

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**DESARROLLO DE MODELOS NUMÉRICOS PARA FUSIBLES  
ESTRUCTURALES SÍSMICOS UTILIZANDO OPENSEES PY**

Damaris Emilia Jurado Dávila

**Ingeniería Civil**

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito  
para la obtención del título de  
**Ingeniera Civil**

Quito, 14 de mayo de 2025

# **UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

## **HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

**Desarrollo de modelos numéricos para fusibles estructurales  
sísmicos utilizando OpenSeesPy**

**Damaris Emilia Jurado Dávila**

**Nombre del profesor, Título académico**

**Pablo Torres, PhD  
Adrián Tola, PhD**

Quito, 14 de mayo de 2025

## © DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Damaris Emilia Jurado Dávila

Código: 00211333

Cédula de identidad: 1753987211

Lugar y fecha: Quito, 14 de Mayo de 2025

## **ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN**

**Nota:** El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETheses>.

## **UNPUBLISHED DOCUMENT**

**Note:** The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETheses>.

### **Dedicatoria**

*A mi madre y padre, que con amor y sacrificio siempre hicieron todo para que yo me convirtiera en mi mejor versión. A mi hermano, por ser mi impulso y motivación para seguir adelante cada día. Y a mis abuelitos, porque sin cada uno de ellos, no sería la persona que soy hoy.*

## RESUMEN

Este trabajo presenta el desarrollo y comparación de modelos numéricos para representar el comportamiento de fusibles estructurales sísmicos de acción por corte, utilizando la plataforma OpenSeesPy. El caso de estudio corresponde a la topología optimizada OPT 1, desarrollada por Avecillas y Eatherton mediante algoritmos genéticos y validada experimentalmente por Nguyen a través de ensayos cuasi-estáticos. Para simular el comportamiento histerético de dicho fusible, se implementaron dos enfoques principales de modelado no lineal: la plasticidad concentrada, mediante el uso de elementos tipo resorte rotacional, y la plasticidad distribuida, a través de secciones de fibras. Ambos modelos fueron sometidos a un protocolo de carga cíclica basado en FEMA 461. Los resultados se compararon con la respuesta experimental para evaluar su precisión. El modelo con secciones de fibras logró reproducir satisfactoriamente la rigidez inicial (90.18 kN/mm frente a 89 kN/mm en el ensayo) y capturar los picos de fuerza con una variación inferior al 12%, demostrando su capacidad para reflejar el comportamiento no lineal del dispositivo. Por otro lado, el modelo con plasticidad concentrada presentó discrepancias mayores, atribuibles a simplificaciones necesarias en la definición del modelo constitutivo del material. Adicionalmente, se destaca que el modelo con fibras, a pesar de su mayor nivel de detalle, no implicó un costo computacional significativamente mayor. Se concluye que gracias a su implementación parametrizada, puede adaptarse fácilmente a nuevas geometrías y elementos optimizados. **Palabras clave:** fusible estructural, OpenSeesPy, disipación de energía, plasticidad distribuida, plasticidad concentrada, análisis no lineal, diseño sísmico, comportamiento histerético.

## ABSTRACT

This thesis presents the development and comparison of numerical models designed to simulate the behavior of shear-type seismic structural fuses using the OpenSeesPy platform. The study focuses on the optimized fuse known as OPT 1, developed by Avecillas and Eatherton using a genetic algorithm and experimentally validated by Nguyen through quasi-static cyclic testing. Two nonlinear modeling strategies were implemented: concentrated plasticity, using rotational spring elements, and distributed plasticity, employing fiber section discretization. Both models were subjected to a cyclic loading protocol following FEMA 461 guidelines. The distributed plasticity model closely reproduced the experimental results, achieving an initial stiffness of 90.18 kN/mm compared to 89 kN/mm from testing, and maintaining a force variation under 12% at peak displacements. In contrast, the concentrated plasticity approach presented higher discrepancies, primarily due to assumptions in the constitutive behavior of the simplified material model. Despite involving more detailed modeling, the fiber-based approach did not require excessive computational effort and was implemented in a parametrized manner, allowing it to be adapted to various geometries and topologies. These findings support the use of the distributed plasticity model in future research phases aimed at integrating optimized structural fuses into full-scale structural systems. This method enables a realistic representation of hysteretic behavior, offering both computational efficiency and modeling versatility.

**Key words:** structural fuse, OpenSeesPy, energy dissipation, distributed plasticity, concentrated plasticity, nonlinear analysis, seismic design, hysteretic behavior

## TABLA DE CONTENIDO

|                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------|----|
| 1.Introducción.....                                         | 11 |
| 2. Antecedentes .....                                       | 13 |
| 2.1 Comportamiento histerético.....                         | 13 |
| 2.2 Disipadores de energía.....                             | 16 |
| 2.3 Optimización de Shear acting structural fuse .....      | 18 |
| 2.4 Aplicación de los disipadores estructurales .....       | 20 |
| 3. Justificación y Objetivos .....                          | 22 |
| 4. Revisión literaria de la optimización de topología ..... | 23 |
| 4.1. Parámetros de experimentación.....                     | 23 |
| 4.2. Geometría y parámetros del material.....               | 24 |
| 5. Modelo computacional .....                               | 27 |
| 5.1 Resorte rotacional no lineal .....                      | 29 |
| 5.2 Fibras no lineales .....                                | 38 |
| 6. Discusión .....                                          | 43 |
| 7. Conclusión .....                                         | 46 |
| 8. Referencias .....                                        | 48 |



## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1 Topografías optimizadas .....                                                | 24 |
| Tabla 2 Datos OPT 1 .....                                                            | 25 |
| Tabla 3 Propiedades material .....                                                   | 26 |
| Tabla 4 Parámetros Hysteretic material .....                                         | 34 |
| Tabla 5 Información de curvas plasticidad concentrada .....                          | 38 |
| Tabla 6 Comparación rigidez inicial de curvas plasticidad concentrada .....          | 38 |
| Tabla 7 Información de curvas plasticidad distribuida .....                          | 43 |
| Tabla 8 Comparación rigidez inicial de curvas plasticidad distribuida .....          | 43 |
| Tabla 9 Relaciones de valores experimentales y del modelo de elementos finitos ..... | 45 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 1 Curvas de esfuerzo vs deformación. Tomado de Hibbeler (2011). .....                           | 15 |
| Fig. 2 Protocolo de Carga Cíclica.....                                                               | 27 |
| Fig. 3 Fotografía de STL. Tomado de Nguyen (2022). .....                                             | 30 |
| Fig. 4 Modelo STL en OpenseesPy .....                                                                | 30 |
| Fig. 5 Idealización OPT 1. Tomado de Nguyen (2022).....                                              | 31 |
| Fig. 6 Modelo de elementos finitos OPT 1. Tomado de Nguyen (2022).....                               | 32 |
| Fig. 7 Modelo OpenseesPy OPT 1 .....                                                                 | 32 |
| Fig. 8 Comparación modelo numérico y experimental plastificación concentrada STL .....               | 37 |
| Fig. 9 Comparación modelo numérico y experimental plastificación concentrada OPT1 ...                | 37 |
| Fig. 10 Comparación modelo numérico y experimental plastificación distribuida OPT1 ..                | 41 |
| Fig. 11 Comparación modelo numérico y experimental plastificación distribuida STL.....               | 42 |
| Fig. 12 Curvas modelo numérico y experimental plastificación distribuida OPT 1<br>normalizadas ..... | 42 |

## 1.Introducción

Los sismos son un fenómeno usual en ciertas partes del mundo, por lo que las estructuras deben ser diseñadas considerando la energía producida por ellos. Según Charleson (2012), los sismos son el resultado de esfuerzos en la corteza terrestre, los posibles movimientos de desplazamiento y resbalamiento generan fuerzas de fricción, lo suficientemente grandes como para trabar o bloquear las superficies de contacto, generando grandes presiones. Esto causa que la corteza absorba crecientes deformaciones por compresión y corte hasta que eventualmente se produce una ruptura o liberación de energía súbita.

La filosofía del diseño sísmico busca prevenir el colapso estructural frente a terremotos severos, los cuales ocurren raramente durante la vida útil de una estructura, protegiendo así la integridad de sus ocupantes. Para lograrlo, se diseña la estructura de manera que disipe la energía sísmica mediante deformaciones inelásticas controladas, aplicando principios de diseño por capacidad y utilizando dispositivos de control sísmico.

Hace 40 años el diseño por capacidad permitió el diseño de estructuras resistentes al colapso, el desarrollo de dispositivos de control sísmicos ahora es una puerta a nuevas innovaciones que permiten no solo evitar el colapso, sino también reducir los daños estructurales y no estructurales que representan un gran impacto económico en los usuarios. Existen una gran variedad de dispositivos, la cual incluye aislamiento sísmico y disipación de energía que han sido utilizados en edificaciones especiales y esenciales para limitar el daño y mantener funcionalidad.

El aislamiento sísmico se entiende de forma simple al imaginar una estructura sobre rodillos; durante un sismo, la estructura se mantiene relativamente estática y el aislamiento sísmico en la cimentación está sujeta a esa energía. Charleson (2012, p. 219) menciona que la forma en que se reduce la respuesta sísmica de la estructura es a través del aumento del periodo natural de este y aumentando su amortiguación. Sin embargo, este dispositivo enfrenta retos como la respuesta al viento y deflexiones altas horizontales en la base.

Por otro lado, los aparatos de disipación de energía absorben la energía sísmica y la disipan reduciendo la respuesta sísmica de la edificación. Estos elementos son denominados como “los fusibles estructurales”, ya que son dispositivos en los que se concentran las deformaciones inelásticas tras un sismo, en efecto disipan la energía sísmica, con la característica que el elemento es reemplazable. Según Vargas y Bruneau (2009), la estructura principal se diseña de manera que, tras un sismo, permanezca elástica o presente únicamente deformaciones inelásticas menores, mientras que los fusibles estructurales serían los únicos elementos que deberían ser reemplazados luego de un evento sísmico severo. Así pues, el término “fusible estructural” se refiere a elementos con zonas de fluencia plástica bien definidas y reemplazables. Estos pueden clasificarse en tres grupos según su mecanismo de acción: axial, flexión y corte.

El comportamiento de los fusibles estructurales de acción por corte aún no ha sido explorado en profundidad, por lo que se requiere de estudios experimentales y computacionales para comprender mejor su desempeño y optimizar su diseño. En este contexto, Nguyen desarrolló una investigación centrada en la evaluación de diferentes topologías de fusibles, con el objetivo de proponer una nueva geometría, diseñada para ofrecer resistencia tanto al pandeo como a la fractura.

Como parte de dicho estudio, se llevó a cabo un programa experimental y se obtuvieron curvas histeréticas, las cuales fueron comparadas con resultados de modelos numéricos realizados en ABAQUS. No obstante, es computacionalmente inviable que ese modelo se introduzca en un edificio real por su complejidad. Por lo que se reconoce la necesidad de realizar más simulaciones computacionales simplificadas para evaluar el comportamiento de esta nueva geometría en estructuras como el enfoque de plasticidad concentrada y plasticidad distribuida. Asimismo, se plantea como línea de investigación la búsqueda de una metodología numérica eficiente en otros entornos de simulación, como OpenSeesPy.

## **2. Antecedentes**

### **2.1 Comportamiento histerético**

La histéresis es un fenómeno caracterizado por un desfase entre la entrada y la salida de un sistema, en el que la respuesta depende del historial previo de cargas (Morris, 2012). En el contexto estructural, este comportamiento se manifiesta a través de lazos histeréticos en el diagrama fuerza-deformación, los cuales representan la energía disipada por el elemento durante ciclos sucesivos de carga y descarga. Este comportamiento está íntimamente relacionado con la ductilidad del material o elemento estructural, entendida como su capacidad de deformarse plásticamente sin una pérdida significativa de resistencia. A diferencia del comportamiento frágil, donde la rotura ocurre con escasa deformación, un sistema dúctil es capaz de experimentar grandes deformaciones una vez alcanzada la fluencia. En este sentido, la ductilidad permite que el elemento disipe energía y mantenga su integridad estructural sin fallar de forma repentina. En el diagrama esfuerzo-deformación, una vez que el material alcanza su límite de fluencia, un pequeño incremento

de carga puede generar una gran deformación. Según Beer et al. (2012, p. 52), esto ocurre debido al deslizamiento del material a lo largo de superficies oblicuas sometidas a esfuerzos cortantes. Tras alcanzar el esfuerzo máximo, se produce la estricción, seguida de la fractura del material con un ángulo cercano a  $45^\circ$ , lo que indica que la falla en materiales dúctiles se da principalmente por corte. En contraste, una falla frágil ocurre de forma súbita, sin una deformación plástica apreciable, y con una deformación unitaria considerablemente menor al momento de fracturarse.

Así pues, el objetivo de la ingeniería sismorresistente es evitar un fallo frágil que cause una pérdida súbita de resistencia, traducéndose en una pérdida brusca de capacidad portante, especialmente la capacidad cortante. Para lograrlo, se busca que los elementos estructurales desarrollen un comportamiento dúctil que les permita disipar energía a través de deformaciones inelásticas estables.

En este contexto, el comportamiento histerético adquiere una importancia fundamental. Según Sutoyo, histéresis se refiere a la dependencia del recorrido de la fuerza restauradora de la estructura frente a la deformación (2009). Así pues, el elemento presenta un comportamiento histerético cuando se encuentra sometido a cargas cíclicas, como es el caso en los sismos, donde la respuesta del sistema no solo depende del estado actual sino también del historial de carga y descarga. El análisis de este comportamiento tiene un papel crucial en enfoques actuales de análisis y diseño sísmico por desempeño, ya que permite evaluar la capacidad de disipación de energía de los elementos estructurales

La curva histerética posee 3 regímenes: elástico, plástico y de daño. Según Hibbeler (2011), en la Fig. 1 cuando una carga se aplica nuevamente sobre un material que ha sido previamente deformado, este alcanza otra vez el punto de fluencia, pero en una nueva posición, denotada como  $A'$ , debido al endurecimiento por deformación. Este fenómeno

provoca un aumento en la región elástica del material, mientras que la región plástica se reduce, lo que implica una disminución de la ductilidad. Por otro lado, la histéresis mecánica se representa como el área encerrada en el bucle del diagrama esfuerzo-deformación durante un ciclo de carga y descarga. Esta área sombreada indica la energía disipada o perdida en forma de calor u otros mecanismos internos.

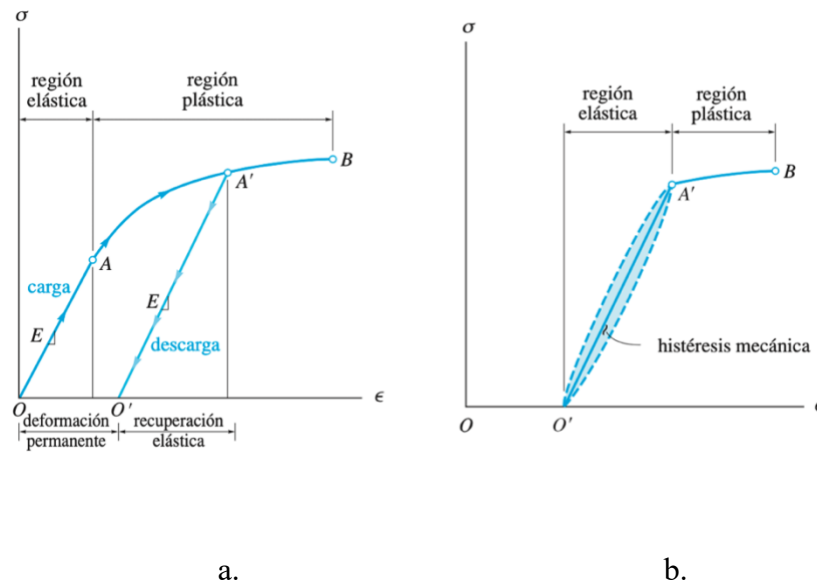


Fig. 1 Curvas de esfuerzo vs deformación. Tomado de Hibbeler (2011).

Así pues, la respuesta cíclica de un material bajo cargas variables en el tiempo se caracteriza por la formación de bucles de histéresis en los diagramas fuerza-deformación o momento-rotación. El área encerrada dentro de cada bucle representa la energía disipada por el sistema durante cada ciclo. A medida que el material experimenta degradación, estos bucles tienden a reducirse en tamaño o a modificar su forma, lo que indica una pérdida progresiva de rigidez y resistencia. En contraste, una estructura que presenta bucles de histéresis amplios y estables se considera más segura, ya que puede disipar mayor energía sísmica y tolerar deformaciones significativas sin colapsar.

## 2.2 Disipadores de energía

Los disipadores de energía se clasifican en tres categorías principales: pasivos, activos e híbridos. Esta clasificación se basa en el tipo de mecanismo utilizado para controlar y disipar la energía inducida por cargas dinámicas, como los sismos. Por consiguiente, los disipadores de energía activos incluyen sensores de movimiento, procesamiento de datos, actuadores dinámicos y sistemas de control para responder a las fuerzas laterales con fuerzas de la misma magnitud con dirección contraria. Por otro lado, según Quichimbo y Valdez (2024) los disipadores de energía pasiva disipan energía del sismo sin necesidad de fuente de alimentación externa. Algunos ejemplos de mecanismos de disipación pasiva son; capas de amortiguamiento que se basa en el uso de material viscoelástico, disipación a través de piezoeléctricos que convierte la energía vibracional en energía eléctrica, disipación a través de capa confinada magnética y disipación a través de histéresis (Baz, 2019, p.6).

De hecho, a partir de la ecuación de movimiento de un sistema de un grado de libertad (Ec. 1), los disipadores de energía pueden representarse en forma de amortiguamiento viscoso, afectando al coeficiente de amortiguamiento  $C$ , y en forma de amortiguamiento histerético a través del daño estructural, lo cual modifica la rigidez  $K$  del sistema. Este comportamiento se asocia directamente con la forma del bucle de histéresis, que refleja la energía disipada en cada ciclo de carga (Reyes y Rubiano, 2002, p.31).

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F \quad (\text{Ec. 1})$$



Según Vargas y Bruneau (2009, p.1) la respuesta de los disipadores de energía de histéresis no es sensible a la frecuencia de la carga, por lo que se llaman disipadores independientes de la velocidad o dependientes del desplazamiento. En otras palabras, el desempeño de estos dispositivos no depende de la velocidad del movimiento, sino del desplazamiento experimentado, ya que, a mayor deformación inelástica, mayor es la cantidad de energía disipada, lo que contribuye significativamente a la reducción del daño estructural. En condiciones de sismos de moderada severidad, los disipadores de energía se comportan como elementos estructurales rigidizadores, así reduciendo las deformaciones. Sin embargo, frente a sismos severos disipan la energía sísmica, limitando el daño en elementos estructurales y no estructurales.

Así pues, los dispositivos de disipación de energía histerética pueden ser denominados fusibles estructurales, ya que son elementos sacrificables en los que se concentran las deformaciones inelásticas y que pueden ser reemplazados tras un evento sísmico. Según Nguyen (2022), estos fusibles se clasifican en tres categorías principales, de acuerdo con el tipo de mecanismo de disipación que emplean: fusibles de acción axial, de acción flexional y de acción por corte.

Los fusibles de acción axial disipan energía mediante deformaciones alternadas por tracción y compresión. Un ejemplo representativo de esta categoría es los arriostres de pandeo restringido (buckling-restrained braces), diseñados específicamente para disipar energía sísmica a través de deformaciones axiales controladas, evitando el pandeo.

Los fusibles de acción flexional, en cambio, disipan energía mediante la deformación fuera del plano del elemento, alrededor de su eje menor. Dispositivos típicos de este grupo son los TADAS (Triangular Added Damping and Stiffness) y ADAS (Added Damping and Stiffness). Los dispositivos TADAS, con geometría triangular, permiten una

distribución uniforme de esfuerzos en la sección, promoviendo una plastificación homogénea y controlada bajo flexión. Por su parte, los dispositivos ADAS presentan una forma en "X", lo que también favorece la disipación eficiente de energía (Alehashem et al., 2008).

Por último, los fusibles estructurales de acción por corte se deforman inelásticamente alrededor de su eje mayor. Un ejemplo destacado de esta categoría es el fusible en forma de mariposa (butterfly-shaped shear fuse), cuyo diseño geométrico está optimizado para concentrar deformaciones por cizallamiento en su zona central. Aunque también puede desarrollar momentos flexionantes, su comportamiento se ha ajustado para maximizar la disipación de energía bajo cargas de corte. Esta configuración permite una distribución más uniforme de tensiones y una elevada capacidad de disipación energética, siendo especialmente adecuada para edificaciones expuestas a cargas sísmicas.

### **2.3 Optimización de Shear acting structural fuse**

Los fusibles estructurales pueden adoptar diversas geometrías y ser optimizados en función de los requerimientos del sistema. Según Skinner et al. (1974), los disipadores histeréticos no están destinados a resistir las cargas estructurales principales, lo que permite enfocarse exclusivamente en su rigidez requerida y su capacidad de disipación de energía al momento de diseñarlos. En particular, se han propuesto múltiples configuraciones geométricas con cortes estratégicos para el diseño de fusibles estructurales de acción por corte, destacando su potencial para mejorar el desempeño sísmico de las estructuras. A medida que avanza la investigación en esta área, aumentan las oportunidades para su optimización y desarrollo.

Según Avecillas y Eatherton (2020), los elementos sometidos a corte en fusibles estructurales presentan una alta esbeltez, lo que los hace propensos al pandeo. Esta inestabilidad compromete tanto su resistencia como su capacidad de disipación de energía. Para abordar este problema, los autores emplearon un algoritmo genético, utilizando como indicador el cociente entre la carga de plastificación por corte y la carga crítica de pandeo. El resultado fue la obtención de topologías optimizadas cuya geometría, evaluada mediante simulaciones con elementos finitos, demostró una resistencia efectiva al pandeo durante ciclos de desplazamiento inelástico, tolerando deformaciones hasta cinco veces mayores que aquellas en fusibles convencionales.

En términos generales, existen dos enfoques tradicionales para el diseño de elementos estructurales sometidos a esfuerzos cortantes en sistemas sismo-resistentes. El primero permite el pandeo por corte y aprovecha la plastificación dúctil que ocurre a lo largo de la diagonal traccionada, como es típico en los muros de corte de acero. El segundo busca inhibir el pandeo mediante placas de baja esbeltez y/o el uso de rigidizadores, con lo cual se promueve la plastificación por corte controlada, como en las vigas de enlace de los marcos tipo EBF modernos.

Sin embargo, al aplicar estos conceptos a fusibles estructurales que actúan a corte, se observa que, aunque ambos enfoques son viables, resulta complejo definir dimensiones que logren la resistencia deseada sin inducir pandeo. Las placas delgadas, en particular, son vulnerables a deformaciones fuera del plano, comportamiento histerético pinzado, baja resistencia frente a cargas reversibles y una limitada capacidad de disipación de energía. Frente a estas limitaciones, Avecillas y Eatherton (2020) propusieron un nuevo enfoque basado en placas de acero con cortes optimizados, capaces de disipar energía al transformar las deformaciones por corte globales en mecanismos locales de plastificación, mientras

resisten el pandeo fuera del plano. Posteriormente, Nguyen (2022) evaluó experimentalmente dichas geometrías mediante un montaje diseñado para aplicar desplazamientos por corte cíclico.

## 2.4 Aplicación de los disipadores estructurales

Como se mencionó anteriormente, existe dos enfoques convencionales de diseño de elementos estructurales que trabajan a corte dentro de sistemas de resistencia sísmica. La primera usada en marco de arriostramiento excéntrico y la segunda es en un muro de corte de acero con alma sólida.

En efecto, el primer enfoque es la fluencia por corte observada en el link de los marcos de arriostramiento excéntricos. Los marcos de arriostramiento excéntricos o Eccentrically Braced Frame (EBF) es un sistema estructural cuya idea principal es integrar las ventajas del pórtico a momento y diagonales concéntricas en un solo sistema estructural para tener alta rigidez elástica, así como una elevada disipación de energía durante sismos severos (Azad yTopkaya,2017). En estos sistemas la disipación de energía sísmica se logra mediante la fluencia por corte o por flexión de un elemento crítico del sistema estructural denominado enlace o link. Así pues, este elemento transfiere las fuerzas axiales inducidas en las diagonales hacia otras diagonales o las columnas a través de deformaciones localizadas por corte y flexión. Según Nguyen (2022, p.10) la longitud del enlace ( $L$ ) es un parámetro fundamental que controla la rigidez, resistencia, ductilidad y el comportamiento global del sistema, y su influencia se evalúa mediante el índice  $\rho = L / (M_p/V_p)$ , donde  $M_p$  y  $V_p$  son el momento y la resistencia plásticos al corte, respectivamente. Estudios han demostrado que los links cortos tienden a fallar por corte del alma, los links largos por flexión, y los links intermedios presentan una combinación de ambos mecanismos. Aunque

los enlaces largos pueden ofrecer ventajas desde el punto de vista arquitectónico, los enlaces cortos han mostrado un desempeño superior bajo cargas cíclicas severas, especialmente en términos de resistencia y ductilidad. Por esta razón, el fusible estructural analizado en este estudio puede integrarse eficazmente dentro de este tipo de sistemas estructurales, contribuyendo al control del daño mediante disipación de energía localizada.

Por otro lado, estos fusibles estructurales pueden incorporarse en sistemas de muros de corte de acero, los cuales se caracterizan por su alta resistencia post-pandeo, alta ductilidad, comportamiento histerético estable y elevada rigidez lateral (Ghosh y Kharmale, 2010).

Consiste en placas delgadas de acero colocadas entre columnas y vigas que funciona como un sistema de resistencia sísmica. En este sistema la placa delgada de acero disipa energía primero por pandeo y posteriormente por acción de campo de tensión, un tipo de comportamiento post-pandeo puede verse como una forma distribuida de disipación por tracción diagonal. En el que se generan tensiones principales de tracción orientadas a 45 grados con respecto a la carga. Para que este comportamiento sea efectivo, es esencial que los elementos de borde tengan la rigidez suficiente para contener el desarrollo del campo de tensiones. Este comportamiento se ha estudiado y validado experimental y numéricamente, permitiendo incluir en normativas de diseño sísmico como la AISC 341. Sin embargo, su aplicación ha sido limitada debido a que posee una baja rigidez, durante inversiones de carga, por lo tanto, el código exige conexiones momento-resistentes, encareciendo el sistema. Asimismo, al ser el espesor de la placa el único parámetro de diseño independiente no es posible ajustar por separado la rigidez, resistencia o ductilidad.

Por consiguiente, los dispositivos sísmicos pueden combinarse en estas y más configuraciones estructurales. Por ejemplo, los fusibles estructurales pueden utilizarse como el enlace de los marcos de diagonales excéntricas. De igual forma, según Nguyen (2022), menciona que se pueden utilizar como viga de acople entre dos muros de corte y en marcos autocentrantes.

### **3. Justificación y Objetivos**

El presente proyecto integrador tiene como objetivo desarrollar un modelo computacional en la plataforma de simulación OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation), que permita reproducir la topología optimizada propuesta por Avecillas y Eatherton (OPT 1) y contrastar su comportamiento con los datos experimentales obtenidos por Nguyen. Si bien investigaciones previas han empleado modelos avanzados de elementos finitos para analizar el comportamiento de fusibles estructurales, estos resultan demasiado complejos para ser replicados en aplicaciones prácticas o en múltiples configuraciones estructurales, como edificaciones de uso común. Por ello, este proyecto propone un enfoque simplificado que pueda integrarse fácilmente en modelos estructurales más amplios, manteniendo la fidelidad en la representación del comportamiento no lineal. Los objetivos específicos del trabajo son:

- Familiarizarse con el entorno de simulación OpenSees y el lenguaje Python, para modelar y analizar propiedades inelásticas en distintas configuraciones estructurales.
- Modelar computacionalmente la topología optimizada OPT 1 y comparar su respuesta histerética con los resultados experimentales disponibles.

- Evaluar y comparar dos metodologías de modelado no lineal: plasticidad distribuida con el enfoque basado en secciones de fibras (fiber section) y plasticidad concentrada con el enfoque de resorte rotacional único (spring), aplicados a la topología OPT 1.

## 4. Revisión literaria de la optimización de topología

### 4.1. Parámetros de experimentación

La optimización topológica de Avecillas y Eatherton (2020) tiene como objetivo encontrar una distribución óptima del material en una placa de acero que permitiera resistir el pandeo mientras se promovía la fluencia plástica. Para ello, se definió un dominio de diseño cuadrado de 711 mm por lado y espesor constante de 12.7 mm, sometido a condiciones de carga que simulan corte puro. La función objetivo propuesta combina dos criterios clave: maximizar la resistencia al corte del fusible y garantizar que este experimente fluencia antes del pandeo, lo cual se controla mediante la razón  $VY/VB$ , donde  $VY$  es la carga de fluencia y  $VB$  la carga crítica de pandeo. Se emplearon valores objetivos  $k$  entre 0.1 y 0.3, lo que asegura un comportamiento dúctil. Las topologías resultantes fueron evaluadas para diferentes fracciones de volumen del material ( $\Delta=30\%,40\%,50\%$ ) seleccionándose como caso base la configuración con  $\Delta=40\%$  y  $k=0.2$  por su equilibrio entre resistencia, simplicidad geométrica y ductilidad. Esta optimización se realizó con un algoritmo genético basado en los principios de la selección natural.

Las topologías prometedoras obtenidas fueron OPT 1, OPT 2 y STL como una placa de control, la tabla 1 contiene datos geométricos y asimismo se observa las 3 geometrías en la Fig. 2.





W=254mm y su espesor es de 25,4 mm. Por otro lado, el espécimen OPT 1 proveniente de la optimización fue parametrizada mediante cinco variables clave que permiten definir completamente su geometría: los anchos de los conectores horizontales y verticales (WT y WL), el radio de curvatura de los conectores (R), la longitud total del fusible (L), y el espesor de la placa (t). Según Nguyen (2022, pg.46), para garantizar la factibilidad geométrica del diseño, se establecieron condiciones mínimas de proporcionalidad entre sus dimensiones, específicamente que la relación  $L/WT$  sea mayor a 4.35 y que  $R/WL$  supere 0.5. La Tabla 2 contiene los datos geométricos finales de la especie OPT1 que fueron utilizados para ensayar.

Tabla 2 Datos OPT 1

| <b>Geometría</b> | <b>(mm)</b> |
|------------------|-------------|
| WT               | 21.6        |
| R                | 63.5        |
| WL               | 119.4       |
| t                | 25.4        |
| L                | 508         |

Se denota que el material utilizado se ensayó 3 veces y las propiedades promedio son las presentes en la Tabla 3. Donde E es el módulo de elasticidad del material,  $F_y$  el esfuerzo de fluencia,  $F_u$  la resistencia última y  $\theta_r$  la elongación a la fractura.

*Tabla 3 Propiedades material*

| <b>Propiedades</b> |        | <b>Unidades</b> |
|--------------------|--------|-----------------|
| E                  | 224000 | MPa             |
| Fy                 | 376    | MPa             |
| Fu                 | 533    | Mpa             |
| $\theta_r$         | 26     | %               |

Las probetas de OPT 1 y STL se ensayaron aplicando desplazamientos por cortante a través de un actuador hidráulico. Nguyen (2022, p.53) empleó el protocolo de carga cíclica especificado en la norma FEMA 461, iniciando con una amplitud de desplazamiento de 0.762 mm. En cada nivel de carga se aplicaron dos ciclos, incrementando progresivamente la amplitud de desplazamiento en un 40% respecto al paso anterior. Esta secuencia se mantuvo hasta que la muestra experimentó una pérdida significativa de su capacidad resistente lateral. La velocidad de aplicación del desplazamiento comenzó en 6.35 mm/min y fue duplicada al alcanzar desplazamientos de 2.9 mm, 8 mm, 22 mm y 60.5 mm. En efecto, la norma FEMA 461 establece protocolos provisionales de ensayo para determinar características de desempeño sísmico de componentes estructurales y no estructurales, el cual en este caso se concentra en un protocolo de carga cuasi-estática cíclica controlada por desplazamientos. Se desarrolló un protocolo de carga tipo “cyclic pushover reverse” para simular un ensayo estructural no lineal, en el cual se aplican fuerzas o desplazamientos laterales incrementales en una estructura. Este protocolo consiste en ciclos de carga que se alternan en ambos sentidos, produciendo una inversión de la dirección de carga en cada ciclo.

El esquema del ensayo se idealiza con la base de la estructura empotrada, mientras que la parte superior se encuentra libre de desplazarse en la dirección  $x$ , permitiendo así la aplicación de desplazamientos laterales inducidos por corte. A partir de esta configuración, se programó un protocolo de carga en Python para ser implementado en el análisis “cyclic pushover reverse”. La representación gráfica de dicho protocolo se muestra en Fig. 2.

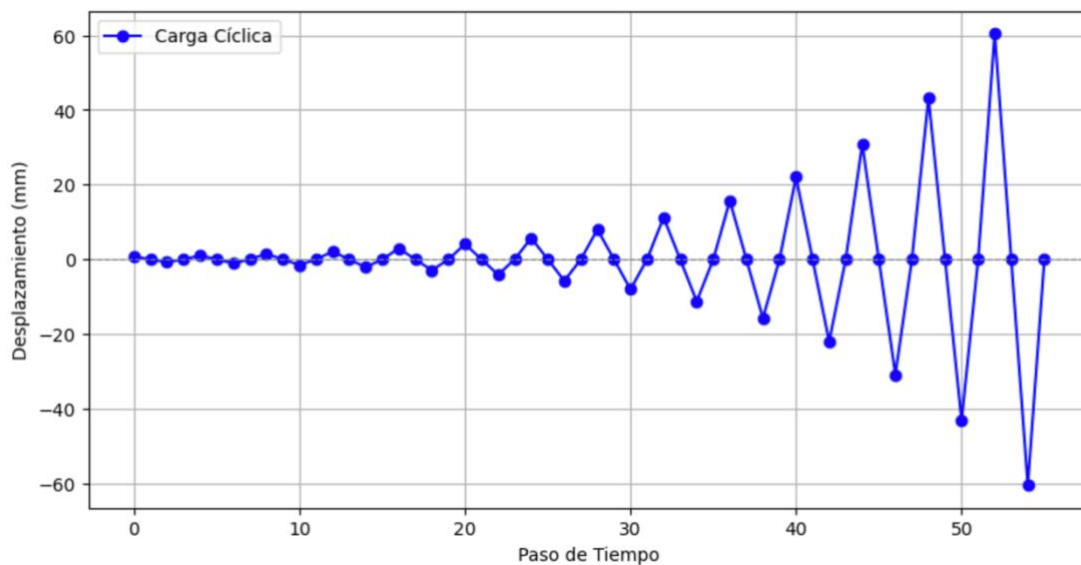


Fig. 2 Protocolo de Carga Cíclica

## 5. Modelo computacional

OpenSees es una plataforma de software diseñada para desarrollar aplicaciones que simulan el comportamiento de sistemas estructurales y geotécnicos sometidos a cargas extremas, como los terremotos. Su objetivo principal es mejorar el modelado y la simulación computacional mediante el desarrollo de herramientas de código abierto. Esta plataforma puede utilizarse a través del lenguaje de programación Python, lo que la

convierte en una herramienta versátil para la realización de análisis no lineales de elementos estructurales.

Según Bruschi, Calvi y Quaglini (2021), los análisis no lineales pueden clasificarse como estáticos (*pushover*) o dinámicos (*time history*), y se emplean para evaluar la vulnerabilidad sísmica de las estructuras. En el análisis *pushover*, se aplica una carga o desplazamiento incremental, ya sea de manera monotónica o cíclica, con el fin de estimar la capacidad sísmica de la estructura. Por otro lado, el análisis *time history* consiste en aplicar un registro sísmico real o simulado directamente a la estructura a lo largo del tiempo, permitiendo evaluar su respuesta dinámica ante eventos sísmicos.

Asimismo, se identifica que existen dos fuentes principales de no linealidad en el análisis estructural: la no linealidad del material y la no linealidad geométrica. La no linealidad del material ocurre cuando los materiales que componen la estructura como el hormigón o el acero dejan de comportarse de manera elástica, es decir, cuando las deformaciones ya no son proporcionales a las cargas aplicadas. Este tipo de comportamiento incluye fenómenos como la plastificación del acero, el aplastamiento, y la degradación de rigidez o resistencia (Gómez y Lizarazo, 2007). Por otro lado, la no linealidad geométrica se refiere a cambios significativos en la geometría de la estructura durante la deformación, como desplazamientos o rotaciones grandes que modifican la configuración original. Esto afecta el equilibrio interno y externo del sistema y puede introducir efectos adicionales como el efecto P-Delta, en el cual las cargas verticales aplicadas amplifican los momentos flectores debido a los desplazamientos laterales. Por consiguiente, dado que los fusibles estructurales son configuraciones compactas diseñadas para la formación de rótulas plásticas, su desempeño está directamente relacionado con el comportamiento inelástico localizado de los materiales.

Para simular la respuesta no lineal del material en estructuras sometidas a cargas sísmicas, los modelos de elementos finitos se clasifican comúnmente en dos enfoques principales: modelos de plasticidad distribuida y modelos de plasticidad concentrada. Los modelos de plasticidad concentrada (Concentrated Plasticity Approach) pueden realizarse con distintos niveles de complejidad. Por ejemplo, una opción común es utilizar un resorte rotacional no lineal (Spring), que define una relación momento-curvatura asignada a una región específica del elemento. Alternativamente, un modelo de plasticidad distribuida son las secciones de fibras no lineales, lo cual permite una representación más detallada de la distribución de esfuerzos y deformaciones en la sección transversal. La elección entre ambos enfoques depende del nivel de precisión requerido y de la complejidad del problema estructural a modelar.

### **5.1 Resorte rotacional no lineal**

Para el enfoque de plasticidad concentrada, utilizar resortes rotacionales no lineales permite modelar rótulas plásticas dentro de la estructura. Para que la respuesta del modelo sea lo más cercana posible a los datos experimentales, la localización de las rótulas plásticas debe coincidir con las zonas donde se observó plastificación del material tras el ensayo. Para el espécimen STL la localización de las rótulas plásticas fue en los extremos, en la Fig. 3 se puede observar donde se generó la falla tras el ensayo. Así pues, se modeló con dos rótulas plásticas representado en la Fig. 4.

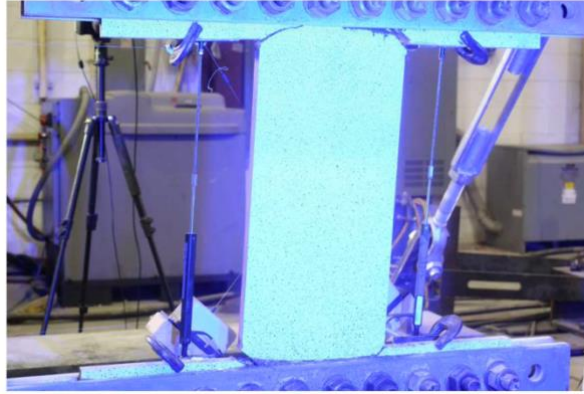


Fig. 3 Fotografía de STL. Tomado de Nguyen (2022).

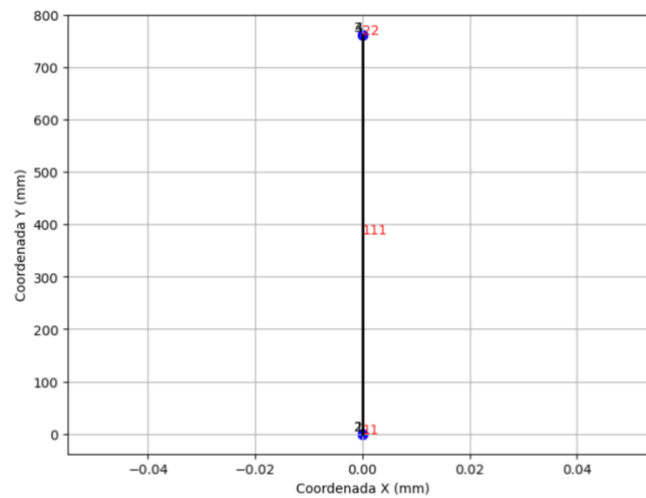


Fig. 4 Modelo STL en OpenSeesPy

Asimismo, para el espécimen OPT 1 Nguyen (2022,p.48) idealiza su geometría como un marco con rótulas plásticas concentradas cuya localización se deriva de fórmulas usando los parámetros geométricos y con el objetivo de minimizar las fuerzas cortantes. La Fig.5 representa la idealización del espécimen.

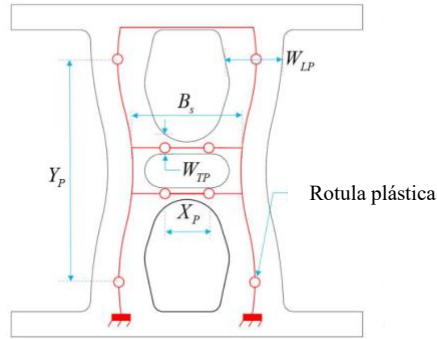


Fig. 5 Idealización OPT 1. Tomado de Nguyen (2022).

Así pues, para el análisis no lineal, los valores de WLP y WTP son datos de entrada en el código de OpenSees para asignar a los elementos. De igual forma, la ubicación óptima de los resortes rotacionales no lineales en el elemento de unión horizontal (*tie*) se determinó a partir de una fórmula que permite encontrar la posición  $x$  donde la fuerza cortante es mínima. Esta posición se obtiene al igualar a cero la derivada de la resistencia al corte con respecto a  $x$ , identificando así el punto donde dicha fuerza alcanza su valor mínimo. Según Nguyen (2022, p.48), el doble del valor de  $x$  da como resultado la distancia  $X_p$ . Por consiguiente, el valor de  $X_p$  es de 56.68 mm obtenido de la Ec.2.

$$X_p = \sqrt{2 * (WT + R) \sqrt{(WT + R)^2 + 8R^2} - 2(WT + R)^2 - 4R^2} \text{ (Ec. 2)}$$

Por otro lado, en cuanto a la ubicación de los resortes rotacionales no lineales en los elementos verticales, Nguyen (2022) propone la expresión  $Y_p \approx L - 0.5 \cdot WL$  para su colocación. No obstante, este valor se encuentra muy próximo a los extremos del elemento, por lo que, con fines de simplificación del modelo, se optó por ubicar los resortes directamente en los nodos extremos. Esta decisión se justifica al observar los resultados del modelo de elementos finitos Fig. 6, en el que la plastificación se concentra en esas zonas extremas.

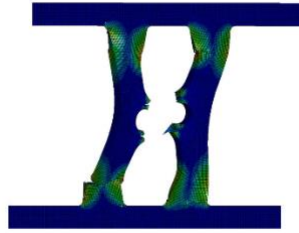


Fig. 6 Modelo de elementos finitos OPT 1. Tomado de Nguyen (2022).

Por lo tanto, como se observa en Fig. 7 se modeló OPT 1 con 8 resortes rotacionales lineales, 1 en cada extremo de los elementos verticales y 1 en cada extremo de los elementos horizontales.

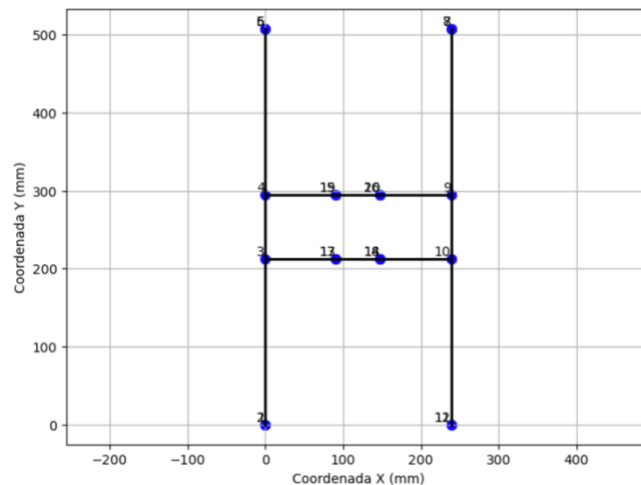


Fig. 7 Modelo OpenseesPy OPT 1

Para el modelado, se definieron nodos coincidentes en las ubicaciones previstas para las rótulas plásticas. Entre estos nodos se colocaron elementos “zeroLength”, los cuales fueron asignados con un material que incorpora el comportamiento inelástico del fusible. Dado que el objetivo del análisis es estudiar la curva histerética de cada fusible estructural, se optó por utilizar el material “unialMaterial Hysteretic”. Este modelo permite representar la respuesta del fusible bajo cargas cíclicas, capturando no solo el comportamiento bilineal del acero, sino también fenómenos críticos como el



estrechamiento del lazo histerético (pinching), la degradación por ductilidad y energía disipada, y la reducción progresiva de la rigidez durante la descarga.

En el modelo histerético utilizado, se definen dos factores independientes para representar el pinching en fuerza y en deformación, ya que corresponden a mecanismos físicos distintos que pueden ocurrir de forma individual o combinada, dependiendo del material o del tipo de conexión. La ausencia de pinching genera un lazo histerético amplio y lleno. Cuando el pinching afecta la fuerza, el lazo se reduce verticalmente, mientras que, si afecta la deformación, se estrecha horizontalmente. Si ambos están presentes, el bucle se comprime hacia el centro, reflejando pérdidas significativas tanto en resistencia como en ductilidad. Por lo tanto, en el modelado del comportamiento histerético, se asumieron valores iguales a 1 para los parámetros pinch x y pinchY, lo que implica la ausencia de pinching tanto en fuerza como en deformación. Esta decisión se tomó debido a que los datos experimentales disponibles no proporcionaban suficiente información para calibrar de forma confiable el estrechamiento del lazo histerético. En consecuencia, se optó por una aproximación conservadora y simplificada que garantizara un lazo amplio, sin pérdida anticipada de rigidez o resistencia durante la descarga. Esta suposición, si bien idealiza el comportamiento, permite centrarse en la comparación de los parámetros clave del modelo, como la rigidez inicial, los picos de fuerza y la forma general del lazo. Cabe mencionar que, para definir este material, se realizaron también otras suposiciones, ya que los datos disponibles se limitaban al esfuerzo de fluencia, esfuerzo último y módulo de elasticidad. La Tabla 4 presenta los valores adoptados para construir la curva bilineal momento-rotación del material.

*Tabla 4 Parámetros Hysteretic material*

|          | <b>Elementos<br/>verticales</b> | <b>Elementos<br/>horizontales(ties)</b> | <b>u</b> |
|----------|---------------------------------|-----------------------------------------|----------|
| Mp       | 47218.19                        | 3341.87                                 | kN*mm    |
| Mu       | 51940                           | 3676.06                                 | kN*mm    |
| Mr       | 18887.27                        | 1336.75                                 | kN*mm    |
| rot_y    | 0.0081                          | 0.0068                                  | mm       |
| rot_u    | 1.613                           | 1.353                                   | mm       |
| rot_r    | 4.032                           | 3.383                                   | mm       |
| Pinch x  | 1                               | 1                                       |          |
| Pinch y  | 1                               | 1                                       |          |
| Damage 1 | 0                               | 0                                       |          |
| Damage 2 | 0                               | 0                                       |          |

Se definieron dos materiales distintos para las diferentes secciones del modelo, considerando que el momento plástico (Mp) se calculó como el producto entre el módulo plástico (Z) y el esfuerzo de fluencia (Fy). Para representar de forma más realista el comportamiento del acero bajo cargas sísmicas, se incorporaron los factores  $R_y$ , que permiten estimar las resistencias esperadas, normalmente superiores a los valores mínimos especificados por norma. Dado que Nguyen estableció un esfuerzo de fluencia de 376 MPa como el promedio obtenido de tres probetas, fue necesario considerar la variabilidad inherente a este valor al definir el modelo elasto-plástico. Por esta razón, se adoptó un  $R_y =$

1.6, valor coherente con los rangos propuestos por la norma AISC 341-16 según el tipo de acero, y que además permitió reproducir de manera más fiel la respuesta histórica experimental del fusible estructural. De igual forma se utilizó un factor  $\beta$  que toma cuenta un endurecimiento por deformación cíclica moderado propuesto por Applied Technology Council (2012), donde 1.2 es el valor para reduced beam sections. El concepto de Reduced Beam Section (RBS) se asemeja al de un fusible estructural debido a que ambos buscan concentrar la demanda inelástica en una zona controlada y alejada de las conexiones críticas, por lo que se utilizó ese factor de 1.2 para  $M_p$  al definir el material.

Para estimar la rotación correspondiente al momento plástico en los elementos del fusible estructural, se utilizó la expresión incluida en el estándar ASCE/SEI 41-17 (Ec. 3), la cual está definida como:

$$\theta_y = \frac{M_p * L}{6 * E * I} \text{ (Ec. 3)}$$

Esta fórmula se deriva del análisis de componentes con doble curvatura, donde ambos extremos del elemento están sometidos a momentos flectores. En este contexto, la rotación plástica fue utilizada para definir los parámetros del material “Hysteretic” en OpenSeesPy, aplicado tanto a los elementos horizontales ("ties") como a los verticales del fusible, considerando su respectiva inercia  $I$  y longitud  $L$ . Dado que esta ecuación asume la existencia de doble curvatura, la longitud  $L$  para cada elemento fue seleccionada cuidadosamente al observar que efectivamente se generaba dicha condición de flexión en ambos extremos. Esta elección se alinea con lo indicado en la Sección 9.4.2.2.1 del ASCE 41-17, que establece el uso de esta formulación cuando se espera que el punto de formación de la rótula plástica se ubique hacia la mitad del claro del elemento. De este modo, la

modelación refleja adecuadamente la distribución de deformaciones y permite representar el comportamiento rotacional inelástico de los componentes dentro del modelo numérico.

Asimismo, debido a la falta de datos experimentales detallados sobre la curva completa momento-rotación del material, se asumieron de forma idealizada los puntos restantes que definen la respuesta histerética en el modelo “Hysteretic”, partiendo del valor del momento plástico y su rotación correspondiente. Esta suposición se realizó bajo el criterio de que el material reproduzca adecuadamente el comportamiento observado en los ensayos de laboratorio en cuanto a la rigidez inicial, capacidad resistente y ductilidad. En consecuencia, se construyó una curva bilineal simplificada que permite representar el mecanismo de plastificación y disipación de energía.

Se obtuvieron las curvas de fuerza versus deformación para los modelos STL y OPT 1. En las cuales se graficó los datos experimentales obtenidos por Nguyen y los datos del modelo numérico. En efecto, la Fig. 8 presenta la comparación para el espécimen STL y la Fig. 9 para el espécimen OPT 1. Cabe recalcar que el espécimen optimizado y de interés para el acople es el OPT 1, por lo que es fundamental comparar valores numéricos para determinar su similitud con los datos experimentales. Se obtuvo la rigidez inicial y la fuerza de corte correspondiente 25, 38 y 54 mm y, ya que la investigación maneja unidades imperiales se utilizó los valores en inches y kips. La tabla 5 y 6, muestra los datos antes mencionados y el error porcentual.

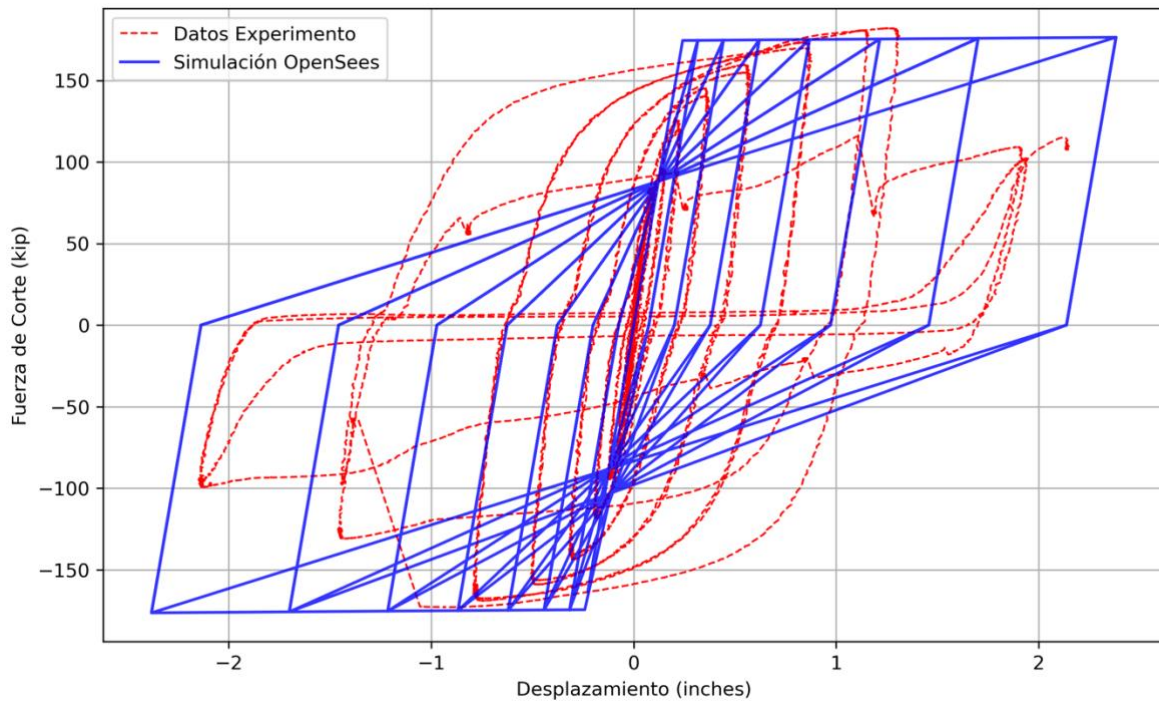


Fig. 8 Comparación modelo numérico y experimental plastificación concentrada STL

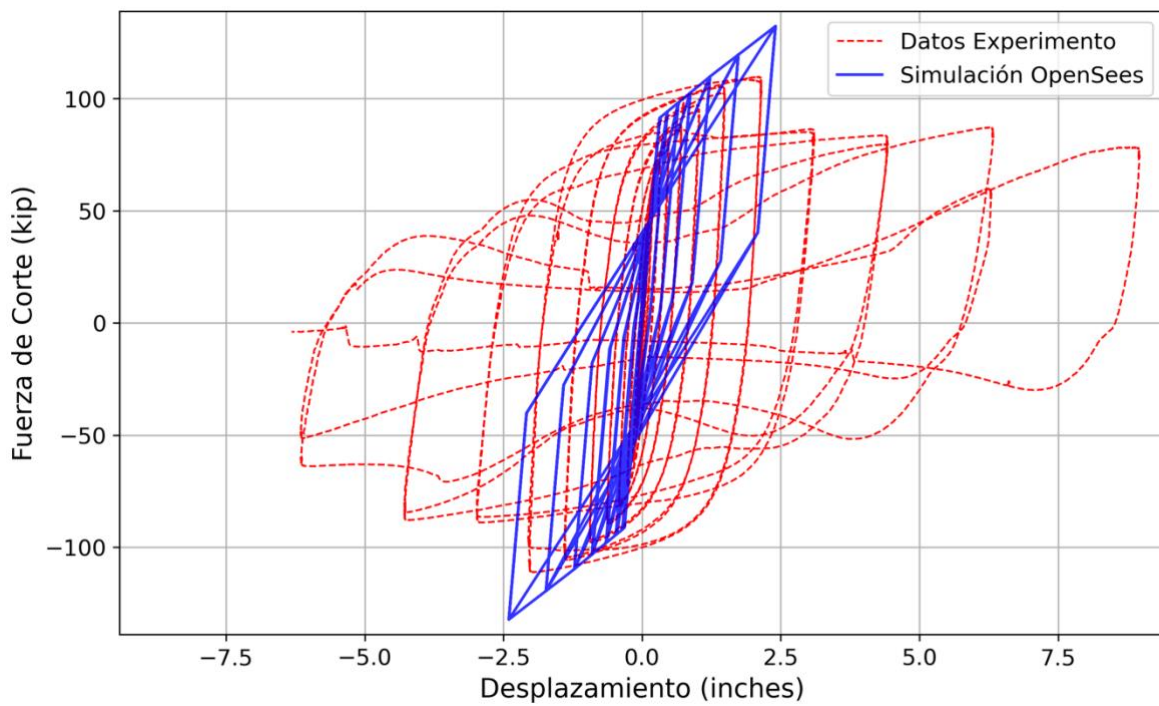


Fig. 9 Comparación modelo numérico y experimental plastificación concentrada OPT1

Tabla 5 Información de curvas plasticidad concentrada

| <b>CONCENTRATED PLASTICITY APPROACH</b> |                                                    |                                                  |                |
|-----------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------|
| <b>Desplazamiento<br/>(pulgadas)</b>    | <b>Fuerza del actuador<br/>experimental (Kips)</b> | <b>Fuerza del<br/>actuador modelo<br/>(Kips)</b> | <b>% Error</b> |
| 1.0                                     | 98.8                                               | 40.3                                             | 59%            |
| 1.5                                     | 106.7                                              | 50.1                                             | 53%            |
| 2.1                                     | 107.1                                              | 127.1                                            | 19%            |

Tabla 6 Comparación rigidez inicial de curvas plasticidad concentrada

|            | <b>Rigidez inicial (kips/inch)</b> |            |               |
|------------|------------------------------------|------------|---------------|
|            | <b>OPT 1</b>                       | <b>STL</b> | <b>%Error</b> |
| <b>EXP</b> | 508                                | 1091       | 1%            |
| <b>MOD</b> | 511                                | 1080       | 1%            |

## 5.2 Fibras no lineales

Las fibras lineales es un modelo de plasticidad distribuida en donde se asigna secciones a los elementos conformado por un número de fibras con área, localización y un material asignado. Así pues, es un modelo numérico bidimensional que su comportamiento no lineal se caracteriza por cada fibra que lo compone. Son útiles para estudiar secciones planas de estructuras, como marcos o muros, permitiendo obtener resultados aproximados sobre desplazamientos, esfuerzos y deformaciones de manera eficiente.

Los especímenes de fusibles estructurales OPT 1 y STL se representaron como elementos “*forceBeamColumn*”, el cual permite integrar la deformación del material a lo largo del elemento estructural. De igual forma, la sección transversal del fusible fue discretizada en fibras individuales, asignando a cada una, propiedades del material Steel02, adecuado para simular el comportamiento histerético del acero. Esta aproximación permitió representar la concentración de deformaciones plásticas y la disipación de energía dentro del fusible, sin comprometer el resto del sistema estructural. Se creó la sección transversal respetando la geometría del espécimen original, para el OPT 1 se creó dos secciones rectangulares con WTP de ancho y espesor de 25.4 mm y WLP de ancho y espesor de 25.4 mm para los elementos horizontales y los elementos verticales respectivamente.

Se utilizó el comando “Patch” con una discretización de  $10 \times 10$  fibras para representar la sección transversal del elemento. Esta cantidad de fibras fue seleccionada como un compromiso entre precisión y eficiencia computacional, considerando que permite obtener resultados representativos del comportamiento estructural sin incrementar excesivamente el tiempo de cálculo. Se consideró que esta discretización era suficiente para capturar adecuadamente la distribución de esfuerzos y deformaciones, manteniendo la viabilidad del modelo numérico.

En cuanto al material, se asignó el modelo Steel02, ya que permite simular el comportamiento no lineal del acero bajo cargas cíclicas, basado en el modelo constitutivo de Giuffré-Menegotto-Pinto, que incorpora endurecimiento cinemático e isotrópico. De acuerdo con Pedrosa et al. (2007), este modelo uniaxial es ampliamente utilizado para capturar la respuesta cíclica del acero estructural, representando de manera precisa la transición suave entre el comportamiento elástico e inelástico, e incluyendo efectos como el Bauschinger mediante el endurecimiento cinemático.

Asimismo, la extensión Steel02, incorpora el endurecimiento isotrópico, capturando la expansión del límite de fluencia con la acumulación de deformaciones plásticas mediante parámetros como  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ . Los pares  $a_1$ , y  $a_2$  definen cómo se incrementa el límite de fluencia en compresión tras una cierta deformación plástica, mientras que  $a_3$  y  $a_4$  hacen lo mismo en tracción. Específicamente,  $a_1$  y  $a_3$  determinan cuánto se incrementa la envolvente de fluencia como proporción de la resistencia inicial  $F_y$ , y  $a_2$  y  $a_4$  indican cuánta deformación plástica se necesita para que ese incremento ocurra. Así pues, para  $a_2$  y  $a_4$  el valor es de 1 y, por otro lado, se utilizó las ecuaciones Ec.4 y Ec.5 propuestas por OpenSeesPy para obtener  $a_3$  y  $a_1$ .

$$a_1 = a_2 * \frac{F_y}{E} \text{ (Ec.4)}$$

$$a_3 = a_4 * \frac{F_y}{E} \text{ (Ec.5)}$$

Además, el endurecimiento cinemático es fundamental para capturar el efecto Bauschinger, donde el material fluye más fácilmente al invertir la dirección de la carga. Este comportamiento es considerado directamente en el modelo Steel02 y se controla mediante los parámetros  $R_0$ ,  $cR_1$  y  $cR_2$  los cuales ajustan la forma de la curva de transición entre las ramas elástica e inelástica. En este estudio se utilizaron los valores recomendados por la documentación oficial del software:  $R_0=15$ ,  $cR_1=0,925$  y  $cR_2=0,15$ .

Así pues, las Fig.10 y Fig. 11 muestran el comportamiento histerético del elemento en comparación a los datos experimentales. Posteriormente, para el espécimen OPT 1 dichas curvas fueron normalizadas mediante la representación del ángulo de corte normalizado frente al ángulo de corte. Para obtener el radio de corte normalizado, los valores de fuerza se dividieron por la fuerza de corte esperada según lo especificado por



Nguyen (2022), siendo 356 kN para OPT 1. En cuanto al ángulo de corte, este se calculó utilizando la altura del espécimen como base geométrica. Esta normalización se realizó con el fin de identificar de forma clara el punto de rotura de los ties, el cual, según Nguyen (2022), ocurre cuando el ángulo de corte alcanza aproximadamente el 12 %. Este valor se utilizó como referencia para comparar la respuesta del modelo numérico con los resultados experimentales. La Fig. 12 presenta las curvas normalizadas tanto del experimento como del modelo numérico. Se observa que el modelo simulado únicamente reproduce la respuesta previa a la fractura, mientras que la curva experimental incluye los ciclos histeréticos posteriores a la rotura.

Asimismo, para comparar los resultados del modelo computacional, la tabla 6 y 7 resume los datos de 3 picos de la curva, la rigidez inicial y los errores porcentuales entre los valores experimentales y del modelo.

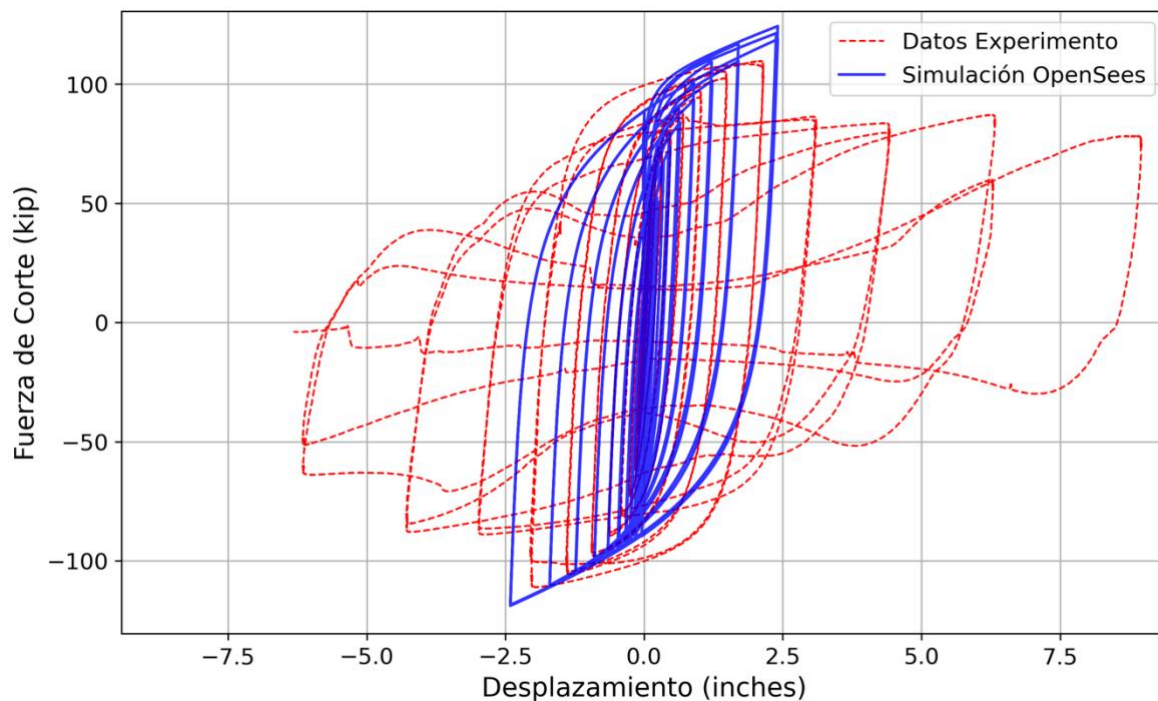


Fig. 10 Comparación modelo numérico y experimental plastificación distribuida OPT1

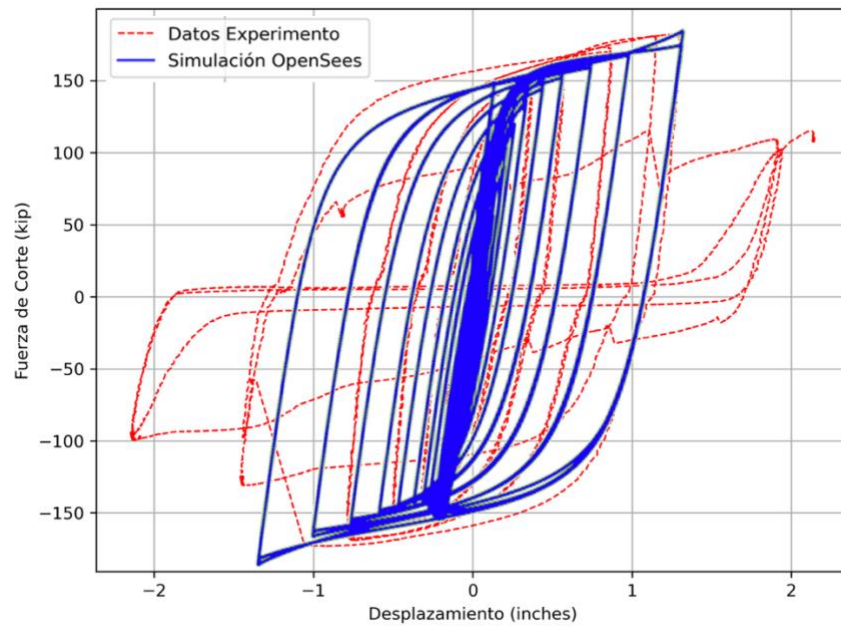


Fig. 11 Comparación modelo numérico y experimental plastificación distribuida STL

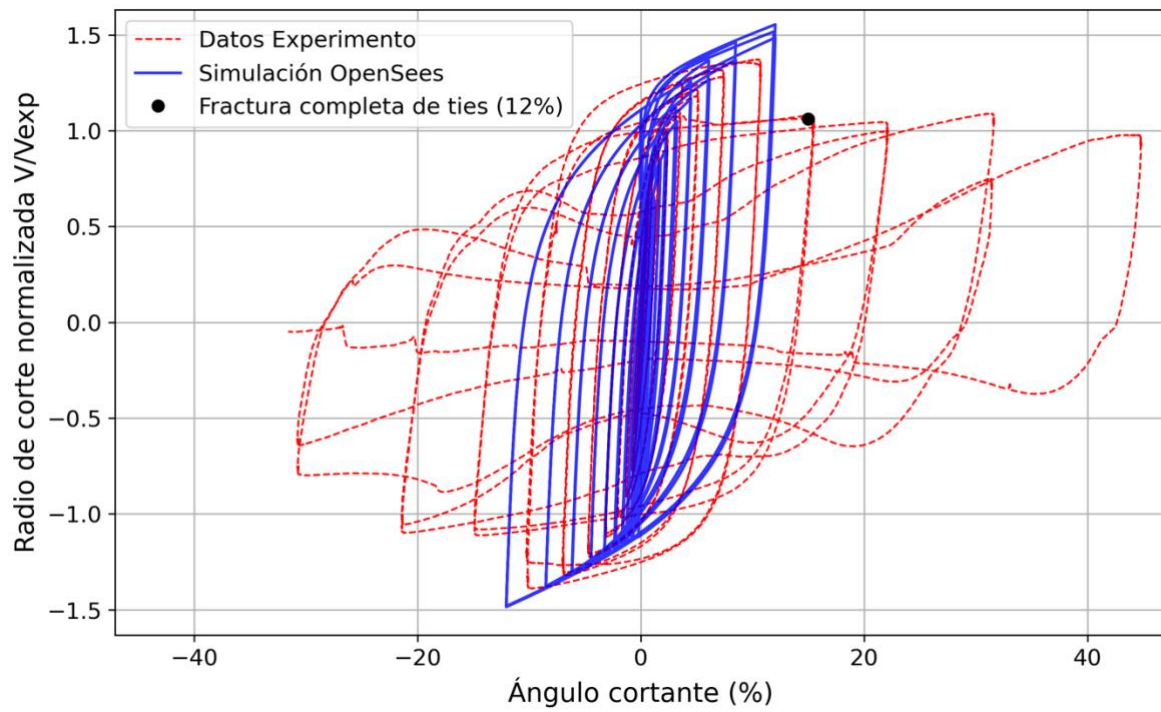


Fig. 12 Curvas modelo numérico y experimental plastificación distribuida OPT 1 normalizadas

Tabla 7 Información de curvas plasticidad distribuida

| <b>FIBER SECTION</b>                 |                                                    |                                                 |                |
|--------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------|
| <b>Desplazamiento<br/>(pulgadas)</b> | <b>Fuerza del actuador<br/>experimental (Kips)</b> | <b>Fuerza del<br/>actuador<br/>modelo(Kips)</b> | <b>% Error</b> |
| 1.0                                  | 98.8                                               | 107.9                                           | 9%             |
| 1.5                                  | 106.7                                              | 113.1                                           | 6%             |
| 2.1                                  | 107.1                                              | 119.2                                           | 11%            |

Tabla 8 Comparación rigidez inicial de curvas plasticidad distribuida

|            | <b>Rigidez inicial (kips/inch)</b> |            |               |
|------------|------------------------------------|------------|---------------|
|            | <b>OPT 1</b>                       | <b>STL</b> | <b>%Error</b> |
| <b>EXP</b> | 508                                | 1091       | 1%            |
| <b>MOD</b> | 515.1                              | 1103       | 1%            |

## 6. Discusión

En el presente estudio se modeló el mismo elemento estructural bajo dos enfoques distintos: plasticidad concentrada mediante elementos ZeroLength y plasticidad distribuida utilizando secciones de fibras. A pesar de aplicar el mismo historial de carga cíclica, las curvas fuerza-desplazamiento obtenidas presentaron diferencias notables. En el modelo de plasticidad concentrada, la respuesta histerética exhibió una forma más angular, con transiciones abruptas entre los estados elástico y plástico, debido a que toda la no linealidad se concentró en un punto localizado y el modelo constitutivo del material utilizado es

bilineal. En contraste, la curva correspondiente a la plasticidad distribuida mostró un comportamiento más suave y redondeado, producto de la progresiva plastificación de las fibras a lo largo del elemento y el uso del modelo constitutivo Steel02. Este comportamiento refleja de manera más realista la formación de zonas plásticas extendidas, como ocurre en sistemas estructurales sometidos a cargas sísmicas. La comparación resalta la importancia de seleccionar el enfoque de modelación en función del nivel de detalle requerido para representar la evolución del daño y la disipación de energía en estructuras.

Así pues, al comparar las gráficas obtenidas del experimento y del modelo numérico, se observa que el modelo con fiberSection simuló de mejor manera el comportamiento real del fusible, ya que la curva histerética fue muy similar en picos, pendientes y recorrido de carga y descarga. La rigidez inicial obtenida de la curva experimental para el OPT 1 fue de 89 kN/mm y la rigidez inicial del modelo fue de 90.18 kN/mm, siendo la curva del modelo ligeramente más vertical. Por otro lado, la rigidez inicial experimental del STL fue de 191 kN/mm, y del modelo numérico fue de 193 kN/mm, lo que representa solo un 1% de diferencia. La Tabla 9 presenta las relaciones entre los valores de rigidez y picos de curvas para el espécimen OPT 1 en ambos enfoques.

En efecto, al sobreponer la curva del modelo con la experimental y al comparar las fuerzas de corte para los desplazamientos de 25, 38 y 54 mm, se evidenció que el enfoque de plasticidad distribuida presenta relaciones cercanas a 1 (Tabla 9), con variaciones máximas de un decimal, lo que indica un excelente acople entre ambos comportamientos. En cambio, aunque el modelo de plasticidad concentrada logró una rigidez inicial muy cercana a la experimental (relación 0.98), presentó desviaciones significativas en los picos de fuerza de corte: 59% de variación en 25 mm, 53% en 38 mm y 19% en 54 mm. En

comparación, el modelo con secciones de fibras mostró variaciones menores: 9%, 6% y 11%, respectivamente.

Cabe señalar que ambos modelos numéricos solo representan el comportamiento histerético previo a la fractura completa de los ties, por lo que no reflejan la pérdida de rigidez ni de capacidad de disipación observadas experimentalmente tras la rotura. Esto limita la simulación de la fase post-crítica. Además, las suposiciones adoptadas para el material Hysteretic, especialmente en el enfoque de resorte rotacional no lineal, también influyeron en los resultados. En particular, la simplificación de la curva momento-rotación a una forma idealizada podría haber afectado la precisión de la respuesta simulada en la zona inelástica, lo que resalta la sensibilidad del modelo a las propiedades asignadas del material y la importancia de contar con datos experimentales detallados para su calibración.

Tabla 9 Relaciones de valores experimentales y del modelo de elementos finitos

| <b>Modelado</b>                             | <b>Fmod/Fexp<br/>Pico 1 (25<br/>mm)</b> | <b>Fmod/Fexp<br/>Pico 2 (38<br/>mm)</b> | <b>Fmod/Fexp<br/>Pico 3 (54<br/>mm)</b> | <b>Kmod/Kexp<br/>Rigidez inicial</b> |
|---------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Fiber section</b>                        | 1.09                                    | 1.06                                    | 1.11                                    | 1.01                                 |
| <b>Concentrated Plasticity<br/>Approach</b> | 0.41                                    | 0.47                                    | 1.19                                    | 0.98                                 |

## 7. Conclusión

Tras comparar ambos enfoques para el modelado del espécimen OPT 1, con el objetivo de simular su comportamiento histerético, se concluye que el uso de plasticidad distribuida mediante secciones de fibras proporcionó resultados satisfactorios. En particular, la curva histerética obtenida presentó una rigidez inicial de 90.18 kN/mm, en comparación con los 89 kN/mm observados experimentalmente, y una variación inferior al 12 % en los picos de fuerza cortante respecto al ensayo físico.

Por lo tanto, se valida el uso del modelo de plasticidad distribuida para extraer propiedades no lineales del dispositivo, lo cual permite avanzar hacia la siguiente etapa de investigación: su integración en un modelo estructural simplificado mediante rótulas plásticas.

En cuanto al enfoque de plasticidad concentrada, se identificaron limitaciones relacionadas con el modelo constitutivo del material utilizado, por lo que se recomienda explorar alternativas más representativas, a fin de evitar la necesidad de múltiples suposiciones. De esta manera, existe un potencial de mejora para que este modelo —más simplificado y basado en resortes no lineales— pueda ser también viable con mayor respaldo investigativo.

Adicionalmente, se observó que el modelo con secciones de fibras no solo es eficaz para la topología OPT 1, sino que también permite adaptar otras geometrías propuestas por Nguyen, gracias a su implementación parametrizada en OpenSees, donde tanto la geometría como la distribución de elementos pueden variarse automáticamente.

Finalmente, el esfuerzo computacional del modelo de fibras fue moderado, ya que no se requirió una discretización excesiva, y los tiempos de simulación fueron comparables

a los del modelo de plasticidad concentrada. En consecuencia, se recomienda este enfoque sobre modelos tridimensionales sólidos o los previamente desarrollados en ABAQUS, por su mayor viabilidad computacional y flexibilidad para futuras investigaciones.

## 8. Referencias

- American Institute of Steel Construction. (2016). *ANSI/AISC 341-16: Seismic provisions for structural steel buildings*. Chicago, IL: American Institute of Steel Construction.
- American Society of Civil Engineers. (2017). *ASCE/SEI 41-17: Seismic evaluation and retrofit of existing buildings*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
- Avecillas, J. A., & Eatherton, M. R. (2020). *Controlling Out-of-Plane Buckling in Shear-Acting Structural Fuses through Topology Optimization*. *Journal of Structural Engineering*, 146(7), 04020132. doi:10.1061/(asce)st.1943-541x.0002692
- Azad, S. K., & Topkaya, C. (2017). A review of research on steel eccentrically braced frames. *Journal of constructional steel research*, 128, 53-73.
- Baz, A. M. (2019). *Active and passive vibration damping*. John Wiley & Sons, Incorporated
- Beer, F.P., Johnston, E.R., Dewolf, J.T. and Mazurek, D.F. (2012) *Mechanics of Materials*. 6th Edition, McGraw-Hill Companies, New York, 758.
- Bruschi, E., Calvi, P. M., & Quaglini, V. (2021). Concentrated plasticity modelling of RC frames in time-history analyses. *Engineering Structures*, 243, 112716.  
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112716>
- Charleson, A. (2012). *Seismic design for architects*. Routledge. Recuperado de <https://doi.org/10.4324/9780080888255>
- GCR, N. (2017). Guidelines for Nonlinear Structural Analysis for Design of Buildings Part IIa–Steel Moment Frames. Retrieved from <https://doi.org/10.6028/NIST.GCR.17-917-46v2>



- Ghosh, S., & Kharmale, S. B. (2010). Research on steel plate shear wall: past, present and future. *Structural steel and castings: shapes and standards, properties and applications*. Nova Science Publishers Inc., Hauppauge, USA.
- Gómez Cassab, A., & Lizarazo Marriaga, J. M. (2007). Influencia de la no linealidad de material en las deflexiones inmediatas de vigas de concreto reforzado. *Ingeniería e Investigación*, 27(2), 92-99. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-56092007000200013&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-56092007000200013&script=sci_arttext)
- Morris, K. A. (2012). What is Hysteresis? *Applied Mechanics Reviews*, 64(5), 050801. doi:10.1115/1.4007112
- Nguyen, T. N. (2022). *Computational and experimental investigation of seismic structural fuse shapes for structural systems* (Tesis doctoral). Virginia Polytechnic Institute and State University. <https://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/111460>
- Pedrosa, J., Vila Pouca, N., Delgado, P., Rocha, P., Arêde, A., Costa, A., & Delgado, R. (2007). *Simulação numérica de ensaios cíclicos de pilares ocos com rotura por corte*. In *CMNE/CILAMCE 2007 – Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia / Congresso Ibero-Latino-Americano de Métodos Computacionais em Engenharia*, Porto, Portugal, 13–15 de junho de 2007. Associação Portuguesa de Mecânica Teórica, Aplicada e Computacional (APMTAC).
- Quichimbo Vines, M. A., & Valdez Moreira, E. D. (2024). *Análisis de desempeño estructural en una estructura de hormigón armado con sistemas de disipación sísmica* [Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio Institucional UPS
- R.C. Hibbeler – Mecánica de Materiales – Octava Edición – Ed. Pearson 2011

- Reyes, J. C., & Rubiano, N. R. (2002). Modelación inelástica de edificios de concreto con disipadores de energía histeréticos. *Revista de Ingeniería*, (15), 30-39.
- Sajjadi Alehashem, Seyed Masoud & Keyhani, Ali & Pourmohammad, Hassan. (2008). Behavior and performance of structures equipped with ADAS & TADAS dampers (a comparison with conventional structures).
- Skinner, R. I., Tyler, R. G., Heine, A. J., & Robinson, W. H. (1980). Hysteretic dampers for the protection of structures from earthquakes. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 13(1), 22–36. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.13.1.22-36>
- Sutoyo, Daniel (2009) *Hysteretic Characteristics of Wood-Frame Structures Under Seismic Motions*. Dissertation (Ph.D.), California Institute of Technology.  
doi:10.7907/R92X-6R80. <https://resolver.caltech.edu/CaltechETD:etd-05172009-153304>
- Vargas, R., & Bruneau, M. (2009). *Experimental Response of Buildings Designed with Metallic Structural Fuses. II. Journal of Structural Engineering*, 135(4), 394–403. doi:10.1061/(asce)0733-9445(2009)135:4(394)