPSW(Leal Barrientos, 2019)	26
Figura 13: Planta genérica (dimensiones en mm) (Acosta Palacio Carlos Enrique, 2010).....	27
Figura 14: Vistas del modelo para el diseño de edificio de 9 pisos con sistema SPSW, construido en SAP2000 (Acosta Palacio Carlos Enrique, 2010).....	28
Figura 15: Diseño de resistencia de muros de corte de placas de acero corrugado prefabricadas bajo cargas combinadas de compresión y corte (Wen C, Guo Y, Zuo J, Zhao X, 2023).....	30
Figura 16: ejemplo de una histéresis (Acosta Palacio Carlos Enrique, 2010)	33
Figura 17: Envoltorio de esfuerzos a partir de análisis RHA y diagramas usados en edificio VBEs para edificio de 15 niveles (Acosta Palacio Carlos Enrique, 2010) .	39
Figura 18:investigaciones sobre muros.....	41
Figura 19: modelo de placa de acero	69
Figura 20: periodos de análisis modal.....	71
Figura 21: Curva pushover recta	72
Figura 22: curva pushover sin truss	73
Figura 23: Modelo sin truss	74
Figura 24: Modelo de placa de acero truss	76
Figura 25: Curva Pushover de placa de acero truss	77
Figura 26: Curva Pushover strip a compresión de muro de placa de acero truss .	78
Figura 27: Curva pushover strip a tracción muro de placa de acero truss	79

Figura 28: resultado obtenido en placa shell vs resultado esperado.....	80
Figura 29: resultado obtenido en placa truss vs resultado esperado	81

Contenido de tablas

Tabla 1: Comparación entre tipos de muro.....	40
Tabla 2: Varios resultados de placa shell.....	67

RESUMEN

Introducción: El análisis de muros de corte de placas de acero (SPSW) es fundamental para la seguridad sísmica debido a su capacidad de disipación de energía, pero su estudio se ve limitado por el alto costo de software comercial. OpenSees ofrece una alternativa accesible, aunque presenta dificultades en el modelado de SPSW por la falta de documentación y calibración. El presente estudio tiene como objetivo desarrollar y validar una metodología para la simulación de SPSW en OpenSees

Metodología: esta investigación combina enfoques documental y experimental para modelar muros de placa de acero de corte (SPSW) en OpenSees y validar su precisión mediante comparación con datos experimentales. Se realizan

simulaciones numéricas en OpenSeesPy, evaluando desplazamientos, esfuerzos y mecanismos plásticos, y se comparan los resultados con pruebas experimentales documentadas.

Resultados: Se observó que los elementos SHELL en OpenSees son estables en análisis modales y lineales, pero presentan limitaciones para simular el pandeo local de la placa. Por otro lado, los elementos truss en tracción demostraron mayor capacidad para reflejar efectos no lineales, incluyendo plastificación progresiva y degradación de resistencia.

Conclusión: El modelo desarrollado en OpenSees es adecuado para representar la rigidez global y el comportamiento modal de los SPSW, pero aún enfrenta limitaciones asociadas a la incapacidad de los elementos Shell para capturar adecuadamente el pandeo local y los mecanismos de disipación de energía, aspectos determinantes en el comportamiento sísmico de los SPSW.

PALABRAS CLAVES

< Muros de placa de acero de corte (SPSW)> < Modelado numérico en OpenSees> < Pandeo local y disipación de energía>

ABSTRACT

Introduction: The analysis of Steel Plate Shear Walls (SPSW) is essential for seismic safety due to their energy dissipation capacity. However, their study is limited due to the high cost of commercial software. OpenSees provides an accessible alternative, but it presents challenges in SPSW modeling due to a lack of documentation and calibration. This study aims to develop and validate a methodology for SPSW simulation in OpenSees.

Methodology: This research combines documentary and experimental approaches to model SPSWs in OpenSees and validate their accuracy through comparison with experimental data. Numerical simulations are performed in OpenSeesPy, evaluating

displacements, stresses, and plastic mechanisms, and the results are compared with documented experimental tests.

Results: It was observed that SHELL elements in OpenSees are stable in modal and linear analyses but have limitations in simulating the local buckling of the steel plate. On the other hand, truss elements in tension demonstrated a greater ability to capture nonlinear effects, including progressive plasticity and strength degradation.

Conclusion: The developed OpenSees model is suitable for representing the global stiffness and modal behavior of SPSWs but still faces challenges. The main limitation lies in the inability of SHELL elements to reproduce local buckling and energy dissipation, which are key aspects of the seismic performance of these systems.

Keywords

<Steel Plate Shear Walls (SPSW)> <Numerical modeling in OpenSees> <Local buckling and energy dissipation>

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

1. Planteamiento del problema

El análisis estructural de sistemas de muros especiales de placas de acero tipo SHELL, como los muros de corte de placas de acero (SPSW), es fundamental para garantizar la seguridad estructural frente a eventos sísmicos. Este sistema estructural es reconocido por su alta ductilidad, excelente capacidad de disipación de energía y resistencia ante cargas cíclicas (Wen C, Guo Y, Zuo J, Zhao X ,2023). No obstante, para aprovechar al máximo estas propiedades, resulta indispensable desarrollar modelos numéricos precisos que permitan predecir su comportamiento ante diferentes tipos de carga, incluyendo estáticas, cíclicas y sísmicas. Esto es crucial para evaluar fenómenos como el pandeo, el comportamiento fuera del plano, la histéresis y la curva fuerza-desplazamiento, contribuyendo así al diseño de estructuras más resilientes frente a terremotos (Dou C, Xie C, Wang Y, Yang N, 2023).

En la actualidad, gran parte de los estudios que abordan el modelado de placas de acero tipo SHELL utilizan programas comerciales como ABAQUS o ANSYS. Estas herramientas destacan por sus capacidades avanzadas en análisis tridimensional y simulación paramétrica, que permiten modelar de forma precisa el comportamiento de estas placas bajo condiciones complejas. Además, su interfaz intuitiva facilita la creación de modelos detallados y la simulación de fenómenos como el confinamiento de materiales y la degradación de rigidez (Tong J, Wu R, Wang L , 2023). Sin embargo, el elevado costo de estas plataformas limita su accesibilidad, particularmente en el ámbito académico y en países con recursos económicos restringidos, lo que impide que muchos investigadores puedan utilizarlas (Vaziri E, Gholami M, Gorji Azandariani M ,2021).

OpenSees se presenta como una alternativa accesible y de código abierto para el modelado estructural avanzado. Su flexibilidad permite realizar simulaciones precisas mediante el uso de elementos no lineales, modelos constitutivos complejos y algoritmos avanzados. Además, su capacidad para integrar scripting en Python o Tcl lo convierte en una herramienta poderosa para investigadores. Sin embargo, a pesar de estas ventajas,

el modelado de elementos tipo SHELL en OpenSees enfrenta importantes limitaciones, como la escasa documentación disponible, la complejidad de implementar materiales personalizados y la necesidad de realizar simplificaciones conservadoras en ciertos casos (Gorji Azandariani A, Gholhaki M, Gorji Azandariani M, 2022). Estas barreras dificultan su adopción en el análisis detallado de placas de acero.

El desarrollo de modelos precisos en OpenSees requiere calibraciones rigurosas basadas en datos experimentales. Estas calibraciones ajustan parámetros como el pandeo y la degradación de rigidez para replicar con fidelidad el comportamiento físico observado en pruebas de laboratorio. Algunos enfoques recientes han demostrado que es posible modelar placas de acero tipo SHELL utilizando elementos de bisagra plástica en fibras, junto con ecuaciones constitutivas avanzadas que consideran fenómenos como la fractura del acero (Jiang Z, Yan T, Zhang A, Su L, Shen C, 2022). Estos métodos han mostrado buenos resultados en la replicación de comportamientos histeréticos y degradación progresiva, logrando una correlación aceptable con los datos experimentales disponibles (Gorji Azandariani M, Roustaei A, Mohammadi M, Rashidi M, Abdolmaleki H, 2021).

Además de la calibración, es imperativo que OpenSees cuente con herramientas más accesibles para el modelado de elementos tipo SHELL (Saedi Daryan A, Salari M, Palizi S, Farhoudi N, 2023). Actualmente, este proceso requiere un nivel avanzado de conocimientos en programación y modelado, lo que restringe su aplicación a un grupo reducido de usuarios (Wu Y, Fan S, Zhou H, Guo Y, Wu Q, 2022). En contraste, los elementos FRAME y TRUSS son ampliamente utilizados en OpenSees debido a su implementación más sencilla y su integración con procedimientos estándar de análisis estructural. Esta situación resalta la necesidad de desarrollar recursos educativos, ejemplos prácticos y metodologías claras que simplifiquen el uso de elementos SHELL, permitiendo que más investigadores puedan utilizarlos en sus análisis estructurales.

A pesar de estos avances, la implementación de los elementos SHELL en OpenSees sigue presentando limitaciones importantes. En particular, no se han desarrollado estrategias integradas para la evaluación de parámetros clave como la plasticidad distribuida, la interacción con otros tipos de elementos o la incorporación de modelos de

daño específicos para materiales laminados. Además, la falta de validaciones comparativas extensivas con experimentos físicos o simulaciones en software comercial ha dificultado la aceptación generalizada de estos elementos dentro de la comunidad de ingeniería estructural.

El fortalecimiento de estas capacidades en OpenSees no solo mejorará la precisión de los modelos de placas de acero tipo SHELL, sino que también permitirá una comparación más directa con las soluciones obtenidas en programas comerciales. Esto fomentará investigaciones más inclusivas y reducirá los costos asociados al modelado avanzado, beneficiando a instituciones académicas y a investigadores en regiones con recursos limitados. Al superar las barreras actuales, OpenSees tiene el potencial de posicionarse como una herramienta robusta para el análisis estructural avanzado, ampliando significativamente su impacto en el campo de la ingeniería estructural (Wu Y, Fan S, Guo Y, Duan S, Wu Q, 2023).

En un contexto global, la optimización del modelado de placas de acero en OpenSees tiene implicaciones relevantes para la seguridad sísmica y la resiliencia estructural. Los muros de corte de placas de acero representan una solución eficiente para mitigar los efectos de los sismos, evitando colapsos catastróficos en estructuras críticas. Promover el desarrollo de herramientas accesibles y de código abierto para simular su desempeño bajo condiciones sísmicas contribuirá no solo a la democratización del acceso a soluciones avanzadas, sino también al fortalecimiento de las capacidades locales en regiones vulnerables. Esto facilitará la implementación de tecnologías más seguras y económicas, garantizando una mayor protección ante los desafíos que plantea la ingeniería sísmica.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Implementación de elemento *shell* para la modelación de SPSW en Opensees

2.2. Objetivos específicos

1. Desarrollar una modelación numérica en Opensees para la simulación del comportamiento de SPSW utilizando elementó Shell.

2. Evaluar la precisión de estabilidad numérica de los elementos Shell en la modelación de SPSW
3. Validar la metodología propuesta mediante la validación con los resultados obtenidos con datos experimentales

3. Justificación

3.1. Justificación Social

En el contexto de la ingeniería estructural, especialmente en países con recursos limitados o en organizaciones pequeñas, el acceso a software de simulación de alto costo es un desafío significativo. Muchos de los programas comerciales utilizados en la industria para el análisis sísmico de estructuras, como ABAQUS y ANSYS, requieren inversiones económicas sustanciales, lo que limita su disponibilidad en ciertas regiones o sectores. OpenSees, al ser un programa de código abierto, permite a empresas, universidades y oficinas de ingeniería acceder de manera libre y sin costos adicionales a herramientas avanzadas para el modelado de estructuras complejas, como las placas de acero SHELL. Esta accesibilidad proporciona una oportunidad para mejorar la capacitación de ingenieros y técnicos, lo que, a su vez, puede generar un impacto social positivo al elevar el nivel de preparación técnica en comunidades y regiones con limitaciones en recursos. Además, el uso de OpenSees fomenta la colaboración y la creación de una comunidad de usuarios global, que puede compartir avances y soluciones de manera abierta y democrática.

3.2. Justificación Económica

El principal beneficio económico de utilizar OpenSees y Python para el modelado de placas de acero SHELL radica en su naturaleza gratuita y accesible. Mientras que los programas comerciales de simulación y análisis estructural requieren costosos permisos de licencia y actualización, OpenSees permite a los usuarios implementar modelos avanzados sin incurrir en gastos adicionales. Para empresas de ingeniería que operan con presupuestos limitados, especialmente en proyectos de investigación, utilizar OpenSees puede reducir significativamente los costos operativos relacionados con software. Además, Python, que es utilizado para escribir scripts en OpenSees, es también un lenguaje de programación gratuito y ampliamente utilizado en la industria. Esta

combinación de herramientas accesibles no solo permite que los recursos financieros se destinen a otras áreas críticas de investigación o desarrollo, sino que también brinda la oportunidad de adoptar una solución de alto nivel para el análisis estructural sin sacrificar la calidad del trabajo.

3.3. Justificación Académica

Desde el punto de vista académico, el uso de OpenSees y Python ofrece una excelente oportunidad para desarrollar nuevas metodologías de análisis estructural, especialmente para el modelado de elementos complejos como las placas de acero. Aunque la mayoría de las investigaciones previas se han centrado en el uso de programas comerciales con capacidades avanzadas en el modelado de este tipo de estructuras, OpenSees ofrece la flexibilidad necesaria para implementar modelos innovadores y personalizados sin depender de las limitaciones de software propietario. A través del uso de Python, los académicos pueden crear y compartir metodologías y algoritmos específicos que sean más adaptables a las necesidades del proyecto, lo que promueve el avance del conocimiento y la innovación en el campo. Además, el código abierto de OpenSees permite que los estudiantes y profesionales en formación puedan acceder a ejemplos y realizar pruebas prácticas, lo que mejora su comprensión de conceptos fundamentales y les permite experimentar con enfoques de modelado que quizás no serían posibles en un entorno con software comercial.

4. Alcance del Proyecto

En el marco de este proyecto, se está desarrollando un análisis numérico detallado de placas de acero SHELL utilizando OpenSees y Python, con el objetivo de explorar su comportamiento bajo diferentes condiciones de carga, particularmente en el contexto de estructuras sometidas a fuerzas sísmicas o cargas laterales. Se está implementando un modelo de elementos finitos para simular la respuesta de estas estructuras, tomando en cuenta la histéresis, fuerza vs desplazamiento, y otros parámetros clave que determinan su rendimiento estructural. Este análisis permite obtener información sobre la rigidez, la *disipación de energía*, y la capacidad de deformación de las placas de acero SHELL bajo condiciones extremas. A través de este trabajo, se busca promover el uso de OpenSees como una herramienta robusta y accesible para la ingeniería estructural.

El proyecto no incluye la implementación de análisis dinámicos completos como análisis sísmicos en tiempo real o la integración de modelos avanzados de interacción suelo-estructura. Tampoco se están realizando experimentos físicos para validar los resultados obtenidos en el modelo numérico, lo que limita la capacidad de correlacionar los resultados de simulación con comportamientos reales de las estructuras. Además, aunque se están considerando diferentes tipos de cargas, el enfoque actual no abarca una evaluación exhaustiva de la fatiga o el comportamiento de la placa de acero SHELL a largo plazo, aspectos que podrían influir en el desempeño de estas estructuras bajo condiciones de uso prolongado.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

1. Conceptos

Un muro de placa de acero de corte (Steel Plate Shear Wall, SPSW) es un sistema estructural utilizado para resistir cargas laterales en edificaciones como se muestra en la figura 1, compuesto por placas de acero delgadas conectadas a un marco de vigas y columnas. Su funcionamiento se basa en el desarrollo de un mecanismo de acción de banda tensada (tension field action), donde la placa de acero, al perder estabilidad bajo compresión, genera franjas diagonales de tracción que contribuyen a la resistencia y disipación de energía del sistema. Este mecanismo es similar al comportamiento de una viga en celosía, donde la placa de acero actúa como los elementos diagonales que resisten fuerzas de tracción, mientras que el marco perimetral proporciona estabilidad y confinamiento.

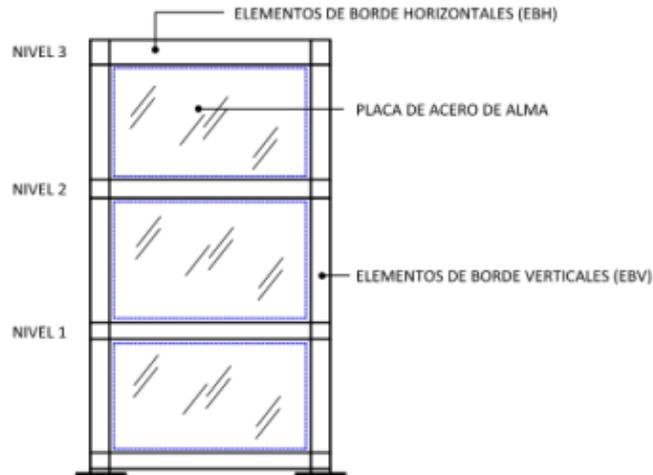


Figura 1: Vista de muro de corte con placa de acero de tres niveles. (Totter & Crisafulli, 2018.)

Desde el punto de vista metodológico, el diseño y análisis de los muros de placa de acero de corte requiere considerar el pandeo inelástico de la placa, la interacción con el marco circundante y la capacidad de disipación de energía del sistema. Para su modelado, es común el uso de elementos shell, que permiten representar el comportamiento de la placa, así como elementos frame para capturar la respuesta del marco estructural. En algunas metodologías, los efectos de tracción pueden ser simplificados mediante elementos *truss*, que representan las bandas tensadas formadas en la placa. Este enfoque permite estudiar la influencia de los elementos de tracción en la resistencia global del sistema y evaluar su respuesta bajo cargas laterales, como en análisis *pushover* o dinámicos no lineales.

Importancia de Modelar un Muro como Shell

- a) **Captura el Comportamiento Realista:** Permiten representar de forma precisa los efectos combinados de fuerzas axiales, cortantes, flexión y torsión. Esta capacidad es clave para simular el comportamiento no lineal del acero y sus mecanismos de disipación de energía.
- b) **Considera el Acoplamiento entre Cargas Laterales y Axiales:** En análisis sísmico y de cargas de viento, los muros resisten fuerzas laterales y pueden interactuar con elementos como losas o vigas, lo cual se modela mejor con elementos shell.

- c) **Incorpora Materiales No Lineales:** Permiten asignar modelos constitutivos avanzados que capturan el comportamiento inelástico del acero. Esto incluye pandeo local, plastificación progresiva y degradación por carga cíclica. Su uso es fundamental para representar la respuesta sísmica realista de muros de acero.
- d) **Evita Simplificaciones en la Distribución de Esfuerzos:** Modelar un muro como una serie de elementos frame o truss puede llevar a distribuciones inexactas de esfuerzos, mientras que los elementos shell capturan mejor el flujo de cargas.
- e) **Útil para P-Delta y Efectos de Segundo Orden:** Los elementos shell pueden capturar inestabilidades por **P-Delta**, lo cual es clave en estructuras esbeltas o con cargas importantes.

2. Estado del arte

El desempeño sísmico de los muros de corte de placas de acero ha sido ampliamente estudiado a través de enfoques experimentales, numéricos y analíticos. Diferentes investigaciones han abordado aspectos clave como la conexión placa-marco, la capacidad última de muros con conexiones parciales, el comportamiento de muros reforzados y el efecto de configuraciones geométricas específicas.

Estudios como los de (Yu J, Huang J, Li B, Feng X, 2021) han demostrado la efectividad de conexiones innovadoras en el desempeño sísmico como se muestra en la figura 2, aunque persisten desafíos en la recuperación de las placas tras un sismo. (Gorji Azandariani M, Kafi M, Gholhaki M Journal, 2021) exploraron la capacidad última de muros con conexiones parciales, evidenciando mejoras en ductilidad y disipación de energía, aunque sin profundizar en la influencia de la longitud de la conexión. (Bypour M, Kioumars M, Yekrangnia M, 2021) analizaron muros reforzados con aberturas, desarrollando modelos numéricos para predecir su capacidad y resistencia al pandeo, resaltando su estabilidad estructural bajo cargas avanzadas.

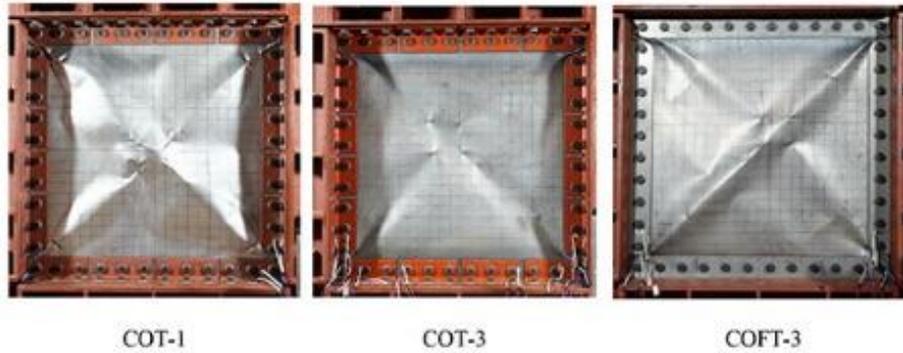


Figura 2: Fallo final de los especímenes (Yu J, Huang J, Li B, Feng X, 2021)

Por otro lado, propusieron un modelo analítico para muros sometidos a esfuerzo cortante excéntrico, validando su precisión con modelos de elementos finitos, aunque sin considerar otros efectos a largo plazo. (Lu J, Zhang H, Yu S, 2021) evaluaron muros autocentrantes con ranuras, destacando la influencia de parámetros geométricos en su desempeño sísmico como se muestra en la figura 3. (Hajimirsadeghi & Fanaie, 2021) estudiaron los efectos de la longitud no conectada de la placa de relleno, demostrando mejoras en la distribución de tensiones, aunque sin resolver completamente los efectos negativos en los elementos de borde.

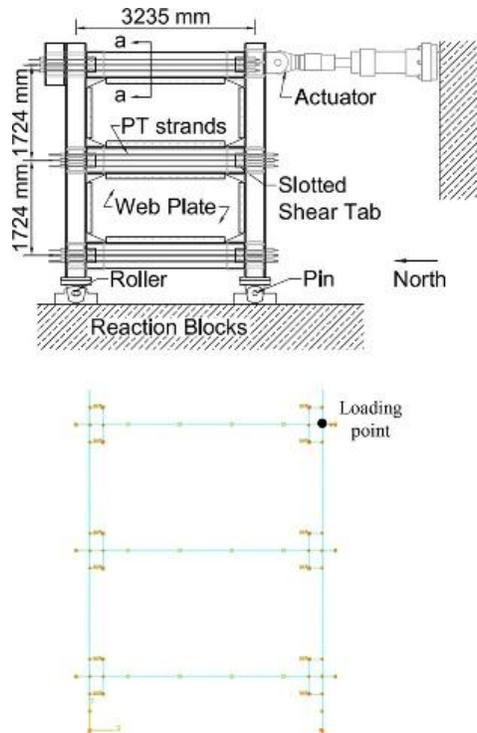


Figura 3: resumen grafico de (Lu J, Zhang H, Yu S, 2021)

Finalmente, investigaciones más recientes como la de (Gorji Azandariani M, Kafi M, Gholhaki M, 2021) han explorado sistemas híbridos y el índice de daño en muros de corte de placas de acero, validando modelos numéricos con resultados experimentales, aunque con limitaciones en la disponibilidad de datos.

En conjunto, estos estudios han permitido un mejor entendimiento del comportamiento de los muros de corte de placas de acero, resaltando la necesidad de optimizar sus conexiones, evaluar el impacto de configuraciones geométricas y desarrollar modelos más precisos para su desempeño sísmico.

El comportamiento de los muros de corte de placas de acero ha sido ampliamente estudiado en diversas investigaciones recientes, con enfoques en refuerzos, optimización estructural y comportamiento sísmico.

Se han desarrollado modelos numéricos en ABAQUS para evaluar la estabilidad, rigidez y capacidad de carga de placas de acero reforzadas con FRP, encontrándose mejoras en la resistencia al pandeo y la estabilidad fuera del plano. Sin embargo, persisten desafíos en el desempeño a largo plazo de adhesivos epóxicos y en condiciones

extremas (Tan J, Su M, Wang Y, Wang K, Cao Y, Li P, 2022). De manera similar, estudios experimentales sobre marcos de acero con muros de corte doble reforzados han demostrado alta capacidad de carga y estabilidad, aunque con ciertos efectos de pinzamiento y reducción de rigidez por pandeo local (Jiang Z, Yan T, Zhang A, Su L, Shen C, 2022).

El comportamiento cíclico de muros de acero inoxidable reforzados diagonalmente ha mostrado excelente ductilidad y resistencia, sin desgarros en las esquinas, pero con limitaciones en la evaluación de factores ambientales y otras configuraciones estructurales (Wu Y, Fan S, Zhou H, Guo Y, Wu Q, 2022). Además, estudios sobre muros de acero conformado en frío han analizado el desempeño sísmico y la disipación de energía, resaltando que el uso de restricciones de pandeo mejora significativamente la rigidez y la ductilidad, aunque persisten deformaciones residuales y esfuerzos concentrados.

La optimización estructural también ha sido un tema clave, con el uso de algoritmos genéticos para la disposición óptima de muros de corte en edificios de acero como se muestra en la figura 4. Los resultados han mostrado reducciones significativas en el peso estructural, aunque sin validación experimental de los diseños optimizados.

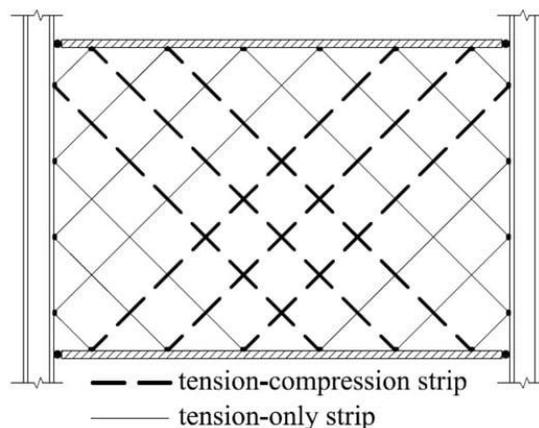


Figura 4: Modelo de análisis simplificado de SPSW (He J, Lin S, Li Y, Dong X, Chen S, 2022)

Por otro lado, estudios de pruebas en mesa vibratoria han permitido comprender el comportamiento sísmico de estructuras de varios pisos con muros de acero conformado en frío, evidenciando modos de falla específicos y destacando la importancia del análisis

bajo movimientos sísmicos bidireccionales. Finalmente, se ha evaluado el comportamiento cíclico de sistemas híbridos de muros de corte con placas de acero y columnas unidas, aportando nuevos conocimientos sobre el desempeño estructural en condiciones dinámicas.

En conjunto, estas investigaciones han contribuido al entendimiento del comportamiento de los muros de corte de placas de acero bajo diversas condiciones, resaltando mejoras en la estabilidad y resistencia, pero también identificando desafíos como el daño a largo plazo en adhesivos, efectos ambientales y validaciones experimentales para optimización estructural.

El estudio de (Gorji Azandariani M, Gholhaki M, Kafi M, Gorji Azandariani A, 2022) se enfoca en la evaluación del comportamiento cíclico y desempeño de un sistema híbrido de muro de corte con placas de acero y columnas enlazadas. Para ello, se llevaron a cabo pruebas experimentales en prototipos a escala y simulaciones numéricas con el fin de analizar parámetros clave como la ductilidad, absorción de energía y rigidez elástica en los muros de corte de placas de acero (SPSW) y sistemas de marco de columnas enlazadas (LCF). Los resultados demostraron que el sistema propuesto exhibe una alta rigidez inicial, una buena capacidad de disipación de energía y facilidad de reparación tras eventos sísmicos.

A pesar de estos avances, persisten desafíos en la optimización de ciertos parámetros estructurales, en particular el efecto de las aberturas en la capacidad de disipación de energía y la resistencia de los SPSW. Estas limitaciones han impulsado investigaciones adicionales para mejorar la precisión de los modelos numéricos y su aplicabilidad en el diseño sísmico de estructuras.

En este contexto, otros estudios recientes han abordado la optimización y el desempeño estructural de muros de corte de placas de acero mediante diferentes metodologías, como el uso de modelos de elementos finitos, análisis paramétricos y métodos metaheurísticos. Estas investigaciones han contribuido a una mejor comprensión del comportamiento sísmico de los SPSW, destacando su potencial para aplicaciones estructurales, pero también identificando limitaciones en su desempeño práctico, como

deformaciones fuera del plano y la influencia de diferentes materiales en su respuesta sísmica.

El estudio de los muros de corte de chapa de acero corrugado ha evolucionado en diversas direcciones, abordando su comportamiento estructural desde enfoques experimentales y numéricos. En esta línea, analizaron el desempeño de estos sistemas mediante modelaciones numéricas avanzadas y pruebas de carga cíclica. Se ha demostrado que los muros de corte de chapa de acero corrugado mejoran significativamente la disipación de energía y la resistencia cíclica, validándose a través de modelos de elementos finitos en ABAQUS.

Estudios recientes han profundizado en aspectos específicos, como la influencia de la configuración de las placas de relleno, la interacción entre la chapa corrugada y otros elementos estructurales, así como la relación entre la rigidez inicial y el pandeo de las placas. Se han desarrollado ecuaciones empíricas y modelos teóricos basados en la teoría de placas ortotrópicas para predecir el comportamiento en condiciones de carga combinada, proporcionando recomendaciones prácticas para optimizar la estabilidad y resistencia de estos sistemas estructurales.

A pesar de los avances, aún persisten desafíos en la comprensión del comportamiento post-pandeo, la degradación por fatiga y el impacto de condiciones de borde complejas. Estas investigaciones han sentado las bases para el desarrollo de nuevas metodologías de diseño y evaluación estructural de muros de corte de acero corrugado en aplicaciones de ingeniería sísmica y de alto desempeño.

En este contexto, resulta fundamental contar con metodologías de análisis que permitan evaluar con precisión el desempeño sísmico de estos sistemas. Diversos estudios han abordado esta problemática a través de enfoques analíticos y experimentales, desarrollando herramientas para su evaluación

2.1. Desempeño sísmico en sistemas de muro de placas

Para evaluar el desempeño sísmico de muros en sistemas de placas, diversos estudios han desarrollado metodologías de análisis basadas en diferentes enfoques. En esta línea,

los autores han llevado a cabo investigaciones que incluyen evaluaciones sísmicas detalladas, las cuales han sido publicadas en los siguientes trabajos:

2.1.1. Sistema de placas a considerado evaluaciones sísmicas

El estudio de (Yu J, Huang J, Li B, Feng X, 2021) investiga el desempeño sísmico de los muros de corte de placas de acero (SPSW) con una nueva conexión entre la placa de acero de relleno y el marco estructural. Para ello, se siguieron tres enfoques principales: análisis teórico, pruebas experimentales y análisis numérico.

En el análisis teórico, se definieron las propiedades mecánicas de la conexión propuesta, basada en ángulos de acero segmentados, placas de acero de relleno y eclisas con orificios estándar. Se derivaron ecuaciones para estimar la capacidad de carga de las conexiones en función de diferentes modos de falla, estableciendo dos criterios principales: el deslizamiento de la placa de acero y la extrusión de la eclisa.

Las pruebas experimentales incluyeron la construcción y evaluación de tres muestras de SPSW a escala 1/3, con dimensiones de 1.5 m de ancho y alto. Mediante pruebas cíclicas, se analizó el desempeño de la conexión entre la placa de acero y el marco, comparándola con la conexión tradicional de pernos para evaluar su efectividad.

El análisis numérico se llevó a cabo mediante simulaciones en ABAQUS, validando los modelos con los resultados experimentales. Además, se estudió la influencia del espesor de la placa de acero en el comportamiento sísmico de la estructura.

Finalmente, a partir de los resultados obtenidos en los experimentos y simulaciones, se evaluó la efectividad de la nueva conexión en términos de resistencia, disipación de energía y facilidad de construcción. Estos aspectos son fundamentales en el desempeño sísmico de los sistemas de muros de corte de placas de acero, donde la eficiencia de las conexiones influye directamente en la respuesta estructural como se muestra en la figura 4.

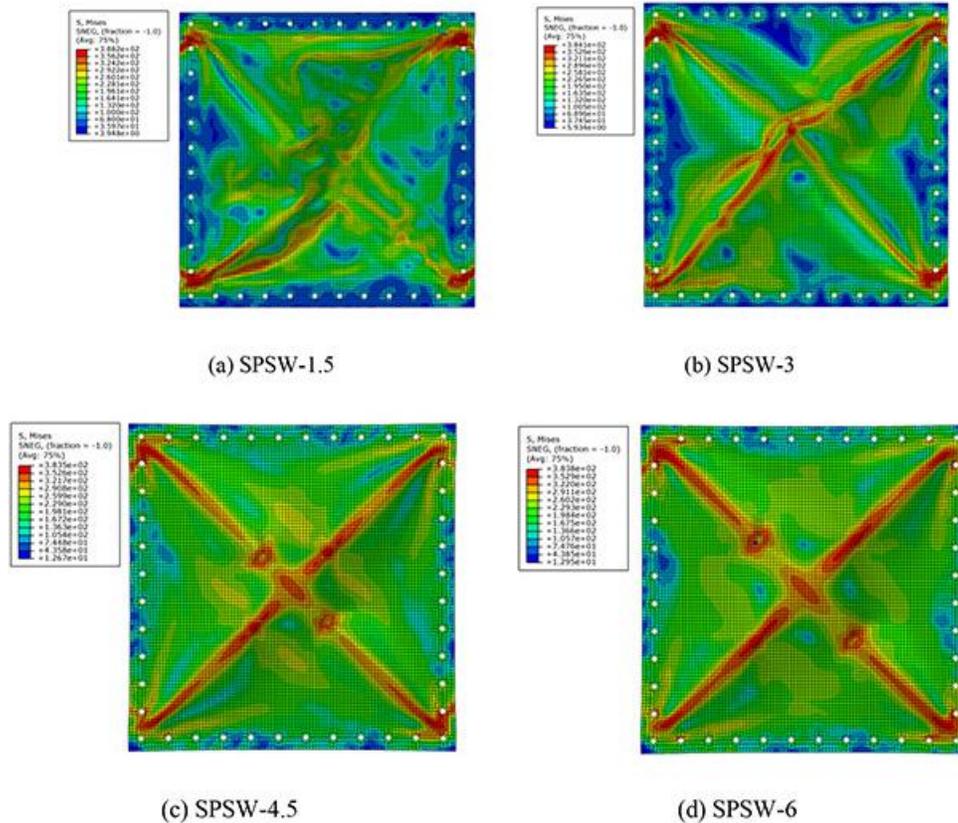


Figura 5: Nefograma de tensión de modelos de muros de corte de placas de acero con diferentes espesores (Yu J, Huang J, Li B, Feng X, 2021)

En esta misma línea, el estudio de (Gorji Azandariani M, Kafi M, Gholhaki M Journal, 2021) investiga el comportamiento estructural del sistema híbrido de muro de corte de placas de acero con columnas enlazadas (HLCS) mediante enfoques analíticos y numéricos. La metodología se divide en varias etapas, comenzando con la definición y configuración del sistema HLCS, el cual combina muros de corte de acero con pilares laterales conectados por vigas de enlace reemplazables. Se analizan los mecanismos de resistencia a cargas laterales, destacando el acoplamiento entre los pilares y el comportamiento plástico de las vigas de enlace.

Para estimar la capacidad última del sistema, se emplean los teoremas de límites superior e inferior de la teoría de plasticidad. Además, se modela la resistencia a la fuerza lateral del HLCS mediante un análisis plástico y el modelo de tira para la placa de acero de relleno. Posteriormente, se desarrollan modelos de elementos finitos en ABAQUS para validar los resultados del análisis de límites, considerando cargas cíclicas en los modelos

para evaluar el comportamiento estructural bajo condiciones sísmicas. La validación de los modelos numéricos se realiza mediante la comparación con resultados experimentales previos.

Un aspecto clave del análisis es la relación de acoplamiento (CR), que cuantifica el grado en que las vigas de enlace contribuyen a la resistencia lateral del sistema. Tal como se muestra en la ecuación 1:

$$CR = \frac{M_{Coupling}}{M_{Total}} = \frac{(L_W + e)(N_L + N_R)}{M_W^L + M_W^R + (L_W + e)(N_L + N_R)} \quad \text{Ec. 1}$$

donde L_W es la distancia entre las líneas centrales de las columnas de los pilares de pared, e es la longitud de las vigas de enlace, N_R y N_L representan las reacciones axiales en los pilares de pared de corte a la derecha e izquierda, respectivamente, M_R y M_L corresponden a las reacciones de flexión en los extremos derecho e izquierdo de las vigas de enlace. Este parámetro permite evaluar la eficiencia del acoplamiento en la disipación de energía y en la redistribución de esfuerzos dentro del sistema estructural.

Para evaluar la influencia de CR en la respuesta estructural, se diseña un estudio paramétrico en el que se analizan 30 estructuras HLCS con alturas de 4, 8 y 12 pisos. En este análisis, se examina el impacto de la rigidez relativa del sistema y la altura de la estructura en la capacidad última y el desempeño sísmico.

Finalmente, se comparan los resultados del análisis de límites con los obtenidos mediante simulaciones numéricas, discutiendo las ventajas del sistema HLCS en términos de disipación de energía, capacidad de reemplazo de elementos y desempeño estructural. La combinación de estos enfoques permite evaluar la eficacia del sistema HLCS como un mecanismo de resistencia sísmica optimizado.

En esta misma línea de investigación, el estudio analiza el comportamiento sísmico de los muros de corte de placas de acero (SPSW) mediante una conexión entre la placa de acero de relleno y el marco estructural. La investigación sigue un enfoque integral que combina análisis teórico, pruebas experimentales y simulaciones numéricas, contribuyendo al desarrollo de estrategias que mejoren la resistencia sísmica de estructuras con sistemas de placas de acero.

En primer lugar, se desarrolla una nueva conexión basada en ángulos de acero segmentados y eclisas con orificios redondos grandes, lo que busca mejorar la precisión en la instalación, facilitar reparaciones tras eventos sísmicos y optimizar la eficiencia estructural. Posteriormente, se lleva a cabo un análisis teórico para determinar las propiedades mecánicas de la conexión, derivando ecuaciones que permiten estimar su capacidad de carga ante distintos modos de falla, como el deslizamiento de la placa de acero y la extrusión de la eclisa.

Para validar el desempeño estructural de la conexión, se realizan pruebas experimentales sobre tres muestras a escala 1/3 de SPSW con dimensiones de 1500 mm x 1500 mm. Estas muestras son sometidas a cargas cíclicas con el fin de evaluar la interacción entre la placa de acero de relleno y el marco estructural, comparando el rendimiento de la nueva conexión con el de conexiones tradicionales mediante pernos.

Además, se desarrollan modelos numéricos en ABAQUS para replicar las pruebas experimentales y realizar análisis paramétricos. La Figura 6 muestra un modelo de simulación de un sistema de placas de acero en el que se aprecian los detalles del mallado y la configuración estructural utilizada en el análisis numérico. Estas simulaciones permiten evaluar el impacto de variables como el espesor de la placa de acero en el desempeño sísmico del sistema. Finalmente, se comparan los resultados del análisis de límites con los obtenidos mediante simulaciones numéricas, discutiendo las ventajas del sistema HLCS en términos de disipación de energía, capacidad de reemplazo de elementos y desempeño estructural. La combinación de estos enfoques permite evaluar la eficacia del sistema HLCS como un mecanismo de resistencia sísmica optimizado.

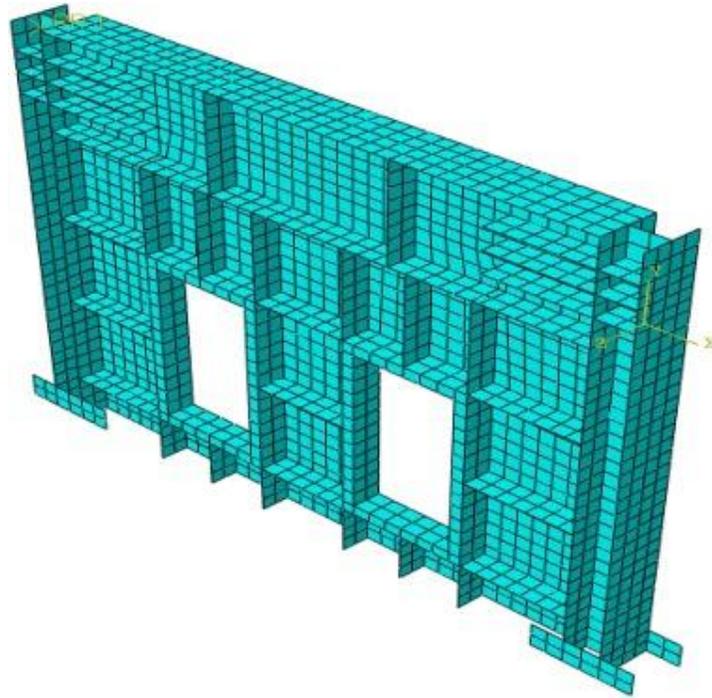


Figura 6: Tamaño de malla del modelo EF (Bypour M, Kioumarsi M, Yekrangnia M, 2021)

En esta misma línea de investigación, el estudio de (Hayatdavoodi A, Dehghani A, Aslani F, Nateghi-Alahi F, 2021) analiza el comportamiento sísmico de los muros de corte de placas de acero (SPSW) como se muestra en la figura 7 mediante una conexión entre la placa de acero de relleno y el marco estructural. La investigación sigue un enfoque integral que combina análisis teórico, pruebas experimentales y simulaciones numéricas, contribuyendo al desarrollo de estrategias que mejoren la resistencia sísmica de estructuras con sistemas de placas de acero.

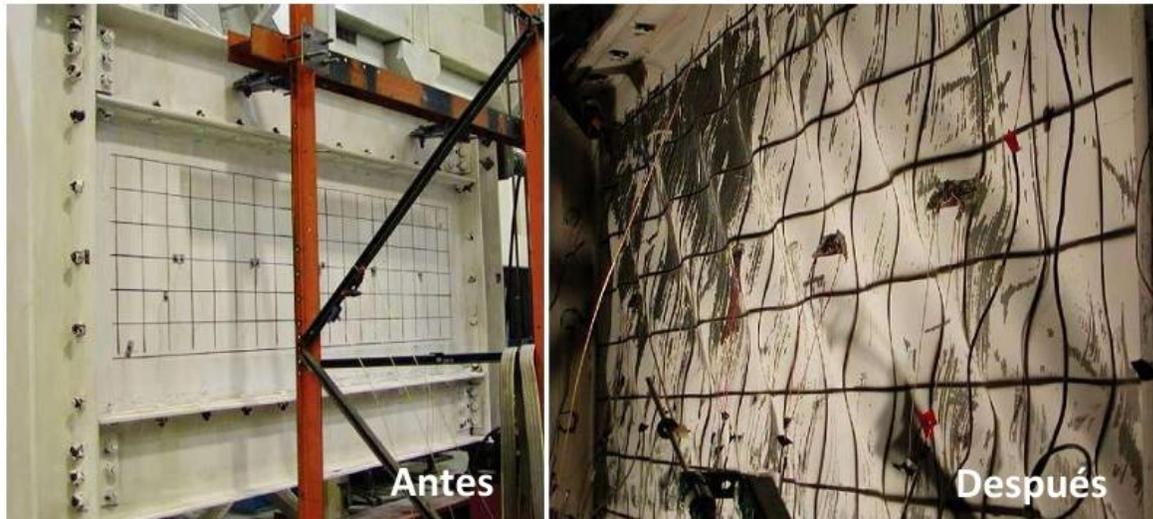


Figura 7: Espécimen de SPSW antes y después del ensayo cíclico (Acosta Palacio Carlos Enrique, 2010)

En primer lugar, se desarrolla un método analítico que amplía teorías fundamentales para considerar la acción combinada de cizallamiento por medio de una herramienta y deformación fuera del plano en los CSPSW. Se introduce un modelo teórico que evalúa la resistencia al corte tomando en cuenta la excentricidad del sistema, analizando las fases de carga en la placa de acero y su interacción con el panel de hormigón armado.

Posteriormente, se implementa un modelo tridimensional de elementos finitos (EF) en un software de simulación. Este modelo se calibra y verifica con base en tres estudios experimentales previos, asegurando la precisión de la representación numérica. Además, se consideran propiedades geométricas y materiales no lineales en la simulación, lo que permite capturar el comportamiento real de los CSPSW bajo condiciones de carga complejas.

Finalmente, se realiza un análisis paramétrico para estudiar el efecto de la excentricidad en la capacidad de corte de los CSPSW mediante curvas de excentricidad de corte. Se evalúa la influencia de variables clave, como el espesor de la placa de acero y el panel de hormigón armado, en la resistencia estructural. Los resultados del método analítico se comparan con los valores obtenidos en el modelo de EF para evaluar su precisión.

Como conclusión, el estudio demuestra que el método analítico propuesto ofrece una estimación precisa de la resistencia al corte de los CSPSW bajo excentricidad. La validación con modelos de elementos finitos confirma la efectividad del enfoque,

proporcionando una herramienta útil para el diseño eficiente de estos sistemas estructurales.

De manera similar, el estudio de (Lu J, Zhang H, Yu S, 2021) emplea un análisis por elementos finitos (FEA) para evaluar el comportamiento sísmico de muros de corte de placas de acero autocentrantes con ranuras (SC-SPSWS), como se muestra en la Figura 8. Para ello, se selecciona inicialmente un modelo de referencia basado en un sistema de un solo tramo y dos pisos (SCSF), cuyas características se toman de investigaciones previas.

A continuación, se desarrolla un modelo de elementos finitos que representa un SC-SPSWS con una placa de acero ranurada y refuerzos laterales. En este modelo, los cordones de acero empleados están compuestos por siete alambres con un diámetro nominal de 15,2 mm y una pretensión inicial de 345 kN. Se definen parámetros geométricos clave, como la altura del marco, la distancia entre ejes y el número de cordones de acero, que influirán en el comportamiento estructural del sistema.

Posteriormente, se lleva a cabo un análisis paramétrico para evaluar cómo diferentes características estructurales afectan el desempeño sísmico del SC-SPSWS bajo carga cíclica. Se estudia el número de enlaces de flexión y su impacto en la rigidez inicial y la disipación de energía mediante curvas de carga frente al ángulo de deriva lateral. Además, se analiza la influencia del espesor de la pared en la capacidad de carga y la ductilidad, así como la relación entre la luz y la altura del sistema para determinar su efecto en la rigidez lateral. También se investiga cómo el área de los cordones de acero contribuye al comportamiento de recentrado y a la mejora de la ductilidad del sistema.

Finalmente, se analizan los resultados obtenidos mediante curvas de carga-desplazamiento para comparar la rigidez lateral y la capacidad de disipación de energía en distintas configuraciones. A partir de estos datos, se identifican configuraciones óptimas de diseño que permiten mejorar el desempeño sísmico del SC-SPSWS. La combinación de simulaciones numéricas con validación experimental garantiza una evaluación precisa de cómo las variaciones geométricas afectan la respuesta estructural del sistema.

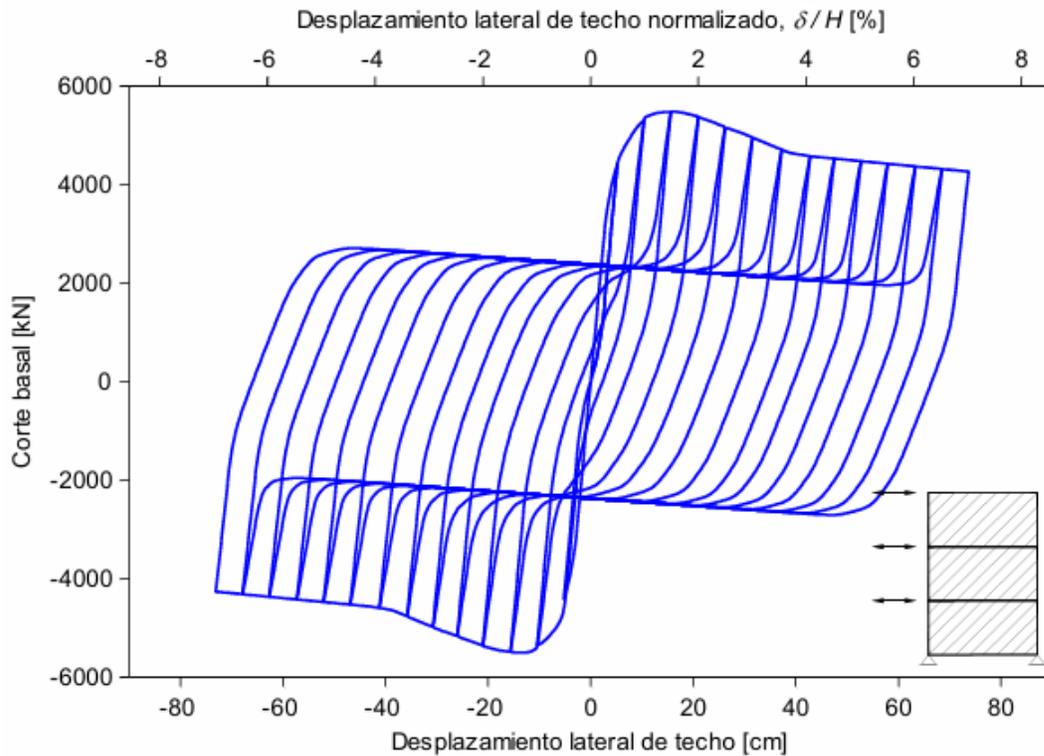


Figura 8: Respuesta cíclica de modelo de franjas para SPSWs (Acosta Palacio Carlos Enrique, 2010)

En esta misma línea, el estudio se combina investigación experimental y análisis teórico para evaluar el comportamiento de muros de corte de placa de acero (SPSW) con diferentes restricciones de pandeo bajo cargas cíclicas como se muestra en el ejemplo de la figura 9. Para ello, se diseñó un programa experimental en el que se probaron siete muestras a escala 1:3.

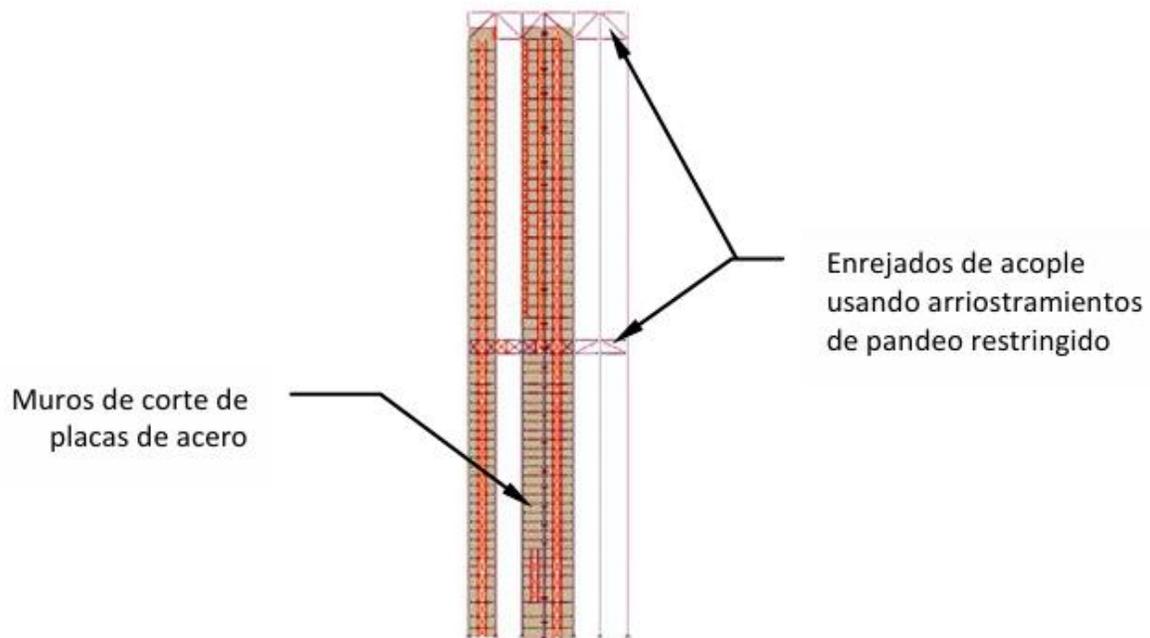


Figura 2-11. Esquema del sistema resistente en torre LACCHC [58].

Figura 9: Esquema del sistema en torre LACCHC (Acosta Palacio Carlos Enrique, 2010)

Durante la fase de evaluación experimental, se analizaron distintos parámetros estructurales, incluyendo los modos de falla, curvas de histéresis, disipación de energía, ductilidad, degradación de rigidez y capacidad de carga. Además, se documentaron las deformaciones residuales y el comportamiento de la placa de acero y las tiras de refuerzo, con el objetivo de comprender mejor el efecto de las restricciones de pandeo en la respuesta del sistema.

Posteriormente, se realizó un análisis comparativo en el que se normalizaron los resultados obtenidos para evaluar el desempeño relativo de cada muestra. Asimismo, se examinó la precisión de los métodos de diseño existentes, como el código chino JGJT 380, la norma AISC 341 y el Eurocódigo 8, en la predicción de la capacidad de carga de corte de los SPSW con pandeo restringido.

Este enfoque integral permitió determinar la efectividad de las restricciones de pandeo en la mejora del desempeño estructural de los SPSW sometidos a cargas cíclicas, proporcionando información relevante para optimizar su diseño y comportamiento sísmico.

De manera complementaria, el estudio de (Jiang Z, Yan T, Zhang A, Su L, Shen C, 2022) evalúa el comportamiento sísmico y la capacidad de reparación de un marco de acero especial con muro de corte de doble placa de acero rigidizada (SSF-SDSPSW). Para ello, se realizaron ensayos experimentales, como se muestra en la Figura 10, así como simulaciones numéricas del sistema con una sola placa.

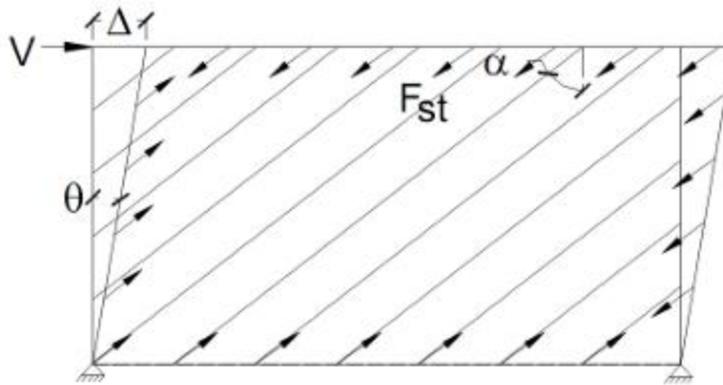


Figura 10: Mecanismo de colapso plástico para SPSW de 1 piso (Acosta Palacio Carlos Enrique, 2010)

Las pruebas experimentales incluyeron dos fases principales. En la primera, se aplicó un protocolo de carga recíproca de ciclo bajo (S1), aumentando progresivamente la deformación para analizar el pandeo local, la formación de campos de tensión y el deslizamiento de conexiones. En la segunda, se sometieron los especímenes a una carga de estado último, llevándolos hasta su capacidad máxima con el objetivo de evaluar su resistencia y los mecanismos de falla. Además, se obtuvieron curvas de respuesta, incluyendo curvas histéresis, curvas de columna vertebral y curvas de disipación de energía, lo que permitió comparar el desempeño de la versión base con las versiones reparadas.

Para complementar el análisis experimental, se desarrolló un modelo de elementos finitos (FEM) en ABAQUS, denominado FEM-KJW1, con la misma geometría que los especímenes ensayados. Se emplearon elementos S4R (tipo carcasa) para las placas frontales y de refuerzo, y C3D8R (tipo sólido) para otras partes estructurales, con un total de 230,088 elementos en el modelo. Se utilizó un modelo constitutivo elástico-plástico bilineal del acero para representar el comportamiento del material.

Finalmente, se realizó un análisis comparativo entre los resultados experimentales y las simulaciones numéricas con el fin de validar la precisión del modelo de elementos finitos, asegurando su capacidad para replicar el comportamiento estructural observado en los ensayos físicos.

En esta misma línea, la metodología del estudio de (Wu Y, Fan S, Zhou H, Guo Y, Wu Q, 2022) se basa en un enfoque combinado de pruebas experimentales y análisis numérico para evaluar el comportamiento sísmico de muros de corte de placas de acero (SPSW) con diferentes configuraciones de restricción al pandeo.

En primer lugar, se diseñaron varios especímenes con refuerzos transversales y longitudinales, seleccionando dimensiones y propiedades de materiales representativos de aplicaciones en edificaciones. Posteriormente, los especímenes fueron sometidos a pruebas de carga cíclica para simular condiciones sísmicas, midiendo parámetros clave como resistencia al corte, rigidez lateral, ductilidad y capacidad de disipación de energía. Además, se documentaron los modos de falla y las deformaciones fuera del plano de las placas de acero.

Para complementar los ensayos, se desarrollaron modelos de elementos finitos utilizando software especializado, considerando la no linealidad material y geométrica, así como las condiciones de frontera y carga. Se llevaron a cabo análisis paramétricos para evaluar el impacto de distintas configuraciones de restricción al pandeo en el comportamiento sísmico de los SPSW como se muestra en el ejemplo de la figura 11.

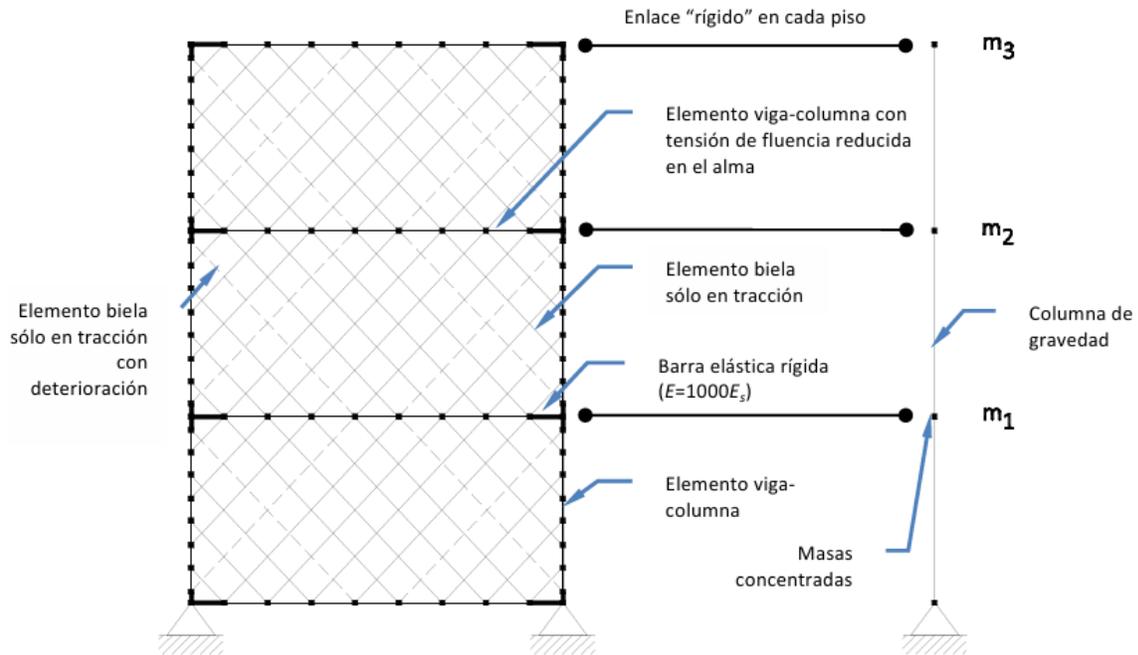


Figura 11: Esquema del modelo de franjas para análisis no lineal de SPSW (Acosta Palacio Carlos Enrique, 2010)

La validación de los modelos numéricos se realizó comparando sus resultados con los obtenidos experimentalmente, ajustando los modelos según fuera necesario para mejorar la correlación. Finalmente, se evaluó el desempeño sísmico de las distintas configuraciones en términos de rigidez, resistencia, ductilidad y disipación de energía, identificando aquellas que optimizan el comportamiento estructural de los SPSW.

En esta misma línea, la metodología del estudio de (Shi Y, Luo Z, Xu Y, Zou Y, Xu L, Ma Q, 2022) se basó en pruebas experimentales y análisis estructural para evaluar el comportamiento sísmico de muros de corte de acero conformado en frío con revestimiento de acero (CFS-SPSW) como se muestra en la figura 12. Se diseñaron seis especímenes a escala real, tres de cada tipo, considerando distintas configuraciones estructurales. Para mejorar la estabilidad, se utilizaron columnas finales de sección cuadrada y se evaluó el efecto del espaciado de pernos y tornillos periféricos, además de incluir una sección en forma de sombrero CFS como componente de borde.

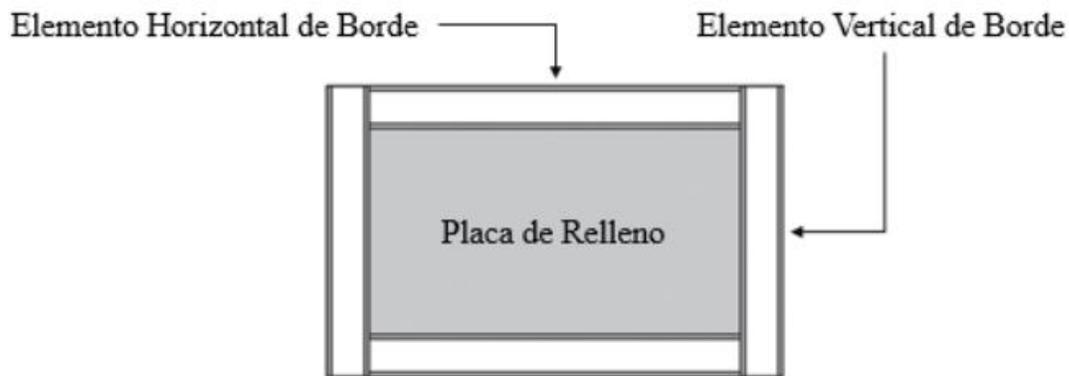


Figura 12: Esquema general de un SPSW (Leal Barrientos, 2019)

Las pruebas experimentales consistieron en la aplicación de cargas cíclicas inversas en un marco de laboratorio para analizar la capacidad de carga, disipación de energía, rigidez y degradación de la resistencia. Se observaron los modos de falla, como el desgarramiento de las columnas finales y la estabilidad de las conexiones atornilladas, lo que permitió identificar los principales factores que afectan el desempeño estructural.

Para analizar la respuesta estructural, se estudiaron las curvas de histéresis y esqueleto, evaluando la capacidad de deformación y disipación de energía. También se examinaron las formaciones de bandas de tensión y el efecto del pandeo en los revestimientos de acero, registrando y comparando los desplazamientos máximos alcanzados durante los ensayos.

Finalmente, se compararon los dos tipos de CFS-SPSW, evaluando la influencia de los pernos de extremo, el tipo de rigidizador vertical y las conexiones atornilladas en la estabilidad y resistencia del sistema. La combinación de pruebas experimentales con análisis estructural permitió obtener una comprensión integral del desempeño sísmico de estos muros con diferentes configuraciones.

Siguiendo esta línea de optimización estructural, la metodología utilizada en el estudio de (He J, Lin S, Li Y, Dong X, Chen S, 2022) combina modelado estructural y optimización mediante algoritmos genéticos para determinar la disposición óptima de los muros de corte de placas de acero en marcos de acero como lo que se observa en la figura 13. Primero, se crea un modelo detallado de la estructura, considerando las propiedades de los materiales, las cargas aplicadas y las restricciones estructurales. Posteriormente, se

definen las variables de diseño, donde la principal corresponde a la posible ubicación de los muros dentro del marco.

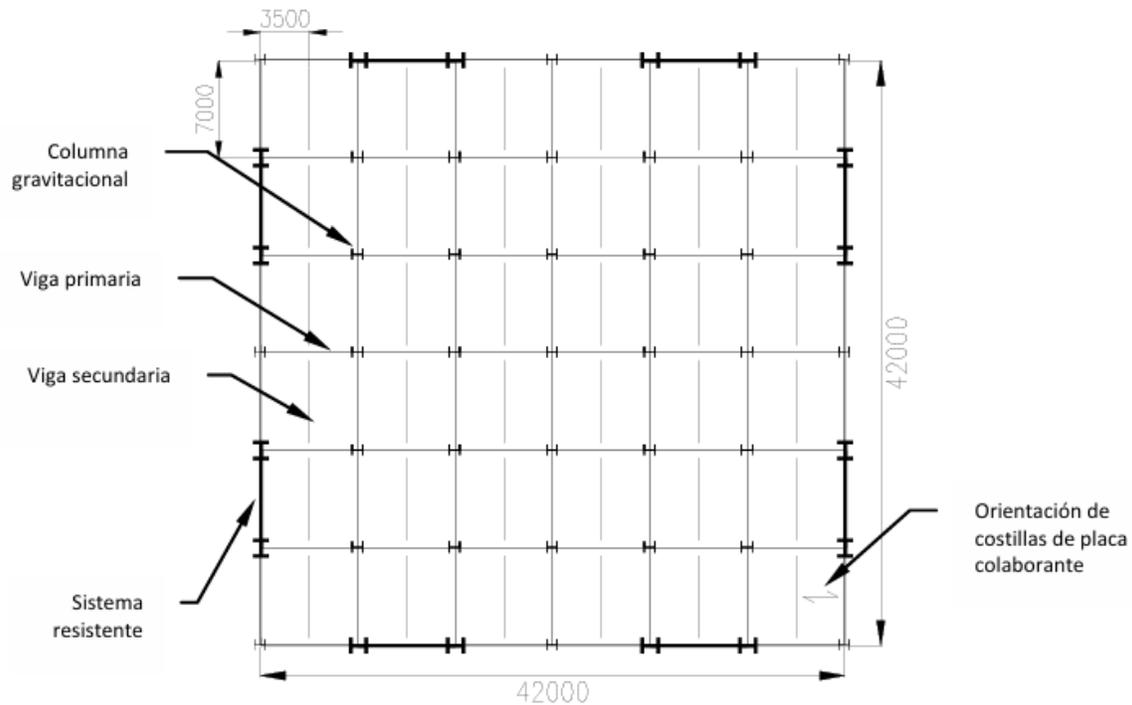


Figura 13: Planta genérica (dimensiones en mm) (Acosta Palacio Carlos Enrique, 2010)

Para la optimización, se implementa un algoritmo genético estructurado en varias etapas. En la fase de codificación, las configuraciones posibles de los muros de corte se representan en una estructura de datos adecuada. Luego, una función de aptitud evalúa cada configuración con base en parámetros como rigidez lateral, capacidad de carga y comportamiento sísmico. Se aplican operadores genéticos de selección, cruce y mutación para generar nuevas configuraciones y mejorar las soluciones a lo largo de varias generaciones.

El proceso iterativo del algoritmo continúa hasta alcanzar una solución óptima o cumplir un criterio de convergencia predefinido. Finalmente, la configuración óptima obtenida se valida mediante análisis estructurales detallados para verificar su eficacia y cumplimiento con los códigos de diseño. Este enfoque permite optimizar de manera eficiente la disposición de los muros de corte, mejorando el rendimiento estructural y la resistencia sísmica de los edificios.

En esta misma línea de evaluación del comportamiento sísmico, el estudio de (Zhou X, Yao X, Xu L, Shi Y, Ke K, Liu L, 2022) analiza el comportamiento sísmico de una estructura CFS-SPSWS de seis pisos a escala real similar al caso de la figura 14 mediante pruebas en mesa vibratoria con movimientos sísmicos bidireccionales como se muestra en esta figura 14 con un caso de 6 pisos. Para ello, se diseñó y construyó un modelo estructural con una altura de piso de 2700 mm, una longitud de 5600 mm y un ancho de 4210 mm. La estructura incluyó muros de corte, muros de carga, muros no portantes, pisos y techos, utilizando muros de corte de placa de acero sujeta con CFS y muros de corte revestidos con placa de acero CFS para resistir cargas laterales.

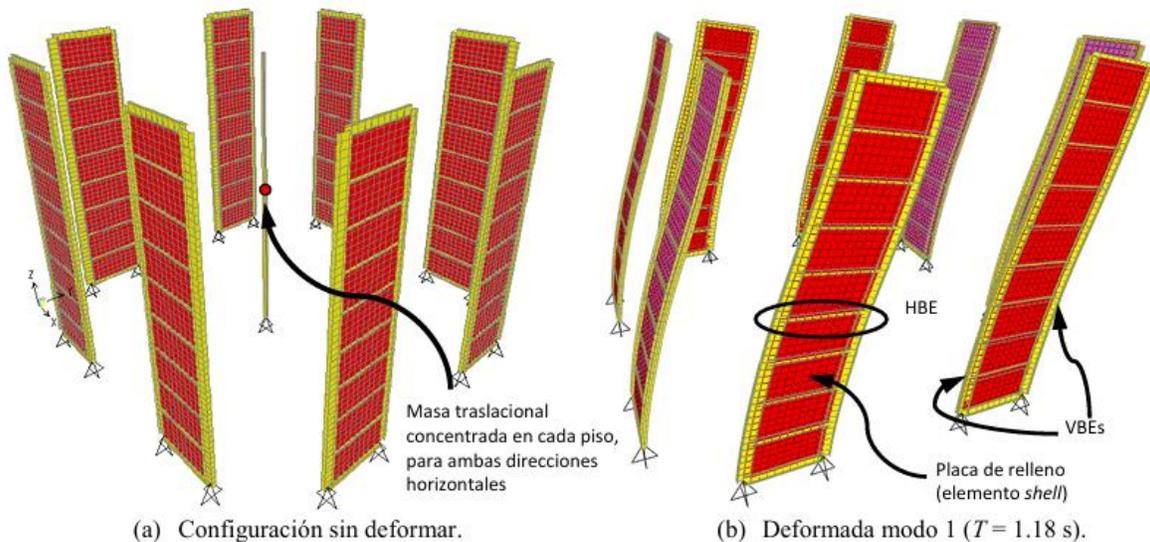


Figura 14: Vistas del modelo para el diseño de edificio de 9 pisos con sistema SPSW, construido en SAP2000 (Acosta Palacio Carlos Enrique, 2010)

Las pruebas experimentales consistieron en la aplicación de movimientos sísmicos bidireccionales para evaluar la respuesta global de la estructura. Se midieron desplazamientos, aceleraciones y deformaciones en distintos elementos estructurales, registrando características de falla como deformaciones excesivas en el primer piso y desprendimiento de conexiones estructurales bajo altos niveles de aceleración. Además, se emplearon ondas aleatorias de ruido blanco para obtener las curvas de función de transferencia y determinar la frecuencia natural del sistema, permitiendo analizar los cambios en sus propiedades dinámicas antes y después de las pruebas sísmicas.

Para evaluar el desempeño sísmico, se analizaron los efectos de los elementos no estructurales en la respuesta global de la edificación y se compararon los resultados experimentales con estudios previos en edificios CFS de baja altura. Finalmente, se identificaron patrones de daño y mecanismos de falla en la estructura de seis pisos, y se propusieron mejoras en el diseño para incrementar su resistencia y ductilidad en zonas sísmicas.

Este estudio constituye la primera investigación experimental de un edificio CFS de seis pisos sometido a entrada sísmica bidireccional a escala real, proporcionando información clave para el desarrollo de estructuras más seguras en regiones de alta sismicidad.

2.1.2. Muro de placa de acero corrugada

Con el objetivo de analizar el comportamiento de los muros de corte de chapa de acero corrugado, se llevó a cabo una revisión de estudios previos que han abordado esta temática. En este sentido, se consideraron las siguientes publicaciones como base para el desarrollo de la investigación:

El estudio de W se centra en el comportamiento de pandeo y la capacidad de carga de los PCSPSW con corrugación vertical sometidos a cargas combinadas de compresión y cortante como se muestra en la figura 15. Para ello, se analiza teóricamente la carga de pandeo elástica de la CSP utilizando la teoría de placas ortotrópicas. Se considera un CSP con dos lados simplemente apoyados y dos lados completamente sujetos, derivando la carga de pandeo compresiva mediante el teorema de la energía potencial mínima. La validez de esta aproximación se verifica a través de análisis de pandeo de valores propios mediante el método de elementos finitos (FEA). A partir de estos resultados, se establece la relación altura-espesor normalizada como un parámetro clave para estimar la estabilidad a compresión del CSP.

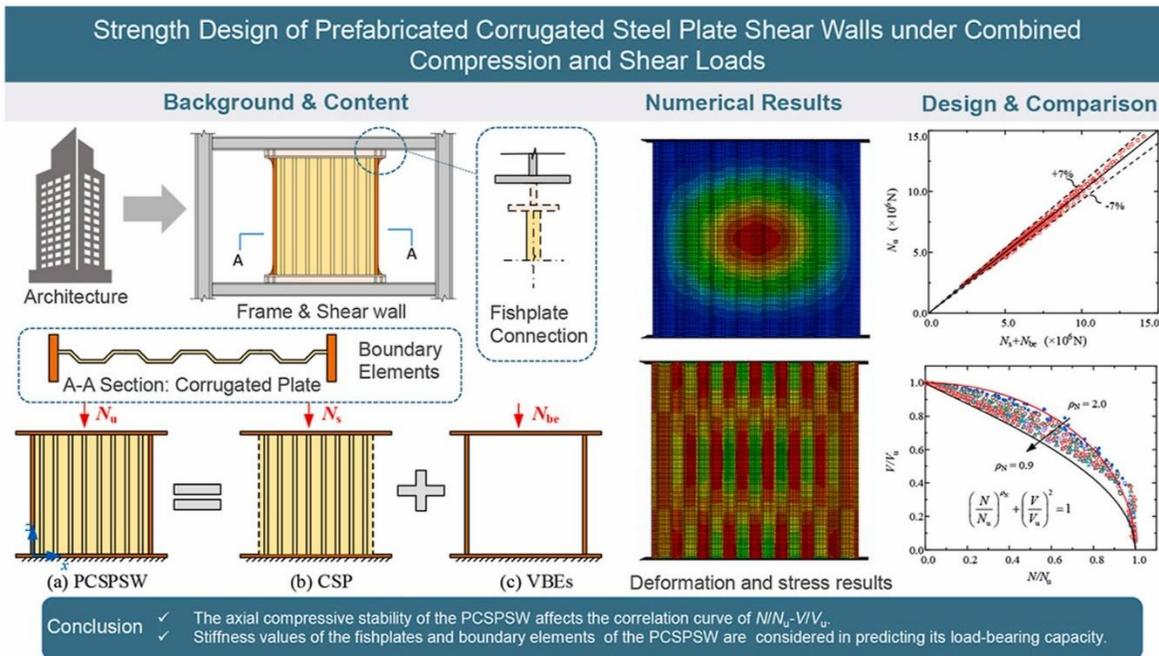


Figura 15: Diseño de resistencia de muros de corte de placas de acero corrugado prefabricadas bajo cargas combinadas de compresión y corte (Wen C, Guo Y, Zuo J, Zhao X, 2023)

Posteriormente, se evalúa la capacidad de carga de los PCSPSW bajo compresión axial mediante simulaciones FEA que incluyen efectos de no linealidad geométrica y elastoplasticidad del material. Se considera que tanto los elementos verticales de borde (VBE) como el CSP comparten la carga de compresión, asumiendo que los VBE tienen una rigidez a la flexión fuera del plano significativamente mayor que la CSP. Esto permite que los VBE proporcionen la restricción lateral necesaria para evitar el pandeo fuera del plano del CSP. Basándose en estos análisis, se obtiene una ecuación de diseño para predecir la resistencia de los PCSPSW bajo compresión pura.

Para evaluar la capacidad de carga bajo cargas combinadas de compresión y cortante, se realizan estudios paramétricos mediante FEA en un rango de dimensiones representativas de aplicaciones ingenieriles. Se analizan factores como las dimensiones de la CSP y los VBE, las propiedades del material y las formas de corrugación. A partir de estos estudios, se establecen curvas de correlación entre las cargas de compresión y cortante, lo que permite derivar una ecuación de diseño aplicable a PCSPSW sometidos a estas condiciones de carga combinadas.

Adicionalmente, se investiga el efecto de las conexiones de placas de pescado en la capacidad de carga del PCSPSW. Se observa que estas conexiones proporcionan restricciones más débiles en comparación con las conexiones directas entre la CSP y las vigas del marco, lo que reduce la capacidad de carga del sistema. Para abordar este efecto, se desarrolla una ecuación de reducción de resistencia basada en la relación de rigidez entre la placa de pescado y la CSP.

Finalmente, el estudio propone un método de diseño integral para predecir la resistencia del PCSPSW bajo cargas combinadas de compresión y cortante. Este método incorpora los efectos de la rigidez a pandeo de la CSP, la contribución de los VBE y la reducción de resistencia causada por las conexiones de placas de pescado. Las ecuaciones derivadas ofrecen una herramienta útil para el diseño estructural de muros de corte de placa de acero corrugado en aplicaciones sísmicas y de carga lateral.

De manera complementaria, la metodología del estudio de (Wu R, Wang L, Tong J, Tong G, Gao W, 2024) se enfoca en el análisis del comportamiento de pandeo elástico por cizallamiento en muros de corte de placa de acero corrugada reforzados múltiples (MCSPSW). Para ello, se desarrolló un modelo teórico basado en la teoría de placas ortotrópicas, con el objetivo de derivar la carga de pandeo elástica a través del método de energía. La investigación considera la influencia de los rigidizadores verticales, los cuales dividen la placa de acero corrugada en subpaneles alineados horizontalmente y limitan la deformación fuera del plano, asegurando la transmisión de esfuerzos cortantes entre subpaneles adyacentes. Este enfoque permite evaluar la disposición óptima de los refuerzos en función de la carga de pandeo elástica máxima.

Para validar la teoría, se implementaron soluciones numéricas mediante MATLAB, donde se resolvieron las ecuaciones de la carga de pandeo considerando diferentes configuraciones de rigidizadores. A partir de estos resultados, se propusieron fórmulas uniformes para el coeficiente de pandeo elástico, abarcando configuraciones con más de un par de refuerzos verticales. Posteriormente, se llevaron a cabo análisis de elementos finitos para verificar la precisión de las fórmulas propuestas y evaluar la efectividad de la disposición óptima de los refuerzos en la mejora de la capacidad de resistencia al corte del MCSPSW.

El estudio también analiza los modos de pandeo que pueden presentarse en la placa de acero corrugada dentro del MCSPSW. La interacción entre los refuerzos y la placa corrugada es clave para evitar el pandeo global bajo cargas de cizallamiento, problema común en aplicaciones estructurales de gran envergadura. Mediante análisis teóricos y numéricos, se identifican las condiciones en las que la placa corrugada puede desarrollar distintos modos de pandeo, proporcionando información esencial para el diseño optimizado de estos sistemas estructurales.

En esta misma línea, la metodología de (Tong J, Wu R, Wang L, 2023) se centra en la evaluación experimental y numérica de los muros de corte de placa de acero corrugado reforzado (SCSPSW), enfatizando el impacto de la corrugación en su desempeño sísmico. Para ello, se realizaron pruebas experimentales en siete especímenes utilizando un dispositivo de carga de varillaje de cuatro barras. Seis de estos especímenes correspondían a SCSPSW, mientras que uno representaba un muro de corte de placa de acero corrugado no endurecido (CSPSW), sirviendo como referencia para comparar el efecto del refuerzo.

Las pruebas se realizaron bajo cargas de cizallamiento cíclico de círculo bajo, con el objetivo de analizar diversos factores que influyen en el comportamiento sísmico de los SCSPSW. En particular, se establecieron cinco comparaciones entre los especímenes, evaluando la influencia de la relación de aspecto del subpanel, la restricción torsional proporcionada por el rigidizador, los métodos de conexión entre la placa de acero corrugado y el rigidizador, la disposición de los pernos y la resistencia de los pernos de conexión. La respuesta estructural se evaluó a través de curvas histéricas como el ejemplo de la figura 16, revelando la capacidad de los SCSPSW para resistir el cizallamiento, su ductilidad y su capacidad de disipación de energía.

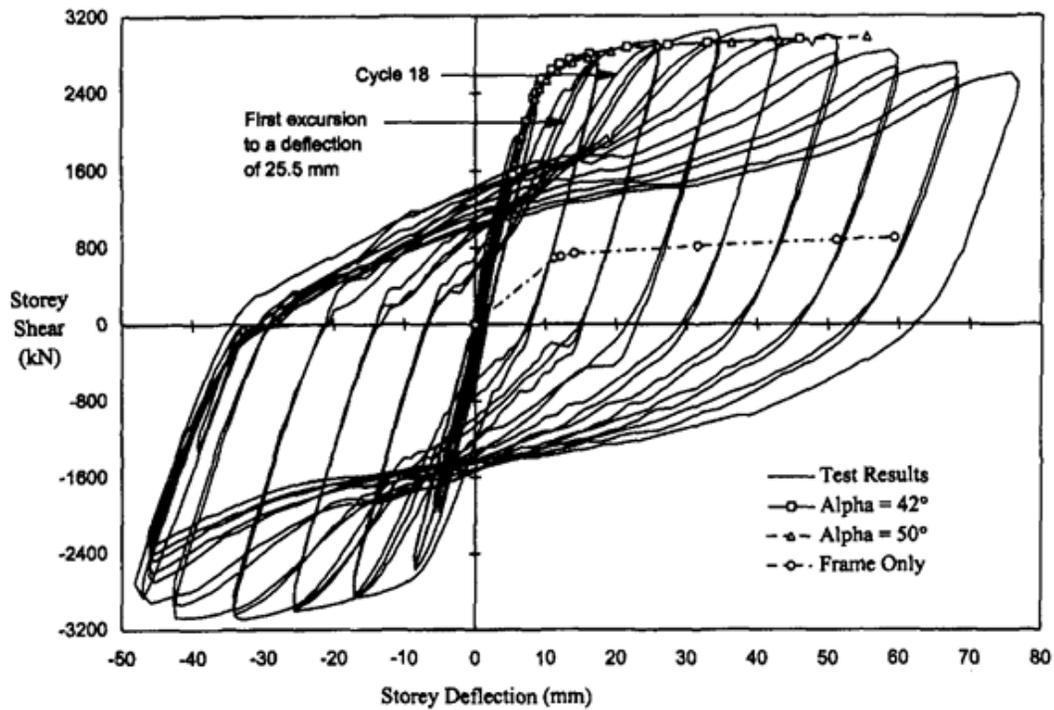


Figura 16: ejemplo de una histéresis (Acosta Palacio Carlos Enrique, 2010)

Posteriormente, se desarrollaron modelos de elementos finitos (FE) para replicar el comportamiento sísmico observado en los experimentos. Estos modelos se validaron comparando sus resultados con los obtenidos en las pruebas físicas, demostrando su precisión en la simulación del pandeo fuera del plano y la distribución de esfuerzos internos en los muros corrugados. A partir de los modelos FE validados, se analizaron las fuerzas internas de tracción y corte en los pernos de conexión, lo que permitió proponer un procedimiento de cálculo para predecir estos esfuerzos de manera razonable.

Finalmente, se llevó a cabo un análisis numérico del efecto de la resistencia al endurecimiento en la resistencia al cizallamiento y en el comportamiento post-pandeo del SCSPSW. Los resultados confirmaron la aplicabilidad de las fórmulas de diseño existentes para la resistencia máxima al cizallamiento y proporcionaron información clave para optimizar el diseño de estos muros en la práctica de ingeniería estructural.

Siguiendo esta línea de investigación, la metodología de (Ghodratian-Kashan & Maleki, 2022) este estudio se centró en la evaluación experimental y numérica del comportamiento cíclico de los muros de corte de placa de acero corrugado doble

(DCSPSW). Para ello, se diseñaron y construyeron tres especímenes a escala media de una sola bahía y un solo piso con diferentes configuraciones de conexión de las placas de relleno corrugadas. En todos los casos, los marcos circundantes presentaban propiedades geométricas y mecánicas similares, mientras que las placas de relleno variaban en su grado de conexión entre sí y con las columnas. Se analizaron los efectos de estas conexiones en la respuesta estructural bajo cargas cíclicas laterales casi estáticas.

Durante los ensayos experimentales, se monitoreó la progresión del pandeo en las placas de acero corrugado, la formación de bisagras plásticas y la disipación de energía del sistema. Se observó que los subpaneles corrugados experimentaban pandeo a partir de ciertos niveles de desplazamiento, lo que impactaba la rigidez y resistencia del sistema. Además, el desarrollo de deformaciones plásticas en las placas y la formación de bisagras plásticas en vigas y columnas fueron registradas en diferentes ciclos de carga.

Para complementar los experimentos, se desarrollaron modelos de elementos finitos (FE) en el entorno ABAQUS, incorporando no linealidades geométricas y materiales. Se utilizó un modelo de endurecimiento cinemático bilineal y el criterio de falla de Von Mises para simular el comportamiento estructural de los muros corrugados. Las propiedades mecánicas de los materiales fueron obtenidas a partir de pruebas de cupón. En estos modelos, las placas de relleno se conectaron directamente al marco delimitador sin simular las placas de pescado utilizadas en las pruebas experimentales.

Los resultados numéricos y experimentales fueron comparados para validar la precisión de los modelos FE en la simulación del comportamiento cíclico de los DCSPSW. Se evaluó el impacto de las conexiones entre placas corrugadas y entre placas y columnas en la capacidad de disipación de energía y resistencia al pandeo del sistema. Se concluyó que los DCSPSW pueden ser una alternativa efectiva para mejorar la resistencia y ductilidad de los muros de corte de acero, siempre que se diseñen adecuadamente las conexiones entre las placas corrugadas y el marco estructural.

Siguiendo con la evaluación del desempeño sísmico de sistemas de placas de acero, el estudio de (Jiang Z, Yan T, Zhang A, Su L, Shen C, 2023), se diseñó un espécimen a escala de un solo piso con una relación ancho-altura $L/H = 1.5$. Este espécimen incluyó

un marco resistente al momento y un panel de relleno compuesto por una placa de acero corrugada trapezoidal, en el centro y dos placas de acero planas en los lados, todas conectadas mediante pernos. El espesor de cada placa se estableció en 1.0 mm, siguiendo recomendaciones previas sobre la configuración óptima de las corrugaciones y la relación altura-espesor del panel.

Las pruebas experimentales consistieron en ensayos de carga cíclica para evaluar la respuesta histérica y el modo de fallo del FCPSW. Durante el ensayo, se observó que antes de alcanzar un ángulo de deriva $\gamma = 1.0\%$, el espécimen permaneció en un estado elástico. A partir de este punto, ingresó a una fase plástica, donde comenzaron a formarse bandas de tensión diagonales en las placas planas, evidenciando el inicio del pandeo. Sin embargo, gracias a la interacción entre las placas corrugadas y planas, el FCPSW logró mantener su resistencia lateral y mostró un incremento gradual en su capacidad de carga, mitigando el fenómeno de degradación de la resistencia que suele afectar a los CPSW tradicionales.

Para complementar los ensayos experimentales, se llevó a cabo un análisis numérico mediante el software ABAQUS. En la modelación de elementos finitos, se utilizaron elementos de cáscara S4R para representar tanto las placas planas como la placa corrugada. Se aplicó un contacto de superficie a superficie entre las diferentes placas para simular con precisión la interacción estructural y evitar la interpenetración de los elementos. Este análisis permitió explorar el impacto de factores clave como la geometría de la corrugación, el espaciado de los pernos y la relación de espesores en el rendimiento lateral del FCPSW.

Los resultados indicaron que los FCPSW presentan un mejor desempeño lateral en comparación con los CPSW convencionales, debido al efecto de restricción generado por la conexión entre la placa corrugada y las placas planas. Se concluyó que una adecuada selección de los parámetros de diseño, como el espaciado de los pernos y la configuración de la corrugación, es fundamental para maximizar la capacidad de disipación de energía y la estabilidad post-pandeo de estos muros. Finalmente, el estudio proporcionó recomendaciones preliminares para la optimización del diseño de los FCPSW en aplicaciones prácticas de ingeniería estructural.

En esta misma línea de investigación, el estudio de (Vaziri E, Gholami M, Gorji Azandariani M, 2021) analiza el comportamiento del sistema de muro de corte de placa de acero corrugado (CSPSW) mediante análisis de empuje, utilizando el software de elementos finitos ABAQUS. Se diseñaron y analizaron veinte estructuras CSPSW con diferentes relaciones ancho-altura ($L/H = 2.5, 2, 1.4$ y 0.85) y distintos números de pisos (1, 2, 4, 6 y 10). El objetivo principal fue evaluar la rigidez, la capacidad de carga y el comportamiento posterior al pandeo de estos sistemas, considerando la interacción entre la placa de acero corrugada y el marco estructural.

Los resultados muestran que los CSPSW tienen una alta rigidez inicial y alcanzan su capacidad máxima a una relación de empuje del 0.1%. Sin embargo, después del pandeo de la placa de relleno corrugada, tanto la rigidez como la capacidad de carga por corte del muro disminuyen significativamente. Antes del pandeo, la placa corrugada de relleno absorbe la mayor parte de la fuerza cortante, pero tras el pandeo, esta carga se transfiere progresivamente al marco límite. En el caso de estructuras de varios pisos, el comportamiento del marco en los niveles inferiores es determinante, ya que asume una mayor porción de la fuerza cortante, especialmente en configuraciones con una alta relación ancho-altura.

Además, el estudio presenta una ecuación para calcular el ángulo de inclinación del campo de tensión en la placa corrugada. Se encontró que este ángulo depende únicamente de la relación de aspecto del muro de corte de placa de acero. Finalmente, se desarrolló un método para estimar la curva fuerza-desplazamiento de los sistemas CSPSW de uno o varios pisos. Este método, basado en la interacción entre la placa corrugada y el marco estructural (PFI), fue validado mediante la comparación con curvas obtenidas de ensayos experimentales y modelos numéricos.

Siguiendo esta línea de investigación, el estudio de (Qiu J, Zhao Q, Yu C, Wang Z, 2022) analiza la resistencia al corte y el comportamiento post-pico de las placas de pared corrugada trapezoidalmente en muros de corte de placa de acero corrugado (CoSPSW) mediante análisis de empuje no lineal. A diferencia de los muros de corte de placa de acero tradicionales (SPSW), las placas corrugadas presentan un comportamiento estructural más complejo debido a su geometría y su interacción con los elementos del

marco de contorno. Se realizaron estudios paramétricos para evaluar la influencia de diversos factores, incluyendo la dirección de diseño de la placa, la geometría de la corrugación y las propiedades del material.

Los modelos numéricos se desarrollaron en ABAQUS utilizando el elemento de vaciado S4R para simular las placas de pared corrugada, con conexiones rígidas entre la placa, las vigas y las columnas. Se analizaron 348 modelos de CoSPSW, de los cuales 239 correspondían a placas corrugadas verticales y 109 a placas corrugadas horizontales. Antes del análisis de empuje no lineal, se realizaron análisis de pandeo de valores propios para comprender la influencia de la geometría de la placa en el modo de pandeo dominante. Los resultados indicaron que la resistencia y la rigidez inicial de los CoSPSW dependen significativamente del ángulo de corrugación y de la relación de aspecto de la placa, y que una selección inadecuada de estos parámetros puede reducir el desempeño sísmico del sistema.

Sobre la base de los resultados obtenidos, se propusieron curvas simplificadas de carga-deriva lateral para las placas de pared corrugada dentro de los CoSPSW. Se encontró que, después del pandeo por cortante, la resistencia de las placas corrugadas disminuye progresivamente, y el modelo de material trilineal con endurecimiento por deformación fue recomendado para capturar mejor este comportamiento en los análisis no lineales. Finalmente, se establecieron ecuaciones de resistencia al corte para distintos tipos de placas corrugadas, proporcionando herramientas prácticas para el diseño y la evaluación estructural de estos sistemas.

Continuando con el estudio del pandeo en muros de corte de placa corrugada, la metodología del estudio de (Sun H, Guo Y, Wen C, Zuo J, 2023) se basa en el análisis del comportamiento de pandeo local y global de los muros de corte de placa de acero corrugados (CSPSW) bajo cargas de cizallamiento puro. Para ello, se desarrollaron modelos de elementos finitos (FEM) específicos para cada tipo de pandeo. En primer lugar, el modelo FEM-I se utiliza para el análisis del pandeo local, restringiendo el movimiento lateral en las líneas de intersección de los pliegues en las placas corrugadas trapezoidales (T-CSPSW) y sinusoidales (S-CSPSW). Este enfoque permite evaluar la interacción entre los subpaneles corrugados cuando ocurre el pandeo local.

Por otro lado, el modelo FEM-g se emplea para analizar el pandeo global de los CSPSW, el cual involucra la flexión de toda la placa o múltiples pliegues con desplazamiento lateral significativo. Se realizaron simulaciones numéricas para determinar la capacidad de carga en cada tipo de pandeo, considerando variaciones en la relación ancho-espesor y la relación de esbeltez normalizada de las placas corrugadas. A partir de estos análisis, se establecen curvas de coeficiente de estabilidad que permiten definir valores límite para evitar el pandeo local y global antes de que la sección alcance su resistencia total a corte.

Los modelos FEM se validaron mediante estudios previos y normativas como el GB50250 y el GB50017, considerando imperfecciones iniciales en la geometría de los subpaneles corrugados. Se analizaron distintos grados de rigidez de los miembros de borde para simular condiciones de contorno realistas. Como resultado, se proponen fórmulas de diseño para determinar los límites de la relación ancho-espesor y la esbeltez normalizada, asegurando que las placas corrugadas mantengan una adecuada capacidad de disipación de energía y ductilidad sísmica sin desarrollar pandeo prematuro.

Siguiendo esta línea de investigación, el estudio de (Wen C, Guo Y, Zuo J, Zhao X, 2023) se centra en los muros de corte de placas de acero corrugadas trapezoidalmente (TCSPSW) con elementos límite verticales (VBE), evaluando su comportamiento global de pandeo y su capacidad de carga por cortante, como el esfuerzo que se muestra en la figura 17. Para ello, se establece un modelo de elementos finitos (FEM) utilizando el software ABAQUS (versión 6.14-4), donde la placa de acero corrugado, los VBEs y los elementos de conexión son modelados con elementos de carcasa de cuatro nodos (S4R), reconocidos en estudios previos por su precisión en la simulación del pandeo y comportamiento estructural de placas corrugadas. Se analizan las interacciones entre la placa de acero corrugado y los VBEs, así como el efecto de las placas de conexión ("placas de pescado") sobre la capacidad de carga.

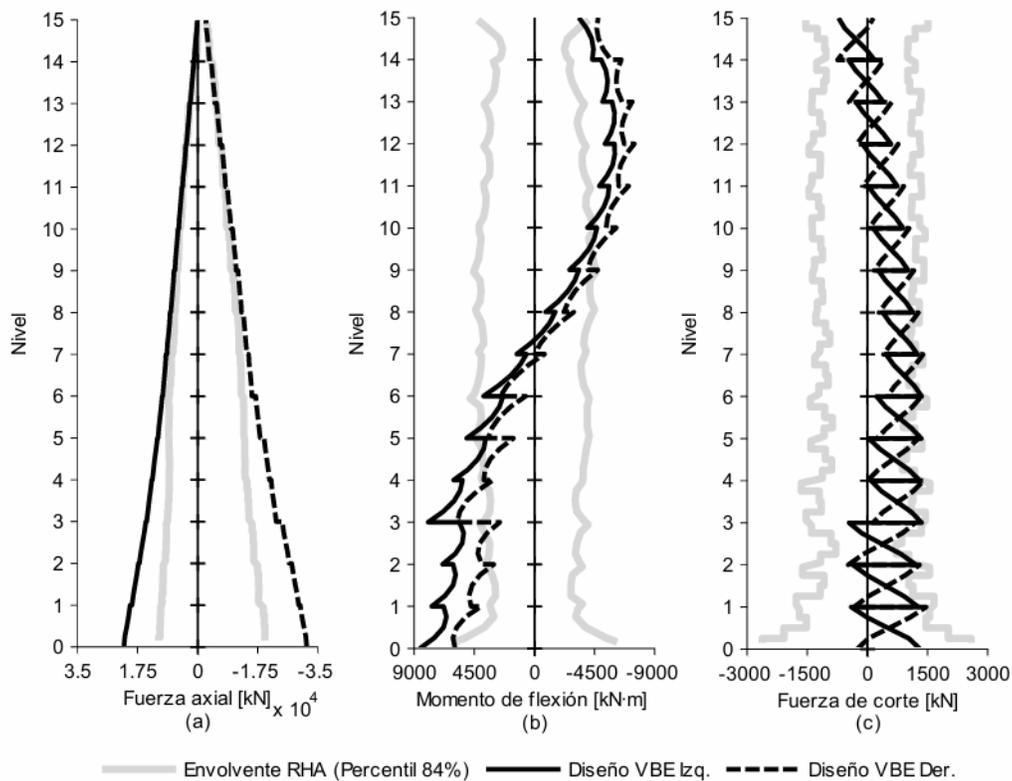


Figura 17: Envolvente de esfuerzos a partir de análisis RHA y diagramas usados en edificio VBEs para edificio de 15 niveles (Acosta Palacio Carlos Enrique, 2010)

Para estimar la capacidad de carga por cortante del sistema TCSPSW-VBE, se descompone en dos contribuciones: la resistencia propia del TCSPSW sin considerar la acción de los VBEs y la resistencia adicional proporcionada por los VBEs, los cuales se comportan como un marco resistente al momento. Se establece un modelo teórico que considera la superposición de ambas contribuciones y se verifican los resultados mediante simulaciones de elementos finitos. Se introduce un coeficiente de reducción para la resistencia debido a la menor rigidez de las placas de conexión, comparando su desempeño con conexiones directas.

Adicionalmente, se determinan los límites inferiores de resistencia y rigidez de los VBEs, garantizando que estos no cedan antes que la placa de acero corrugado. Para ello, se definen umbrales mínimos del área de sección y rigidez a flexión fuera del plano de los VBEs, asegurando una adecuada restricción lateral al TCSPSW. Finalmente, se

presentan recomendaciones de diseño basadas en los resultados obtenidos, estableciendo un procedimiento sistemático para la predicción de la capacidad de carga por cortante de los TCSPSW-VBE, incluyendo la evaluación de la influencia de los parámetros geométricos y de conexión.

3. Comparación y Análisis de Muros Estructurales

La comparación de distintos tipos de muros estructurales es fundamental para comprender su desempeño en diversas aplicaciones. La tabla 1 presenta las diferencias claves entre muros de acero, muros shell y muros corrugados, destacando su rigidez, resistencia y modelado en OpenSees. El gráfico de la figura 18 complementa esta información al mostrar la distribución de estudios numéricos, experimentales y en OpenSees sobre estos sistemas.

Tabla 1: Comparación entre tipos de muro

Característica	Placa de Acero de Muro	Muro Shell (Plano)	Muro Corrugado
Geometría	Placa lisa de acero en muros delgados	Superficie plana continua	Superficie ondulada o acanalada
Uso Principal	Muros de acero delgados (SPSW)	Muros de concreto, acero o diafragmas	Muros en edificios industriales,

			disipadores de energía
Esfuerzos Considerados	Axiales y cortante en el plano (puede incluir flexión si se usa 41hell)	Axiales, cortante y flexión dentro y fuera del plano	Axiales y cortante con rigidez variable según la dirección
Rigidez	Uniforme si es isotrópico	Uniforme en toda la superficie (si es homogéneo)	Anisotrópica, mayor en la dirección de la corrugación
Resistencia	Dependiendo del material, misma resistencia en todas direcciones	Similar en todas direcciones si es isotrópico, o variable si es ortotrópico	Mayor en la dirección de la corrugación
Modelado en OpenSees	Membrane o ShellMITC4 con modelo de tensión diagonal	ShellMITC4, ShellDKGQ o secciones de fibras	Shell ortotrópico o modelado detallado con frame + shell
Flexión Fuera del Plano	No se considera en modelos de membrana	Se considera en modelos shell	Puede ser representada si el modelo lo permite

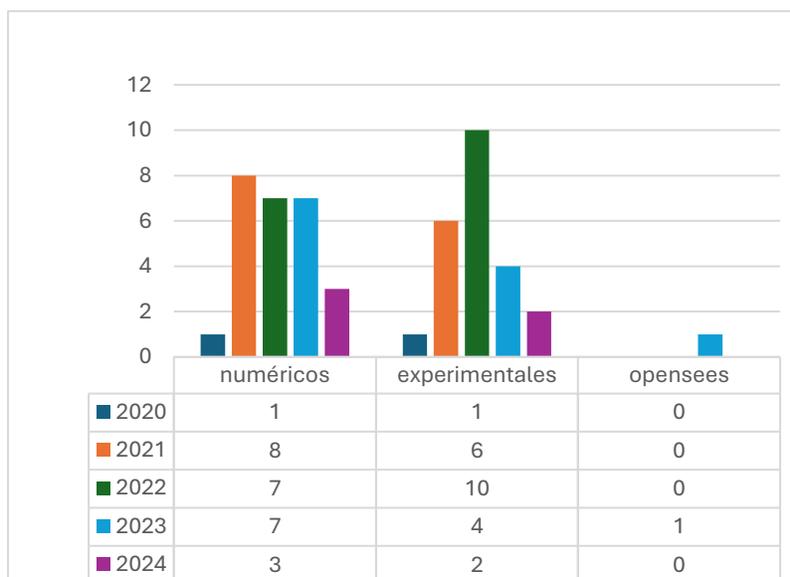


Figura 18: investigaciones sobre muros

CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO

1. Contenido del marco metodológico

La investigación es de tipo *experimental*, ya que se centra en la implementación de elementos *shell* en OpenSees y su validación mediante simulaciones numéricas comparadas con resultados experimentales de estructuras SPSW.

Se utiliza un diseño de investigación *documental y experimental*, donde se analizan estudios previos sobre modelación de SPSW con elementos *shell* y sus validaciones experimentales. Se desarrollan y ejecutan simulaciones numéricas en OpenSees para evaluar el comportamiento estructural de SPSW. Se comparan los resultados obtenidos con datos de referencia experimentales o simulaciones previas con otros métodos.

El estudio se enfoca en modelos numéricos de SPSW con diferentes configuraciones geométricas y materiales, basándose en casos experimentales documentados en la literatura.

Los datos provienen de registros experimentales de pruebas en SPSW realizadas en laboratorios. Simulaciones computacionales en OpenSees. Comparaciones con modelos analíticos o normas de diseño estructural.

La investigación emplea diversas herramientas, técnicas y mecanismos para el desarrollo y validación del modelo. Se utiliza *OpenSeesPy* como software principal para la implementación del modelo y el análisis no lineal. En la modelación, los elementos *shell* representan la placa del SPSW, mientras que los elementos *frame* se emplean para el marco estructural. Los materiales se definen a través de modelos constitutivos que describen el comportamiento del acero estructural y del acero de la placa del SPSW. Para validar los resultados, se realiza una comparación con pruebas experimentales y un análisis de sensibilidad paramétrica, garantizando la precisión y fiabilidad del modelo.

Se analizan desplazamientos, esfuerzos y formación de mecanismos plásticos en la SPSW. Se validan los resultados comparándolos con pruebas experimentales disponibles. Se evalúa el desempeño del modelo en términos de precisión y eficiencia computacional.

2. Metodología en OpenSees

La modelación numérica de muros estructurales en OpenSees utilizando elementos *shell* requiere una estrategia detallada para representar adecuadamente su comportamiento no lineal. En este estudio, se desarrolla un código en OpenSees que define la geometría del muro a partir de una malla de nodos y elementos *shell*, asegurando una correcta discretización para capturar su respuesta estructural. Se emplean materiales no lineales para considerar la degradación de rigidez y resistencia, incorporando secciones de fibras para modelar el comportamiento del acero estructural y sus elementos rigidizadores. Además, se establecen condiciones de contorno que representan los apoyos y restricciones en la base, y se implementa un esquema de carga que reproduce acciones estáticas y dinámicas. Finalmente, se integran *recorders* para monitorear desplazamientos, fuerzas y esfuerzos en puntos clave del muro, permitiendo un análisis detallado de su respuesta ante distintas solicitaciones.

Para este caso se hacen 2 códigos uno en líneas verticales y horizontales, y otro en diagonales

2.1. Metodología de placa *shell*

2.1.1. Librería de placa *shell*

Para la implementación del modelo, se emplean diversas librerías que facilitan tanto el desarrollo como el análisis de resultados. La librería **OpenSeesPy** (`import openseespy.opensees as ops`) es utilizada para definir la geometría, materiales, condiciones de contorno y cargas del muro. Se generan nodos y elementos *shell* mediante funciones de OpenSeesPy, asegurando una malla adecuada para capturar la respuesta estructural con precisión.

Para el procesamiento y análisis de datos, se emplea **NumPy** (`import numpy as np`), que permite manejar arreglos de datos eficientemente, facilitando la manipulación de resultados obtenidos del análisis estructural, como desplazamientos nodales, esfuerzos en los elementos y fuerzas de reacción.

La visualización del modelo y sus resultados se realiza con **Matplotlib** (`import matplotlib.pyplot as plt`), que permite generar gráficos de respuesta estructural,

incluyendo desplazamientos, deformaciones y esfuerzos. Adicionalmente, se utiliza **OpsVis** (*import opsviz as opsv*), una extensión de OpenSeesPy que facilita la representación gráfica del modelo y la animación de sus deformadas bajo diferentes estados de carga.

Mediante la combinación de estas herramientas, se obtiene un código eficiente que no solo ejecuta el análisis estructural del muro, sino que también permite visualizar sus resultados de manera clara y detallada, facilitando la interpretación del comportamiento estructural.

2.1.2. Definición de modelo

2.1.2.1. Definición de materiales no lineal

Para modelar el comportamiento no lineal del muro, se define un material constitutivo basado en el criterio de plasticidad *J2Plasticity* en OpenSees. Este modelo captura el endurecimiento del material mediante una combinación de endurecimiento isotrópico y cinemático, permitiendo simular adecuadamente la respuesta elasto-plástica del concreto o del acero estructural bajo cargas cíclicas y monotónicas.

Los parámetros utilizados en la definición del material incluyen el módulo de elasticidad E y el coeficiente de Poisson ν , a partir de los cuales se calcula el módulo de corte G . Además, se define el módulo de compresibilidad K , que regula la respuesta volumétrica del material. La tensión de fluencia inicial σ_0 y la tensión de fluencia final σ_∞ determinan la evolución de la plastificación, mientras que el parámetro δ controla el endurecimiento exponencial del material. Finalmente, el parámetro H define la contribución del endurecimiento cinemático.

En OpenSees, el material se implementa con el comando (véase anexo) porque captura la plasticidad en estado de esfuerzos planos, lo que es esencial para elementos de cascarón sometidos a cargas biaxiales. Este modelo permite representar el endurecimiento cinemático e isotrópico, lo que mejora la precisión en el análisis no lineal del acero estructural al simular su respuesta inelástica bajo carga. A diferencia de otros modelos como *ElasticIsotropic* o *DruckerPrager*, *J2Plasticity* es más adecuado para estructuras de acero sometidas a altas deformaciones y cargas cíclicas, proporcionando

una representación más precisa de la disipación de energía y la plasticidad en muros tipo *shell*.

Este modelo se asigna posteriormente a los elementos *shell*, garantizando que el comportamiento no lineal del muro se represente de manera realista. La calibración de los parámetros se realiza con base en datos experimentales o normativos, asegurando una simulación precisa del desempeño estructural del muro bajo diferentes estados de carga.

2.1.2.2. Definición de secciones

Para capturar de manera precisa la respuesta estructural del muro y los elementos que lo componen, se definen diferentes tipos de secciones en el modelo.

a) Sección **LayeredShell** para Elementos Tipo Shell

Los elementos *shell* utilizados en el modelo requieren una sección adecuada para representar el comportamiento de la placa del muro. Se emplea la sección **PlateFiber**, que permite definir el espesor total del muro y asociarlo a un material previamente definido. Para mejorar la precisión del modelo, el espesor se divide en varias capas (*nLayers*), cada una con un espesor uniforme. Esta estratificación permite modelar variaciones en las propiedades mecánicas a lo largo del espesor, asegurando una mejor representación del comportamiento flexional y de corte del muro.

La sección se define en OpenSees con el siguiente comando (véase anexo) donde *matTag_plane_stress_inelastic* es la etiqueta del material que representa el comportamiento del acero en estado plano de esfuerzos. Se elige en lugar de otras opciones porque permite modelar con precisión la respuesta no lineal de elementos tipo *shell* bajo cargas combinadas de membrana y flexión. A diferencia de secciones más simples como *ElasticMembranePlateSection*, que asumen comportamiento elástico y no capturan plastificación, *PlateFiber* representa la distribución realista de tensiones en toda la sección mediante una discretización en fibras. Esta capacidad es crucial para estructuras como muros delgados o placas de acero donde los efectos de plastificación progresiva, deformaciones en plano y flexión deben modelarse con fidelidad. Además, el uso de un material inelástico en estado plano de esfuerzos permite capturar la

degradación de rigidez y la redistribución de esfuerzos, características fundamentales en análisis de comportamiento post-elástico y colapso estructural.

b) Sección de Fibras para Elementos Tipo *Beam-Column*

Para los elementos tipo *beam-column* que representan componentes estructurales del muro, se define una sección de fibras basada en la geometría de un perfil W. Este enfoque permite modelar de manera realista la distribución de esfuerzos en la sección transversal bajo flexión y compresión.

Se definen los parámetros geométricos del perfil, incluyendo el ancho y espesor de las alas (*flange*), el espesor del alma (*web*), y la altura total de la sección. Posteriormente, la sección se discretiza en fibras, asignando materiales específicos a cada parte del perfil. Las fibras se distribuyen en una malla cuadrilátera, asegurando que la representación de la sección sea precisa y compatible con los elementos inelásticos del modelo.

La generación de la sección de fibras se realiza mediante el siguiente bloque de código (véase anexo) Este código se usa para la generación de la sección de fibras en lugar de otras alternativas porque permite capturar con precisión la distribución de tensiones y deformaciones dentro de la sección transversal de un elemento estructural. A diferencia de secciones homogéneas o formulaciones basadas en esfuerzos promedio, la representación por fibras discretiza la sección en múltiples regiones (*patches*), cada una asociada a un material específico, lo que permite modelar de manera realista la plastificación, la interacción entre flexión y esfuerzo axial, y la redistribución de tensiones durante la respuesta no lineal.

¿Por qué no otros métodos? Definir cada fibra individualmente con *fiber* OpenSees permite definir fibras una por una, pero hacerlo manualmente requiere muchas líneas de código. Si la sección tiene cientos de fibras, definir las individualmente es ineficiente y difícil de modificar. En cambio, *patch quad* genera automáticamente varias fibras en una región con una sola línea.

Uso de otras funciones como "*layer*", esta se usa para definir conjuntos de fibras en líneas, pero no es útil para secciones cerradas o compuestas como esta. *patch quad* es

más adecuado porque permite definir bloques de fibras en áreas rectangulares completas.

Métodos de modelado con elementos sólidos o *beam-section*, OpenSees permite modelar secciones con *beamSection* y elementos sólidos, pero la ventaja de *section Fiber* es que captura el comportamiento no lineal de manera más detallada, especialmente en estructuras sometidas a flexión y cortante.

Además, la inclusión del parámetro *-torsion* permite considerar la rigidez a la torsión de la sección, lo que puede ser crucial en estructuras sometidas a cargas excéntricas o torsionales. En comparación con otras opciones, como *ElasticSection* o *LayeredShell*, este enfoque es más adecuado para modelar la no linealidad del material y los efectos de la degradación de rigidez en elementos sometidos a grandes deformaciones.

Para visualizar la distribución de fibras, se utiliza OpsVis, que permite graficar la sección con colores diferenciados para los materiales (véase anexo). Esta representación visual facilita la verificación de la correcta asignación de materiales y la adecuada discretización de la sección.

¿Por qué no otros métodos como *matplotlib* o *plotly* directamente? *Matplotlib* o *Plotly* no interpretan automáticamente la estructura de una sección de fibras. Para graficar con *matplotlib*, tendrías que extraer las posiciones de cada fibra y asignarles colores manualmente, lo cual es más tedioso y propenso a errores. OpsVis ya está optimizado para OpenSeesPy. Usa las mismas definiciones de materiales y secciones de OpenSees, asegurando que la visualización sea precisa.

Con estas definiciones de secciones, se garantiza que el modelo capture tanto la respuesta en flexión como la respuesta de corte del muro, asegurando una simulación precisa de su comportamiento estructural.

2.1.2.3. Definición de Shell

a) Definición de Materiales para Elementos de Viga

Además de los materiales utilizados en los elementos tipo *shell*, se define un material específico para las vigas del modelo. Se emplea el material *Steel02*, que representa el

comportamiento no lineal del acero estructural mediante el modelo de **Giuffré-Menegotto-Pinto** con endurecimiento isotrópico y cinemático. Este material es adecuado para capturar el comportamiento histerético del acero sometido a cargas cíclicas.

Los parámetros principales del material incluyen a **F_y** que es el Esfuerzo de fluencia del material, **E₀** es el Módulo de elasticidad inicial, **br** es la Pendiente post-fluencia, que define la transición entre la respuesta elástica y la plastificación.

La definición del material en OpenSees se realiza con un comando (véase anexo) donde *matTag_beam* es la etiqueta única del material que se asignará a las vigas del modelo. A diferencia de materiales elásticos (Elastic), que no pueden capturar plastificación, o modelos simplificados como Steel01, que solo consideran endurecimiento isotrópico, Steel02 incorpora endurecimiento cinemático e isotrópico, lo que lo hace más adecuado para simular el comportamiento no lineal del acero estructural bajo cargas variables. Esto es fundamental en muros tipo *shell*, donde los esfuerzos pueden redistribuirse y experimentan ciclos de carga y descarga debido a cargas laterales.

b) Definición de Integración y Transformaciones para Elementos de Viga

Los elementos de viga requieren una transformación geométrica para garantizar la correcta interpretación de los grados de libertad en el análisis estructural. Se define una transformación lineal con el siguiente comando (véase anexo) donde los parámetros indican la orientación del eje local del elemento. Si se usara PDelta, se considerarían efectos de segundo orden, lo cual es útil para columnas y estructuras más flexibles, pero no siempre es necesario en elementos *shell* donde la rigidez a flexión y corte es alta. Por otro lado, *Corotational* se utiliza para grandes deformaciones y rotaciones, lo que puede ser computacionalmente más costoso y solo necesario en análisis altamente no lineales.

Para mejorar la precisión del análisis de las vigas, se define un esquema de integración de la sección basado en la cuadratura de *Lobatto*, lo cual permite evaluar el comportamiento de la sección en múltiples puntos a lo largo del elemento (véase anexo). Este método mejora la captura de efectos no lineales en la respuesta estructural del muro.

Comparado con otras opciones, *legendre* (Gauss-Legendre) distribuye los puntos de integración dentro del elemento, pero no en los extremos, lo que puede afectar la

precisión en secciones de fibra donde las deformaciones extremas son importantes. *Radau* coloca un punto en un extremo, pero no en ambos, lo que podría generar menor precisión en ciertos tipos de cargas. *NewtonCotes* usa puntos de integración equiespaciados, lo que puede llevar a inestabilidades numéricas. Trapezoidal es más simple pero menos preciso para análisis de secciones no lineales.

2.1.2.4. Elemento FRAME

a) Definición y Creación de Elementos FRAME

En el modelo estructural, los elementos *FRAME* representan los bordes del muro y están conformados por vigas y columnas. Estos elementos se modelan mediante el comando *dispBeamColumn*, que permite capturar el comportamiento no lineal de la sección a través de una integración por fibras.

b) Transformación Geométrica P-Delta

Para considerar los efectos de segundo orden debido a la interacción entre carga axial y flexión (efecto P- Δ), se utiliza la transformación geométrica (véase anexo) donde *transfTag* es la etiqueta de la transformación, *vecX* y *vecY* definen la orientación de los ejes locales del elemento.

Esta transformación permite capturar los efectos adicionales de inestabilidad que ocurren en presencia de cargas gravitacionales. En comparación con otras transformaciones geométricas:

Linear no considera efectos de segundo orden, solo es válida para análisis estrictamente lineales. *Corotational* considera grandes deformaciones y rotaciones, lo cual es útil para análisis altamente no lineales, pero puede ser computacionalmente costoso cuando solo se requieren efectos P-Delta. *None* no aplica ninguna transformación geométrica, lo que es inapropiado para problemas donde los efectos P-Delta son relevantes.

c) Integración de la Sección por Fibras

Los elementos *FRAME* utilizan un modelo basado en secciones de fibras, lo que permite distribuir las tensiones en el área transversal del elemento. La integración de la sección se define mediante la cuadratura de *Lobatto* con cinco puntos de integración (véase

anexo) donde *integrationTag* es la etiqueta de la integración, *sectionTag* es la etiqueta de la sección de fibras, 5 indica el número de puntos de integración a lo largo del elemento.

Esta configuración mejora la precisión en la estimación de la curvatura y la flexión dentro de cada elemento.

¿Por qué no usar otras opciones? *Lobatto* (Elegido) distribuye los puntos en los extremos y el interior del elemento. Buena precisión en secciones de fibra con plastificación progresiva. Legendre usa cuadratura de Gauss en el centro del elemento. No captura bien la plastificación en los extremos del elemento. Newton-Cotes usa puntos de integración equiespaciados. Puede dar problemas de estabilidad numérica. Trapezoidal usa puntos solo en los extremos. No captura bien la variación de esfuerzos internos.

d) Construcción de los Elementos FRAME

Los elementos *FRAME* se generan en los bordes del muro, asegurando la continuidad estructural.

2.1.2.5. Elementos *truss*

a) Definición y Creación de Elementos TRUSS

Los elementos *TRUSS* se utilizan en este modelo para proporcionar estabilidad lateral sin contribuir a la rigidez flexional de la estructura. Su función principal es actuar como una restricción elástica en la dirección axial, evitando desplazamientos excesivos del muro sin inducir efectos de momento.

b) Generación de Nodos TRUSS

Para conectar los elementos *TRUSS* al modelo, primero se generan nodos adicionales fuera del dominio principal de la estructura. Estos nodos representan los puntos de conexión de los elementos *TRUSS* y están ubicados a una distancia *offset* del borde derecho del muro.

c) Asignación de Masa y Restricciones

Para garantizar que los elementos TRUSS interactúen correctamente con el modelo estructural, se asigna masa nodal al nodo superior, representando su contribución dinámica (véase anexo)

Además, el nodo superior se restringe en la dirección Y y en la rotación alrededor de Z, asegurando que solo pueda desplazarse horizontalmente en respuesta a la deformación del muro (véase anexo)

d) Definición de los Elementos TRUSS

Los elementos *TRUSS* se definen como elementos axiales que transmiten únicamente esfuerzo normal (véase anexo 12), Donde *node_i*, *node_j* son los nodos conectados por el elemento, *area_truss* es el área transversal del elemento, *materialTag* corresponde al material utilizado, en este caso, un material elástico (véase anexo)

¿Por qué no usar otros elementos? *truss* (Elegido) solo axial (tensión/compresión). Simple, eficiente y apropiado para riostras y armaduras. *corotTruss* similar al *truss*, pero con grandes deformaciones. Necesario solo si hay grandes rotaciones, lo cual no siempre aplica. *Frame* considera flexión, corte y axial. Más costoso computacionalmente y no necesario para elementos solo axiales. *Beam* sirve principalmente en flexión. Pero no captura correctamente el comportamiento de un truss, que solo trabaja axialmente.

e) Definición y Creación de Elementos ElasticBeamColumn

Los elementos *elasticBeamColumn* se utilizan en este modelo para representar vigas y columnas elásticas que pueden resistir esfuerzos axiales, cortantes, flexión y torsión. Se emplean en la estructura para conectar los nodos *TRUSS* y transmitir cargas de manera continua a lo largo del modelo.

f) Definición de Propiedades Elásticas

Antes de crear los elementos, es necesario definir sus propiedades elásticas de la ecuación 2, Estas incluyen; Área transversal (*A*), Define la capacidad de carga axial; Módulo de elasticidad (*E*), Controla la rigidez axial y flexional; Relación de Poisson (*ν*), Infiere en la rigidez transversal y el módulo de corte; Momentos de inercia (*I_y*, *I_z*),

Controlan la resistencia a la flexión en ambos planos; Rigidez torsional (GJ), Determina la resistencia a la torsión; Módulo de corte (G), Se obtiene como en la ecuación 2.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad \text{Ec. 2}$$

Estas propiedades se definen (véase anexo)

g) Definición de la Transformación Geométrica

Para definir la orientación de los elementos en el espacio 3D, se crea una transformación geométrica que define la orientación del eje local X (véase anexo). Esto indica que el eje local X se alinea con la dirección global Y.

h) Creación de los Elementos *ElasticBeamColumn*

Cada elemento se define entre dos nodos consecutivos de la lista *truss_right_nodes* (véase anexo) ¿Por qué no usar otros métodos? Creación manual de cada elemento ineficiente y propenso a errores en modelos grandes. No validar la existencia de nodos puede generar errores si un nodo no fue definido previamente. No usar *try-except* para manejar errores un solo fallo detendría la ejecución del programa. Usar otro tipo de elemento (e.g., *truss*) *elasticBeamColumn* es más adecuado para vigas y columnas, ya que considera flexión y torsión. Cada elemento se conecta a los nodos consecutivos en la lista *truss_right_nodes*. Se asignan sus propiedades elásticas y transformación geométrica.

2.1.2.6. Restricciones de nodos

Las restricciones en los nodos son esenciales para definir las condiciones de apoyo y articulación, asegurando que el modelo estructural se comporte correctamente bajo cargas aplicadas. En este caso, se imponen restricciones tanto en la base como en los nodos superiores.

Los nodos de la base representan la fundación del modelo y se restringen completamente, impidiendo cualquier tipo de movimiento o rotación (véase anexo), Los seis grados de libertad están restringidos; 1, Desplazamiento en X; 1, Desplazamiento en

Y; 1, Desplazamiento en Z; 1, Rotación alrededor de X; 1, Rotación alrededor de Y; 1, Rotación alrededor de Z. Esta condición impide que la base se mueva o gire, proporcionando un apoyo empotrado para la estructura.

Los nodos superiores tienen restricciones parciales que permiten ciertos movimientos y rotaciones (véase anexo), Se restringe solo el desplazamiento en la dirección Y; 0, Desplazamiento en X (libre); 1, Desplazamiento en Y (restringido); 0, Desplazamiento en Z (libre); 0, Rotación alrededor de X (libre); 0, Rotación alrededor de Y (libre); 0, Rotación alrededor de Z (libre). Esto permite que los nodos superiores se desplacen horizontalmente en X y Z y que roten libremente, lo que sugiere un comportamiento articulado en la parte superior de la estructura.

En las bases completamente empotradas los nodos en la base tienen restricción total de movimiento, lo que los convierte en puntos fijos en el análisis estructural. En las condiciones en los nodos superiores se restringe solo el desplazamiento en Y, lo que puede representar una conexión articulada o una condición de desplazamiento controlado, dependiendo del contexto estructural.

2.1.3. Análisis modal

a) Metodología y Configuración del Análisis Modal en OpenSees

El análisis modal se utiliza para determinar las frecuencias naturales y modos de vibración de la estructura. Esto es fundamental en el diseño estructural, ya que permite identificar los modos dominantes de la respuesta dinámica y evaluar la susceptibilidad a vibraciones inducidas por cargas dinámicas.

Para resolver el análisis modal en OpenSees, se configura el sistema de ecuaciones con parámetros optimizados para eficiencia y estabilidad. Se emplea *ops.system('BandGeneral')*, un sistema adecuado para problemas simétricos de tamaño moderado. La numeración de nodos se optimiza con *ops.numberer('RCM')*, que utiliza el algoritmo *Reverse Cuthill-McKee* para reducir la banda de la matriz de rigidez y mejorar el rendimiento computacional. Para manejar las restricciones, se aplica el método de penalización mediante *ops.constraints('Penalty', 1e12, 1e12)*, introduciendo grandes coeficientes en los términos restringidos. Finalmente, el proceso de resolución numérica

se gestiona con `ops.algorithm('Newton')`, que implementa el método de Newton-Raphson para encontrar soluciones iterativas.

El análisis modal requiere que la estructura tenga masas definidas en los nodos para obtener resultados precisos. Existen diferentes formas de asignar masas, pero algunas presentan desventajas. Asignarlas manualmente con `ops.mass` nodo por nodo puede ser ineficiente en modelos grandes y propenso a errores. Por otro lado, asignar masa a todos los nodos sin verificar los grados de libertad (*DOFs*) puede generar problemas en nodos restringidos. Asimismo, utilizar un único valor global de masa sin diferenciar entre nodos limita la personalización y adaptabilidad del modelo, afectando la precisión del análisis modal. Se recorre cada nodo del modelo y se consulta su grado de libertad (*DOF*). Se asigna una masa unitaria en las direcciones *X*, *Y* y *Z* solo si el nodo tiene al menos un grado de libertad libre. No se asigna masa en las rotaciones, ya que no son relevantes en este análisis modal.

La distribución de masas es clave para que el análisis modal represente correctamente la respuesta dinámica de la estructura. En modelos más avanzados, la masa puede calcularse a partir del peso propio de los elementos estructurales.

b) Cálculo e Interpretación de los Modos Propios y Períodos Naturales en OpenSees

Ahora se ejecuta el análisis modal mediante la función `ops.eigen()`, que resuelve el problema de valores propios (véase anexo). ¿Por qué no usar otros métodos? Resolver manualmente la matriz de rigidez y masa: Ineficiente, propenso a errores y computacionalmente costoso. Usar análisis transitorio en lugar de modal no da directamente las frecuencias modales, solo respuestas específicas en el tiempo. Aproximaciones simplificadas como Rayleigh menos precisas, no aplicables a estructuras complejas.

Se definen 6 modos de vibración (`num_modes = 6`), lo cual permite capturar la mayor parte de la respuesta dinámica. `ops.eigen(num_modes)` obtiene los valores propios del sistema, que corresponden a los cuadrados de las frecuencias angulares naturales (ω^2).

A partir de los valores propios, se calcula la frecuencia angular natural (ω) y el período natural (T) para cada modo (véase anexo) ¿Por qué no usar otros métodos? Aproximaciones empíricas no son aplicables a modelos complejos y pueden ser inexactas. Cálculo manual de matrices de rigidez y masa ineficiente, difícil de manejar en estructuras grandes. Uso de software externo para cálculo modal requiere exportar datos y no está integrado en OpenSees.

Se obtiene la frecuencia angular natural ω_n que se muestra en la ecuación 3:

$$\omega_n = \sqrt{\lambda_n} \quad \text{Ec. 3}$$

donde λ_n es el valor propio correspondiente al modo n . Se calcula el período natural de vibración T_n como se muestra en la ecuación 4:

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad \text{Ec. 4}$$

Se imprimen los resultados para cada modo, lo que permite interpretar la respuesta dinámica de la estructura.

Los modos con períodos más largos representan las formas de vibración más dominantes. Modos con períodos más cortos suelen estar asociados a vibraciones locales o de alta frecuencia. Se usa `opsv.plot_mode_shape(mode, endDispFlag=0)` para graficar el modo de vibración número `mode`. Se establece un formato visual (`fmt_undefo`) con color, línea y grosor adecuados para diferenciar la forma modal. Se configura la vista en 3D con `az_el=(30,0)`, que define el ángulo de observación en azimut y elevación. Se coloca un título con el modo de vibración y su período modal.

2.1.4. Nodos de control para aplicar carga de empuje y gravedad

a) Aplicación de Cargas Gravitacionales

Una vez identificados los nodos de control, se aplican las cargas gravitacionales en la dirección **Z** mediante el siguiente procedimiento:

- I. **Definir la serie temporal de carga:** Se usa `timeSeries("Linear", 3)` para definir una variación lineal en el tiempo. Se asigna un patrón de carga `pattern("Plain", 3, 3)`.
- II. **Aplicar carga gravitacional en los nodos de control:** Se establece una fuerza gravitacional **negativa en Z** (`gravity_force = -1.0 * N`). Se aplican cargas en cada nodo de control usando `ops.load(node_id, 0, 0, gravity_force, 0, 0, 0)`. Se almacena la fuerza aplicada en un diccionario para su seguimiento.
- III. **Verificar la fuerza total aplicada:** Se suma la contribución de cada nodo de control para obtener la fuerza gravitacional total aplicada.

b) Configuración del Análisis Estático

Para resolver el sistema bajo la acción de la gravedad, se configuran los siguientes parámetros:

- I. **Condiciones de restricción y numeración:** Se emplea `constraints("Penalty", 1e12, 1e12)` para imponer restricciones con un método de penalización. Se optimiza la numeración de los grados de libertad con `numberer("RCM")`. Se usa `system("BandGeneral")` para resolver el sistema de ecuaciones.
- II. **Configuración del solucionador y análisis:** Se define un criterio de convergencia basado en `test("NormDisplncr", 1.0e-5, 2000)`, lo que indica que el análisis iterará hasta un máximo de 2000 pasos o hasta que el incremento de desplazamiento sea menor que $1.0e-5$. Se usa el algoritmo de Newton modificado con `algorithm("KrylovNewton")` para mejorar la convergencia. Se aplica integración por control de carga (`integrator("LoadControl", 0.0005)`) para aplicar la carga en pequeños incrementos. Se ejecuta el análisis estático con `analysis("Static")` y `ops.analyze(20)`, lo que significa que la carga se aplicará en 20 pasos incrementales.
- III. **Evaluación de resultados:** Se imprime si el análisis gravitacional fue exitoso o falló.

Esta metodología garantiza que la estructura está correctamente cargada y estabilizada bajo la acción de la gravedad antes de aplicar cargas laterales. La elección de nodos de

control permite evaluar la respuesta estructural en ubicaciones clave y facilitar la aplicación de cargas adicionales en análisis posteriores.

2.1.5. Análisis Pushover

El análisis *pushover* es un procedimiento de análisis estático no lineal utilizado para evaluar la capacidad sísmica de estructuras. Se basa en la aplicación de una carga lateral creciente hasta que la estructura alcanza un estado límite o una condición de falla. La curva resultante (corte basal vs. desplazamiento) permite identificar la resistencia y ductilidad de la estructura. A continuación, se describe la metodología utilizada en tu código:

a) Configuración Inicial

Antes de iniciar el análisis de empuje, es necesario limpiar el estado del análisis previo y definir los parámetros iniciales. Para ello, `ops.wipeAnalysis()` elimina cualquier configuración previa de análisis, mientras que `ops.loadConst("-time", 0.0)` fija las cargas gravitacionales antes de aplicar el análisis lateral. Luego, se establecen los parámetros principales: el nodo de control, que es el punto donde se aplica el desplazamiento (generalmente en la parte superior de la estructura); el grado de libertad controlado (*ControlDOF*), que en este caso es 1, indicando desplazamiento en la dirección X; el incremento de desplazamiento (*DisplIncr*), que define el valor aplicado en cada paso; el máximo desplazamiento (*MaxDisp*), que actúa como límite del análisis; y el número de pasos (*NstepsPush*), que determina la cantidad de iteraciones a realizar.

b) Definición de la Carga Lateral

Se define un patrón de carga incremental, donde se aplica una fuerza horizontal en el nodo de control; `ops.timeSeries("Linear", 2)`, Define una carga que aumenta de manera lineal; `ops.pattern("Plain", 2, 2)`, Asocia la carga al patrón 2; `ops.load(node_id, horizontal_force, 0, 0, 0, 0, 0)`, aplica una carga lateral en el nodo de control.

c) Configuración del Análisis

Aquí se configuran los métodos de solución numérica y los criterios de convergencia: `ops.system("UmfPack")`: Método para resolver sistemas de ecuaciones;

ops.numberer('Plain'), Estrategia de numeración simple; *ops.constraints("Penalty", 1e14, 1e14)*, Usa penalización para imponer restricciones; *ops.test("NormDisplncr", 1.0e-4, 100)*, Control de convergencia basado en la norma del incremento de desplazamiento; *ops.algorithm("RaphsonNewton")*, Método de iteración de Newton-Raphson; *ops.integrator('DisplacementControl', node_id, ControlDOF, Displncr)*, Controla el desplazamiento en el nodo de control.

d) Definición de Recorders

Para almacenar los resultados del análisis, se usan *recorders* (véase anexo) ¿Por qué no usar otros métodos? No usar *recorder* no se podrían analizar los resultados del *pushover*. Registrar solo fuerzas de reacción no se podría graficar la curva *pushover* (falta desplazamiento). No incluir esfuerzos en elementos Shell no se evaluaría la distribución interna de tensiones en los muros. Usar solo *ops.printModel()* muestra información solo en consola, no genera archivos para análisis posterior. reacciones en la base, Guarda la suma de las fuerzas de los apoyos; desplazamiento del nodo de control, Guarda la evolución del desplazamiento lateral; esfuerzos en elementos SHELL, Almacena los esfuerzos de los elementos de la estructura.

e) Ejecución del Análisis

El análisis se realiza paso a paso, adaptando el incremento si hay problemas de convergencia (véase anexo). ¿Por qué no usar otros métodos? Usar un incremento fijo si el análisis no converge, se detendría sin intentar corregir el problema. No reducir el incremento si hay fallos puede generar errores numéricos y terminaciones prematuras. No registrar desplazamientos y corte basal no se podría construir la curva *pushover*. Se realiza un análisis paso a paso. Si no converge, se reduce el incremento de desplazamiento hasta encontrar una solución. Se almacenan los valores de desplazamiento y corte basal.

2.2. Código de *truss*

Este código define una sección transversal de fibra para un elemento tipo *beam-column* en OpenSees, incluyendo la creación de materiales, la definición de la geometría y la visualización de la distribución de fibras. Esta metodología es útil para modelar elementos

estructurales con comportamiento no lineal, permitiendo evaluar efectos de plastificación y respuesta inelástica.

2.2.1. Inicia el Código

Este código en OpenSeesPy define y visualiza una sección de fibra para elementos tipo *beam-column* en un modelo estructural 2D. La metodología se puede dividir en las siguientes etapas:

- I. **Inicialización del modelo en OpenSees (véase anexo):** Se limpia cualquier modelo previo con *ops.wipe()*. Se define un modelo 2D (*-ndm 2*) con tres grados de libertad por nodo (*-ndf 3*), lo cual es típico para análisis estructurales con vigas y columnas en OpenSees.
- II. **Definición de geometría (véase anexo):** Se establecen dimensiones básicas de la estructura, incluyendo la altura de la columna (*h_col*), el claro de la viga (*h_beam*) y otros parámetros geométricos.
- III. **Propiedades de materiales (véase anexo):** Se definen propiedades mecánicas del acero, como el módulo de elasticidad (*E_steel*), la relación de Poisson (*mu*), la tensión de fluencia (*Fy_steel*), la resistencia última (*Fu_steel*) y el espesor de la placa (*t_plate*).
- IV. **Definición de material no lineal para acero (véase anexo),** Se define un material *Steel02* con; etiqueta 1, esfuerzo de fluencia 414.19 MPa, módulo de elasticidad *E_steel*, factor de endurecimiento 0.01 (relación entre el módulo de endurecimiento y el módulo elástico)
- V. Definición de elementos estructurales (véase anexo). Se establecen propiedades de área (*A_beam*, *A_col*) e inercia (*I_col*) para vigas y columnas.
- VI. Transformación de coordenadas (véase anexo 29) Se define una transformación geométrica *PDelta*, que considera efectos de segundo orden debido a cargas axiales.

¿Por qué no usar otras transformaciones geométricas? *ops.geomTransf('Linear', 1)* no considera efectos de segundo orden, solo válido para análisis lineales. *ops.geomTransf('Corotational', 1)* más preciso en grandes deformaciones, pero innecesario para estructuras convencionales y más costoso computacionalmente.

a) Definición e Integración de Secciones de Fibras en OpenSees

La integración de la sección se define estableciendo las dimensiones de la sección transversal (véase anexo), donde bf representa el ancho del ala (*flange*), tf su espesor, d la altura total de la sección y tw el espesor del alma (*web*). Para modelar el comportamiento del elemento *beam-column*, se emplea la integración de Gauss-Lobatto con cinco puntos, lo que permite una mejor representación de la distribución de esfuerzos en la sección.

Para la definición sección de fibras (véase anexo), se define una *Fiber Section* con etiqueta 1 y la interacción torsional activada mediante *-torsion 1*. Se crean *patches* (grupos de fibras) que representan el *flange* superior, el *flange* inferior y el *web*, todos definidos con *patch quad 1*. Cada *patch* se configura con un número de subdivisiones (nf , nw) y las coordenadas de sus vértices en sentido antihorario. Finalmente, *plt.axis('equal')* se emplea para garantizar que la proporción de la figura sea correcta.

2.2.2. Shell y truss

Este código modela una estructura en OpenSeesPy utilizando elementos frame y truss, considerando el efecto del campo de tensiones inclinadas en un panel de acero. A continuación, se explica la metodología paso a paso:

a) Definición y Configuración del Modelo 2D con Elementos Frame en OpenSees

Se limpia el modelo (`ops.wipe()`) y se define un modelo 2D (`ops.model('basic', '-ndm', 2, '-ndf', 3)`) con dos dimensiones espaciales (x , y) y tres grados de libertad por nodo (desplazamientos en x , y y rotación).

Se definen las dimensiones del panel, vigas y columnas, donde h_{beam} representa la luz de la viga, h_{col} la altura de la columna, y L_b y h_c son dimensiones adicionales. Además, se especifica *num_strips* como el número de elementos diagonales que simulan el campo de tensiones inclinadas. En cuanto a las propiedades del acero, se establecen el módulo de elasticidad (E_{steel}), el esfuerzo de fluencia (F_y_{steel}), el esfuerzo último (F_u_{steel}) y el espesor de la placa (t_{plate}). Para modelar el comportamiento elastoplástico del acero, se utiliza un

La definición de los elementos *Frame (Beam-Column)* incluye la asignación de vigas y columnas como elementos de borde, donde A_{beam} y A_{col} representan las áreas de sección transversal, e I_{col} el momento de inercia de la columna. Para capturar los efectos de segundo orden, se emplea una transformación geométrica P-Delta mediante `ops.geomTransf('PDelta', 1)`. Además, la integración de la sección se define utilizando el método de *Lobatto* con `ops.beamIntegration('Lobatto', sectionTag, 1, 5)`, aplicado a los elementos tipo *beam-column*. La sección de fibra (*fib_sec_1*) se compone de dos regiones: una en las aletas de la viga o columna, modelada con *patch 'quad'*, y otra en el alma de la sección, también definida con *patch 'quad'*. Finalmente, la sección se visualiza mediante `opsv.plot_fiber_section()`.

a) Modelado de la Banda de Tensiones Inclinadas en un Panel Estructural con OpenSees

Se calcula el ángulo de la banda de tensiones inclinadas (*theta_tension_field*) utilizando la fórmula de *Thorburn*:

$$\tan^2 \theta = \frac{1 + \frac{t_{plate} h_{beam}}{2A_{col}}}{1 + \frac{t_{plate} h_{beam}}{A_{beam} + \frac{h_{col}^3}{360I_{col} h_{beam}}}} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde, θ Ángulo de la banda de tensiones inclinadas, t_{plate} Espesor de la placa del panel, h_{beam} Altura de la viga, A_{col} = Área de la columna, A_{beam} Área de la viga, h_{col} = Altura de la columna, $I_{col} h_{beam}$ Momento de inercia de la columna respecto al eje horizontal de la viga

Se obtiene L_{div} , que representa la longitud de la trayectoria de carga en la dirección inclinada. Se calcula el esfuerzo cortante τ_e considerando una rigidez de corte k_s :

$$\tau_e = \frac{(k_s \pi^2 E_{steel})}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t_{plate}}{L_b} \right)^2 \quad \text{Ec. 6}$$

Donde, k_s Coeficiente de rigidez de corte, π^2 Factor relacionado con el pandeo elástico, E_{steel} = Módulo de elasticidad del acero, μ Coeficiente de Poisson del acero, t_{plate} = Espesor de la placa del panel, L_b Longitud de la placa en la dirección considerada.

Se define un material histerético (Hysteretic) para representar el comportamiento no lineal de las diagonales de tracción. Se definen nodos en las esquinas del panel (*ops.node()*). Se generan nodos intermedios para las diagonales de tracción siguiendo la geometría del campo de tensiones inclinadas. Se calculan las coordenadas de los nodos intermedios en función de *theta_tension_field* usando trigonometría (*np.tan()*). Se generan los elementos tipo *truss* (*ops.element('Truss')*) conectando los nodos diagonales con el área efectiva A_{truss} . Se conectan los nodos alineados horizontal y verticalmente con elementos *beam-column* (*ops.element('dispBeamColumn')*). También se usa una función para detectar automáticamente líneas entre nodos (*generar_rectas()*), lo que facilita la definición de los elementos estructurales.

2.2.3. Elementos truss

Este fragmento de código en OpenSeesPy modela una estructura con elementos tipo *truss* en compresión, una columna P-Delta y una carga gravitacional aplicada en la parte superior de la columna. Se establecen las condiciones de frontera y se realiza un análisis estático inicial. A continuación, se explica cada sección:

a) Generación de Nodos, Elementos Truss y Aplicación de Restricciones en el Modelo

Se generan nodos y elementos *truss* a compresión dentro del panel, se definen los nodos en posiciones basadas en el ángulo de la tensión diagonal (definido previamente como *theta_tension_field*), se usa un bucle *for* para crear los nodos y conectarlos con elementos de tracción en diagonal y se calcula la posición de los nodos inferiores y superiores en función de la ecuación de la línea de inclinación. La lógica de generación de nodos toma en cuenta si la intersección de la recta diagonal está dentro de los límites del panel (*panel_height* y *panel_width*).

Se impone la condición de igualdad de grados de libertad (*equalDOF*) entre nodos con coordenadas cercanas, si la distancia entre dos nodos es menor que 0.1, se restringen

juntos en las direcciones X, Y y rotacional (1,2,3), si no se cumple esta condición, no se hace ninguna modificación. Esto ayuda a **evitar inestabilidades** en el modelo asegurando continuidad en los desplazamientos de nodos cercanos. Se fijan los grados de libertad en $Y = 0$ (base del modelo), impidiendo desplazamientos y rotaciones (véase anexo). Significa que todos los nodos en $Y = 0$ están empotrados (sin desplazamiento en X, Y ni rotación).

Se añaden dos nodos para la columna P-Delta, separados por la altura del panel (h_{col}), se asigna una transformación geométrica P-Delta (véase anexo), se modela la columna de dos formas con elemento *elasticBeamColumn* (elemento viga-columna elástico) y elemento *Truss* entre la parte superior de la columna y un nodo estructural

Se define un patrón de carga gravitacional en la parte superior de la columna (véase anexo). ¿Por qué no usar otros métodos? *ops.pattern("Plain", 1, "Linear")* con *ops.load()* dentro: Innecesario si solo se necesita una carga gravitacional puntual, *ops.eleLoad()* en lugar de *ops.load()*: *eleLoad* se usa para cargas distribuidas en elementos, no en nodos. Definir una carga distribuida en vigas en lugar de nodos: No es la mejor opción si el objetivo es modelar una carga puntual en el nodo superior.

Se le asigna masa al nodo superior proporcional a la carga gravitacional (véase anexo), Se fija la base de la columna para que no tenga desplazamientos en X ni Y, pero permita rotación (véase anexo).

b) Configuración y Ejecución del Análisis Estático

Se configuran los parámetros del análisis estático donde el Sistema de ecuaciones, *BandGeneral*; Numeración de nodos, *Plain*; Condiciones de frontera, *Penalty*; Criterio de convergencia, *NormDisplIncr*; Algoritmo de solución, *Newton*; Control de carga, *LoadControl(0.1)*, para aplicar cargas en incrementos pequeños; Ejecución del análisis, Se realizan 5 pasos de análisis estático (véase anexo).

2.2.4. Análisis pushover

a) Implementación de un Análisis Pushover en OpenSeesPy: Metodología y Configuración

Este código implementa un análisis pushover en OpenSeesPy para evaluar la respuesta estructural bajo una carga lateral incremental. El análisis se realiza controlando el desplazamiento en el nodo superior derecho. A continuación, se explica la metodología en detalle.

¿Qué hace esta sección? *ops.loadConst("-time",0.0)*, Mantiene las cargas constantes (útil para conservar la carga gravitacional previa); *ops.wipeAnalysis()*, Limpia cualquier análisis previo para evitar conflictos; *ops.timeSeries('Linear', 2)*, Define una serie de tiempo lineal, es decir, la carga se incrementará proporcionalmente; *ops.pattern('Plain', 2, 2)*, Define un patrón de carga con ID = 2; *ops.load(2, 1.0, 0.0, 0.0)*, Aplica una carga lateral unitaria en el nodo 2, en la dirección X (se multiplicará por un factor en cada incremento).

Explicación de cada parámetro, el *ops.system('BandGeneral')*, usa un solucionador de ecuaciones de banda general; *ops.numberer('Plain')*, se numera los grados de libertad sin optimización; *ops.constraints('Penalty',1e12,1e12)*, se aplica la restricción por penalización para imponer condiciones de frontera con alta rigidez; *ops.test('NormDispIncr', 1.0e-6, 10)*, se define el criterio de convergencia, se usa la norma del incremento de desplazamientos; se permite un error de 1.0e-6 con un máximo de 10 iteraciones; *ops.algorithm('Newton')*, utiliza el método de Newton para resolver iterativamente el problema no lineal; *ops.integrator('DisplacementControl', 3, 1, 0.0005)*, Controla el análisis mediante el desplazamiento en el grado de libertad 1 (X) del nodo 3. Se usa un incremento de 0.0005 m por paso; *ops.analysis('Static')*, Especifica un análisis estático no lineal.

b) Ejecución del Análisis Pushover

Se define *max_displacement = 0.40 m*, que es el límite máximo de desplazamiento permitido. Se inicializan listas vacías para almacenar los resultados del análisis. Se ejecuta un bucle *while* que avanza mientras no haya fallado el análisis (*ok == 0*) y el desplazamiento del nodo 3 en X sea menor que 0.40 m. En cada iteración el *ops.analyze(1)* ejecuta un incremento de análisis; si el análisis es exitoso (*ok == 0*), se obtiene el desplazamiento lateral del nodo 3, se obtiene la fuerza aplicada a la estructura (*getLoadFactor(2) / 1000* en kN), se registra las fuerzas en los elementos 406 y 306, se

almacenan los valores en listas para graficar después, si el análisis no converge, se imprime un mensaje y se detiene.

El propósito es ejecutar el análisis paso a paso, aumentando el desplazamiento del nodo superior derecho hasta que la estructura alcance el colapso o el desplazamiento máximo. Para ello, se generan tres gráficos: la curva *Pushover*, que representa la relación entre el desplazamiento y la fuerza lateral aplicada; la curva *Pushover* para *Strip 406*, que muestra la fuerza en un elemento en compresión; y la curva *Pushover* para *Strip 306*, que muestra la fuerza en un elemento en tracción.

CAPITULO IV: RESULTADOS

En este estudio se presenta una metodología de análisis estructural basada en el uso de OpenSees, enfocada en la evaluación del comportamiento no lineal de un modelo mediante un análisis Pushover. Se implementa un código que incorpora elementos tipo shell, frame y truss, considerando efectos como la interacción entre estos y la influencia del fenómeno P-Delta. A través de esta metodología, se analizan distintos escenarios de conexión entre los elementos estructurales y su impacto en la estabilidad y convergencia del análisis. En las siguientes secciones, se expondrán los resultados obtenidos, destacando las dificultades numéricas encontradas, las estrategias aplicadas para mejorar la estabilidad del modelo y la interpretación de la respuesta estructural bajo cargas incrementales.

En total al correr el código hubo más de 45 intentos donde el más largo tomo 4 horas el incremento inicial de desplazamiento máximo de 5 dígitos de decimales ya que no soporta la cantidad de pasos, los intentos de la dimensión de placa variaron entre 4m x 4m a 9m x 9m con el tamaño del elemento varió entre 0,05m a 0,5m.

En el presente documento, se presenta la tabla 2 con los resultados de los distintos intentos realizados para ejecutar el análisis pushover sin que este se viera interrumpido por problemas de convergencia. La tabla recopila únicamente aquellos casos en los que el análisis se desarrolló de manera exitosa, es decir, sin que el proceso se viera estancado por problemas numéricos o dificultades en la convergencia del análisis. Esta información resulta fundamental para evaluar los parámetros y estrategias que permitieron la correcta ejecución del análisis no lineal, proporcionando una referencia para estudios futuros y ajustes en el modelo estructural.

Tabla 2: Varios resultados de placa shell

Característica	con varios truss para P-delta con incremento inicial de 0.00001	con un truss para P-delta con incremento inicial de 0.0005	con un truss para P-delta con incremento inicial de 0.0001	con un truss para P-delta con incremento inicial de 0.001
Paso inicial	0	0	0	0
Desplazamiento inicial (mm)	1.01	0.01	0.10	1.0000 mm
Corte basal inicial (kN)	-30,300.01	-303.00	8.93	29.6872 kN
Paso final registrado	286+ (fallo en 307)	999	14 (fallo en 14)	213
Desplazamiento final (mm)	3.89 (fallo en 307)	0.07	13.016	13.3828 mm
Corte basal final (kN)	-116,099.74 (fallo en 307)	-3,300.00	116.27	397.1171 kN
Incremento de desplazamiento (mm)	~0.01 mm por paso	~0.01 mm por paso	~0.10 mm por paso	~12.3828 mm por paso
Incremento de corte basal (kN)	~300 kN por paso	~3 kN por paso	~8-9 kN por paso	~367.4299 kN por paso
Número total de pasos exitosos	286	999	13	213 (pero hubo múltiples fallos de convergencia)
Errores encontrados	Convergencia fallida en paso 287 y posteriores	Advertencias, pero sin fallo total	No hay convergencia en el paso 13, fallando en 14	Fallos de convergencia en múltiples pasos (ej. 7, 8, 203, 213, 214, etc.), advertencias sobre el elemento 381.
Método de solución	NewtonLineSearch, ModifiedNewton	No especificado	AcceleratedNewton	Método de Newton acelerado (AcceleratedNewton).
Tipo de error	Fallo en la convergencia, iteraciones excesivas en J2PlateFiber	Advertencias menores, pero sin fallos críticos	Fallo en la convergencia, iteraciones excesivas en J2PlateFiber y errores en carga de dominio	Fallo de convergencia en la prueba de desplazamiento incremental (CTestNormDisplncr), con un límite de 20 iteraciones y una tolerancia de 0.00010.00010.0001, superada en varios casos.
tiempo pushover	7.1 seg	7.1s	1 m 48 seg	8 minutos

1. Resultado de Modelo de Muro de Placa en OpenSees

El diseño estructural del muro de placa se compone de distintos tipos de elementos finitos, todos ellos conectados por nodos que representados por números organizados de la siguiente manera:

1. **Elementos *Shell* (Azul):** Representan el cuerpo principal del muro. Se obtuvo mediante los modelados de elementos SHELL para capturar el comportamiento de membrana y flexión. Distribuidos en una malla ortogonal con nodos numerados en azul.
2. **Elementos *Frame* (Rojo):** Ubicados en los bordes verticales del muro. Obtenido mediante los modelados con elementos *dispBeamColumn*, los cuales permiten la distribución de momentos y cortantes a lo largo de su longitud. Conectados a la malla de elementos *Shell* para garantizar compatibilidad de deformaciones.
3. **Elementos *Truss* (Verde):** Ubicados en la parte superior derecha de la estructura. Elementos puramente axiales que ayudan a equilibrar la estructura y evitar efectos no deseados.
4. **Elemento *ElasticBeamColumn* (Azul – Nodos 129 y 130):** Obtenido mediante el modelado con el elemento *ElasticBeamColumn*. Representa un componente con comportamiento elástico que conecta el extremo derecho del muro, contribuyendo a la rigidez global.

El modelo incluye condiciones de apoyo en la base (representadas por cuadrados magenta), las cuales restringen el movimiento en los nodos inferiores para simular un muro empotrado en su base.

Este esquema permite analizar la respuesta estructural del muro bajo diferentes condiciones de carga, incorporando elementos que simulan efectos no lineales y elasticidad para un comportamiento más realista. Esta placa se obtuvo bajo la formación de nodos como se muestra en la figura 19.

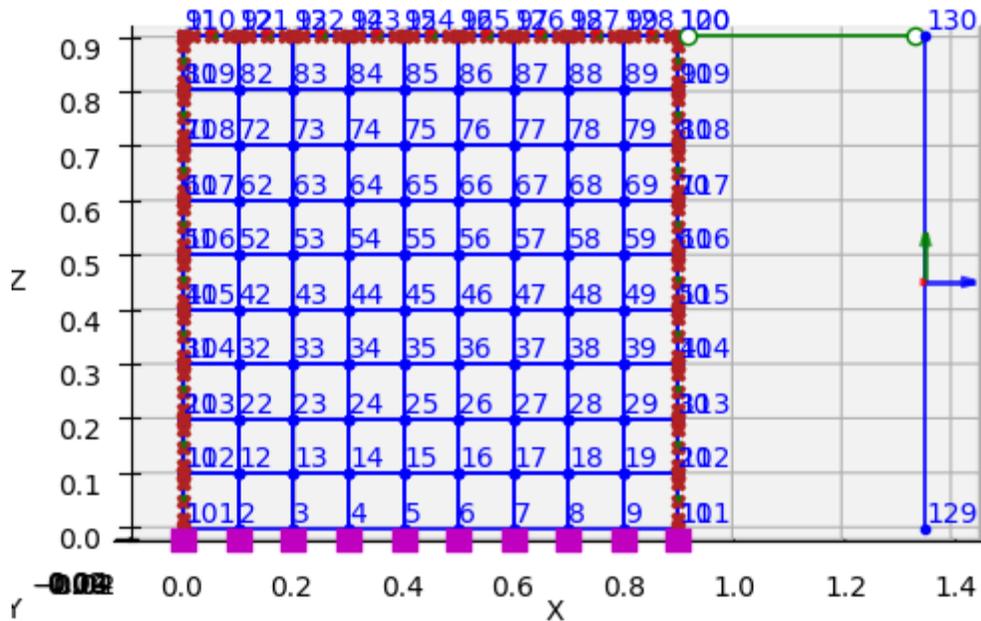


Figura 19: modelo de placa de acero

2. Resultado de Análisis Modal del Muro de Placa

El análisis modal se obtuvo con la asignación de masas y calcular los periodos modales para cada modo del muro de placa demorando 12 segundos aproximadamente, esto ha permitido obtener los primeros seis modos de vibración, los cuales están caracterizados por sus respectivas formas modales y períodos de vibración.

1. **Modo 1 (T = 0.4588 seg):** Presenta una deformada global con predominio de traslación en la dirección X. Es el modo fundamental de la estructura, influenciado por la flexibilidad del muro.
2. **Modo 2 (T = 0.3339 seg):** Similar al primer modo, pero con mayor curvatura en el muro. Se observa mayor participación de efectos de cortante.
3. **Modo 3 (T = 0.1488 seg):** Se presenta un modo de vibración con una deformación en forma de "S". Indica la activación de modos superiores con mayor curvatura en la deformada.

4. **Modo 4 (T = 0.1439 seg):** Combinación de traslación y deformación de flexión del muro. Muestra una mayor rigidez en comparación con los modos anteriores.
5. **Modo 5 (T = 0.1387 seg):** Exhibe una deformada más compleja con varios puntos de inflexión. Representa la interacción de efectos de flexión y cortante en el muro.
6. **Modo 6 (T = 0.0873 seg):** Modo de alta frecuencia con deformaciones localizadas. Influenciado por la rigidez relativa de los elementos estructurales.

Este análisis proporciona información clave sobre la respuesta dinámica del muro, permitiendo evaluar su comportamiento ante cargas sísmicas y vibraciones ambientales. Los períodos de vibración, como se muestra en la figura 20 obtenidos reflejan la influencia de la configuración estructural, la rigidez de los elementos y la interacción entre los distintos componentes del modelo.

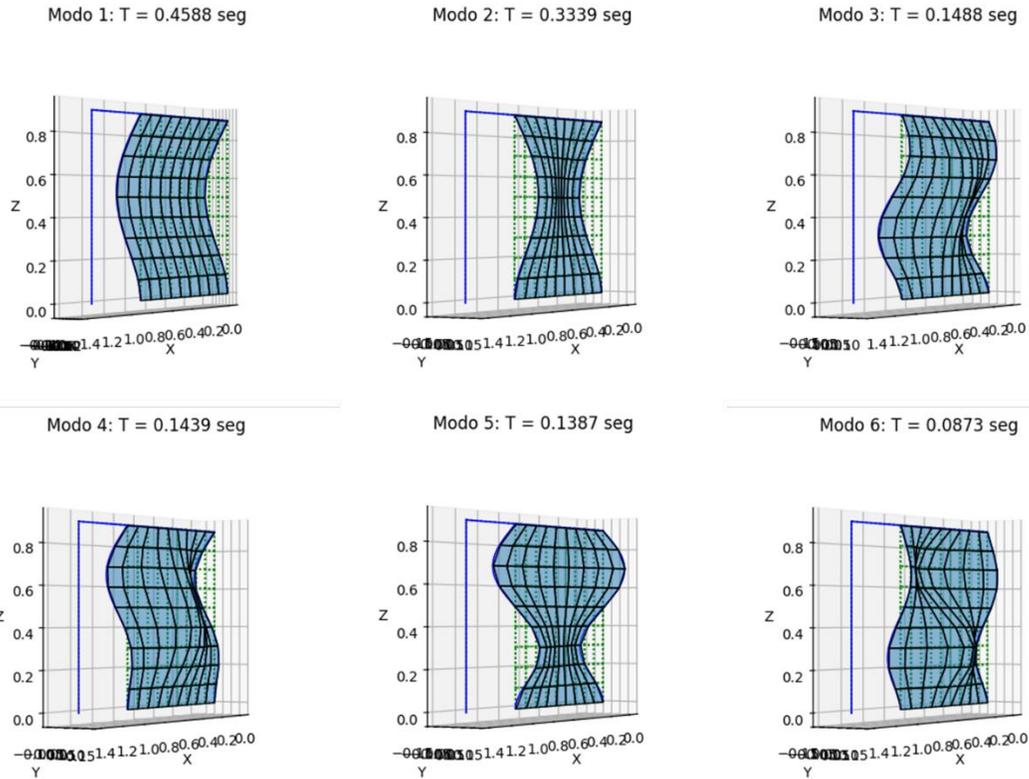


Figura 20: periodos de análisis modal

3. Resultado de análisis Pushover

El resultado del análisis Pushover mostrado en la figura 21. refleja un comportamiento lineal del modelo estructural, sin evidencia de plastificación ni formación de mecanismos de colapso. La falta de convergencia y la imposibilidad de generar ciclos de histéresis sugieren que el modelo podría estar dominado por un comportamiento elástico, posiblemente debido a una configuración inadecuada de materiales, secciones o elementos que deberían permitir la degradación de rigidez y resistencia. Además, el tiempo de ejecución prolongado, entre 4 a 6 minutos, indica que el proceso iterativo del análisis enfrenta dificultades numéricas, lo que podría estar relacionado con la formulación de los elementos, el tipo de integrador utilizado o la necesidad de ajustes en los parámetros del análisis no lineal. Para mejorar la representación del comportamiento estructural, sería recomendable revisar las propiedades del material, los modelos de daño y la estrategia de control del desplazamiento.

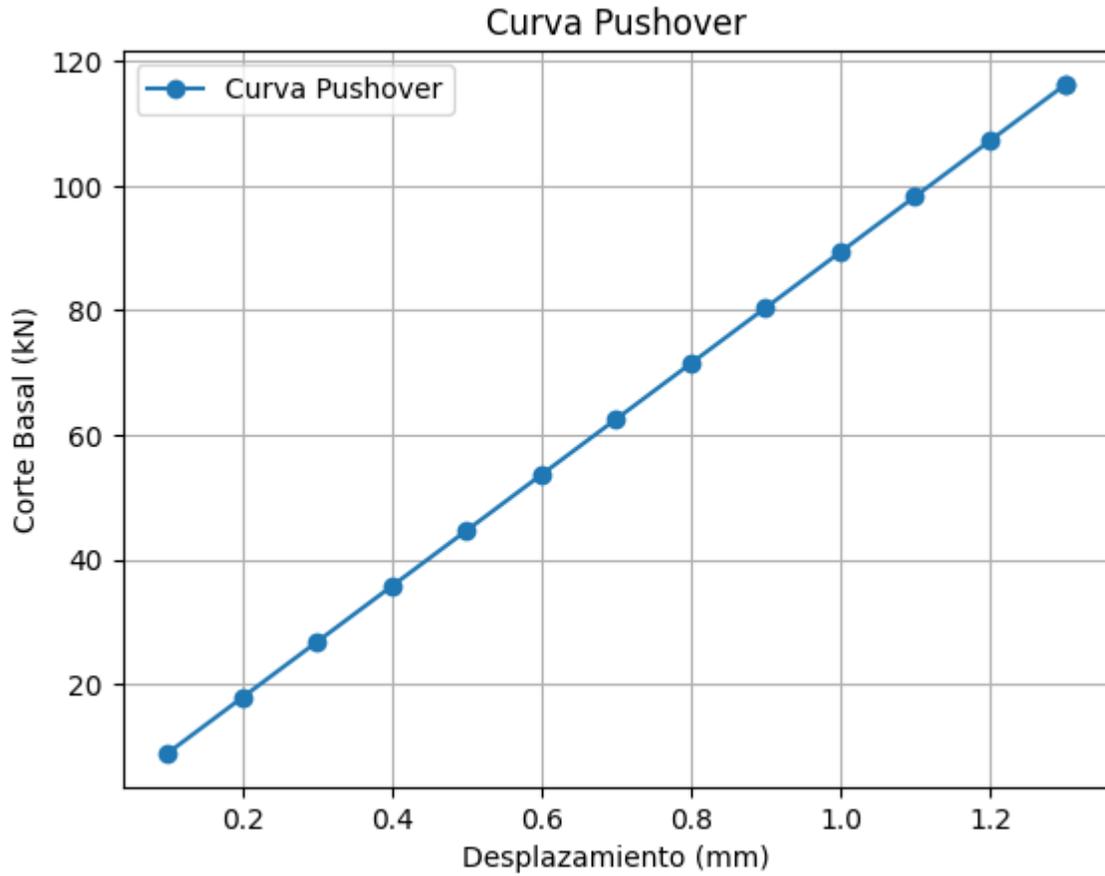


Figura 21: Curva pushover recta

Sin embargo, se había logrado tener un caso, la curva Pushover que logró generarse correctamente antes de considerar los efectos P-Delta, lo que indica que el modelo estructural pudo ser analizado sin problemas bajo cargas incrementales, como se muestra en la figura 22.

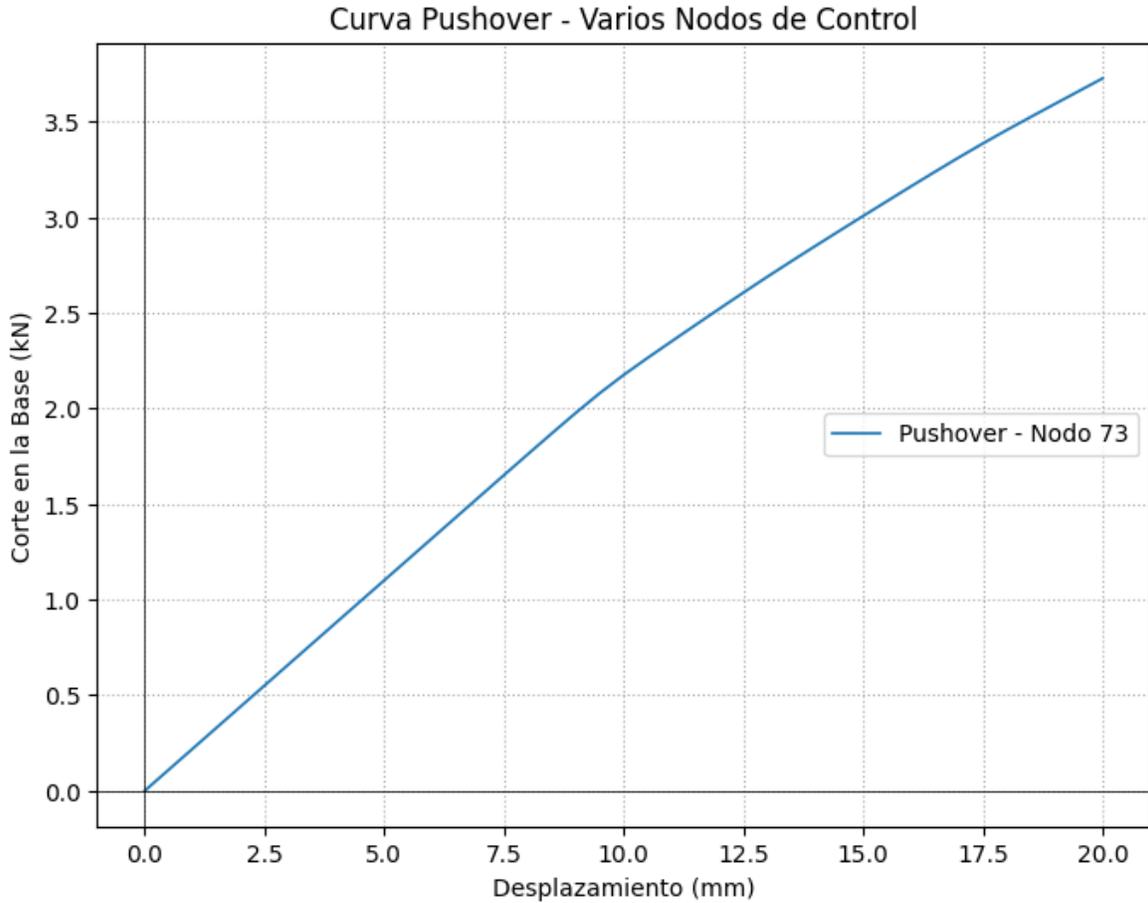


Figura 22: curva pushover sin truss

Pero esta aun no tenía los elementos truss como se muestra en la figura 23, al activar el efecto P-Delta, se evidenció que la estabilidad del análisis dependía de la conectividad de los elementos truss con otros elementos estructurales. Específicamente, el análisis funcionó solo cuando los elementos truss estaban conectados simultáneamente con los elementos frame y shell, lo que sugiere que esta configuración proporcionaba suficiente rigidez y estabilidad. Por otro lado, cuando los elementos truss se conectaban únicamente con los elementos shell, el análisis modal fallaba, lo que puede deberse a problemas de inestabilidad estructural o dificultades en la formulación de los elementos en OpenSees. Esto resalta la importancia de una correcta modelación de las conexiones entre elementos para garantizar un comportamiento estructural adecuado y evitar problemas numéricos en el análisis.

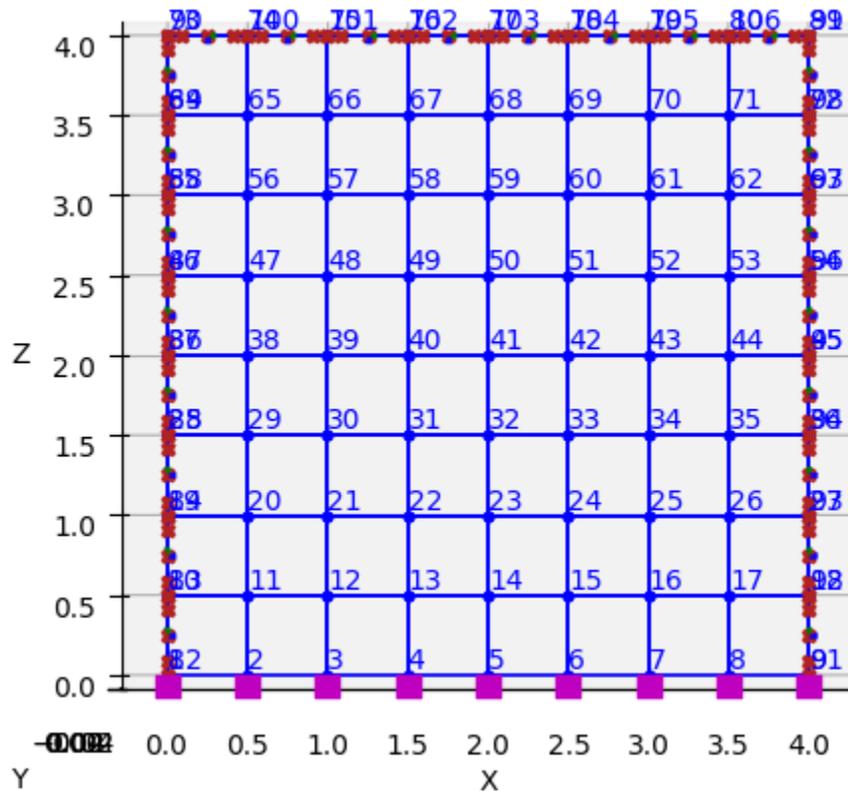


Figura 23: Modelo sin truss

4. Resultados del Análisis del Muro Tipo Truss

El modelo estructural del muro *truss* de la figura 24 está compuesto por distintos tipos de elementos que representan el comportamiento mecánico del sistema:

- **Elementos Frame (azul - dispBeamColumn):** Dispuestos en el interior del muro, formando una malla rectangular o cuadrada. Estos elementos colaboran en la transmisión de fuerzas internas (flexión, corte) y simulan la continuidad estructural del muro. Ayudan a representar el comportamiento flexo-cortante distribuido.
- **Elementos Frame (rojo - dispBeamColumn):** Ubicados en los bordes exteriores del muro (superior, inferior y laterales). Representan los elementos de borde, aportando rigidez y capacidad resistente a flexión y corte. Funcionan como un marco estructural perimetral.

- **Elementos Truss (verde):** Dispuestos en una configuración reticulada diagonal dentro del muro, estos elementos solo resisten esfuerzos axiales, permitiendo una disipación eficiente de cargas laterales.
- **Elemento ElasticBeamColumn (azul - nodos 501 y 500):** Representa una conexión flexible fuera del plano del muro, posiblemente modelando una viga de borde o una conexión a otra estructura.

Comportamiento del Muro Truss:

1. **Distribución de esfuerzos:** La disposición en forma de malla diagonal de los elementos tipo **truss** sugiere que la estructura distribuye eficientemente las cargas axiales, evitando efectos de flexión dentro del cuerpo del muro.
2. **Rigidez lateral:** La combinación de los elementos frame en los bordes y la retícula interna **truss** proporciona un equilibrio entre flexibilidad y resistencia a fuerzas horizontales.
3. **Transferencia de carga:** La rigidez de los elementos ElasticBeamColumn en los nodos 501 y 500 indica que el muro está conectado a un sistema que transfiere esfuerzos fuera de su plano.

Este análisis confirma que la modelación con elementos truss en la retícula interna reduce los efectos de flexión dentro del muro, promoviendo un comportamiento estructural eficiente para cargas predominantemente axiales.

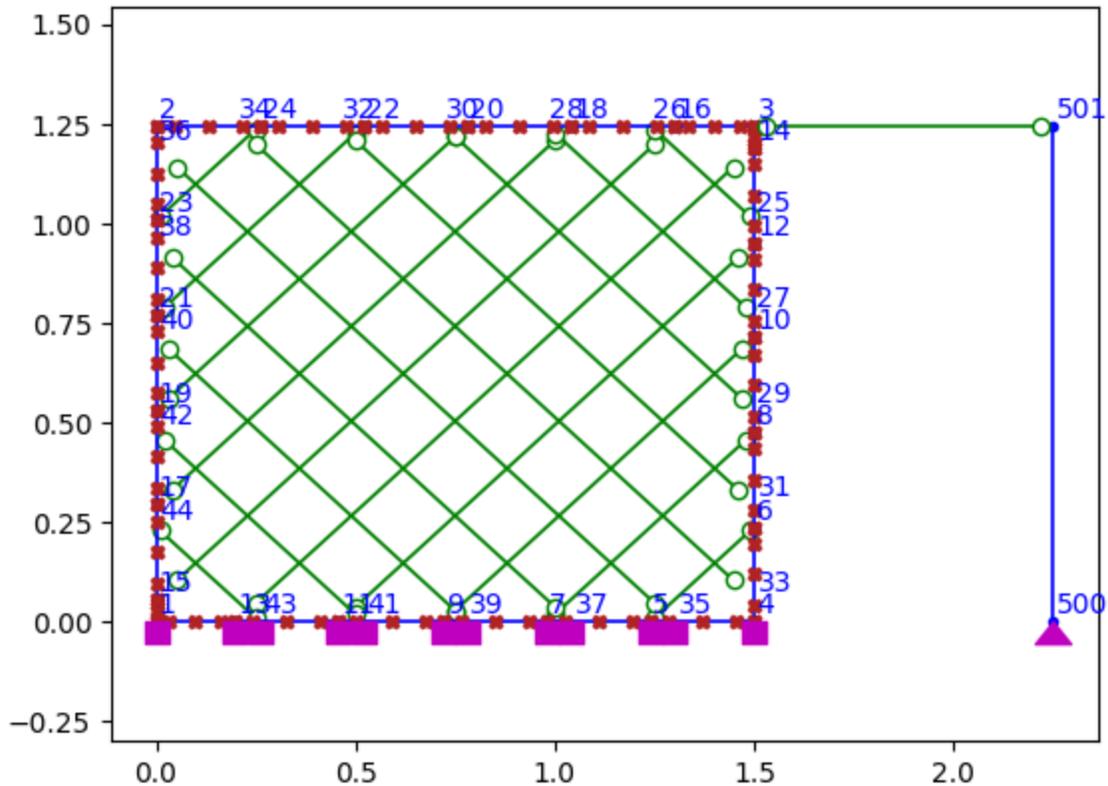


Figura 24: Modelo de placa de acero truss

5. Descripción de los Resultados de las Curvas *Pushover*

Los resultados obtenidos a partir del análisis *pushover* del muro tipo *truss* muestran el comportamiento global y local de la estructura bajo cargas laterales crecientes. A continuación, se describe el significado de cada curva:

1. Curva *Pushover* Global (ver figura 25)

- **Eje X:** Desplazamiento lateral del nodo superior derecho (m).
- **Eje Y:** Carga lateral aplicada (kN).
- **Interpretación:** Se observa un crecimiento inicial rápido de la carga con el desplazamiento, lo que indica una alta rigidez inicial. La curva se suaviza alrededor de 0.2 m de desplazamiento, lo que sugiere el inicio de la no linealidad estructural. Posteriormente, hay una disminución en la capacidad de carga, lo que sugiere el inicio de mecanismos de falla en los elementos estructurales.

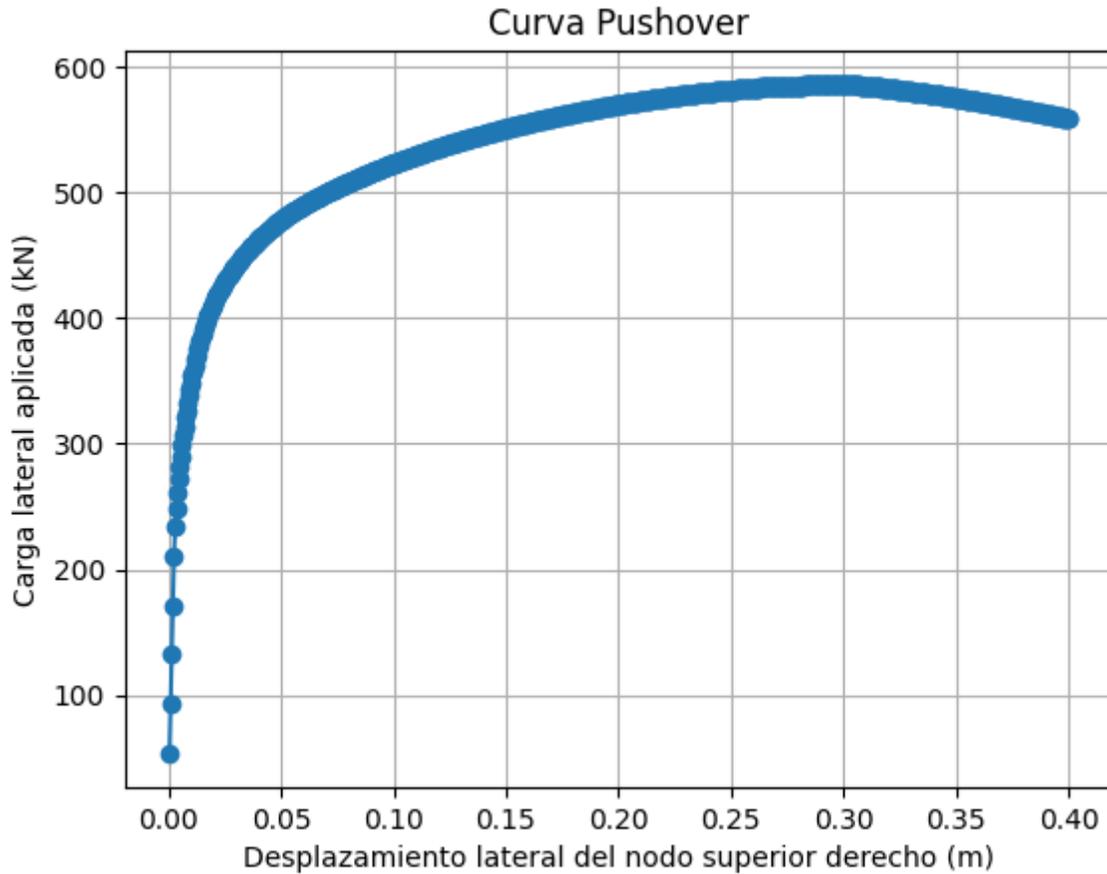


Figura 25: Curva Pushover de placa de acero truss

2. Curva Pushover para Strip en Compresión (ver figura 26)

- **Eje X:** Desplazamiento lateral del nodo superior derecho (m).
- **Eje Y:** Fuerza en la strip 406 (kN).
- **Interpretación:** La fuerza en el strip en compresión permanece prácticamente constante a lo largo del análisis. Esto sugiere que los elementos en compresión no experimentan variaciones significativas en su carga axial, lo que podría deberse a una redistribución de esfuerzos o a una respuesta elástica constante.

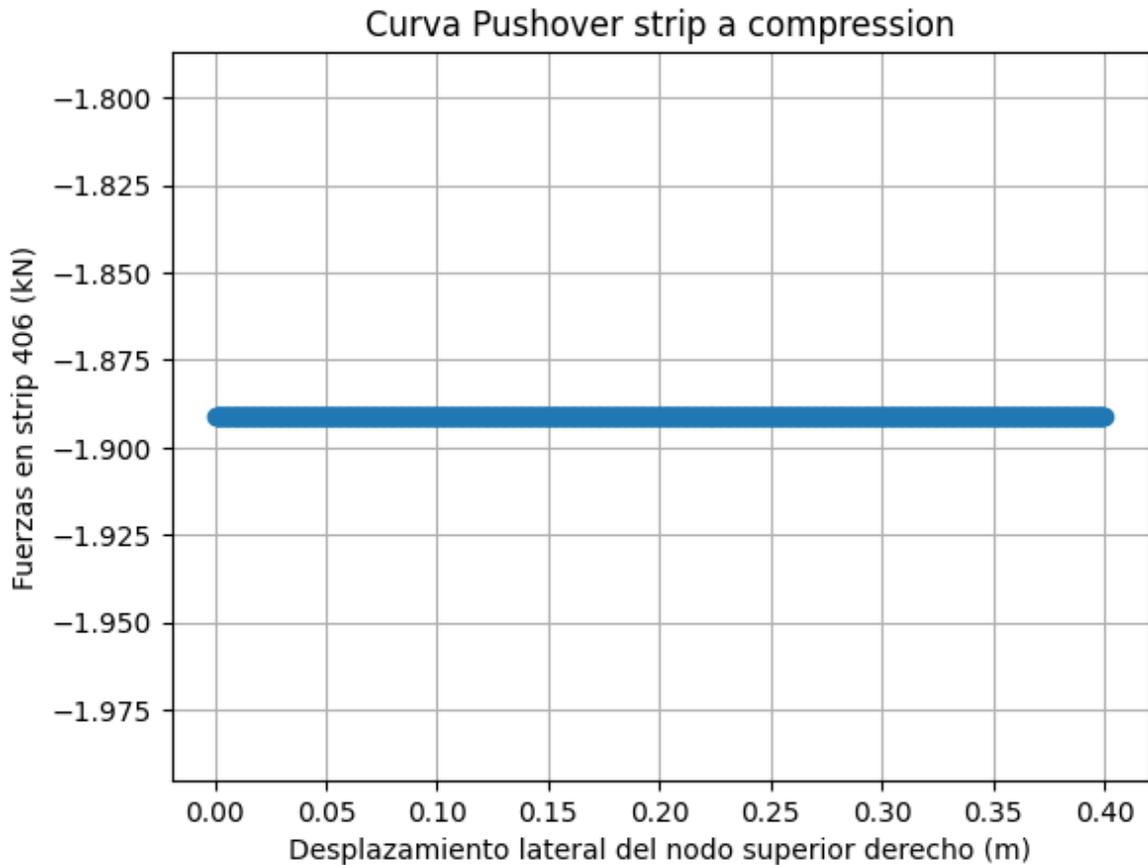


Figura 26: Curva Pushover strip a compresión de muro de placa de acero truss

3. Curva Pushover para Strip en Tracción (ver figura 27)

- **Eje X:** Desplazamiento lateral del nodo superior derecho (m).
- **Eje Y:** Fuerza en la strip 306 (kN).
- **Interpretación:** A diferencia de la curva de compresión, la fuerza en tracción aumenta en magnitud conforme el desplazamiento lateral crece. Esto indica que los elementos en tracción asumen una mayor demanda de carga a medida que el muro se deforma. Se observa una tendencia lineal en la reducción de la capacidad del strip, lo que sugiere un comportamiento progresivo hasta alcanzar una posible falla o redistribución de carga en el sistema.

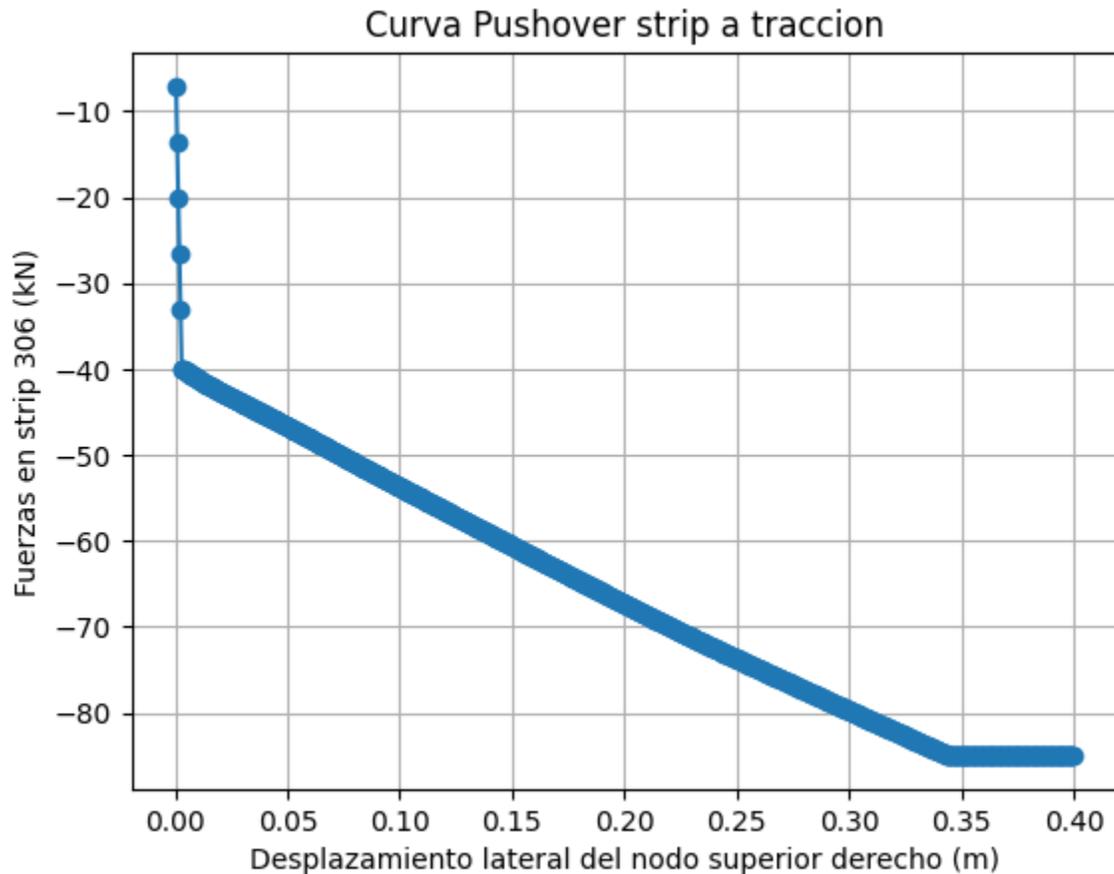


Figura 27: Curva pushover strip a tracción muro de placa de acero truss

El análisis confirma que el muro tipo *truss* presenta una buena capacidad de carga lateral inicial, pero con un punto de inflexión en su resistencia debido a la no linealidad de los elementos estructurales. Además, los elementos en tracción absorben gran parte del esfuerzo, mientras que los elementos en compresión mantienen una carga relativamente constante.

6. Comparación resultado obtenido vs resultado esperado

En la figura, se presentan dos gráficos que comparan el resultado obtenido a partir del análisis *pushover* realizado en OpenSees (izquierda) con el comportamiento esperado basado en datos experimentales o referencias previas (derecha). El gráfico de la izquierda muestra una relación lineal entre el desplazamiento y la fuerza cortante aplicada, lo que sugiere que el modelo se encuentra en un régimen predominantemente elástico sin evidencia de comportamiento no lineal significativo.

En contraste, el gráfico de la derecha exhibe una respuesta histerética esperada, con bucles de histéresis característicos de un sistema sometido a cargas cíclicas, reflejando efectos de daño, ablandamiento y disipación de energía. La comparación entre ambos gráficos permitirá evaluar la capacidad del modelo numérico para reproducir adecuadamente el comportamiento estructural previsto y realizar ajustes si es necesario.

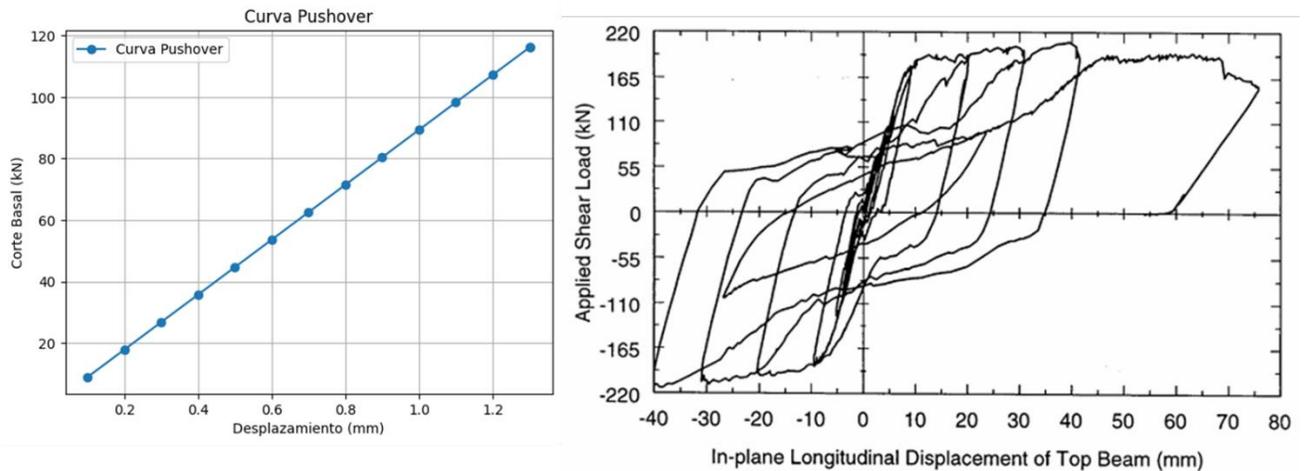


Figura 28: resultado obtenido en placa shell vs resultado esperado

En la figura 29 se observa una superposición entre el resultado obtenido (curva azul) y el resultado esperado (curvas histeréticas en negro). Se destaca que, aunque existen diferencias en la rigidez inicial entre el modelo y los resultados experimentales, esto no invalida la capacidad del modelo para representar adecuadamente el comportamiento global de la estructura. Tales discrepancias pueden atribuirse a simplificaciones típicas en modelos numéricos, como la ausencia de imperfecciones iniciales, historia de carga previa o efectos de daño acumulado, que suelen reducir la rigidez observada en ensayos físicos. A pesar de estas diferencias, las curvas comparadas muestran una tendencia similar en términos de capacidad máxima, lo que sugiere que la calibración inicial del modelo es razonable como primera aproximación. Además, considerando que el enfoque del ASCE 41 se basa en criterios de desempeño estructural derivados de la capacidad global (típicamente obtenida mediante análisis pushover), esta aproximación resulta coherente con los objetivos del análisis. No obstante, un

análisis cíclico permitiría evaluar con mayor precisión la degradación de rigidez y la disipación de energía, contribuyendo a un ajuste más completo del modelo frente a la respuesta

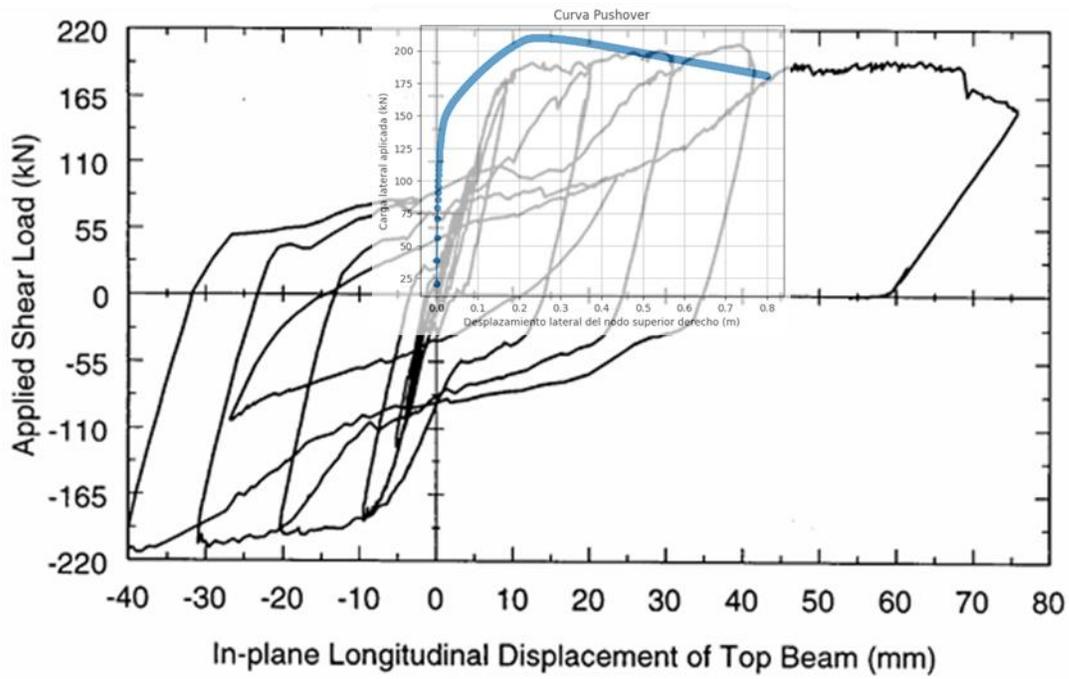


Figura 29: resultado obtenido en placa truss vs resultado esperado

CAPITULO V: CONCLUSIÓN

El presente estudio tuvo como objetivo desarrollar un modelo numérico en OpenSees para simular el comportamiento de muros de corte de placas de acero (SPSW) utilizando elementos SHELL. A lo largo del proceso, se implementaron diversas estrategias para capturar con precisión la respuesta estructural bajo cargas laterales. Los resultados obtenidos mostraron que el modelo representó correctamente la rigidez global y las frecuencias naturales en el análisis modal y lineal, sin embargo, en el análisis pushover, la respuesta del modelo fue predominantemente elástica-lineal, sin evidenciar plastificación significativa ni degradación en la curva envolvente.

Se verificó que los elementos SHELL en OpenSees son estables y precisos en análisis modal y lineal, proporcionando resultados confiables en términos de rigidez global. No obstante, presentan limitaciones para capturar los efectos no lineales esenciales en el comportamiento de los SPSW, como la disipación de energía y la degradación de rigidez. La principal deficiencia identificada es que estos elementos no reproducen el pandeo local en placas delgadas, lo que podría ser un factor clave en la discrepancia observada en la respuesta no lineal del modelo.

Por otro lado, los elementos truss utilizados en la modelación demostraron mayor capacidad para reflejar efectos no lineales. La curva pushover global mostró un incremento progresivo de la resistencia hasta un punto máximo, seguido de una degradación, lo que es consistente con estructuras que experimentan plastificación progresiva. Además, los elementos truss en tracción capturan adecuadamente la plastificación y la degradación de resistencia, mientras que los elementos en compresión no tienen un impacto significativo en la respuesta estructural.

Para mejorar la representación del comportamiento histerético en OpenSees, se recomienda explorar modelos constitutivos avanzados que consideren la evolución de daño y la disipación de energía. Asimismo, la validación del modelo con datos experimentales más detallados permitiría optimizar la calibración de parámetros y mejorar la precisión en la predicción de la respuesta estructural.

Finalmente, el modelo desarrollado constituye una primera aproximación que reproduce de forma razonable la respuesta modal y el comportamiento global de los sistemas SPSW. Aunque se observan discrepancias en la rigidez inicial respecto a los resultados experimentales, estas pueden atribuirse a simplificaciones comunes en los modelos numéricos, como la ausencia de imperfecciones iniciales, historia de carga o daño acumulado, que suelen estar presentes en ensayos físicos. Aun así, la respuesta obtenida presenta una tendencia coherente en términos de capacidad máxima, lo que resulta consistente con el enfoque de evaluación por desempeño estructural planteado en la norma ASCE 41, centrado en la comparación entre la demanda y la capacidad global de la estructura, típicamente representada mediante curvas fuerza-desplazamiento. No obstante, el modelo aún enfrenta desafíos importantes en la simulación precisa del comportamiento no lineal. En particular, la limitada capacidad de los elementos tipo *SHELL* para capturar el pandeo local restringe la adecuada representación de los mecanismos de disipación de energía característicos de estos sistemas. Mejorar la calibración de materiales y explorar estrategias complementarias de modelado permitiría fortalecer el uso de OpenSees como herramienta para el análisis avanzado de estructuras de acero sometidas a cargas cíclicas y sísmicas.

Bibliografía

- Acosta palacio Carlos enrique. (2010). *Diseño e implementación de una herramienta de representación del conocimiento para apoyar la gestión de requisitos en un proceso de desarrollo de software*. Universidad de Chile facultad de ciencias físicas y matemáticas .
- Bypour, M., Kioumars, M., & Yekrangnia, M. (2021). Shear capacity prediction of stiffened steel plate shear walls (SSPSW) with openings using response surface method. *Engineering Structures*, 226. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111340>
- Dou, C., Xie, C., Wang, Y., & Yang, N. (2023). Cyclic loading test and lateral resistant behavior of flat-corrugated steel plate shear walls. *Journal of Building Engineering*, 66. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.105831>
- Ghodratian-Kashan, S. M., & Maleki, S. (2022). Experimental investigation of double corrugated steel plate shear walls. *Journal of Constructional Steel Research*, 190. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107138>
- Gorji Azandariani, A., Gholhaki, M., & Gorji Azandariani, M. (2022). Assessment of damage index and seismic performance of steel plate shear wall (SPSW) system. *Journal of Constructional Steel Research*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107157>
- Gorji Azandariani, M., Gholhaki, M., Kafi, M. A., & Gorji Azandariani, A. (2022). Assessment of cyclic behavior and performance of hybrid linked-column steel plate shear wall system. *Journal of Building Engineering*, 58. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104963>
- Gorji Azandariani, M., Kafi, M. A., & Gholhaki, M. (2021). Innovative hybrid linked-column steel plate shear wall (HLCS) system: Numerical and analytical approaches. *Journal of Building Engineering*, 43. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102844>

- Gorji Azandariani, M., Rousta, A. M., Mohammadi, M., Rashidi, M., & Abdolmaleki, H. (2021). Numerical and analytical study of ultimate capacity of steel plate shear walls with partial plate-column connection (SPSW-PC). *Structures*, 33. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.06.046>
- Hajimirsadeghi, M. R., & Fanaie, N. (2021). Steel plate shear walls with large disconnected lengths of web plate to vertical boundary element. *Structures*, 34. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.10.056>
- Hayatdavoodi, A., Deghani, A., Aslani, F., & Nateghi-Alahi, F. (2021). The development of a novel analytical model to design composite steel plate shear walls under eccentric shear. *Journal of Building Engineering*, 44. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103281>
- He, J., Lin, S., Li, Y., Dong, X., & Chen, S. (2022). Genetic Algorithm for Optimal Placement of Steel Plate Shear Walls for Steel Frames. *Buildings*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/buildings12060835>
- Jiang, Z. Q., Yan, T., Zhang, A. L., Su, L., & Shen, C. J. (2022). Experimental research on special steel frame with stiffened double steel plate shear wall. *Journal of Constructional Steel Research*, 189. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.107067>
- Leal Barrientos, J. , & F. C. G. (2019). Desempeño sísmico de muros de corte de placa de acero utilizando elementos finitos tipo cascara. In Sociedad Chilena de Mecánica Computacional (Ed.), *XVIII Jornadas de Mecánica Computacional*.
- Lu, J., Zhang, H., & Yu, S. (2021). Study on seismic behaviors of self-centering steel plate shear walls with slits. *Journal of Constructional Steel Research*, 185. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106878>
- Qiu, J., Zhao, Q., Yu, C., & Wang, Z. (2022). Lateral behavior of trapezoidally corrugated wall plates in steel plate shear walls, Part 2: Shear strength and post-peak behavior. *Thin-Walled Structures*, 174. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109103>

- Saedi Daryan, A., Salari, M., Palizi, S., & Farhoudi, N. (2023). Size and layout optimum design of frames with steel plate shear walls by metaheuristic optimization algorithms. *Structures*, 48. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.11.118>
- Shi, Y., Luo, Z., Xu, Y., Zou, Y., Xu, L., & Ma, Q. (2022). Experimental study on the seismic behavior of high-performance cold-formed steel plate shear walls. *Engineering Structures*, 251. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113552>
- Sun, H. J., Guo, Y. L., Wen, C. B., & Zuo, J. Q. (2023). Local and global buckling prevention design of corrugated steel plate shear walls. *Journal of Building Engineering*, 68. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106055>
- Tan, J. K., Su, M. N., Wang, Y. H., Wang, K., Cao, Y. Q., & Li, P. (2022). Experimental study on cyclic shear performance of steel plate shear wall with different buckling restraints. *Structures*, 35. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.11.021>
- Tong, J., Wu, R., & Wang, L. (2023). Experimental and numerical investigations on seismic behavior of stiffened corrugated steel plate shear walls. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 52(12). <https://doi.org/10.1002/eqe.3920>
- Vaziri, E., Gholami, M., & Gorji Azandariani, M. (2021). The Wall–Frame Interaction Effect in Corrugated Steel Plate Shear Walls Systems. *International Journal of Steel Structures*, 21(5). <https://doi.org/10.1007/s13296-021-00529-3>
- Wen, C. B., Guo, Y. L., Zuo, J. Q., & Zhao, X. Y. (2023). Strength design of prefabricated corrugated steel plate shear walls under combined compression and shear loads. *Journal of Building Engineering*, 65. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105790>
- Wu, R. M., Wang, L. Q., Tong, J. Z., Tong, G. S., & Gao, W. (2024). Elastic buckling formulas of multi-stiffened corrugated steel plate shear walls. *Engineering Structures*, 300. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117218>
- Wu, Y., Fan, S., Guo, Y., Duan, S., & Wu, Q. (2023). Experimental study and numerical simulation on the seismic behavior of diagonally stiffened stainless

steel plate shear walls under low cyclic loading. *Thin-Walled Structures*, 182. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110165>

Wu, Y., Fan, S., Zhou, H., Guo, Y., & Wu, Q. (2022). Cyclic behaviour of diagonally stiffened stainless steel plate shear walls with two-side connections: Experiment, simulation and design. *Engineering Structures*, 268. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114756>

Yu, J., Huang, J., Li, B., & Feng, X. (2021). Experimental study on steel plate shear walls with novel plate-frame connection. *Journal of Constructional Steel Research*, 180. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106601>

Zhou, X., Yao, X., Xu, L., Shi, Y., Ke, K., & Liu, L. (2022). Shake table tests on a full-scale six-storey cold-formed thin-walled steel-steel plate shear wall structure. *Thin-Walled Structures*, 181. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110009>

ANEXO

material se implementa con el comando

```
ops.nDMaterial('J2Plasticity', matTag_plane_stress_inelastic, K, G, sig0, sigInf, delta, H)
```

La sección se define en OpenSees con el siguiente comando

```
ops.section('PlateFiber', secTag_LayeredShell, matTag_plane_stress_inelastic, espesor)
```

La generación de la sección de fibras se realiza mediante el siguiente bloque de código

```
fib_sec_1 = [['section', 'Fiber', 1, '-torsion', 3],  
            ['patch', 'quad', 3, nf, nw, bf/2, d/2, -bf/2, d/2, -bf/2, (d/2)-tf, bf/2, (d/2)-tf],  
            ['patch', 'quad', 3, nf, nw, bf/2, -d/2, bf/2, -d/2+tf, -bf/2, -(d/2)+tf, -bf/2, -(d/2)],  
            ['patch', 'quad', 3, nf, nw, tw/2, d/2-tf, -tw/2, d/2-tf, -tw/2, -d/2+tf, tw/2, -d/2+tf]  
            ]
```

Para visualizar la distribución de fibras, se utiliza OpsVis, que permite graficar la sección con colores diferenciados para los materiales

```
opsv.plot_fiber_section(fib_sec_1, 1, matcolor=['r', 'lightgrey', 'gold', 'w', 'w', 'w'])  
plt.axis('equal')  
plt.show()
```

La definición del material en OpenSees se realiza con un comando

```
ops.uniaxialMaterial('Steel02', matTag_beam, Fy, E0, br)
```

Se define una transformación lineal con el siguiente comando

```
ops.geomTransf('Linear', 1, 0, 1, 0)
```

Para mejorar la precisión del análisis de las vigas, se define un esquema de integración de la sección basado en la cuadratura de *Lobatto*,

```
ops.beamIntegration('Lobatto', 1, 2, 3)
```

Para considerar los efectos de segundo orden debido a la interacción entre carga axial y flexión (efecto P- Δ), se utiliza la transformación geométrica

```
ops.geomTransf('PDelta', transfTag, *vecX, *vecY)
```

La integración de la sección se define mediante la cuadratura de *Lobatto* con cinco puntos de integración

```
ops.beamIntegration('Lobatto', integrationTag, sectionTag, 5)
```

Para garantizar que los elementos TRUSS interactúen correctamente con el modelo estructural, se asigna masa nodal al nodo superior

```
ops.mass(truss_node_id, 1000.0 * kg, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0)
```

Además, el nodo superior se restringe en la dirección Y

```
ops.fix(truss_node_id, 0, 1, 0, 0, 0, 1)
```

Los elementos *TRUSS* se definen como elementos axiales que transmiten únicamente esfuerzo normal

```
ops.element('truss', element_id, node_i, node_j, area_truss, materialTag, '-rho', 0.0)
```

corresponde al material utilizado, en este caso, un material elástico

```
ops.uniaxialMaterial('Elastic', 1001, E_truss)
```

Estas propiedades se definen

```
A = 1000 * m**2 # Área transversal (m^2)
```

```
E = 200000.0 * MPa # Módulo de elasticidad
```

```
v = 0.3 # Relación de Poisson
```

```
G = E / (2 * (1 + v)) # Módulo de corte
```

```

Iz = 1000 * m**4 # Momento de inercia fuerte (m^4)

Iy = 1000 * m**4 # Momento de inercia débil (m^4)

GJ = 1.0e5 # Rigidez torsional (N*m^2)

# Para definir la orientación de los elementos en el espacio 3D, se crea una
transformación geométrica que define la orientación del eje local X

vecX = [0, 1, 0] # Orientación del eje local X

transfTag = 30

try:

    ops.geomTransf('Linear', transfTag, *vecX)

except Exception as e:

    print(f"Error al definir la transformación geométrica: {e}")

# Para definir la orientación de los elementos en el espacio 3D, se crea una
transformación geométrica que define la orientación del eje local X

# Restringir los nodos de la base

for i in range(1, Nx + 2):

    ops.fix(i, 1, 1, 1, 1, 1, 1)

# Cada elemento se define entre dos nodos consecutivos de la lista
truss_right_nodes

for j in range(len(truss_right_nodes) - 1):

    start_node = truss_right_nodes[j]

    end_node = truss_right_nodes[j + 1]

    # Validar existencia de nodos

    coords_start = ops.nodeCoord(start_node)

    coords_end = ops.nodeCoord(end_node)

```

```

if not coords_start or not coords_end:

    print(f"Advertencia: Nodo {start_node} o {end_node} no existe. Verifica la
creación de nodos.")

    continue

# Crear elemento elasticBeamColumn

try:

    ops.element('elasticBeamColumn', element_id2, start_node, end_node, A, E,
G, GJ, Iy, Iz, transfTag, '-mass', 0.0)

    print(f"Elemento elasticBeamColumn {element_id2} creado entre nodos
{start_node} y {end_node}.")

    element_id2 += 1

except Exception as e:

    print(f"Error al agregar el elemento elasticBeamColumn con id {element_id2}
entre los nodos {start_node} y {end_node}: {e}")

# Restricciones en los Nodos de la Base

for i in range(1, Nx + 2):

    ops.fix(i, 1, 1, 1, 1, 1, 1)

# Definir las restricciones en los nodos superiores

for i in range(node_id - Nx - 1, node_id):

    ops.fix(i, 0, 1, 0, 0, 0, 0)

# El análisis modal requiere que la estructura tenga masas definidas en los nodos

for node in range(1, node_id):

    # Solo asignar masa a nodos no totalmente restringidos

```

```

dofs = ops.nodeDOFs(node) # Verificar los DOFs del nodo

if any(ops.nodeDOFs(node)): # Si hay al menos un DOF libre

    ops.mass(node, 1.0, 1.0, 1.0, 0.0, 0.0, 0.0) # Asignar masa a los nodos

# se ejecuta el análisis modal mediante la función ops.eigen(), que resuelve el
problema de valores propios

# Ahora proceder con el análisis modal

num_modes = 6

eigenvalues = ops.eigen(num_modes)

# se calcula la frecuencia angular natural ( $\omega$ ) y el período natural (T) para cada
modo

# Crear una lista para almacenar los periodos modales

Tmodes = []

# Calcular los periodos modales para cada modo

for i in range(num_modes):

    omega_n = np.sqrt(eigenvalues[i]) # Frecuencia angular natural

    period_n = 2 * np.pi / omega_n # Periodo natural

    Tmodes.append(period_n)

    print(f"Modo {i+1} - Frecuencia angular natural (rad/s): {omega_n:.4f}")

    print(f"Modo {i+1} - Periodo natural (s): {period_n:.4f}")

# Para almacenar los resultados del análisis, se usan recorders

```

```

PushDataDir = "PushoverResults"

ops.recorder("Node", "-file", f"{PushDataDir}/Base_Reactions.out", "-time", "-node",
*Nodos_Base, "-dof", 1, "reaction")

ops.recorder("Node", "-file", f"{PushDataDir}/ControlNode_Displacement.out", "-
time", "-node", node_id, "-dof", ControlDOF, "disp")

num_shell_elements = Nx * Ny

ops.recorder("Element", "-file", f"{PushDataDir}/Shell_Stress.out", "-time", "-ele",
*range(1, num_shell_elements + 1), "stress")

# El análisis se realiza paso a paso, adaptando el incremento si hay problemas de
convergencia

displacement = []

base_shear = []

for step in range(NstepsPush):

    result = ops.analyze(1)

    if result != 0:

        print(f"No hay convergencia en el paso {step}, ajustando el incremento...")

        current_disp_incr = DisplIncr

        while result != 0 and current_disp_incr > 1e-6:

            current_disp_incr /= 2

            ops.integrator("DisplacementControl", node_id, ControlDOF,
current_disp_incr)

            result = ops.analyze(1)

        if result != 0:

            print(f"Análisis fallido en el paso {step}")

```

```

        break

    disp = ops.nodeDisp(node_id, ControlDOF) * 1000

    reaction = abs(sum([ops.nodeReaction(n, 1) for n in Nodos_Base]) / 1000)

    displacement.append(disp)

    base_shear.append(reaction)

    print(f"Paso {step}: Desplazamiento = {disp:.4f} mm, Corte Basal = {reaction:.4f}
kN")

# Inicialización del modelo en OpenSees

ops.wipe()

ops.model('basic', '-ndm', 2, '-ndf', 3) # 2D frame

# Definición de geometría

h_beam = 1.5 # Beam span

h_col = 1.245 # Column height

Lb=1.41

hc=0.96

num_strips = 10

panel_width = h_beam

panel_height = h_col

# Propiedades de materiales

E_steel = 200e9 # Young's modulus (Pa)

mu=0.3 # Poisson ratio

Fy_steel = 192e6 # Yield stress (Pa)

```

```

Fu_steel= 408e6    # Ultimate stress (Pa)
t_plate = 0.002    # Plate thickness (m)

# Definición de material no lineal para acero

ops.uniaxialMaterial('Steel02', 1, 414.19e6, E_steel, 0.01) # Material elasto-plástico

# Definición de elementos estructurales

A_beam = 0.0106
A_col = 0.0054
I_col = 6.345e-6

# Transformación de coordenadas

ops.geomTransf('PDelta', 1)

# Definición de integración de sección

bf=0.14
tf=0.015
d=0.09
tw=0.02
nf=4
nw=4
sectionTag=1

ops.beamIntegration('Lobatto', sectionTag, 1, 5)

# Definición de la sección de fibras

fib_sec_1 = [['section', 'Fiber', 1, '-torsion', 1],

```

```
['patch','quad',1,nf,nw,bf/2,d/2,-bf/2,d/2,-bf/2,(d/2)-tf,bf/2,(d/2)-tf], # noqa:  
DEFINIDOS EN SENTIDO ANTI HORARIO
```

```
['patch','quad',1,nf,nw,bf/2,-d/2,bf/2,-d/2+tf,-bf/2,-(d/2)+tf,-bf/2,-(d/2)], #  
noqa: E501
```

```
['patch','quad',1,nf,nw,tw/2,d/2-tf,-tw/2,d/2-tf,-tw/2,-d/2+tf,tw/2,-d/2+tf] #  
noqa: E501
```

```
]
```

```
ops.fib_sec_list_to_cmds(fib_sec_1)
```

```
# Se fijan los grados de libertad en  $Y = 0$  (base del modelo), impidiendo  
desplazamientos y rotaciones
```

```
ops.fixY(0, 1, 1, 1)
```

```
# Se asigna una transformación geométrica P-Delta
```

```
ops.geomTransf('PDelta', 2)
```

```
# Se define un patrón de carga gravitacional en la parte superior de la columna
```

```
ops.load(int(pdelta_node_top), 0.0, -P_gravity, 0.0)
```

```
# Se le asigna masa al nodo superior proporcional a la carga gravitacional
```

```
ops.mass(pdelta_node_top,1*P_gravity/9.81,0,0)
```

```
# Ejecución del análisis
```

```
ops.analysis('Static')
```

```
ops.analyze(5)
```