



**UNIVERSIDAD  
SAN SEBASTIAN**  
VOCACIÓN POR LA EXCELENCIA

**FACULTAD DE INGENIERIA, ARQUITECTURA Y DISEÑO**

**INGENIERÍA CIVIL**

**SEDE CONCEPCIÓN**

**EVALUACIÓN NUMÉRICA DE UNA PROPUESTA DE RIOSTRA DE  
PANDEO RESTRINGIDO PARA LA PROTECCIÓN SÍSMICA DE  
ESTRUCTURAS**

**Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil**

**Profesor tutor: Ramón Mata Lemus**

**Estudiante: Felipe Ignacio Concha Espinosa**

**© Felipe Ignacio Concha Espinosa se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra con fines académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento, siempre y cuando se incluya la cita bibliográfica del documento.**

**Concepción, Chile**

**2024**

## HOJA DE CALIFICACIÓN

En \_\_\_\_\_, el \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_ los abajo firmantes dejan

constancia que el (la) estudiante \_\_\_\_\_ de  
la carrera de \_\_\_\_\_ ha  
aprobado la tesis para optar al título de

---

con una nota de \_\_\_\_\_

---

**Profesor Evaluador**

---

**Profesor Evaluador**

---

**Profesor Evaluador**

## DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo a mi familia, en especial a mi mamá, mi papá, Janote, Maite y Chubi, así como a mi hermano y mi sobrina perruna Don Richie que está en cielo, panchito que me acompaña en esta aventura y Mila. También a mi abuelo Segundo, que del poco tiempo que estuvimos juntos lo pasamos súper. Gracias por estar a mi lado en esta aventura de volver a estudiar, por creer en mí desde el primer día, y por su apoyo incondicional que me dio fuerzas para seguir adelante.

A mis amigos, que quizás no siempre entendieron por qué decidí regresar a la universidad, pero que nunca dejaron de animarme y de ofrecerme su comprensión.

Y, finalmente, a mi compañera de vida, Bárbara, quien desde el momento en que nos conocimos ha sido mi mayor apoyo. Gracias por tu amor, paciencia y fe en mí, por ser mi pilar y acompañarme en cada paso de este viaje. Este logro es tanto mío como suyo.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al profesor Ramón Mata Lemus, cuya motivación y apoyo fueron una constante durante todo este proceso. Su impulso para que diera siempre lo mejor de mí y la confianza que depositó en mí resultaron fundamentales.

Extiendo mi gratitud a la profesora Javiera Padilla, quien mostró siempre una disposición incondicional para atender todas mis solicitudes, al profesor Patricio Fuentes, quien me brindó su apoyo desde el inicio de este gran desafío que representó comenzar mis estudios, y al profesor Francisco Acuña, quien logró despertar en mí un profundo interés por la geotecnia.

Asimismo, agradezco a todos los demás profesores con quienes tuve el privilegio de compartir clases. Su pedagogía, dedicación y paciencia fueron pilares fundamentales en mi formación profesional. De cada uno de ustedes he aprendido valiosas lecciones, por lo cual les estoy profundamente agradecido.

# TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN .....	13
ABSTRACT .....	14
INTRODUCCIÓN .....	15
OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	16
ALCANCES DE CADA CAPÍTULO.....	17
CAPÍTULO I: FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	19
1.1 Descripción del problema .....	20
1.2 Delimitación del estudio.....	23
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....	26
2.1. Introducción a los Arrostramientos de Pandeo Restringido.....	27
2.2 Revisión del estado de arte sobre Arriostres de Pandeo Restringido .....	28
2.3 Análisis de Literatura sobre Arriostres de Pandeo Restringido (BRB).....	37
2.4 Evolución y Desarrollo de los Arriostres de Pandeo Restringido.....	40
2.5 Tipos de Arrostramientos Restringidos contra Pandeo (BRB).....	45
2.6 Evaluación de BRB bajo el Protocolo de Carga de la AISC 341-22 .....	49
2.7 Madera como Material Confinante en los Buckling Restrained Braces (BRB) .....	53
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....	56
3.1 Enfoque Metodológico.....	57
3.2 Tipo de Investigación.....	57
3.3 Métodos y Técnicas .....	58
3.4 Población y Muestra .....	59
3.5 Procedimiento .....	60

CAPITULO IV: ANALISIS DE RESULTADOS .....85

4.1 Análisis de Resultados del Modelamiento en Elementos Finitos del BRB .....86

4.2 Análisis de resultado de la capacidad estructural a través de SAP200 ..... 103

CONCLUSIÓN ..... 118

BIBLIOGRAFIA ..... 121

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Numero de sismo por año. Fuente: AllQuakes,2024. ....	20
<b>Figura 2.</b> Construcciones fuera de norma nacional. Fuente: Muñoz, 2011 .....	21
<b>Figura 3.</b> BRB tipo Scorpion. Fuente: Gray M. et al.,2012.....	22
<b>Figura 4.</b> Porcentaje de documentos a estudiar. Fuente: Propia. ....	37
<b>Figura 5.</b> Cantidad de estudio por años de acuerdo con la clasificación. Fuente: Propia.....	39
<b>Figura 6.</b> BRB en edificio. Fuente: Surendran & Varma, 2017.....	40
<b>Figura 7.</b> Respuesta de la riostra de acero ordinaria y BRB bajo carga lateral. Fuente: Hussain & Kim, 2023.....	41
<b>Figura 8.</b> Ejemplo de marco arriostrado excéntricamente. Fuente: Crisafulli, 2012. (a) marco con riostra restringidas al pandeo, (b) con componente dúctil fuera de la viga. ....	42
<b>Figura 9.</b> Componentes de un BRB tipo. Fuente: Hussain & Kim, 2023 .....	44
<b>Figura 10.</b> Sección longitudinal núcleo del BRB. Fuente: Clark,1999.....	44
<b>Figura 11.</b> Composición común BRB. Fuente: Tectonus,2022.....	45
<b>Figura 12.</b> BRB con Sección tubular doble. Fuente: Orellana, 2020. ....	46
<b>Figura 13.</b> BRB completamente de acero con restricción soldada.....	47
<b>Figura 14.</b> BRB de ensamblaje en sitio. Fuente: Orellana, 2020. ....	47
<b>Figura 15.</b> a) TBRB revestido de madera laminada con tornillos (b) Paneles de madera contrachapada masiva revestidos de BRB con pernos. Fuente: Blomgren et al., 2016, Murphy et al., 2021. ....	49
<b>Figura 16.</b> Secuencia de carga. Fuente: AISC 341,22.....	51
<b>Figura 17.</b> Protocolo de carga AISC 341 Capitulo K. Fuente: Morral,2015.....	52
<b>Figura 18.</b> Ciclo de histéresis riostra con pandeo restringido. Fuente: Morral, 2015. ....	52
<b>Figura 19.</b> Deriva y alargamiento de la riostra. Fuente: Resta, 2019 .....	60

<b>Figura 20.</b> Protocolo de desplazamiento para riostra en estudio según AISC 341-22. Fuente: Propia. ....	64
<b>Figura 21.</b> Elementos solidos tridimensionales de la propuesta BRB en AutoCAD 3D. ....	66
<b>Figura 22.</b> Dimensiones de propuesta de núcleo de acero dúctil. Fuente: Propia. ....	67
<b>Figura 23.</b> Madera como materia confinante con calado al interior. ....	67
<b>Figura 24.</b> Encamisado de acero con placa de cierre. Fuente: Propia. ....	68
<b>Figura 25.</b> Definición del acero A36 no lineal. Fuente: Propia. ....	70
<b>Figura 26.</b> Curva tensión deformación acero ASTM A36. Fuente: Ansys,2023. ....	71
<b>Figura 27.</b> Definición del material confinante madera en software ANSYS. Fuente: Propia. ....	72
<b>Figura 28.</b> Comportamiento de contactos. Fuente: Morral F.,2015. ....	73
<b>Figura 29.</b> Interacción material confinante- encamisado en ANSYS. ....	74
<b>Figura 30.</b> Interacción madera-madera en ANSYS. Fuente: Propia. ....	74
<b>Figura 31.</b> Interacción encamisado - placa cierre en ANSYS. Fuente: Propia. ....	75
<b>Figura 32.</b> interacción friccional entre el núcleo de acero - madera en ANSYS. Fuente: Propia. ..	76
<b>Figura 33.</b> Interacción núcleo de acero - placa cierre en ANSYS. Fuente: Propia. ....	76
<b>Figura 34.</b> Elemento 3D Solid186. Fuente: Morral F.,2015. ....	77
<b>Figura 35.</b> Condiciones de contorno en ANSYS. ....	78
<b>Figura 36.</b> Ingreso del protocolo de carga en ANSYS. Fuente: Propia. ....	79
<b>Figura 37.</b> Configuración geométrica de los modelos de marcos con y sin BRB en SAP2000. Fuente: Propia. ....	81
<b>Figura 38.</b> Esquema de condiciones de borde y cargas asignadas en el modelo numérico. ....	82
<b>Figura 39.</b> Asignación de rótulas plásticas en vigas y columnas en SAP2000. ....	83
<b>Figura 40.</b> Rotulas plásticas en marco. Fuente: Propia. ....	84
<b>Figura 41.</b> Modelo 1 en ANSYS. Fuente: Propia. ....	87

<b>Figura 42.</b> No convergencia del modelo 1 en ANSYS. Fuente: Propia.....	87
<b>Figura 43.</b> Deformaciones plásticas excesivas en la zona de transición del núcleo de acero en ANSYS. Fuente: Propia.....	88
<b>Figura 44.</b> Deformación plástica en la zona de fluencia del núcleo de acero en ANSYS. Fuente: Propia.....	88
<b>Figura 45.</b> Modelo 2 con abertura en placa de cierre de 80 mm en ANSYS.....	89
<b>Figura 46.</b> No convergencia del modelo 2 en ANSYS. Fuente: Propia.....	90
<b>Figura 47.</b> Núcleo de acero sin mayor deformación plástica en la zona de fluencia en ANSYS. Fuente: Propia.....	90
<b>Figura 48.</b> Deformación plástica excesiva en la zona de transición y conexión del BRB en ANSYS. Fuente: Propia.....	90
<b>Figura 49.</b> Modelo 3 en ANSYS considerando calado de la zona de transición del núcleo en la madera. Fuente: Propia.....	91
<b>Figura 50.</b> Convergencia de substeps del modelo 3 en ANSYS. Fuente: Propia.....	92
<b>Figura 51.</b> Esfuerzo elástico núcleo. Fuente: Propia.....	92
<b>Figura 52.</b> Esfuerzos elásticos en la zona transición y conexión del núcleo.....	93
<b>Figura 53.</b> Modelo 4 con aumento en el ancho de la zona conexión y transición.....	94
<b>Figura 54.</b> Convergencia de substeps del modelo 4 en ANSYS.....	94
<b>Figura 55.</b> Plastificación en la zona de conexión. Fuente: Propia.....	95
<b>Figura 56.</b> Fuerza vs desplazamiento. Fuente: Propia.....	96
<b>Figura 57.</b> Modelo final en ANSYS. Fuente: Propia.....	97
<b>Figura 58.</b> Convergencia total del modelo final en ANSYS. Fuente: Propia.....	97
<b>Figura 58.</b> Convergencia total del modelo final en ANSYS. Fuente: Propia.....	98
<b>Figura 59.</b> Deformación plástica del núcleo de acero. Fuente: Propia.....	98
<b>Figura 60.</b> Curva histerética estable modelo final. Fuente: Propia.....	101
<b>Figura 61.</b> Curva histerética de Mass timber buckling restrained.....	101

<b>Figura 61.</b> Curva histerética de Mass timber buckling restrained.....	101
<b>Figura 62.</b> Curva histerética BRB con elastómero como material confinante. Fuente: Morral,2015. .....	101
<b>Figura 61.</b> Curva histerética de Mass timber buckling restrained. Fuente: Blomgren H. et al.,2016 .....	101
<b>Figura 62.</b> Curva histerética BRB con elastómero como material confinante. Fuente: Morral,2015. .....	101
<b>Figura 64:</b> Esfuerzo normal madera 1 en ANSYS. Fuente: Propia. ....	102
<b>Figura 65:</b> Esfuerzo normal madera 2 en ANSYS. Fuente: Propia. ....	102
<b>Figura 66:</b> Envolvente Curva Histerética del BRB analizado. Fuente: Propia. ....	103
<b>Figura 67.</b> Ingreso de envolvente en SAP 2000. Fuente: Propia. ....	104
<b>Figura 68.</b> Curva de capacidad de marco de un piso y un vano. Fuente: Propia. ....	105
<b>Figura 69.</b> Rotulas plásticas en marco de un piso y un vano. Fuente: Propia. ....	106
<b>Figura 70.</b> Curva de capacidad de marco de un piso y dos vanos. Fuente: Propia. ....	107
<b>Figura 71.</b> Rotulas plásticas en marco de un piso y dos vanos. ....	108
<b>Figura 72.</b> Curva de capacidad de marco de un piso y tres vanos. Fuente: Propia.....	109
<b>Figura 73.</b> Rotulas plásticas en marco de un piso y tres vanos. Fuente: Propia. ....	109
<b>Figura 74.</b> Curva de capacidad de marco de un piso y cuatro vanos. Fuente: Propia. ....	109
<b>Figura 75.</b> Rotulas plásticas en marco de un piso y cuatro vanos.....	111
<b>Figura 76.</b> Curva de capacidad de marco de un piso y cinco vanos. Fuente: Propia. ....	112
<b>Figura 77.</b> Rotulas plásticas en marco de un piso y cinco vanos.....	112
<b>Figura 78.</b> Curva de capacidad de marcos de dos pisos de 1 a 5 vanos con BRB. ....	114
<b>Figura 79.</b> Curva de capacidad de marcos de dos pisos de 1 a 5 vanos sin BRB.....	114
<b>Figura 80.</b> Rotulas plásticas en marco de dos pisos y un vano. Fuente: Propia.....	115
<b>Figura 81.</b> Rotulas plásticas en marco de dos piso y dos vanos. Fuente: Propia. ....	115

<b>Figura 82.</b> Rotulas plásticas en marco de dos piso y tres vanos. Fuente: Propia.....	116
<b>Figura 83.</b> Rotulas plásticas en marco de dos piso y cuatro vanos. Fuente: Propia.....	116
<b>Figura 83.</b> Rotulas plásticas en marco de dos piso y cuatro vanos. Fuente: Propia.....	116
<b>Figura 84.</b> Rotulas plásticas en marco de dos piso y cinco vanos. Fuente: Propia.....	117

## RESUMEN

La presente investigación evaluó una propuesta de riostras de pandeo restringido (BRB) diseñadas para estructuras de menor escala, utilizando un núcleo de acero de bajo espesor confinado con madera como material alternativo. Mediante análisis numéricos avanzados, se estudió el comportamiento del dispositivo bajo condiciones de carga cíclica, destacando su capacidad de disipación de energía y la estabilidad de su comportamiento histerético. Además, se realizó un análisis estático no lineal para evaluar el desempeño estructural de un marco de hormigón armado como configuración representativa de construcciones de menor escala. Los resultados mostraron mejoras en el desempeño estructural al incorporar el BRB en comparación con estructuras sin este dispositivo, validando su viabilidad técnica. Este trabajo sentó las bases para futuras investigaciones relacionadas con las conexiones del BRB, la implementación de modelos más avanzados y su evaluación en estructuras más representativas.

**PALABRAS CLAVES:** Riostras de pandeo restringido (BRB), Madera, Desempeño sísmico, Comportamiento histerético, elementos finitos.

## **ABSTRACT**

This research evaluated a proposal for buckling restrained braces (BRBs) designed for smaller-scale structures, using a low-thickness steel core confined by wood as an alternative material. Through advanced numerical analysis, the behavior of the device under cyclic loading conditions was studied, highlighting its energy dissipation capacity and the stability of its hysteretic behavior. Additionally, a nonlinear static analysis was performed to assess the structural performance of a reinforced concrete frame as a representative configuration for smaller-scale constructions. The results showed improvements in structural performance when incorporating the BRB compared to structures without this device, validating its technical feasibility. This work laid the foundations for future research related to the connections of the BRB, the implementation of more advanced models, and its evaluation in more representative structures.

**KEYWORDS:** Buckling-Restrained Braces (BRB), Wood, Seismic performance, Hysteretic behavior, Finite elements

## INTRODUCCIÓN

En Chile, los frecuentes eventos sísmicos han destacado la necesidad de implementar tecnologías avanzadas en ingeniería estructural, no solo para garantizar la estabilidad de las edificaciones, sino también para proteger vidas humanas y bienes materiales. Históricamente, la construcción habitacional en el país se ha basado en el uso predominante del hormigón, madera y mampostería, mientras que en el sector industrial el acero ha sido el material preferido debido a su facilidad y rapidez de ensamblaje (Centro UC de Innovación en Madera, 2019). Sin embargo, a pesar de contar con una normativa sísmica avanzada, muchas edificaciones, particularmente las de menor escala en ámbitos comerciales e industriales, no cumplen con los estándares actuales. Esta situación obedece a factores como la falta de recursos para mejoras estructurales, falta de fiscalización y la ausencia de soluciones específicas para estas estructuras. En este contexto, se han desarrollado dispositivos y técnicas constructivas que buscan mejorar el desempeño sísmico de las edificaciones, definido como la respuesta esperada ante un determinado nivel de demanda sísmica.

Entre las soluciones más destacadas, el uso de disipadores de energía ha adquirido gran relevancia. Estos dispositivos, diseñados para absorber y reducir la energía generada durante un sismo, contribuyen a proteger las estructuras minimizando el impacto de las vibraciones. Se clasifican en tipos como viscosos, viscoelásticos, friccionales y metálicos, siendo estos últimos reconocidos por su capacidad de disipación y comportamiento dúctil. Sin embargo, enfrentan limitaciones, como las deformaciones permanentes tras un evento sísmico, que complican su reutilización, y los disipadores viscosos, además de su costo elevado, tienen un tiempo de vida útil limitado (Oviedo et al., 2008). En este sentido, las riostras de pandeo restringido (BRB, Buckling Restrained Braces) han emergido como una solución eficiente. Estas riostras están diseñadas con un núcleo de acero dúctil confinado para evitar el pandeo y mejorar la rigidez, ofreciendo una alta capacidad de disipación energética.

Un uso destacado de estas riostras es en los marcos arriostrados con pandeo restringido (BRBF, Buckling Restrained Braced Frames), que integran elementos

diagonales capaces de resistir cargas sísmicas sin pandeo, permitiendo reducir el tamaño y peso de los elementos estructurales. Además, ofrecen una combinación óptima de rigidez lateral y disipación de energía. A pesar de estas ventajas, la implementación de los BRBF es limitada debido a sus elevados costos y su peso, además de las restricciones asociadas a su instalación, especialmente en estructuras de menor escala.

En este sentido, la presente investigación propone el uso de riostras de pandeo restringido, reduciendo sus dimensiones, utilizando materiales alternativos para el confinamiento, y diseñando las secciones con capacidades adecuadas para pequeñas estructuras. Este enfoque incluye el uso de madera como confinante, combinada con núcleos de acero de bajo espesor, lo que no solo evita el pandeo durante la disipación de energía, sino que también reduce significativamente los costos y la complejidad de fabricación e instalación. Con esta solución, se busca garantizar la ductilidad y capacidad de las riostras, contribuyendo al desarrollo de estructuras más accesibles y resilientes frente a los sismos.

## **OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **Objetivo general**

Evaluar numéricamente una propuesta de BRB (Buckling-Restrained Brace) como solución para la protección sísmica de estructuras, analizando su desempeño y efectividad bajo condiciones de carga cíclica.

### **Objetivos específicos**

1. Estimar las capacidades del dispositivo y los componentes.
2. Analizar el comportamiento histerético del dispositivo utilizando método de elementos finitos.
3. Comparar el desempeño de pórtico con y sin BRB para evaluar la factibilidad técnica del dispositivo.

## **ALCANCES DE CADA CAPÍTULO**

### **Capítulo 1: Introducción**

Este capítulo introduce el tema de investigación, destacando la importancia de desarrollar sistemas de protección sísmica eficientes para estructuras en Chile, particularmente las riostras de pandeo restringido (BRB). También se presentan los objetivos generales y específicos de la investigación, resaltando la relevancia de los dispositivos optimizados en el contexto sísmico nacional.

### **Capítulo 2: Formulación del problema**

Se define el problema central de la investigación, relacionado con la vulnerabilidad estructural de edificaciones pequeñas en Chile debido a costos y complejidad de las soluciones actuales. Además, se plantean las preguntas de investigación y se delimitan los alcances técnicos y metodológicos del estudio.

### **Capítulo 3: Marco Teórico**

En este capítulo se presenta una revisión de la literatura sobre el diseño y desempeño de las BRB, destacando su capacidad para disipar energía sísmica. También se explican los conceptos clave, como protocolo de carga, componente del BRB, comportamiento histerético, ubicando la investigación en su contexto académico y científico.

### **Capítulo 4: Metodología**

Se describen las herramientas y métodos utilizados en la investigación. Se presenta el modelo analítico para calcular el comportamiento del núcleo ante cargas cíclicas y el modelo numérico desarrollado en software de elementos finitos, detallando la geometría, materiales, condiciones de borde y protocolo de cargas.

## **Capítulo 5: Resultados y análisis**

A partir de este análisis, se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones numéricas, enfocadas en la estabilidad y el comportamiento histerético del BRB bajo diversas condiciones. Se evaluaron escenarios de alta y baja adherencia en el contacto entre el material confinante y el núcleo, identificando las propiedades óptimas de los dispositivos. Asimismo, se llevó a cabo un análisis no lineal estático en una construcción a menor escala para evaluar el desempeño estructural con el uso de BRB.

## **Capítulo 6: Conclusiones**

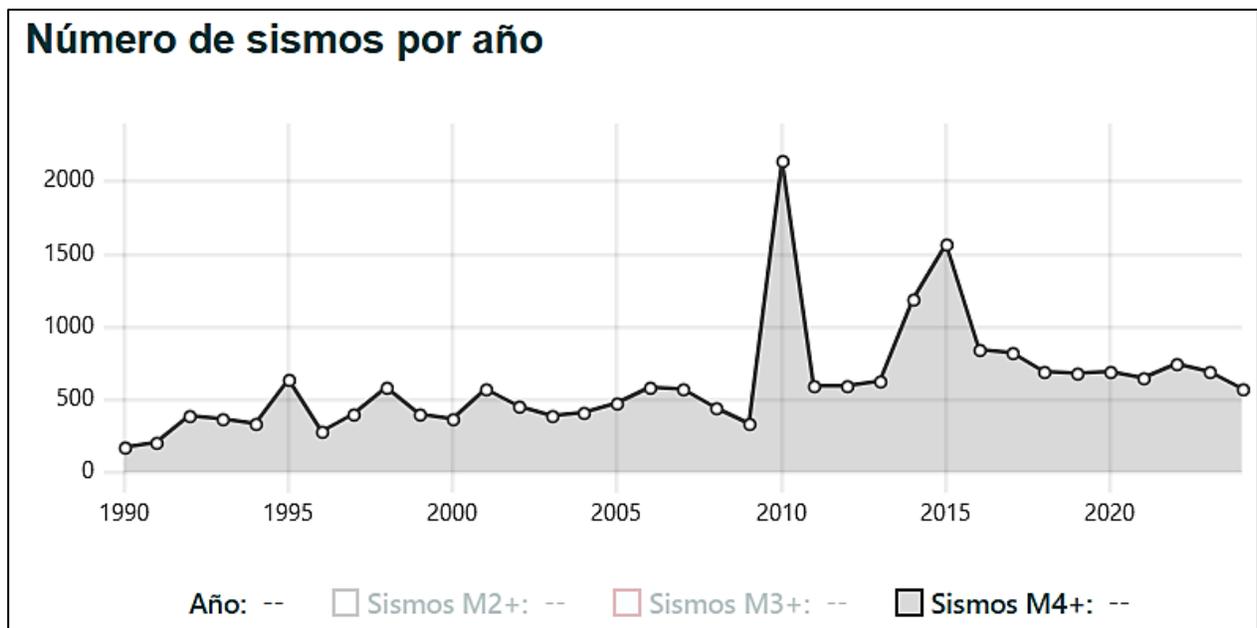
Se presentan las conclusiones principales del estudio, resaltando la viabilidad técnica del BRB optimizadas con materiales confinantes alternativos. Asimismo, se identifican las limitaciones del trabajo y se proponen recomendaciones para futuros estudios experimentales y aplicaciones prácticas.

## **CAPÍTULO I: FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

## 1.1 Descripción del problema

Chile es uno de los países más sísmicamente activos del mundo, lo que lo coloca en una amenaza constante de terremotos, especialmente aquellos de gran magnitud y alto potencial destructivo (Núñez et al., 2015) Esta alta amenaza sísmica se debe a que Chile se encuentra ubicado en una de las zonas más activas del planeta, consecuencia del proceso de subducción de la Placa de Nazca bajo el continente sudamericano.

De acuerdo con datos recopilados por AllQuakes (2024), la Figura 1 muestra el número de sismos por año en Chile desde 1990 hasta 2020 sobre magnitud 4 Mw., evidenciando la gran cantidad de sismos producidos anualmente en el país. Este escenario adverso subraya la necesidad de una normativa sísmica que proporcione directrices claras para el análisis y diseño estructural en Chile, como lo hace la NCh 433 de 2012.



**Figura 1.** Numero de sismo por año. Fuente: AllQuakes,2024.

Chile es uno de los países que ha mostrado mayor avance en materia de ingeniería sísmica en Latinoamérica y el mundo, ya que las consecuencias de los terremotos han servido como valiosa experiencia para la reforma de su código sísmico.

A pesar de la existencia de una normativa avanzada, muchas estructuras existentes en el país presentan una alta vulnerabilidad sísmica, especialmente aquellas de menor tamaño, como instalaciones habitacionales, industriales y comerciales. Estas estructuras cumplen con una normativa como la NCh 433, pero no actualizada a la versión de 2009 con los decretos supremos. Además, muchas incluyen ampliaciones no reguladas que no aplican ninguna normativa (Ver Figura 2). Esto se debe, entre otras razones, a la falta de fiscalización en numerosas construcciones y al exceso de informalidad en el sector (Muñoz, 2011).

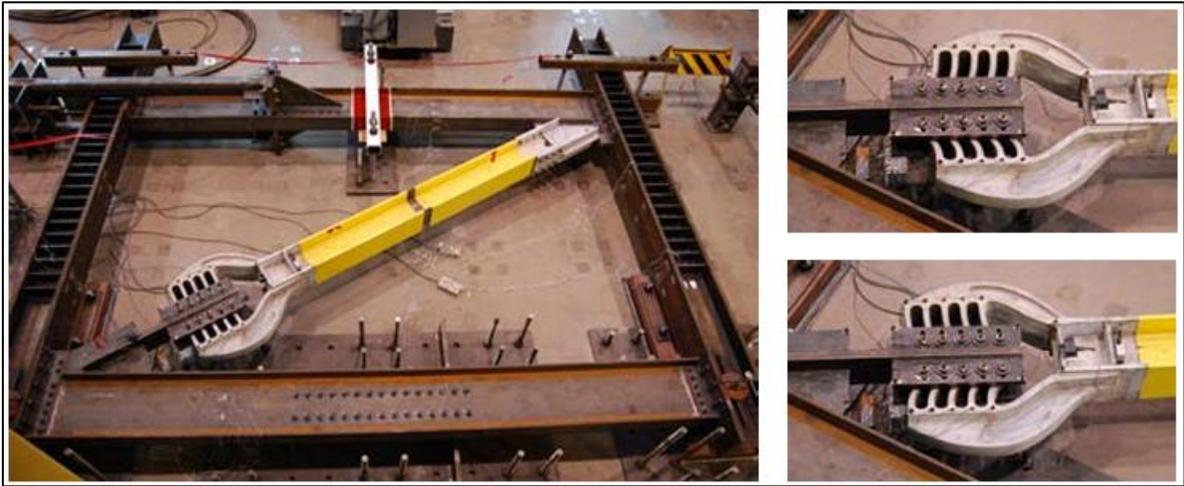


**Figura 2.** Construcciones fuera de norma nacional. Fuente: Muñoz, 2011

El desarrollo de soluciones para el reforzamiento sísmico de este tipo de estructuras está orientado a dispositivos avanzados, como aisladores sísmicos o sistemas de disipación de energía de gran escala. Sin embargo, estas tecnologías presentan barreras significativas para su implementación en Chile debido a sus grandes dimensiones, altos costos y la limitada factibilidad técnica en estructuras de menor escala.

Además, se han diseñado dispositivos como las riostras de pandeo restringido (BRB) de gran tamaño y otros sistemas avanzados, como los disipadores tipo Scorpion (Ver Figura 3). No obstante, estos también enfrentan restricciones en su aplicación, ya

sea por costos o por su complejidad técnica, quedando las pequeñas estructuras desprovistas de soluciones adaptadas a sus necesidades.



**Figura 3.** BRB tipo Scorpion. Fuente: Gray M. et al.,2012

Esta problemática refleja la necesidad de desarrollar alternativas más accesibles, económicas y específicas para el contexto chileno, capaces de mejorar la respuesta sísmica en edificaciones pequeñas y de menor costo, abordando así la vulnerabilidad estructural que persiste en este tipo de construcciones.

### **Preguntas de investigación**

En este contexto, la investigación busca responder las siguientes preguntas:

1. ¿Cuál es la capacidad estructural que pueden alcanzar las riostras de pandeo restringido con confinante de madera?
2. ¿Cómo es el comportamiento histerético del dispositivo propuesto ante cargas cíclicas simuladas numéricamente?
3. ¿Es posible mejorar el desempeño estructural de pequeñas estructuras al incluir el dispositivo propuesto?

## **1.2 Delimitación del estudio**

El presente trabajo se enfoca en la evaluación numérica de un dispositivo de arriostramiento de pandeo restringido (BRB) diseñado para mejorar el desempeño estructural de edificaciones de baja escala, (como viviendas, estructuras industriales y comerciales), frente a cargas sísmicas. El análisis del dispositivo se realizó mediante un enfoque computacional basado en el método de elementos finitos. A continuación, se presenta el alcance del estudio:

### **Límites del Estudio:**

#### **1. Dimensiones y Componentes del Dispositivo:**

- El análisis considerará un BRB con un núcleo de acero A36 de 2 mm de espesor, encapsulado en madera de pino radiata GS y contenido dentro de un perfil tubular cuadrado de acero A36 de 200x200 mm con 3 mm de espesor. El dispositivo tendrá una longitud fija de 5 metros. Considerando que puede ser instalado en marcos típicos de 3 m de altura y 4 m de longitud.

#### **2. Enfoque de Modelación:**

- Se utilizará un modelo de elementos finitos en ANSYS para simular el comportamiento histerético del dispositivo bajo cargas cíclicas. Se evalúa ante cargas cíclicas considerando el protocolo de precalificación para BRB establecido en el AISC 341-22, Seismic Provisions for Structural Steel Buildings. Para la ley constitutiva del material se considera el núcleo de acero mediante una curva de endurecimiento isotrópico bilineal. Esta elección se debe a que, aunque el endurecimiento cinemático bilineal representa de manera más precisa el efecto Bauschinger (Ansys 2020), su implementación genera problemas de convergencia numérica en los modelos. Por esta razón, el endurecimiento isotrópico bilineal se emplea

como una aproximación práctica, ya que ofrece mayor estabilidad computacional en el análisis y permite capturar de manera razonable el comportamiento plástico del material. Además, la opción large deformation se utilizará para representar con mayor realismo las grandes deformaciones y efectos plásticos, asegurando la estabilidad del modelo.

### **3. Simplificaciones del Modelo:**

- En la modelación se excluirán los pernos de la placa de cierre del BRB con el perfil tubular. Además, para evaluar la capacidad estructural máxima de la riostra, únicamente se modelará la pletina, considerando la zona del núcleo y la de transición. Las conexiones no serán incluidas en este estudio.
- Se consideran las interacciones entre los materiales en los casos correspondientes. Para las superficies donde no ocurre deslizamiento, se utilizará la interacción bonded para simular una conexión completamente adherida. En cambio, para las superficies con fricción, se aplicará la interacción frictional, especificando el coeficiente de fricción de  $\mu = 0.005$  para la interacción madera-núcleo y  $\mu = 0.2$  para la interacción acero-acero. Cabe destacar que el núcleo de acero está recubierto de Teflón, por lo que la fricción disminuye (Teflon™ - Recubrimientos, n.d.).

### **4. Evaluación del Comportamiento Histerético:**

- El dispositivo fue sometido a cargas cíclicas siguiendo el protocolo de desplazamiento especificado en el capítulo K del AISC 341-22. Este protocolo, implementado en 15 pasos, permitió evaluar el desempeño histerético del BRB, concentrándose en aspectos clave como la disipación de energía y la estabilidad de la curva histerética. Estas decisiones metodológicas garantizaron que el modelo numérico representara de

manera eficiente el comportamiento real del dispositivo bajo cargas sísmicas, asegurando la estabilidad del modelo y la convergencia numérica.

#### **5. Aplicación en Estructuras de Pequeña Escala:**

- Se analiza una estructura a pequeña escala, considerando un marco de hormigón armado compuesto por columnas de 40x40 cm y vigas de 40x30 cm. Para las columnas, se emplea un 2% de cuantía mínima de acero, mientras que en las vigas se utiliza el doble del acero mínimo especificado por la ACI-318-19. Estos parámetros se seleccionaron para representar la informalidad característica de las construcciones a pequeña escala que no cumplen con el diseño normativo.
- Los modelos consistirán en marcos de 1 y 2 pisos, con entre 1 y 2 vanos, y serán evaluados en SAP2000 mediante análisis no lineal estático (Pushover). El objetivo es analizar el desempeño estructural de estas estructuras, tanto con y sin la incorporación de BRB.

#### **6. Limitaciones del Estudio:**

- Este trabajo no incluye pruebas experimentales ni análisis dinámicos en estructuras completas. Además, no se contemplarán interacciones con sistemas arquitectónicos ni la influencia de elementos no estructurales.

Este marco de delimitación permite enfocar el estudio en la implementación y desempeño del dispositivo en edificaciones de pequeña escala, asegurando un análisis detallado dentro de las limitaciones de tiempo y recursos disponibles, así como la estabilidad y la convergencia numérica del análisis.

## **CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO**

## 2.1. Introducción a los Arrostramientos de Pandeo Restringido

Los desastres naturales, como los terremotos, representan un desafío significativo tanto para la protección de la vida humana como para la estabilidad económica de las naciones. En regiones sísmicamente activas, los ingenieros estructurales enfrentan la compleja tarea de diseñar sistemas que puedan resistir de manera efectiva los movimientos telúricos (Black et al., 2002). Durante las últimas décadas, se han desarrollado múltiples estrategias y dispositivos para limitar los desplazamientos estructurales y proteger las edificaciones, incluidos los amortiguadores, muros de corte, enlaces de disipación de energía y sistemas de arriostramiento (Uang et al., 2004).

Entre estas soluciones, los arriostramientos de acero se han destacado como una herramienta clave para resistir fuerzas sísmicas, especialmente en edificios de gran altura. Sin embargo, los arriostramientos convencionales presentan limitaciones importantes: bajo cargas cíclicas intensas, son susceptibles a deformaciones por pandeo, lo que provoca respuestas histéricas asimétricas, una reducción significativa en la capacidad de disipación de energía y un deterioro de su resistencia estructural (Xie, 2005).

Para abordar estas deficiencias, surgieron los arriostramientos restringidos contra pandeo (BRB), diseñados específicamente para evitar la deformación por pandeo en los arriostramientos de acero. Estos dispositivos ofrecen un comportamiento estructural superior al mantener una resistencia constante tanto bajo fuerzas compresivas como de tracción. Además, son capaces de absorber una cantidad significativamente mayor de energía sísmica en comparación con los sistemas convencionales (Black et al., 2002; Palazzo et al., 2009).

## **2.2 Revisión del estado de arte sobre Arriostres de Pandeo Restringido**

Para comprender los conceptos, aplicaciones y avances en el desarrollo de los arriostres de pandeo restringido (BRB), se llevó a cabo una revisión exhaustiva de la literatura, que incluyó un total de 40 documentos relacionados con diferentes aspectos de los BRB. Este análisis se centró especialmente en aquellos estudios que emplean la madera como material confinante, conocidos como timber BRB. Este enfoque específico responde a la orientación de la presente investigación, que busca explorar las propiedades y ventajas de la madera como material alternativo en el diseño de BRBs. Los BRBs han emergido como una solución clave en la ingeniería estructural, mejorando la resistencia sísmica de diversas edificaciones. A lo largo de los últimos años, múltiples estudios han explorado sus aplicaciones, diseños e innovaciones, demostrando su eficacia tanto en estructuras de madera como en sistemas híbridos. Este estado del arte unifica las contribuciones de 40 investigaciones, abordando las principales tendencias y hallazgos en el campo.

Los arriostres de pandeo restringido (BRB) han emergido como una solución clave en la ingeniería estructural, mejorando la resistencia sísmica de diversos tipos de edificaciones. A lo largo de los últimos años, múltiples estudios han explorado sus aplicaciones, diseños e innovaciones, demostrando su eficacia tanto en estructuras de madera como en sistemas híbridos. Este estado del arte unifica las contribuciones de 40 investigaciones, abordando las principales tendencias y hallazgos en el campo.

En el ámbito de la construcción de madera y estructuras híbridas, Blomgren et al. (2016) exploraron el uso de Heavy Timber Buckling-Restrained Braced Frames en edificios comerciales, destacando su capacidad para superar las limitaciones tradicionales de altura en construcciones de madera. Ese mismo año, Gilbert (2016) desarrolló métodos para integrar madera y acero en marcos híbridos, optimizando su resistencia sísmica mediante el uso de estribos restringidos por pandeo y dispositivos de amortiguamiento por fricción. Además, propuso conexiones de varillas encoladas para unir elementos de acero y madera, promoviendo el uso de materiales sostenibles.

Posteriormente, Pit et al. (2019) mejoraron los Heavy Timber Buckling-Restrained Braces mediante la incorporación de placas preventivas, incrementando su capacidad de compresión y simplificando la construcción. En el mismo año, Resta (2019) introdujo el Timber Buckling-Restrained Brace Frame (TBRB), un sistema diseñado para evitar la transferencia de fuerzas del núcleo a la envoltura, mejorando la ductilidad y previniendo el pandeo compresivo. Las pruebas demostraron que el TBRB cumple con los requisitos de deformación bajo carga cíclica, consolidándose como una opción viable para edificaciones pequeñas.

Pantelides et al. (2020) presentaron el Mass Timber Buckling-Restrained Brace for Seismic Regions (T-BRB), un sistema que combina un núcleo de acero con revestimiento de madera masiva, mejorando la disipación de energía, la estabilidad estructural y la sostenibilidad. Las pruebas realizadas evidenciaron un comportamiento histerético estable y una capacidad superior de disipación de energía, posicionando al material MPP como el de mejor rendimiento.

Por su parte, Suzuki et al. (2020) desarrollaron un nuevo dispositivo de Buckling-Restrained Brace (BRB) para estructuras de madera de mediana altura, utilizando una placa de acero de bajo punto de fluencia integrada con madera laminada reforzada con fibra de carbono, sin necesidad de pernos. Este diseño innovador destacó por su estabilidad y eficiencia en la disipación de energía bajo cargas cíclicas.

En investigaciones más recientes, Sharp et al. (2022) evaluaron la capacidad de la madera para proporcionar soporte contra el pandeo de refuerzos de acero en sistemas híbridos. Su estudio introdujo el TBRB como una solución económica para construcciones donde la madera es el material principal, empleando pruebas uniaxiales y el protocolo AISC 341-16. Los resultados revelaron un comportamiento sísmico estable y beneficios económicos en comparación con sistemas convencionales.

Guda (2022) avanzó en el diseño de sistemas de pandeo restringido para madera masiva, aplicando elementos finitos para evaluar su viabilidad en proyectos modernos.

Además, Takeuchi et al. (2022) se enfocaron en el análisis de modos de fallo en BRBs de madera masiva bajo cargas cíclicas, desarrollando nuevos criterios de diseño para evitar inestabilidades globales y fallos locales, mejorando la seguridad estructural.

Posteriormente, Dorrance et al. (2023) abordaron las deformaciones fuera del plano en BRBs instalados en estructuras de madera, estableciendo directrices esenciales para su implementación segura en proyectos actuales.

Si bien la incorporación de materiales como la madera en los sistemas de arriostramiento restringido al pandeo (BRB) ha demostrado ser una innovación prometedora en términos de comportamiento estructural y sostenibilidad, es igualmente relevante analizar el desempeño general de estos sistemas frente a eventos sísmicos. En los últimos años, las investigaciones sobre sistemas de arriostramiento han avanzado significativamente, buscando mejorar la resistencia y resiliencia de las estructuras ante eventos sísmicos. Entre estos desarrollos se destacan los sistemas de arriostramiento restringido al pandeo (BRB) y los variantes auto-centros (SC-BRB), los cuales han demostrado un notable potencial para optimizar el comportamiento estructural en zonas de alta actividad sísmica.

Un estudio realizado por Yongxu Jin et al. (2023) analiza el rendimiento de los arriostramientos auto-centros (SC-BRB), que incorporan tecnología de pre-tensado para permitir que las estructuras recuperen su forma original tras un sismo. Mediante simulaciones en un edificio de 55 pisos y utilizando el software ABAQUS, se evaluaron indicadores clave bajo seis terremotos raros. Los resultados muestran que, en comparación con los BRB convencionales, los SC-BRB presentan una capacidad superior para reducir las deformaciones residuales y minimizar los daños estructurales, lo que los posiciona como una solución prometedora para aumentar la resiliencia sísmica de edificios altos.

Por su parte, Rafael Sabelli et al. (2006) en su investigación sobre los Buckling-Restrained Braced Frames (BRBF), destacan el desarrollo de un sistema de resistencia

sísmica que traduce la ductilidad del acero suave en un mejor desempeño estructural. Estos sistemas, diseñados específicamente para resistir cargas sísmicas, ofrecen mayor control de la respuesta estructural, optimizando la ductilidad y minimizando el pandeo de los elementos de arriostramiento. Complementando este enfoque, Shadiya, K. et al. (2015) abordan el diseño sísmico de los BRBF, destacando su eficiencia en la construcción de edificios mediante una metodología que incluye análisis experimentales, simulaciones numéricas y ejemplos prácticos. Estos estudios subrayan que los BRBF permiten una reducción del área de arriostramiento, ofrecen mayor flexibilidad y poseen un coeficiente de modificación de respuesta ( $R = 8$ ), lo que los hace ideales para zonas de alto riesgo sísmico.

En un contexto latinoamericano, M. Canales et al. (2017). desarrollaron un estudio enfocado en evaluar el rendimiento sísmico de marcos con refuerzo por pandeo restringido (BRBF) en un edificio chileno de oficinas de nueve pisos, diseñado bajo las normas sísmicas locales. Este trabajo representa un hito en la introducción de los BRBF en Chile, evaluando su desempeño frente a los marcos de refuerzo concéntrico (CBF) convencionales. La investigación destaca la necesidad de adaptar los códigos de construcción chilenos para incluir estos sistemas innovadores.

En Perú, J. Manosalva (2023) centró su investigación en el diseño de disipadores de energía tipo BRB para edificaciones residenciales en zonas sísmicas II y III. Su metodología propone integrar estos sistemas en construcciones donde las normativas actuales son limitadas, logrando una solución avanzada que mejora la disipación de energía y la protección estructural. De forma complementaria, Sánchez (2023) implementó BRB en una edificación de concreto armado de ocho niveles, evaluando su desempeño mediante modelado en ETABS bajo normas internacionales como ASCE/SEI 41-13 y FEMA 440. Este estudio demostró que los BRB ofrecen mayor rigidez, resistencia y una mejor disipación de energía durante eventos sísmicos, optimizando así la seguridad estructural.

El estudio por R. Tremblay et al. (2004) se enfoca en evaluar el rendimiento sísmico de estructuras equipadas con Buckling Restrained Braces (BRB) en comparación con los sistemas de arriostramiento de acero convencionales. Los BRB están diseñados para mejorar la estabilidad y reducir las fuerzas sobre los elementos estructurales durante eventos sísmicos, un aspecto decisivo para la seguridad en zonas propensas a terremotos. La principal innovación del estudio es la reducción de la longitud del núcleo de arriostramiento, lo que incrementa la rigidez axial del BRB y mejora su capacidad para resistir tensiones sísmicas. Esta modificación no solo optimiza el diseño de los BRB, sino que también promete una mejor respuesta estructural bajo carga sísmica, transformando potencialmente las prácticas de diseño en ingeniería estructural.

La tesis realizada por A. Orellana (2020), bajo la asesoría de Luis Antonio Zegarra Ciquero en la Pontificia Universidad Católica del Perú, se centra en la mejora de la respuesta sísmica de edificaciones en Perú mediante el uso de arriostres de pandeo restringido (BRB). Este sistema, aunque común en otros países, es relativamente nuevo en Perú. La investigación evalúa la efectividad de los BRB en comparación con el sistema tradicional de arriostres concéntricamente arriostrados (SCBF).

Así mismo, San Martín Tapia (2021) evaluó el desempeño sísmico de estructuras de acero con diagonales restringidas al pandeo mediante análisis avanzados como el pushover estático y dinámico incremental (time-history), siguiendo lineamientos de FEMA 440 y FEMA P695. Este enfoque, adaptado a las condiciones chilenas, proporciona herramientas más precisas para estimar el punto de desempeño estructural, destacando la importancia de los BRB como solución eficiente y adaptable en regiones de alta actividad sísmica.

Estas investigaciones evidencian el potencial de los BRB y SC-BRB para transformar el diseño y construcción de estructuras resistentes a sismos, ofreciendo soluciones más seguras, flexibles y sostenibles en diversos contextos normativos y geográficos.

En este sentido, el estudio de los distintos tipos de BRB (Buckling Restrained Braces) resulta fundamental para comprender los avances en el diseño y desempeño estructural. Un análisis relevante es el realizado por R. Ozcelik et al. (2020) publicado en *Steel and Composite Structures*, que aborda el diseño y evaluación de BRBs con módulos de concreto prefabricado (PCMs) como revestimiento. La innovación radica en el uso de PCMs, lo que facilita la instalación y reduce el peso de los componentes, permitiendo su manipulación sin equipos pesados. Este estudio experimental probó siete configuraciones de BRBs con PCMs sobre una placa central, evaluando su rendimiento cíclico.

Otro aporte destacado es el de A. Maurya et al. (2016) quienes investigaron el Miniature Buckling Restrained Brace (MBRB) en Virginia Tech y el Tokyo Institute of Technology. Este dispositivo compacto está diseñado para aplicaciones de menor capacidad, con un criterio de estabilidad que evita el pandeo global, siendo una solución innovadora en disipación de energía.

La investigación de J. Zhao et al. (2022) introduce el Mantenimiento Libre de Soportes de Acero-Compuesto con Restricción de Pandeo (MFSC-BRB). Este soporte combina un núcleo de acero con un tubo de polímero reforzado con fibra de vidrio (GFRP) y utiliza moldeo por infusión al vacío para lograr ligereza y bajo mantenimiento, siendo ideal para edificios altos y puentes expuestos a cargas dinámicas.

M. Reza (2017), por su parte, desarrolló una chaqueta multicapa de acero o polímeros reforzados con fibra (FRP) para reforzar miembros estructurales. Este método mejora la resistencia al pandeo de columnas y vigas, ofreciendo una solución económica y ligera sin costuras.

El trabajo de Zub (2018) se centra en la precalificación de BRBs en Rumania, combinando simulaciones numéricas y pruebas experimentales. Su objetivo es simplificar la adopción de estos dispositivos en el diseño estructural, reduciendo la necesidad de validaciones experimentales específicas.

Bahrami et al. (2020), en el Journal of Applied Engineering Science, compararon BRBFs (marcos de acero con BRBs) y EBFs (marcos excéntricamente reforzados), demostrando que los BRBFs mejoran la capacidad de carga y disipación de energía durante sismos, usando análisis con ABAQUS y registros sísmicos.

Cancelado R. (2013), evaluó riostras BRB a escala 1:4 en Colombia, utilizando materiales locales para mejorar la resistencia sísmica en edificaciones metálicas. Este análisis se enfocó en la vulnerabilidad sísmica y su aplicación práctica en la región.

En México, Guerrero H. et al. (2016), analizaron contravientos restringidos al pandeo (CRP) en un marco de acero de cinco pisos a escala 1:10, sometido a pruebas de vibración y mesa vibradora. El estudio destacó el uso de CRP como dispositivos pasivos de disipación de energía, ideales para zonas sísmicas de alto riesgo.

En un ámbito similar, Yousef-beik et al. (2020) desarrollaron un sistema de refuerzo de madera con Anti-Buckling Tubes (ABT) y un Resilient Friction Joint (RSFJ) para evitar el pandeo elástico y mejorar la capacidad de carga. Este sistema fue probado en un prototipo a escala real utilizando un actuador MTS de 250 kN.

Guerrero H. et al. (2020), también en México, presentaron un dispositivo económico de disipación sísmica, el CRP, diseñado para estructuras de mediana y baja altura, accesible para regiones con recursos limitados. Pruebas experimentales confirmaron su comportamiento histerético estable y su alta capacidad de disipación de energía.

En Colombia, Hoyos Aristizábal, D. (2014), bajo la dirección de Juan Andrés Oviedo Amézquita, desarrolló un modelo de elementos finitos para evaluar disipadores tipo riostra a escala real, superando los estándares de la NSR-10. Utilizando SimulationMechanical 2014, analizó la curva histerética fuerza-deformación para validar la metodología.

Por otro lado, Shadiya et al. (2015), mediante ANSYS, estudiaron configuraciones de BRBFs con distintos patrones de arriostramiento en marcos de cinco pisos, destacando el patrón en X en bahías adyacentes como el más eficiente en términos de esfuerzo y deformación.

Modi et al. (2019), en el *International Journal of Engineering Development and Research*, exploraron BRBs de bajo peso (LWBRB) con núcleos de aluminio, optimizando su ubicación y eficiencia para estructuras comerciales.

Luego, Ostovar, N. (2023), desarrollaron un sistema de BRB con concreto de ultra alto rendimiento (UHPFRC) y goma hiperelástica, mejorando la capacidad de carga y disipación de energía.

Mientras que Alemayehu, R. et al. (2020), por su parte, diseñaron el NOVEL BRB con un núcleo en forma de H y carcasa cuadrada, destacándose por su sostenibilidad y eficiencia.

Este panorama refleja la diversidad de enfoques y la constante innovación en el diseño y aplicación de los Buckling Restrained Braces (BRBs) para mejorar la resistencia sísmica y la eficiencia estructural. No obstante, para comprender a fondo estos avances, es crucial conocer la literatura global sobre BRBs.

En este sentido, se destacan los estudios de Hussain H. et al. (2023), publicados en la revista *Buildings*. Este trabajo aborda el desarrollo y la innovación de los BRBs en entornos corrosivos, un aspecto clave para el diseño sísmico de estructuras. A pesar de las ventajas de los BRBs, como su alta rigidez y capacidad de absorción de energía, estos enfrentan retos significativos en ambientes costeros y húmedos debido a la corrosión. La revisión sistemática de la literatura, siguiendo las directrices PRISMA, analizó estudios publicados en los últimos 15 años para identificar enfoques y materiales emergentes que puedan mejorar la resistencia a la corrosión de los BRBs. El análisis

reveló un aumento en la investigación sobre materiales anticorrosivos, destacando aleaciones de aluminio, acero inoxidable y materiales compuestos.

Por otro lado, también se encuentra la investigación realizada por Surendran N. et al. (2017), publica en el International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). Este estudio se centra en la innovación de los BRBs como sistema estructural para mejorar la resistencia sísmica de edificaciones. La investigación resalta cómo los BRBs, al superar las limitaciones de los sistemas de arriostramiento convencionales, pueden prevenir el pandeo bajo cargas de compresión. La principal innovación de los BRBs radica en su diseño, que combina un núcleo de acero con un revestimiento que evita el pandeo, permitiendo que los BRBs actúen como "fusibles estructurales". La metodología utilizada fue una revisión exhaustiva de estudios previos, experimentos y aplicaciones prácticas, comparando diferentes estudios de caso y pruebas, lo que demostró las ventajas de los BRBs, como su capacidad para disipar energía de manera estable con un comportamiento histerético simétrico.

En este mismo contexto, la investigación de Takeuchi, T. (2018), del Tokyo Institute of Technology, ofrece un análisis detallado sobre el desarrollo y las aplicaciones de los BRBs desde la década de 1970. Estos dispositivos sísmicos, que combinan un núcleo axial y un mecanismo de restricción para suprimir el pandeo, han demostrado un comportamiento histerético estable y casi simétrico. La metodología de este estudio incluye una revisión de la evolución histórica y las primeras aplicaciones en Japón, así como los requisitos de diseño para asegurar una respuesta histerética estable. Los resultados destacan que los BRBs se han implementado en más de 160 edificios en Japón desde los años 90, introduciendo conceptos innovadores como la "estructura tolerante al daño".

Finalmente, la investigación realizada por Shallan, O. et al. (2024), ofrece una revisión exhaustiva de los pernos restringidos contra el pandeo (BRB). Este estudio analiza la evolución de los BRB desde sus primeras aplicaciones en Japón hasta su adopción global. El análisis pone de relieve las mejoras en diseño y eficiencia de

componentes clave como el núcleo y el mecanismo de restricción. La metodología incluye una revisión sistemática de estudios experimentales, analíticos y teóricos, evaluando el desempeño de los BRB bajo cargas cíclicas. Los resultados indican que los BRBs superan a los sistemas de arriostramiento convencionales en términos de disipación de energía y estabilidad de las curvas de histéresis.

### 2.3 Análisis de Literatura sobre Arriostres de Pandeo Restringido (BRB)

De los 40 documentos revisados, se identificó que el 25% aborda directamente los timber BRB (Ver Figura 4). Este hallazgo es particularmente relevante, ya que la madera ofrece beneficios significativos en comparación con los materiales confinantes tradicionales, como el acero y el concreto. Entre estas ventajas destacan su bajo costo, su amplia disponibilidad en regiones con recursos limitados y sus propiedades naturales de amortiguamiento, que contribuyen a mejorar la eficiencia sísmica de las estructuras (Pantelides et al., 2020; Pit & Liu, 2018).

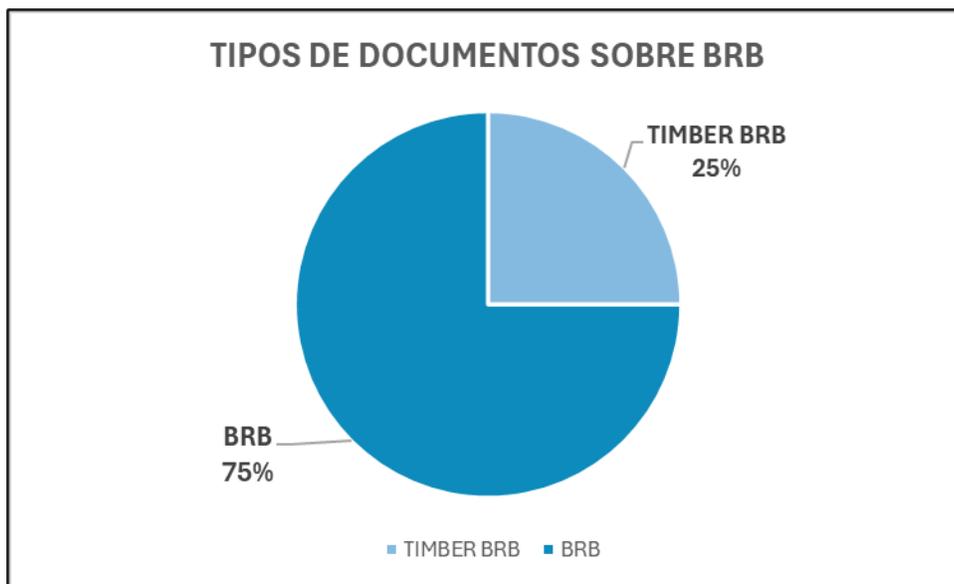


Figura 4. Porcentaje de documentos a estudiar. Fuente: Propia.

## Clasificación de la Literatura Revisada

Para organizar y facilitar el análisis, los documentos fueron clasificados en cuatro categorías principales:

1. **Estudio numérico y/o modelo numérico en elementos finitos de BRB:** Esta categoría incluye investigaciones que abordan el análisis de BRB a través de dos enfoques principales:
  - **Modelos computacionales:** Se centra en el uso de simulaciones de elementos finitos (FEM) para predecir el comportamiento de los BRB bajo condiciones de carga cíclica. Estos estudios evalúan la capacidad de disipación de energía, los modos de falla y la estabilidad del sistema bajo cargas dinámicas.
  - **Estudios analíticos:** Incluye el desarrollo de modelos matemáticos y fórmulas analíticas para describir el comportamiento del BRB, considerando parámetros como el pandeo, las propiedades del material confinante y la interacción núcleo-confinante. Estas aproximaciones analíticas permiten validar resultados experimentales y numéricos, además de optimizar diseños iniciales.
2. **Estudio experimental de BRB:** Análisis de pruebas físicas realizadas en laboratorio para evaluar el desempeño de los BRB y sus configuraciones materiales. Estos estudios verifican la respuesta histerética y la capacidad de disipación de energía de los BRB bajo cargas cíclicas.
3. **Estudio sísmico con BRB:** Evaluación del impacto de los BRB en estructuras completas bajo escenarios sísmicos, incluyendo simulaciones y experimentos en estructuras a escala. Se investigan aspectos como la reducción de desplazamientos y la mejora en la regularidad estructural.
4. **Reseñas sobre los BRB:** Revisiones integrales de la literatura que resumen tendencias, aplicaciones y desafíos en el desarrollo de BRB.

Esta clasificación proporciona una visión más clara y detallada de las áreas de investigación actuales.

### Evolución Temporal de la Investigación en BRB

Se recopiló información sobre la cantidad de documentos publicados por año para visualizar la evolución del interés en los BRB. En los últimos años, se ha observado un crecimiento notable en las publicaciones relacionadas con el desarrollo de timber BRB, impulsado por la creciente demanda de soluciones sostenibles en ingeniería estructural.

En la Figura 5 se observa la cantidad de estudios realizados por año, destacando al 2020 como el año con mayor énfasis en investigaciones experimentales sobre BRB.

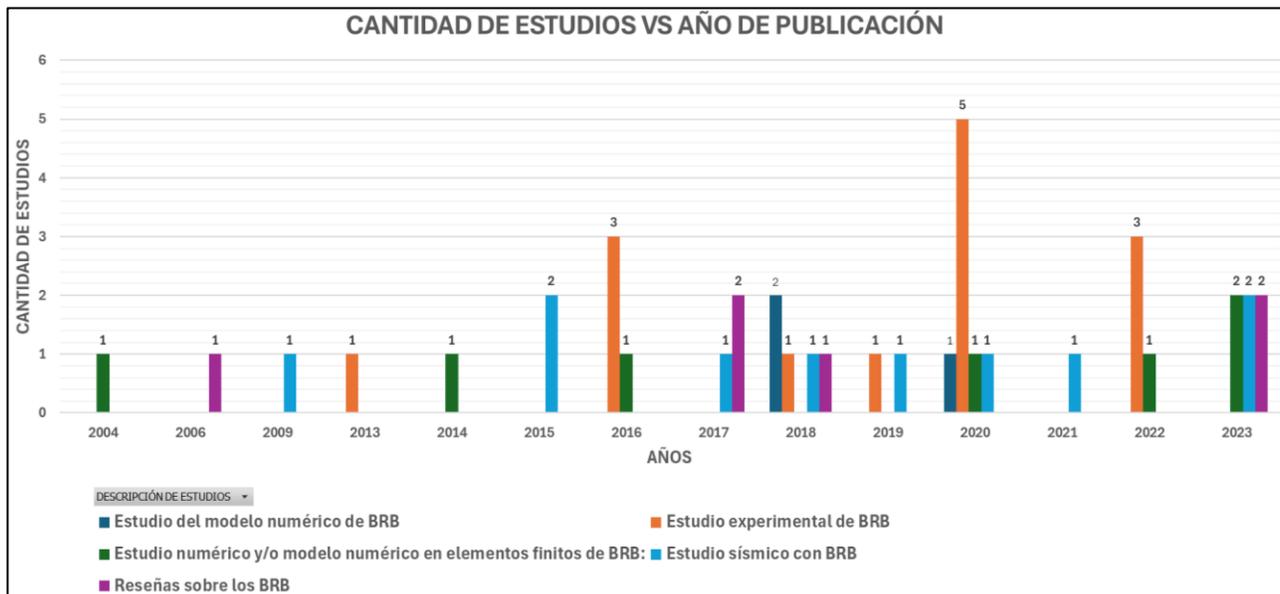


Figura 5. Cantidad de estudio por años de acuerdo con la clasificación. Fuente: Propia.

## Relevancia y Perspectivas Futuras

La revisión literaria realizada subraya la importancia de los enfoques numéricos y experimentales para avanzar en el diseño de BRB. Las simulaciones computacionales y los modelos analíticos desempeñan un papel importante al proporcionar herramientas confiables para predecir el comportamiento estructural bajo diversas condiciones. Además, los estudios experimentales complementan estos modelos, validando y refinando las propuestas iniciales.

### 2.4 Evolución y Desarrollo de los Arriostramiento de Pandeo Restringido

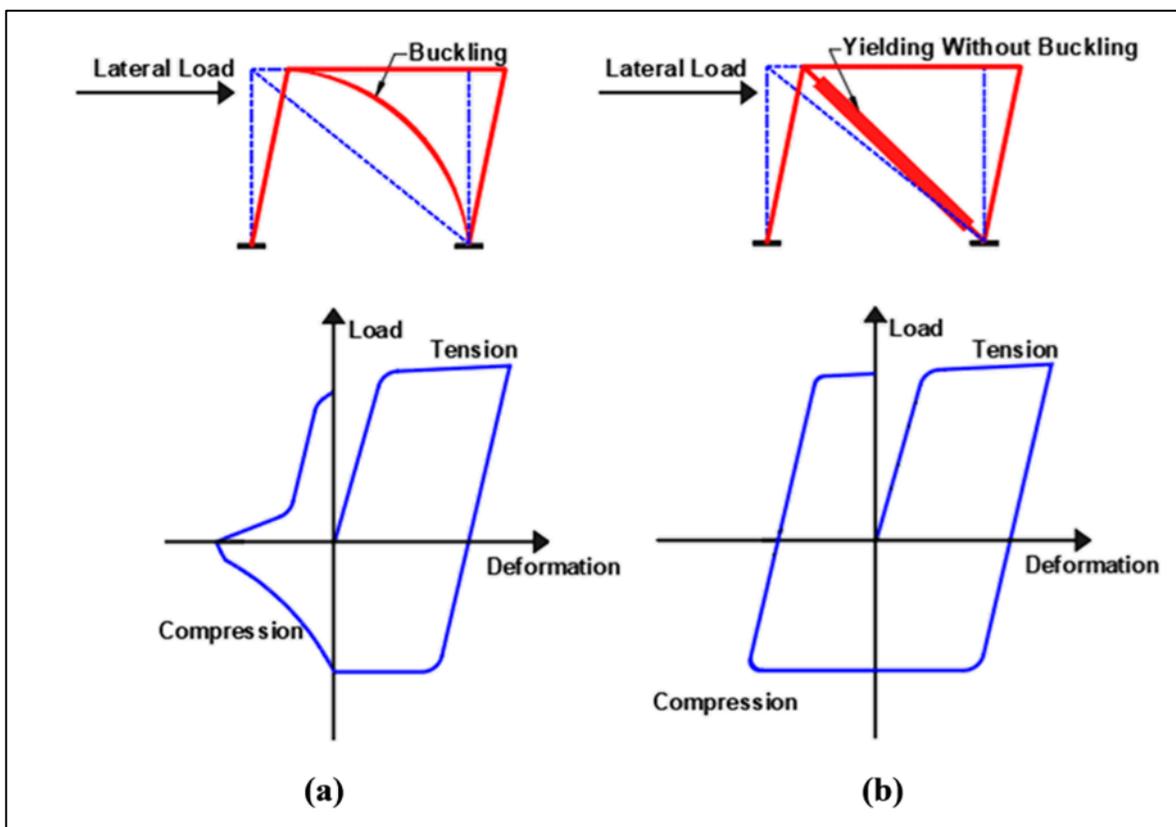
Los terremotos han representado un desafío importante para la ingeniería estructural debido a los daños que pueden causar a las edificaciones y sus ocupantes. En respuesta a este problema, se han desarrollado diversas técnicas para reducir y controlar los daños estructurales causados por movimientos sísmicos. Entre estas técnicas, destacan las estrategias de control pasivo de respuesta sísmica, que introducen elementos estructurales adicionales diseñados para disipar energía y concentrar el daño en componentes específicos de la estructura. Uno de los dispositivos más eficaces en este ámbito son los arriostramientos restringidos contra pandeo (Buckling-Restrained Braces, BRB), (Ver Figura 6), que desde su concepción en Japón durante la década de 1970, han revolucionado la protección sísmica de las edificaciones (Uang y Nakashima, 2004).



**Figura 6.** BRB en edificio. Fuente: Surendran & Varma, 2017

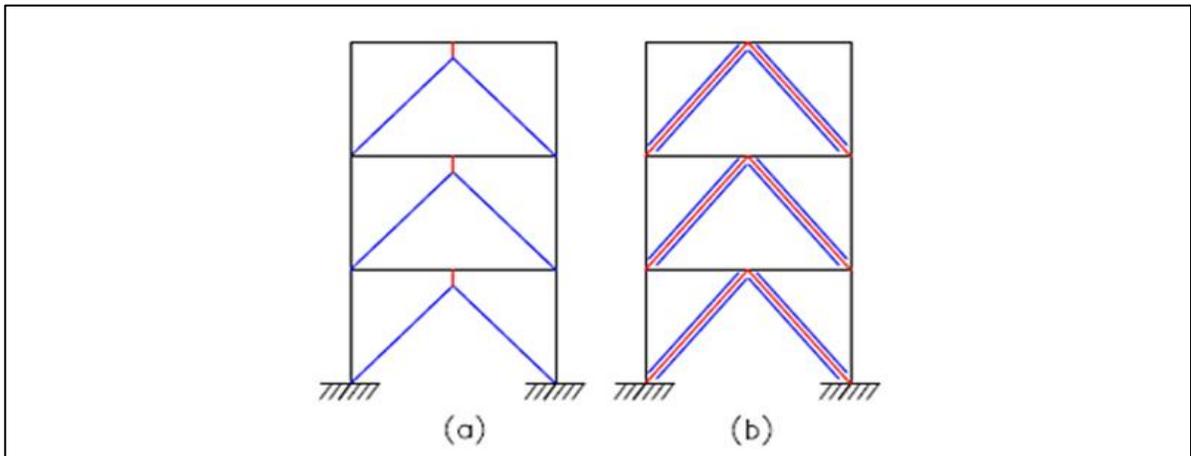
## Técnicas de Control de Respuesta Sísmica y el Surgimiento de los BRB

Las técnicas de control pasivo, como los disipadores histeréticos metálicos, han sido desarrolladas para complementar las estrategias de diseño tradicional. Estas técnicas incorporan dispositivos adicionales, como los arriostramientos de acero, que son capaces de disipar grandes cantidades de energía sísmica (Oviedo et al., 2009). En particular, los arriostramientos con pandeo restringido (BRB) surgieron como una mejora significativa frente a los sistemas tradicionales, ya que eliminan los problemas asociados al pandeo elástico bajo cargas cíclicas intensas (Black et al., 2002). Los BRB son estratégicamente colocados en la estructura para optimizar su capacidad de disipación de energía y facilitar su reemplazo en caso de deformaciones permanentes tras un evento sísmico (Ver Figura 7).



**Figura 7.** Respuesta de la riostra de acero ordinaria y BRB bajo carga lateral. Fuente: Hussain & Kim, 2023

Los primeros BRB surgieron como una evolución de los marcos arriostrados excéntricamente, donde se buscaba colocar el componente dúctil fuera de la viga, logrando combinar una alta rigidez lateral con una excelente capacidad de disipación de energía (Ver Figura 8). Este diseño no solo mejoró la seguridad estructural, sino que también permitió implementar medidas de rehabilitación y reforzamiento sin comprometer significativamente la arquitectura del edificio (Oviedo et al.,2009).



**Figura 8.** Ejemplo de marco arriostrado excéntricamente. Fuente: Crisafulli, 2012. (a) marco con riostra restringidas al pandeo, (b) con componente dúctil fuera de la viga.

### Componentes y Diseño de los BRB

Los BRB (Buckling-Restrained Braces) están diseñados para resistir tanto esfuerzos de tracción como de compresión, gracias a una configuración que evita el pandeo del sistema. Estos elementos se componen de tres partes principales: el núcleo de acero dúctil, el material confinante y la camisa de confinamiento (Ver Figura 9).

### Partes principales de un BRB

- a. **Núcleo de acero dúctil:** Es el componente interno que absorbe los esfuerzos de tracción y compresión. Está diseñado para garantizar un comportamiento histerético estable y eficiente durante eventos sísmicos. Además, el núcleo está recubierto con un material aislante que evita la interacción directa con la camisa

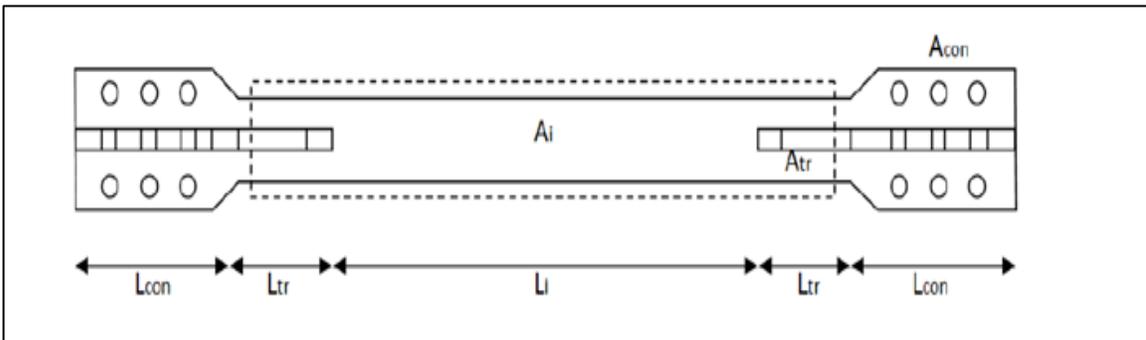
de confinamiento, lo que permite un desempeño simétrico tanto en tracción como en compresión.

El núcleo de acero se divide en tres zonas funcionales (Ver figura 10):

- i. **Zona de fluencia (LI):** Es la región donde se concentra la deformación plástica, permitiendo que el BRB opere eficientemente bajo tracción y compresión. El acero utilizado en esta zona debe ser altamente dúctil, con propiedades de fluencia consistentes entre sus valores nominales y reales.
  - ii. **Zona de transición (Ltr):** Actúa como un refuerzo para la zona de fluencia. Posee una sección transversal mayor, lo que asegura que esta región permanezca en el rango elástico durante esfuerzos sísmicos.
  - iii. **Zona de conexión (Lcon):** Constituye el punto de anclaje del BRB a la estructura. Estas conexiones, que pueden ser soldadas, apernadas o pivotantes, están diseñadas para garantizar que la deformación plástica ocurra exclusivamente en la zona de fluencia, previniendo fallas frágiles en las uniones.
- b. Material confinante:** Este material rodea al núcleo de acero y actúa como una capa intermedia entre el núcleo y la camisa de confinamiento. Su función principal es restringir el movimiento lateral del núcleo y prevenir el pandeo local, permitiendo que este desarrolle su capacidad de disipación de energía sin interferencias.
- c. Camisa de confinamiento:** Es el elemento externo que encapsula el núcleo y el material confinante, evitando el pandeo global del sistema. Gracias a esta camisa, el núcleo puede responder de manera eficiente y simétrica bajo esfuerzos de tracción y compresión, maximizando la disipación de energía durante eventos sísmicos.



**Figura 9.** Componentes de un BRB tipo. Fuente: Hussain & Kim, 2023



**Figura 10.** Sección longitudinal núcleo del BRB. Fuente: Clark, 1999

### Ventajas y Aplicaciones Modernas

Los BRB ofrecen varias ventajas sobre los sistemas tradicionales de arriostramiento, como evitar el pandeo elástico en modos bajos de compresión, garantizar un comportamiento estable en ciclos de histéresis y mejorar el desempeño estructural. Estas características permiten que las riostras controlen los desplazamientos laterales de la edificación, proporcionen rigidez adicional y concentren el daño en componentes específicos que son fácilmente reemplazables (Black et al., 2002).

A pesar de su efectividad, los BRB tradicionales presentan desafíos asociados al uso de concreto o mortero como material de confinamiento, lo que aumenta el peso del dispositivo y complica las inspecciones post-sismo. Para superar estas limitaciones, se han desarrollado configuraciones de BRB completamente de acero, que son más ligeras y fáciles de mantener (Palazzo et al., 2009). Sin embargo, en ambientes costeros o húmedos, los componentes de acero pueden ser susceptibles a la corrosión, lo que ha

llevado a la implementación de materiales alternativos como aleaciones de aluminio y acero inoxidable, así como camisas llenas con materiales innovadores (Zhao et al., 2022).

## 2.5 Tipos de Arriostramientos Restringidos contra Pandeo (BRB)

En la actualidad, los arriostramientos restringidos contra pandeo (BRB) presentan una amplia variedad de configuraciones que se diferencian principalmente por los materiales utilizados en su diseño, como el material de confinamiento, el núcleo, la capa aislante, la forma del núcleo y el tipo de conexión. La composición más común incluye un núcleo de acero, generalmente rectangular o cruciforme, confinado por mortero dentro de una sección hueca que puede ser rectangular o circular (Ver Figura 11). Aunque esta configuración implica mayores costos, tiempo de fabricación y peso, su desempeño es considerado superior en términos de disipación de energía y estabilidad estructural (Black et al., 2002; Wada et al., 2018).

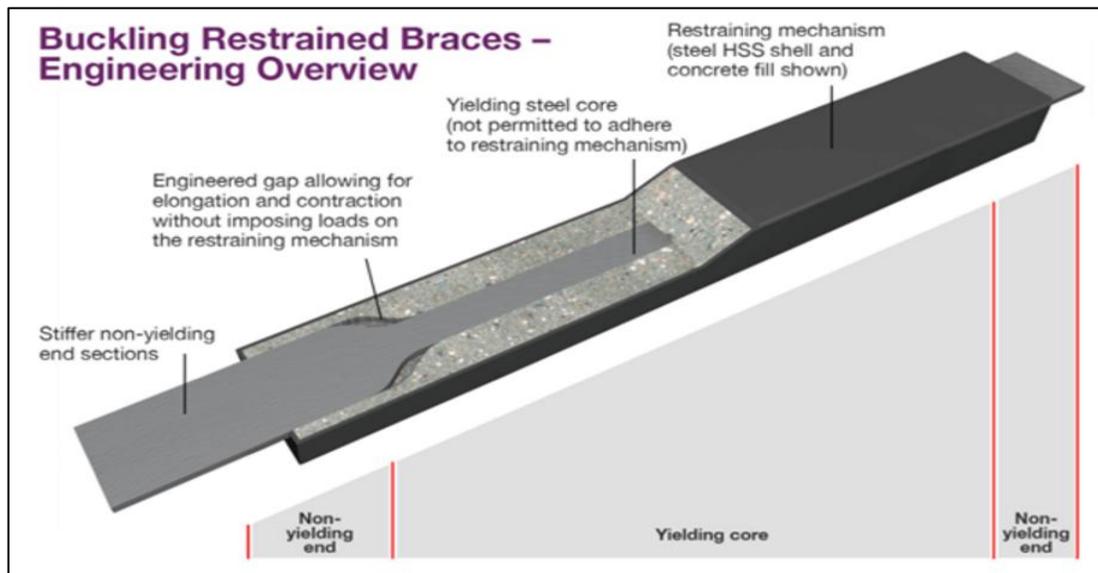


Figura 11. Composición común BRB. Fuente: Tectonus, 2022.

A lo largo del tiempo, se han propuesto diferentes variaciones en el diseño de los BRB, principalmente en el tipo de material de confinamiento y las técnicas de aislamiento. Estas

variaciones, aunque no siempre se documentan, han permitido adaptar los BRB a diversas necesidades estructurales y condiciones sísmicas (Wada et al., 2018).

### Tipos Principales de BRB

1. **BRB con sección tubular doble:** Este diseño consiste en un núcleo circular hueco confinado dentro de un segundo tubo circular, que puede ubicarse dentro o fuera del núcleo principal (Ver Figura 12). Aunque esta configuración es efectiva para prevenir el pandeo global, todavía puede presentarse pandeo local, lo que limita parcialmente su desempeño bajo cargas cíclicas intensas (Wada et al., 2018).

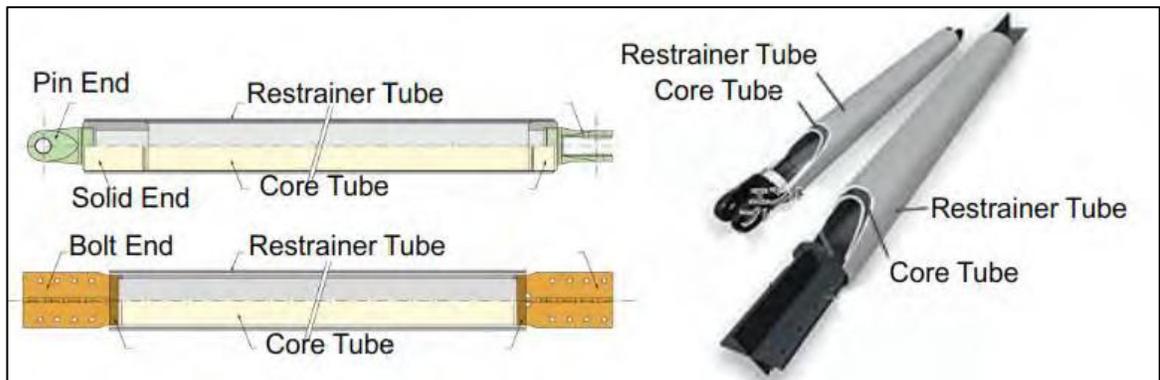
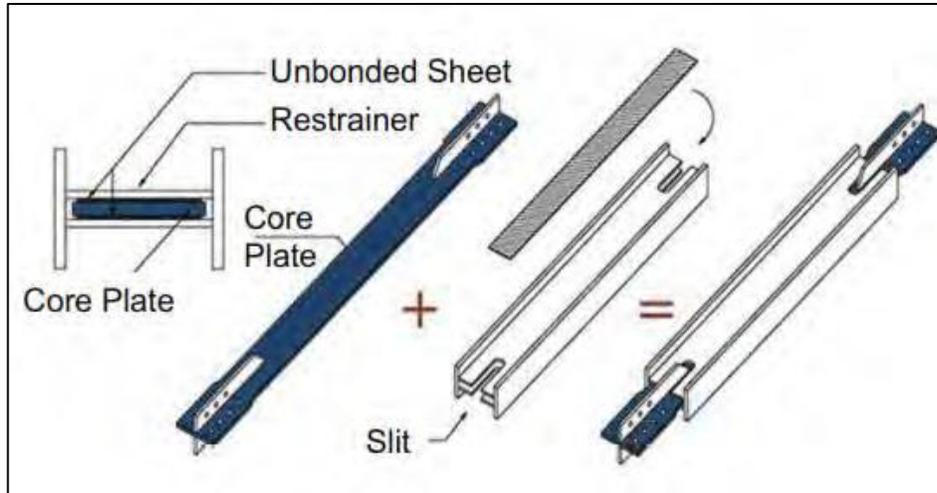


Figura 12. BRB con Sección tubular doble. Fuente: Orellana, 2020.

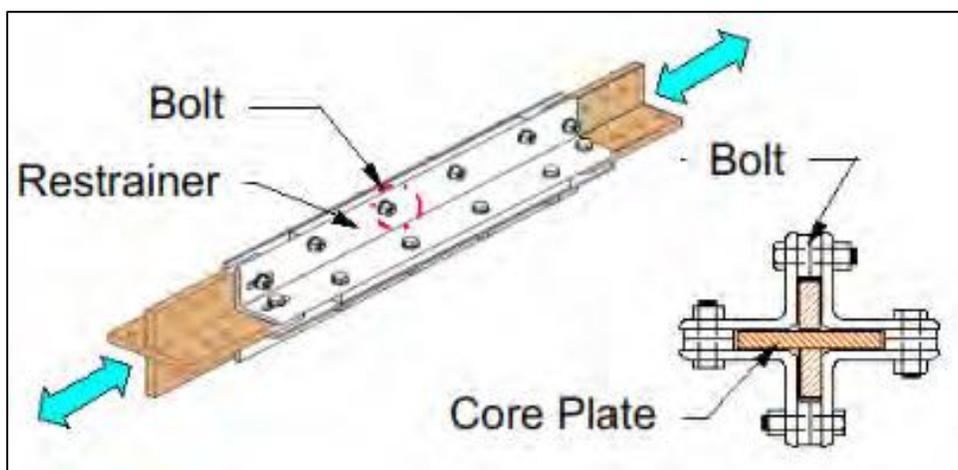
2. **BRB completamente de acero con restricción soldada:** Este diseño elimina la necesidad de mortero, lo que hace que el dispositivo sea más ligero. Sin embargo, para garantizar la rigidez a la flexión necesaria, las platinas de restricción deben ser considerablemente gruesas (Ver Figura 13). Aunque esta configuración mejora la eficiencia estructural, se enfrentan problemas como la aparición de abultamientos en el núcleo, lo que afecta su estabilidad (Wada et al., 2018).



**Figura 13.** BRB completamente de acero con restricción soldada.

Fuente: Orellana, 2020.

3. **BRB de ensamblaje en sitio:** Este diseño incorpora una camisa de confinamiento ensamblada mediante pernos ajustables, lo que facilita las inspecciones y el mantenimiento (Ver Figura 14). Aunque este enfoque simplifica el proceso de construcción, requiere un diseño cuidadoso para evitar fuerzas fuera del plano en los pernos y garantizar una transferencia adecuada de momentos en las conexiones. La estabilidad del dispositivo depende en gran medida de estas características de diseño (Wada et al., 2018).



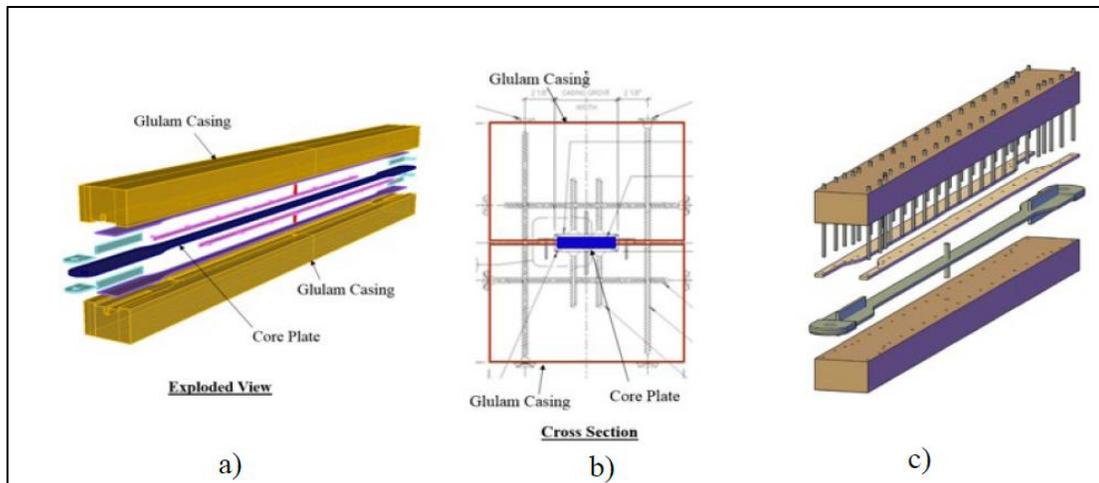
**Figura 14.** BRB de ensamblaje en sitio. Fuente: Orellana, 2020.

#### **4. Arriostramientos Restringidos contra Pandeo de Madera (TBRB)**

Una innovación destacada en el campo de los BRB es el desarrollo de los arriostramientos restringidos contra pandeo de madera (TBRB). Este sistema combina un núcleo de acero con un revestimiento de madera, proporcionando una solución sostenible y eficiente para mejorar la resistencia sísmica (Ver Figura 15). Según Pantelides et al. (2020), los TBRB no solo son efectivos en términos de disipación de energía, sino que también ofrecen ventajas económicas y ambientales frente a los sistemas tradicionales.

El diseño de los TBRB evita que las fuerzas del núcleo de acero se transfieran al revestimiento de madera, eliminando el riesgo de pandeo y mejorando la ductilidad del sistema. Esto hace que los TBRB sean particularmente adecuados para construcciones donde la madera es un material predominante, como las edificaciones tipo V (Resta et al., 2020).

Si bien el montaje de los TBRB es relativamente sencillo, su desarrollo enfrenta desafíos técnicos debido a la cantidad significativa de pernos utilizados para el anclaje del núcleo al revestimiento de madera. Estos elementos, aunque esenciales para garantizar la estabilidad y transferencia de cargas, complican los procesos de mantenimiento y reparación. La instalación masiva de pernos puede generar concentraciones de esfuerzos locales que afectan la continuidad estructural de la madera, aumentando el riesgo de degradación por factores como humedad, contracciones o expansiones naturales del material. Durante las reparaciones, estas uniones mecanizadas dificultan la intervención, ya que requieren la extracción y reinstalación precisa de los elementos de sujeción, lo que incrementa el tiempo y costo asociado al mantenimiento.



**Figura 15.** a) TBRB revestido de madera laminada con tornillos (b) Paneles de madera contrachapada masiva revestidos de BRB con pernos. Fuente: Blomgren et al., 2016, Murphy et al., 2021.

### **Ventajas de los TBRB frente a los BRB Convencionales**

Los TBRB destacan por su menor costo de fabricación, facilidad de montaje y sostenibilidad en comparación con los BRB tradicionales. Según Surendran et al. (2017), estas características hacen que los TBRB sean una opción ideal para regiones de alta sismicidad con recursos limitados. Además, su capacidad de disipación de energía y estabilidad estructural es comparable, o incluso superior, a la de los BRB convencionales, lo que refuerza su viabilidad técnica y económica.

### **2.6 Evaluación de BRB bajo el Protocolo de Carga de la AISC 341-22**

El protocolo de carga para evaluar los Buckling Restrained Braces (BRB) es un procedimiento esencial establecido por la normativa AISC 341-22, específicamente en su Capítulo K, que detalla los requisitos de diseño y comportamiento para sistemas de arriostramiento sísmico. Este protocolo tiene como objetivo validar la capacidad de los BRB para soportar cargas cíclicas, simulando las condiciones severas que podrían experimentar durante un terremoto. Su propósito principal es garantizar un comportamiento seguro y eficiente, cumpliendo con los estándares modernos de diseño sísmico (Oviedo et al., 2009).

## **Simulación de Condiciones Sísmicas**

El protocolo de carga especificado en el Capítulo K está diseñado para replicar las demandas dinámicas impuestas por eventos sísmicos. Incluye la aplicación de ciclos de carga de amplitud progresiva, los cuales simulan las fuerzas cíclicas de tracción y compresión generadas durante un terremoto. Este enfoque permite evaluar:

- Capacidad de disipación de energía: A través de deformaciones inelásticas sostenibles, los BRB pueden absorber la energía sísmica, protegiendo la estructura principal.
- Estabilidad histerética: Un comportamiento histerético estable refleja la capacidad del dispositivo para mantener su resistencia y rigidez durante múltiples ciclos de carga sin pérdida significativa de estas propiedades (Guerrero et al., 2016).

La capacidad de los BRB para evitar el pandeo bajo compresión es una de sus principales ventajas frente a los sistemas de arriostramiento convencionales. Esto asegura que el sistema pueda proporcionar una respuesta estructural confiable y estable durante y después de un evento sísmico severo (Guerrero, 2017).

## **Requisitos del Protocolo de Carga**

El Capítulo K de la AISC 341-22 (Ver Figura 16) establece las siguientes especificaciones para la evaluación de BRB:

1. Ciclos de Amplitud Controlada: Los ciclos iniciales son de baja amplitud, incrementándose progresivamente para evaluar el comportamiento del sistema desde su respuesta elástica inicial hasta su respuesta inelástica máxima (Ver figura17).

2. Cargas Alternas de Tracción y Compresión: Este requisito asegura que los BRB puedan manejar cargas en ambas direcciones sin experimentar pandeo bajo compresión ni pérdida de capacidad bajo tracción.
3. Evaluación de la Estabilidad Histerética: Los dispositivos deben demostrar un comportamiento simétrico y repetitivo en sus curvas de histéresis, indicando una disipación constante de energía y resistencia a la degradación durante los ciclos de carga.
4. Pruebas Experimentales: Los prototipos de BRB son sometidos a pruebas en laboratorios especializados, aplicando las cargas cíclicas definidas para validar su desempeño y garantizar el cumplimiento de los estándares de diseño sísmico (Apaza, 2017).

**Loading Sequence**

Loads shall be applied to the test specimen to produce the following deformations, where the deformation is the steel core axial deformation for the test specimen and the rotational deformation demand for the subassembly test specimen brace:

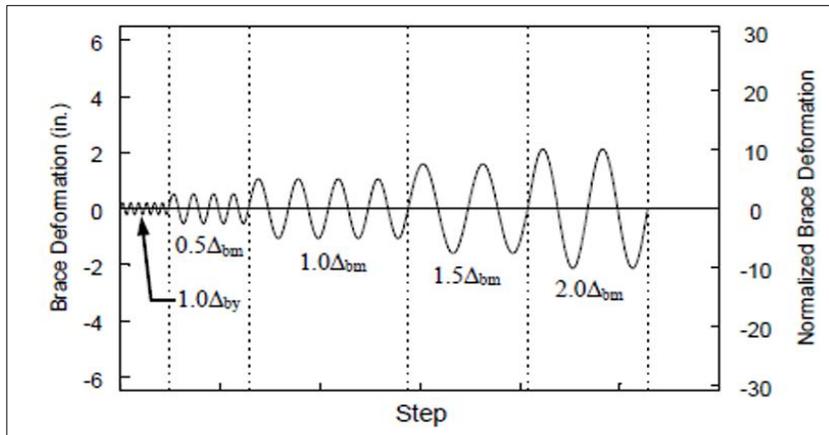
- (a) 2 cycles of loading at the deformation corresponding to  $\Delta_b = \Delta_{by}$
- (b) 2 cycles of loading at the deformation corresponding to  $\Delta_b = 0.50 \Delta_{bm}$
- (c) 2 cycles of loading at the deformation corresponding to  $\Delta_b = 1.0 \Delta_{bm}$
- (d) 2 cycles of loading at the deformation corresponding to  $\Delta_b = 1.5 \Delta_{bm}$
- (e) 2 cycles of loading at the deformation corresponding to  $\Delta_b = 2.0 \Delta_{bm}$
- (f) Additional complete cycles of loading at the deformation corresponding to  $\Delta_b = 1.5 \Delta_{bm}$ , as required for the brace test specimen to achieve a cumulative inelastic axial deformation of at least 200 times the yield deformation (not required for the subassembly test specimen)

where

$\Delta_{bm}$  = value of deformation quantity,  $\Delta_b$ , at least equal to that corresponding to the design story drift, in. (mm)

$\Delta_{by}$  = value of deformation quantity,  $\Delta_b$ , at first yield of test specimen, in. (mm)

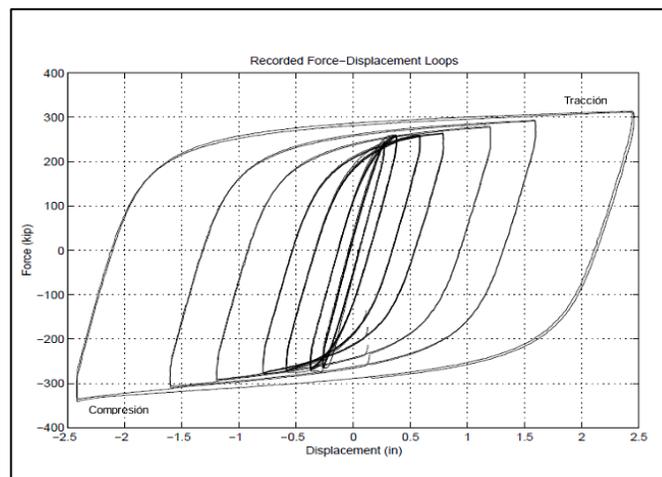
**Figura 16.** Secuencia de carga. Fuente: AISC 341,22



**Figura 17.** Protocolo de carga AISC 341 Capitulo K. Fuente: Morral,2015

### Validación Mediante Simulaciones Numéricas

Además de las pruebas físicas, la normativa enfatiza la importancia de las simulaciones numéricas como complemento esencial. Estas simulaciones, desarrolladas mediante modelos de elementos finitos, permiten predecir el comportamiento de los BRB bajo diversas condiciones de carga (Ver Figura 18). Asimismo, facilitan la optimización del diseño antes de las pruebas experimentales, evaluando parámetros clave como la relación de esbeltez del núcleo y las propiedades del material confinante (Guerrero et al., 2016).



**Figura 18.** Ciclo de histéresis riostra con pandeo restringido. Fuente: Morral, 2015.

## **2.7 Madera como Material Confinante en los Buckling Restrained Braces (BRB)**

El uso de la madera como material confinante en los Buckling Restrained Braces (BRB) es un enfoque innovador en la ingeniería estructural que combina sostenibilidad y eficiencia. La madera, especialmente en sus formas procesadas como la madera laminada o la madera masiva procesada (MPP), ha demostrado ser una opción viable para reemplazar materiales confinantes tradicionales como el acero y el concreto. Este material presenta propiedades mecánicas adecuadas, un costo reducido y una menor huella ambiental, posicionándolo como una alternativa atractiva en el diseño de BRB (Pantelides et al., 2020; Suzuki et al., 2020).

Entre las propiedades más relevantes de la madera como material confinante, destaca su resistencia a la compresión paralela a la fibra, que varía entre 20 y 45 MPa dependiendo de la especie y del procesamiento. Aunque su resistencia a la compresión perpendicular a la fibra es menor, entre 2 y 4 MPa, esto puede gestionarse mediante diseños que distribuyan adecuadamente las cargas. Además, la madera tiene un módulo de elasticidad longitudinal de 9 a 13 GPa, lo que le confiere la rigidez necesaria para funcionar como confinante en los BRB. Su densidad, que oscila entre 500 y 750 kg/m<sup>3</sup>, la hace significativamente más ligera que el concreto o el acero, reduciendo el peso total de la estructura y facilitando el transporte y la instalación. Otro atributo clave es su capacidad de amortiguamiento natural, que contribuye a reducir las vibraciones, mejorando así el comportamiento sísmico de las estructuras equipadas con BRB (Pantelides et al., 2020; Guerrero, 2017).

El uso de la madera como confinante en BRB ofrece múltiples ventajas. En primer lugar, su bajo costo y amplia disponibilidad, especialmente en regiones forestales, la convierten en una opción económica y accesible. La madera también es fácil de procesar y ensamblar, lo que reduce los costos y tiempos de construcción. Además, su sostenibilidad ambiental es un factor crucial: como material renovable, la madera tiene una huella de carbono significativamente menor que el concreto o el acero, y su capacidad de almacenar carbono durante su vida útil contribuye a mitigar el cambio

climático. La compatibilidad de la madera con estructuras predominantemente de este material, como las edificaciones de madera de mediana altura, refuerza su atractivo en términos de estética y homogeneidad (Resta & Dong, 2020; Suzuki et al., 2020).

Sin embargo, la madera también presenta limitaciones que deben considerarse. Su susceptibilidad a la absorción de humedad puede afectar sus propiedades mecánicas y su durabilidad, aunque este problema puede mitigarse con tratamientos protectores y recubrimientos. Otra desventaja es su menor resistencia a la compresión perpendicular a la fibra en comparación con el concreto o el acero, lo que requiere diseños cuidadosos para garantizar su efectividad. Además, la madera es inflamable, aunque los tratamientos ignífugos pueden reducir significativamente este riesgo. Finalmente, la madera puede experimentar deformaciones diferidas bajo cargas sostenidas (creep), lo que puede impactar su rendimiento a largo plazo (Pantelides et al., 2020; Guerrero et al., 2016).

Estudios experimentales han demostrado que los Timber BRB (TBRB) equipados con madera masiva como confinante tienen un desempeño sobresaliente. Por ejemplo, las curvas de histéresis obtenidas en pruebas realizadas por Pantelides et al. (2020) muestran una disipación de energía estable y una resistencia sostenida durante múltiples ciclos de carga. Estos resultados evidencian que los TBRB con madera masiva laminada mecanizada (glulam) son comparables, e incluso superiores en algunos casos, a los BRB convencionales en términos de estabilidad estructural y eficiencia energética. Adicionalmente, el costo de fabricación de los TBRB puede ser entre un 30% y 50% menor que el de los sistemas tradicionales de concreto o acero (Pantelides et al., 2020; Suzuki et al., 2020).

El uso de madera como material confinante es particularmente atractivo en proyectos que buscan promover la sostenibilidad y en regiones con recursos limitados. En construcciones de mediana altura o en edificaciones predominantemente de madera, los TBRB no solo mejoran el desempeño sísmico, sino que también reducen los costos asociados y facilitan la implementación de sistemas de arriostramiento avanzados. Sin embargo, para maximizar su potencial, es esencial combinar su uso con diseños

optimizados y tratamientos que mitiguen sus limitaciones, como la vulnerabilidad a la humedad y el fuego (Pantelides et al., 2020; Resta & Dong, 2020; Guerrero et al., 2016).

La propuesta de arriostramiento de pandeo restringido que se presenta en esta investigación, se plantea el empleo de madera como material de confinamiento para el núcleo de acero, destacando sus ventajas y la accesibilidad en la región. Para mitigar las desventajas asociadas a la madera, se propone incorporar una camisa de acero conformada por un perfil tubular de 200x200 mm. Este elemento actúa como encofrado para la madera, eliminando la necesidad de instalar pernos, los cuales representan una de las principales limitaciones en los TBRB convencionales, donde la instalación excesiva de pernos puede generar concentraciones de esfuerzo que derivan en fallas localizadas en la madera.

El uso del encamisado de acero aborda de manera efectiva los problemas característicos de la madera, como la susceptibilidad a la humedad y la baja resistencia a la compresión perpendicular a la fibra, entre otros.

La propuesta de BRB tiene como objetivo optimizar los procesos de fabricación, instalación y mantenimiento futuro. En comparación con los BRB tradicionales, esta solución se presenta como una alternativa más eficiente, al reducir el tamaño, los costos y la complejidad en la instalación.

## **CAPITULO III: METODOLOGÍA**

### 3.1 Enfoque Metodológico

La presente investigación se llevará a cabo bajo un **enfoque cuantitativo**, basado en simulaciones numéricas y análisis estructurales. El objetivo principal es evaluar el desempeño y la viabilidad de un nuevo arriostre de pandeo restringido (BRB) como solución para la protección sísmica de estructuras, especialmente en construcciones de menor escala.

El estudio también incluye un análisis analítico preliminar basado en ecuaciones clásicas de pandeo crítico, como las formuladas por Euler, para comprender y validar los fenómenos estructurales observados en los modelos computacionales.

### 3.2 Tipo de Investigación

La investigación se clasifica como:

1. **Descriptiva:** Caracteriza los parámetros fundamentales del BRB, como sus propiedades histeréticas y su capacidad de disipación de energía.

En una primera etapa, se realizará un análisis numérico utilizando elementos finitos en ANSYS R1 2023 para evaluar las propiedades mecánicas del BRB. Posteriormente, se llevará a cabo un análisis estructural comparativo en SAP2000 utilizando la técnica de **Pushover** en un conjunto de marcos de hormigón armado, modelados con diferentes configuraciones geométricas. Los resultados permitirán identificar las ventajas en términos de capacidad estructural y formación de rótulas plásticas.

### **3.3 Métodos y Técnicas**

Para alcanzar los objetivos, se emplearán los siguientes métodos y herramientas:

#### **Diseño y modelado del BRB:**

1. Software empleado: AutoCAD 3D para la representación geométrica inicial del dispositivo.

#### **Simulaciones numéricas:**

2. Software empleado: ANSYS R1 2023.

Parámetros analizados en el modelo de elementos finitos:

- Deformaciones plásticas, elásticas y esfuerzos elástico del núcleo de acero.
- Esfuerzos normales y deformaciones en la madera confinante.
- Análisis cíclico para evaluar la respuesta histerética del BRB bajo cargas definidas por la AISC 341-22.

3. Software empleado: SAP2000.

- Tipo de análisis: Estático no lineal
- Técnica aplicada: Análisis Pushover para determinar las curvas de capacidad y la formación de rótulas plásticas en marcos de hormigón armado con y sin el BRB.

#### **Normativas aplicadas:**

- AISC 341-22
- AISC 360-22 para el diseño del BRB.
- ACI 318-19 para el diseño del hormigón armado.
- NCh 1198 of 2014 - Madera - Construcciones en madera – Cálculo.
- NCh 2369 of 2003 - Diseño sísmico de estructuras e instalaciones Industriales.

- ASCE 41-23 - Evaluación Sísmica y Rehabilitación de Edificios Existentes.

### **3.4 Población y Muestra**

La población simulada corresponde a estructuras representativas de construcciones de menor escala en Chile, como viviendas habitacionales, industriales y comerciales. La muestra se define como un conjunto de marcos rígidos de hormigón armado, diseñados con dimensiones y características que permitan analizar el impacto del BRB bajo condiciones sísmicas.

#### **1. Características de la muestra:**

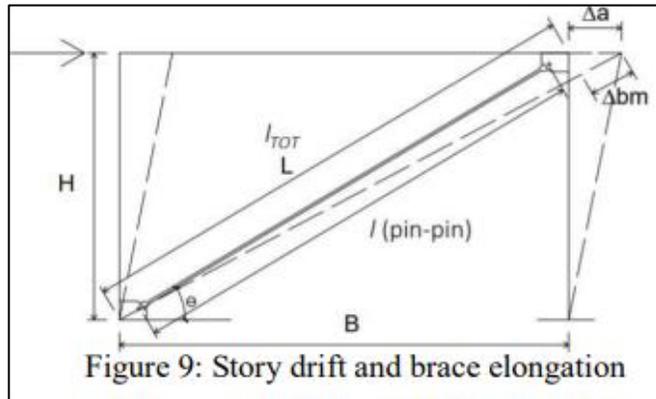
- Pilares de hormigón armado con sección de 40 cm x 40 cm.
- Vigas de hormigón armado con sección de 40 cm x 30 cm.
- Altura del piso: 3 metros.
- Longitud de vano: 4 metros.

#### **2. Configuraciones geométricas:**

- Diez esquemas estructurales diferentes:
  - Marcos con 1, 2, 3, 4 y 5 vanos, cada uno en configuraciones de uno y dos pisos.
- Estas configuraciones representan estructuras de menor escala comunes en contextos habitacionales e industriales.

### 3.5 Procedimiento

Primero, se analiza el protocolo de desplazamiento establecido en la normativa AISC 341-22, específicamente en su Capítulo K. Este análisis tiene como objetivo determinar las dimensiones del marco objeto de estudio, lo que permite calcular la longitud del arriostamiento restringido contra pandeo (BRB). (Ver Figura 19).



**Figura 19.** Deriva y alargamiento de la riostra.  
Fuente: Resta, 2019

Se define las variables H (altura) y B (largo) con el objetivo de encontrar el largo del BRB que será estudiado (Ver Tabla 1).

**Tabla 1:** Dimensiones del marco y BRB para estudio.

H	3000	mm
B	4000	mm
L	5000	mm

Fuente: Propia.

#### 3.5.1 Requisitos de Desplazamiento Lateral

En el análisis del marco propuesto, con dimensiones de 3 m de altura, 4 m de largo y una riostra de 5 m de longitud, se establecen los requisitos de desplazamiento lateral específicamente para la riostra, conforme a la normativa AISC 341, la cual regula el comportamiento de los arriostamientos restringidos contra pandeo (BRB). El arquetipo evaluado es representativo de una edificación, pero los límites normativos establecidos en la NCh 433 of 2009 se basan en derivas elásticas, lo que limita su aplicabilidad en

sistemas que trabajan en el rango inelástico, como los arriostramientos restringidos contra pandeo (BRB). Por este motivo, se optó por utilizar la NCh 2369 of 2003, diseñada para instalaciones industriales, ya que esta norma contempla deformaciones inelásticas y establece límites específicos para desplazamientos no lineales. La NCh 2369 of 2003 indica que los desplazamientos máximos calculados en análisis no lineal no deben ser reducidos y deben cumplir con los límites definidos en el apartado 6.3. Dicho apartado establece que, para otras estructuras, la deformación máxima permitida es  $0.015 \cdot H$ , siendo  $H$  la altura de la estructura evaluada. Esta deformación es utilizada en el análisis debido a la inclusión del sistema BRB, lo que garantiza una evaluación adecuada de su desempeño. Alternativamente, también podría considerarse el uso de la ASCE 7, que ofrece un enfoque similar para estructuras sometidas a demandas sísmicas en el rango inelástico.

A continuación, se describe la metodología utilizada para elaborar el protocolo de carga propuesto, conforme a lo establecido en el capítulo K de la norma **AISC 341-22**, aplicado específicamente al diseño del sistema de arriostramiento restringido contra pandeo (BRB).

## 1. Desplazamiento Lateral de Diseño

El desplazamiento lateral de diseño  $\Delta_d$ , se define como:

$$\Delta_d = 0.015 \cdot H$$

Calculando para  $H = 3m$ :

$$\Delta_d = 0.015 \cdot 3 = 0.045m = 45 \text{ mm}$$

## 2. Deformación de la Riostra Basada en el Desplazamiento Lateral de Diseño

La deformación de la riostra,  $\Delta_{bm}$ , se determina utilizando trigonometría, considerando la teoría de pequeños ángulos:

$$\Delta_{bm} = \Delta_d \cdot \cos \theta$$

Donde el ángulo  $\theta$  se calcula en función de las proporciones del marco. Para una altura de 3 m y un largo de 4 m, el ángulo se obtiene como:

$$\theta = \arctan\left(\frac{H}{L}\right) = \arctan\left(\frac{3}{4}\right) = 36.87^\circ \approx 37^\circ$$

Por lo tanto,  $\cos \theta = \cos 37^\circ \approx 0.8$ . Sustituyendo:

$$\Delta_{bm} = 0.045 \cdot 0.8 = 0.036m = 36mm$$

## 3. Cálculo del Desplazamiento en el Punto de Fluencia

Para realizar el análisis de comportamiento del arriostramiento restringido contra pandeo (BRB), es fundamental disponer de las propiedades mecánicas del material que estará sometido al patrón de carga cíclica. En este caso, el acero utilizado es un A36, cuyas propiedades son:

- **Límite de fluencia ( $f_y$ ):** 250 MPa
- **Módulo de elasticidad ( $E$ ):** 250 MPa

La deformación unitaria en el punto de fluencia se calcula como:

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E}$$

Sustituyendo los valores:

$$\varepsilon_y = \frac{250}{200.000} = 0.00125$$

El desplazamiento en el punto de fluencia de la riostra  $\Delta_{by}$ , se determina multiplicando esta deformación unitaria por la longitud de la riostra, que en este caso es de 5 m:

$$\Delta_{by} = \varepsilon_y \cdot L$$

Sustituyendo:

$$\Delta_{by} = 0.00125 \cdot 5 = 0.00625 \text{ m} = 6.25 \text{ mm}$$

Este valor de desplazamiento corresponde a la cantidad de deformación alcanzada cuando el acero llega a su límite elástico bajo las condiciones del patrón de carga.

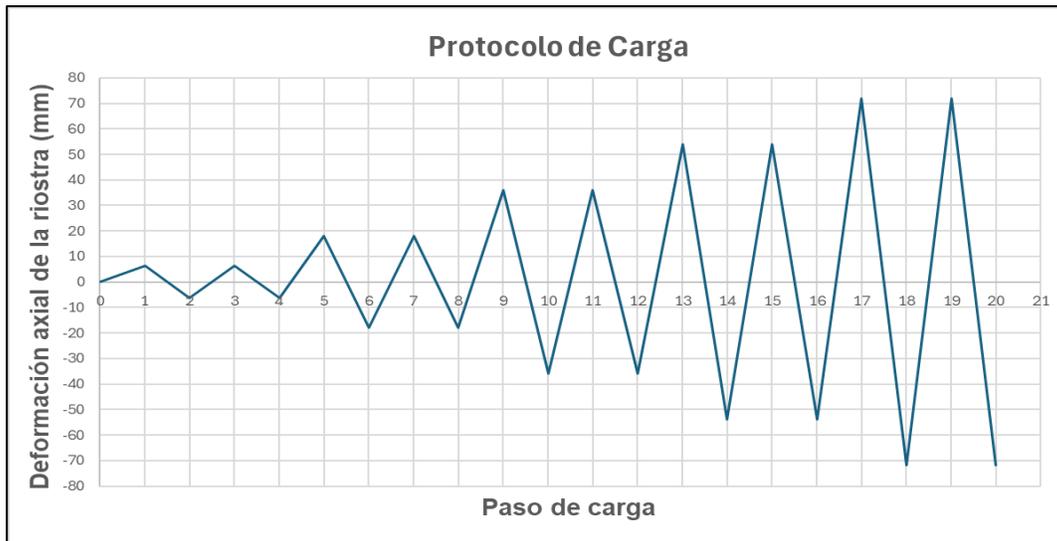
### 3.5.2 Secuencia de Carga

Las cargas deben aplicarse a la muestra de prueba para producir las siguientes deformaciones, donde la deformación corresponde a la deformación axial del núcleo de acero en la muestra de prueba y a la demanda de deformación rotacional en la riostra de la subestructura de prueba:

- (a) 2 ciclos de carga a la deformación correspondiente a  $\Delta_b = \Delta_{by}$
- (b) 2 ciclos de carga a la deformación correspondiente a  $\Delta_b = 0.5\Delta_{bm}$
- (c) 2 ciclos de carga a la deformación correspondiente a  $\Delta_b = 1.0\Delta_{bm}$
- (d) 2 ciclos de carga a la deformación correspondiente a  $\Delta_b = 1.5\Delta_{bm}$
- (e) 2 ciclos de carga a la deformación correspondiente a  $\Delta_b = 2.0\Delta_{bm}$

(f) Ciclos completos adicionales de carga a la deformación correspondiente a  $\Delta_b = 1.5\Delta_{bm}$ , según lo requerido para que la muestra de prueba de la riostra alcance una deformación inelástica acumulativa.

En la figura 20 se observa el protocolo de desplazamiento a utilizar para este estudio.



**Figura 20.** Protocolo de desplazamiento para riostra en estudio según AISC 341-22.  
Fuente: Propia.

Es importante destacar que la deformación de rotura del núcleo de acero está lejos de alcanzarse, ya que la deformación unitaria calculada es de 0.0144, lo que es considerablemente menor que la deformación de rotura del núcleo de acero, que es de 0.1. Esto indica que el sistema se encuentra operando dentro de un rango seguro y aún lejos del límite de rotura según lo establecido en el protocolo de carga del AISC 341-22, Capítulo K.

### 3.5.3 Consideraciones analíticas

Con el propósito de evitar la aparición de fluencia en la zona de conexión del núcleo de acero dúctil y garantizar que tanto el pandeo como la plastificación se concentren en la región diseñada para la fluencia del núcleo, se utilizaron los criterios de diseño para elementos traccionados y elementos sometidos a compresión, conforme a lo estipulado en el AISC 360. A continuación, se detallan las ecuaciones empleadas:

### 1. Ruptura en tracción en la sección neta:

$$P_n = F_u \cdot A_e$$

Siendo:

$F_u$ : Resistencia última a la tracción del material.

$A_e$ : Área neta efectiva.

### 2. Fluencia en tracción en la sección bruta:

$$P_n = F_y \cdot A_g$$

Siendo:

$F_y$ : Resistencia de fluencia del material.

$A_g$ : Área bruta.

### 3. Resistencia nominal a compresión:

$$P_n = F_{cr} \cdot A_g$$

Siendo:

$F_{cr}$ : Carga crítica de Euler.

$A_g$ : Área bruta.

### 4. Resistencia de aplastamiento nominales:

$$P_n = 1.8 \cdot F_y \cdot A_{pb}$$

Siendo:

$F_y$ : Resistencia de fluencia del material.

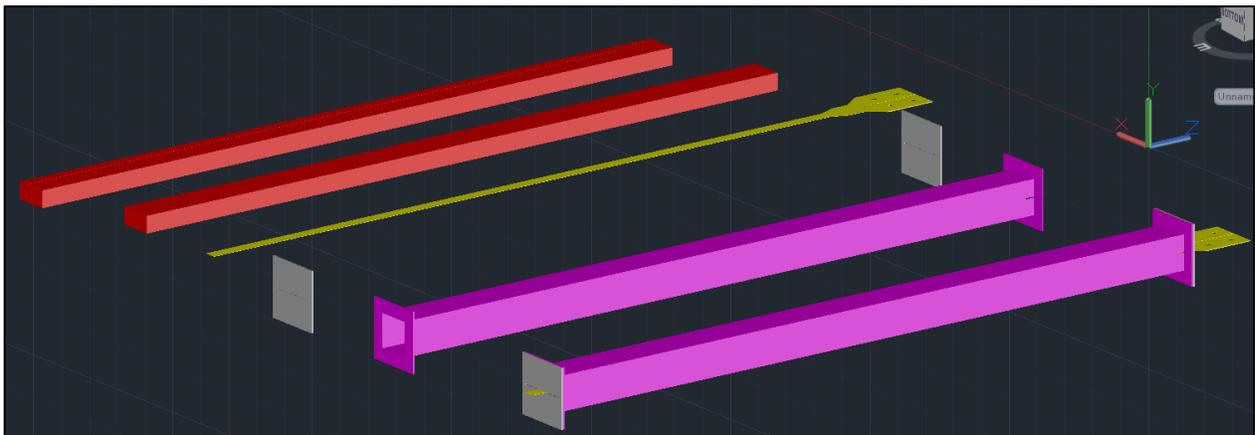
$A_{pb}$ : área proyectada del apoyo.

### 3.5.4 Modelo numérico de elementos finitos

Para comprender el desempeño de un arriostramiento con pandeo restringido (BRB) que combina un núcleo de acero delgado y madera como material confinante, se requiere un análisis detallado empleando herramientas numéricas sofisticadas. En este trabajo, se utilizó el software Ansys R1 2023 para modelar de manera no lineal la interacción entre ambos materiales. El estudio se centró en evaluar cómo la madera y el acero trabajan en conjunto, considerando las propiedades de fricción en su contacto. Se analizaron dos escenarios: uno donde la adherencia entre los materiales es elevada y otro donde es mínima, con el objetivo de comprender el impacto de estas condiciones en el comportamiento general del sistema y su estabilidad frente a cargas.

#### 3.5.4.1 Geometría modelo 3D

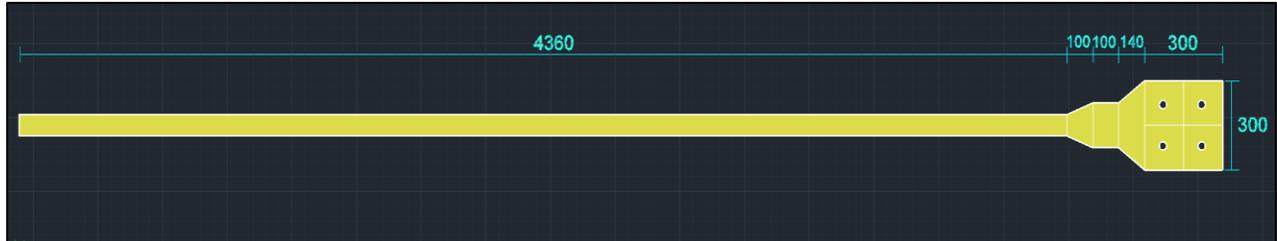
El modelo planteado fue construido empleando elementos sólidos tridimensionales mediante el uso de AutoCAD 3D (Autodesk, n.d.). Los cuerpos principales que conforman esta propuesta de riostra de pandeo restringido están constituidos por seis elementos, representados esquemáticamente en la Figura 21.



**Figura 21.** Elementos sólidos tridimensionales de la propuesta BRB en AutoCAD 3D.

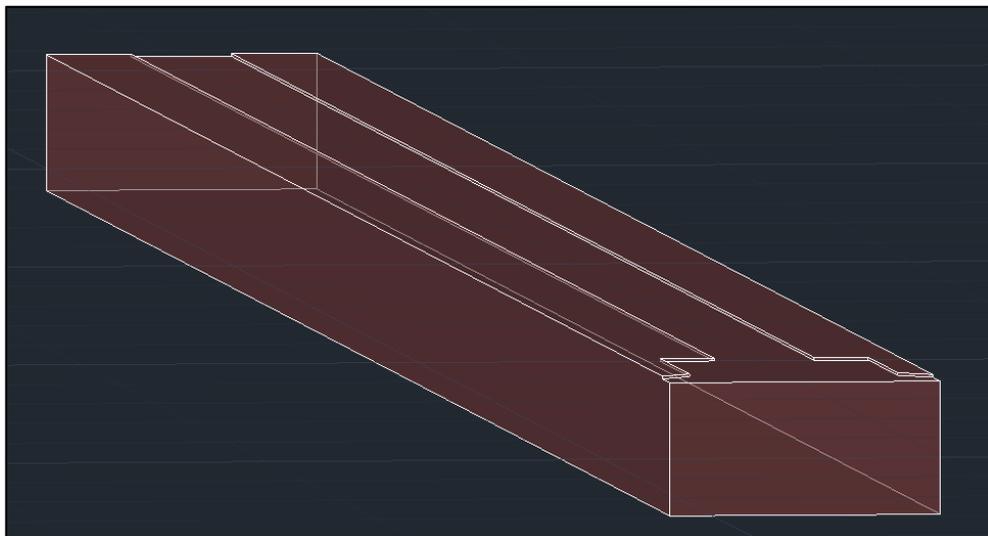
Fuente: Propia.

El núcleo de acero de la BRB se diseñó a partir de una plancha comercial rectangular con un espesor de 2 mm, cuya configuración y dimensiones específicas se detallan en la Figura 22.



**Figura 22.** Dimensiones de propuesta de núcleo de acero dúctil. Fuente: Propia.

Este núcleo se encuentra confinado entre dos piezas de madera de pino radiata GS, cuyas dimensiones son de 200 x 100 mm, seleccionadas conforme a las especificaciones de la norma chilena NCh 1198 of 2014 (INN,2014). Estas piezas presentan un calado interno diseñado para alojar el núcleo metálico, tal como se ilustra en la Figura 23.

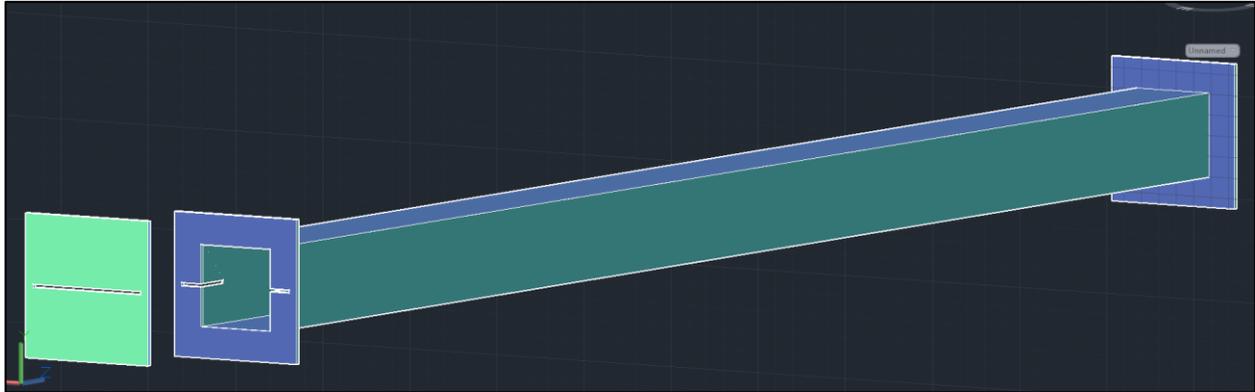


**Figura 23.** Madera como materia confinante con calado al interior.

Fuente: Propia

Para garantizar la estabilidad del conjunto, las piezas de madera están encapsuladas en una camisa de acero que consiste en un perfil tubular cuadrado comercial. En sus extremos, esta camisa está soldada a una placa de acero de 10 mm de espesor, a la cual se fija posteriormente una placa adicional de acero con dimensiones

de 350 x 350 mm y un espesor también de 10 mm, con el propósito de asegurar el encajonado de la madera dentro del perfil tubular, evitando su desplazamiento (véase Figura 24).



**Figura 24.** Encamisado de acero con placa de cierre. Fuente: Propia.

En este modelo, se consideró dibujar únicamente la zona de conexión y la de transición del arriostramiento en uno de los lados del BRB. Esta decisión fue tomada con el propósito de estudiar estas áreas específicas donde pudieran presentarse concentración de tensiones por los agujeros y, al mismo tiempo, evitar problemas de convergencia numérica durante los cálculos. Las propiedades geométricas de la riostra de pandeo restringido están resumidas en la Tabla 2, facilitando su evaluación en las diferentes áreas de interés.

Una vez completado el diseño del BRB en AutoCAD, el modelo fue exportado en formato .iges para ser posteriormente importado y analizado en Ansys R1 2023, donde se desarrollaron los estudios correspondientes.

### **3.5.4.2 Leyes constitutivas de los materiales**

#### **Acero:**

La ley constitutiva del material que describe el comportamiento no lineal del acero se representa mediante una curva bilineal con endurecimiento isotrópico. El endurecimiento isotrópico implica un aumento uniforme de la resistencia del material en todas las direcciones a medida que se acumulan deformaciones plásticas. Este modelo no captura el efecto Bauschinger, que se refiere a la reducción de la resistencia bajo ciclos de carga y descarga.

Por otro lado, el endurecimiento cinemático bilineal es más adecuado para simular este efecto, ya que permite que la superficie de fluencia se desplace en el espacio de tensiones, capturando el comportamiento no simétrico bajo ciclos de carga y descarga. Sin embargo, este modelo presenta desafíos en términos de convergencia numérica y complejidad computacional, lo que lo hace más difícil de implementar y, en algunos casos, inestable.

Uno de los principales factores que contribuye a los problemas de convergencia numérica al usar el modelo cinemático es el mallado, que no fue adecuado en términos de la calidad y resolución necesarias para este tipo de análisis. Además, los elementos no estaban bien restringidos, lo que también afectó negativamente la estabilidad y la convergencia de las simulaciones.

Por lo tanto, aunque el endurecimiento isotrópico bilineal no captura de manera precisa el efecto Bauschinger, se ha seleccionado debido a su simplicidad computacional y su capacidad para aproximar el comportamiento del material bajo condiciones cíclicas, asegurando una mejor estabilidad en las simulaciones sin comprometer significativamente la precisión del modelo. Además, debido al confinamiento del núcleo de acero, se espera que no se produzcan grandes deformaciones en el comportamiento tracción-compresión del material, lo que permite utilizar el modelo isotrópico. El material seleccionado para el modelo es acero ASTM A36, cuyas propiedades, basadas en las propiedades nominales de catálogo no experimentales, incluyen:

- Tensión de fluencia ( $F_y$ )
- Tensión última ( $F_u$ )
- Deformación unitaria ( $\epsilon_u$ )
- Módulo de elasticidad ( $E$ )

La deformación de fluencia ( $\epsilon_y$ ) y el módulo tangente ( $E_t$ ) se calculan mediante las siguientes ecuaciones:

$$\epsilon_y = \frac{F_y}{E}$$

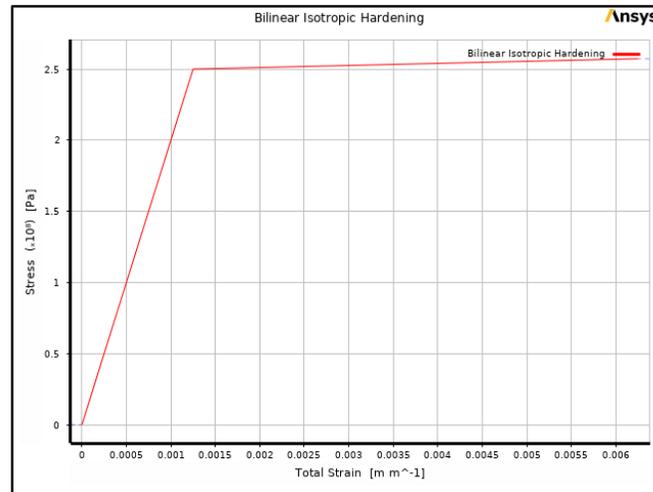
$$E_t = \frac{F_u - F_y}{\epsilon_u - \epsilon_y}$$

Y se incorporan en el software ANSYS para el análisis (véase Figura 25).

Properties of Outline Row 4: A36NL				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m <sup>-3</sup>	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Mod...		
6	Young's Modulus	200	GPa	
7	Poisson's Ratio	0.3		
8	Bulk Modulus	1.6667E+11	Pa	
9	Shear Modulus	7.6923E+10	Pa	
10	Bilinear Isotropic Hardening			
11	Active Table	Total		
12	Yield Strength	250	MPa	
13	Tangent Modulus	1450	MPa	
14	Specific Heat Constant Pressure, C <sub>p</sub>	434	J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>	

**Figura 25.** Definición del acero A36 no lineal. Fuente: Propia.

En la Figura 26 se presenta la curva de tensión versus deformación unitaria bilineal que describe el comportamiento del acero ASTM A36 tanto en tracción como en compresión, y que se utiliza en el modelo desarrollado.



**Figura 26.** Curva tensión deformación acero ASTM A36.  
Fuente: Ansys,2023.

### **Madera:**

Para representar las propiedades de la madera en el software ANSYS R1 2023, se utilizó un material de tipo "Wood". El modelo asumió un comportamiento elástico, incorporando únicamente el módulo de elasticidad especificado en la norma chilena NCh 1198:2014. Este valor, correspondiente a una madera estructural de grado GS, es de 10,500 MPa, según lo indicado en la Tabla 4 de dicha norma para pino radiata seco con un contenido de humedad del 12 %.

La elección de modelar la madera con un comportamiento elástico se debe a que este material presenta un mecanismo de falla típicamente frágil. Al superar su límite elástico, la madera exhibe una ductilidad muy limitada, lo que provoca una falla súbita. Por lo tanto, la filosofía de diseño de este material se basa en que trabaje dentro de su rango elástico. En este sentido, se verificará que los esfuerzos no superen los límites admisibles establecidos para evitar la ocurrencia de fallas abruptas y garantizar el desempeño seguro de la estructura.

La parametrización de estas propiedades permite garantizar una adecuada representación del material en los análisis numéricos. En la Figura 27 se muestra la configuración utilizada para la definición de este material en el modelo desarrollado.

Properties of Outline Row 5: MADERA				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	935.7	kg m <sup>-3</sup>	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's Mod...		
8	Young's Modulus	10500	MPa	
9	Poisson's Ratio	0.3742		
10	Bulk Modulus	1.3911E+10	Pa	
11	Shear Modulus	3.8204E+09	Pa	
12	Tensile Yield Strength	Tabular		
13	Tensile Ultimate Strength	Tabular		
14	Isotropic Thermal Conductivity	0.4528	W m <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>	
15	Specific Heat Constant Pressure, C <sub>p</sub>	1685	J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>	
16	Isotropic Electric Loss Tangent	Tabular		
17	Isotropic Resistivity	1.095E+06	ohm m	
18	Isotropic Relative Permittivity	10.12		

**Figura 27.** Definición del material confinante madera en software ANSYS. Fuente: Propia.

### 3.5.4.3 Contactos

En el modelo numérico, todos los contactos fueron representados mediante pares de elementos CONTACT-TARGET. La definición de la interacción entre las superficies se basó en la rigidez relativa de las mismas (véase Figura 28):

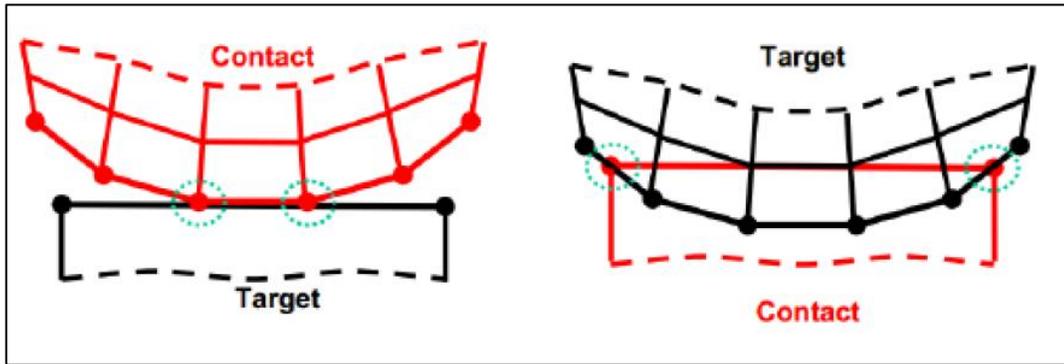
- **Contacto simétrico:**

Este tipo de contacto se asumió cuando la rigidez de ambas superficies era similar. En estos casos, ambas caras se definieron como Contact y Target, asegurando que ninguna penetrara sobre la otra.

- **Contacto asimétrico:**

Cuando la rigidez de una superficie era significativamente mayor que la de la otra, se utilizó un contacto asimétrico. En este caso, la cara Target (de mayor

rigidez) podía penetrar en la cara Contact (de menor rigidez), pero no inversamente. Para garantizar una correcta configuración, fue necesario identificar con precisión cuál superficie tenía mayor rigidez. En este modelo, la madera fue definida como la cara Contact y el acero como la cara Target.



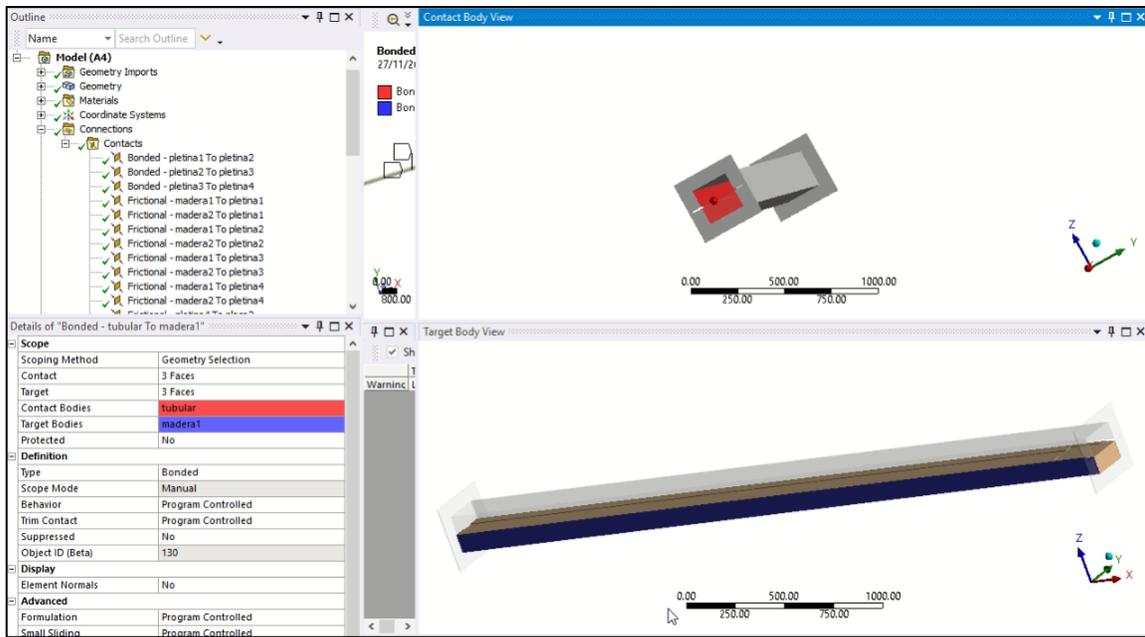
**Figura 28.** Comportamiento de contactos. Fuente: Morral F.,2015.

En el modelo numérico se implementaron dos tipos de interfaces:

#### **Interfaz Bonded:**

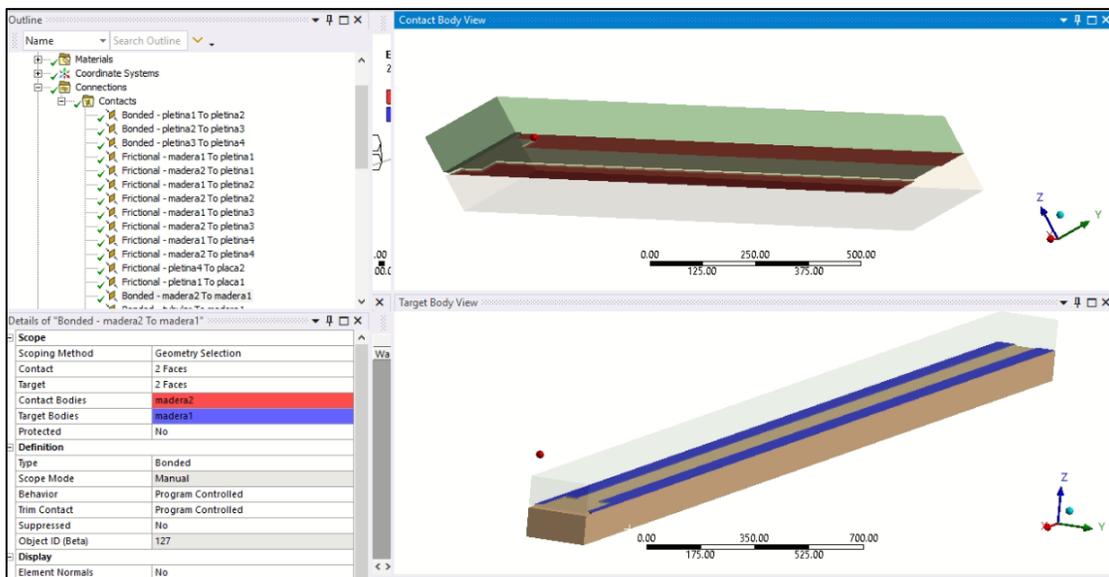
Este contacto modela superficies completamente adheridas, sin permitir desplazamientos relativos entre ellas. Se utilizó en los siguientes casos:

- **Unión entre la camisa exterior de acero y el material confinante:** Aquí, se configuró un contacto asimétrico, donde la camisa de acero actuó como la cara Target de mayor rigidez, mientras que la madera confinante fue definida como la cara Contact (véase Figura 29).



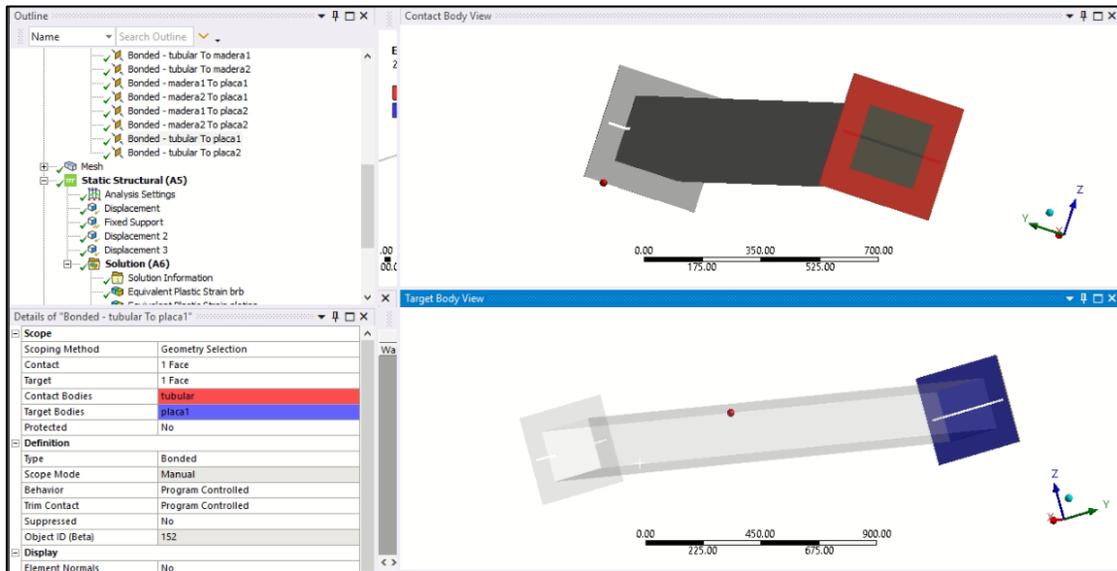
**Figura 29.** Interacción material confinante- encamisado en ANSYS.  
Fuente: Propia.

- **Interacción madera-madera:** Este contacto se modeló también como Bonded, simulando una unión rígida (véase Figura 30).



**Figura 30.** Interacción madera-madera en ANSYS. Fuente: Propia.

- **Interacción entre el perfil tubular y la placa:** En esta unión, se empleó el mismo tipo de contacto para garantizar la adherencia (véase Figura 31).



**Figura 31.** Interacción encamisado - placa cierre en ANSYS. Fuente: Propia.

### Interfaz Frictional:

Este tipo de contacto permite desplazamientos relativos controlados mediante un coeficiente de fricción ( $\mu$ ). Se utilizó en los siguientes casos:

- **Interacción entre el núcleo de acero y la madera confinante:** Aquí, se aplicó un coeficiente de fricción de  $\mu = 0.005$ , (véase Figura 32).

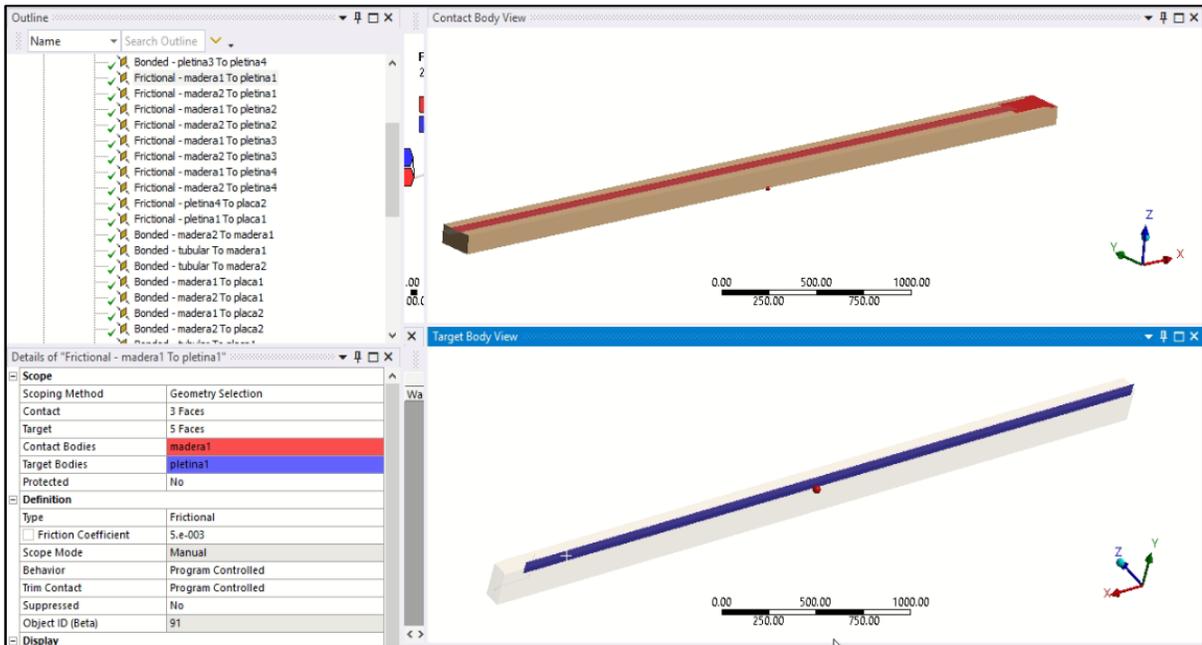


Figura 32. interacción friccional entre el núcleo de acero - madera en ANSYS. Fuente: Propia.

- **Interacción entre el núcleo de acero y la placa:** En este caso, se configuró un contacto con un coeficiente de fricción de  $\mu = 0.2$ . (véase Figura 33).

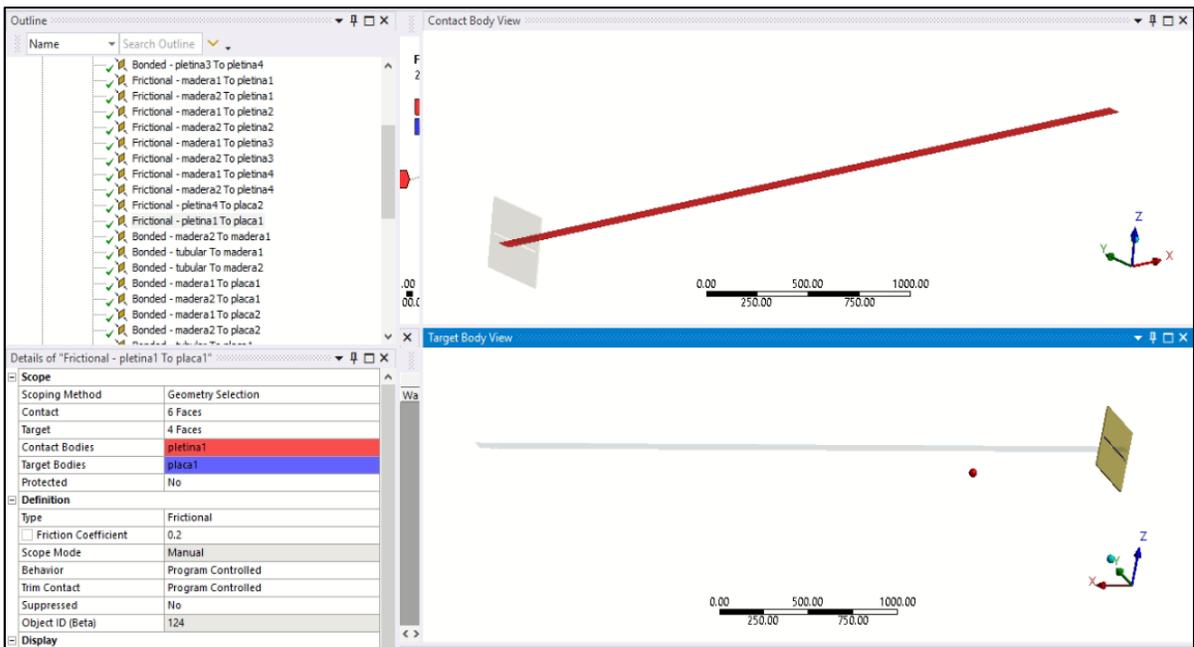
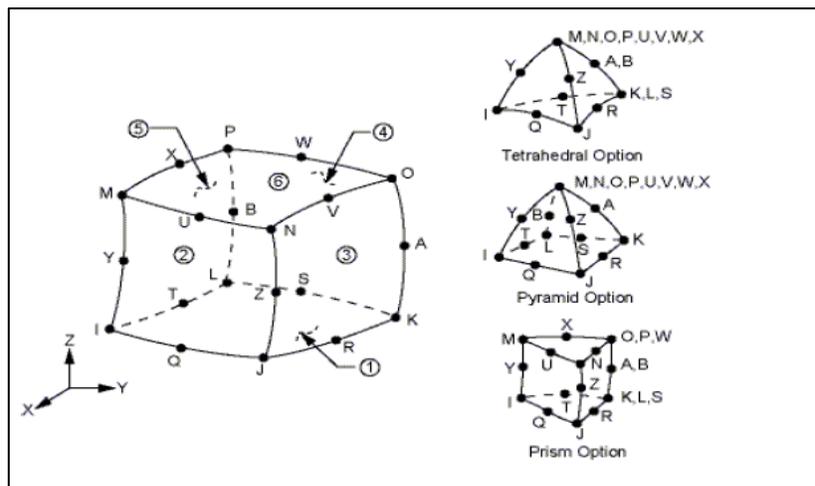


Figura 33. Interacción núcleo de acero - placa cierre en ANSYS. Fuente: Propia.

Esta configuración de contactos asegura una representación precisa de las interacciones mecánicas en el modelo, respetando las propiedades físicas de los materiales involucrados.

### 3.5.4.4 Generación de la malla de elementos finitos

Para discretizar la geometría del modelo se emplearon elementos volumétricos tridimensionales del tipo SOLID186 (véase Figura 34). Este tipo de elemento cuenta con tres grados de libertad por nodo, que corresponden a las traslaciones en las direcciones X, Y y Z. La estructura del elemento incluye 20 nodos distribuidos de acuerdo con el esquema ilustrado a continuación.



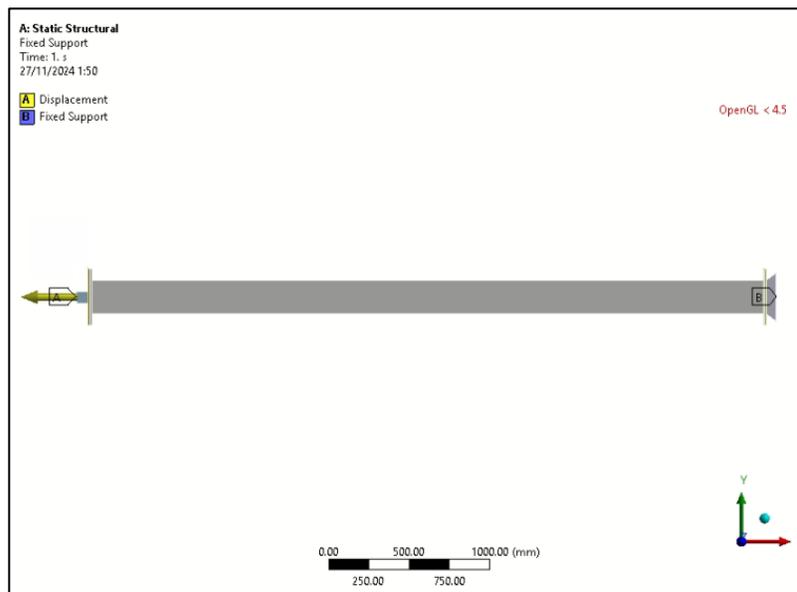
**Figura 34.** Elemento 3D Solid186. Fuente: Morral F.,2015.

Aunque su configuración base es hexaédrica, estos elementos pueden ajustarse a formas piramidales, prismáticas o tetraédricas, lo que los hace versátiles para adaptarse a diferentes geometrías. Están diseñados para modelar materiales que presentan comportamientos como plasticidad, endurecimiento, fluencia, grandes desplazamientos y deformaciones. Además, resultan ideales para simular materiales elastoplásticos prácticamente incompresibles, empleando interpolaciones de tipo Lagrange entre sus nodos.

Los elementos de contacto asociados en el modelo son CONTA174 y TARGE170, que se integran de manera efectiva con los SOLID186. Para asegurar la estabilidad y la convergencia de la solución, se pone especial atención en la calidad del mallado. El ángulo de las aristas de los elementos debe aproximarse a los 90°, siendo la configuración hexaédrica la más estable para este tipo de análisis.

### 3.5.4.5 Definición de las condiciones de borde

Para replicar fielmente las condiciones operativas del arriostramiento y limitar los desplazamientos y rotaciones fuera del plano de carga, se estableció un soporte fijo (*fixed support*) en uno de los extremos del núcleo de acero dúctil, específicamente en la región donde se modela la zona de transición (Ver figura 35). En el extremo opuesto, las restricciones se aplicaron en todas las direcciones excepto en el eje longitudinal, permitiendo así desplazamientos controlados, ya sea en un esquema de carga monotónica creciente o cíclica.



**Figura 35.** Condiciones de contorno en ANSYS.

Fuente: Propia.

Este enfoque asegura que el núcleo de acero del BRB esté sometido exclusivamente a esfuerzos axiales de tracción y compresión. Por su parte, la madera confinante se mantiene restringida únicamente mediante su interacción con el núcleo de acero dúctil, mientras que el tubo de acero que la envuelve está limitado por el contacto directo con la madera, asegurando así la correcta simulación de las condiciones de confinamiento.

### 3.5.4.6 Ingreso de protocolo de desplazamiento

Tal como se describe en la sección 4.4.1, se introdujo el protocolo de desplazamiento en el software ANSYS para evaluar el desempeño de la propuesta de la riostra de pandeo restringido (BRB). Este protocolo tiene como objetivo simular las condiciones de carga reales a las que estaría sometido el BRB, permitiendo analizar su comportamiento mecánico bajo diferentes escenarios de carga (Ver Figura 36).

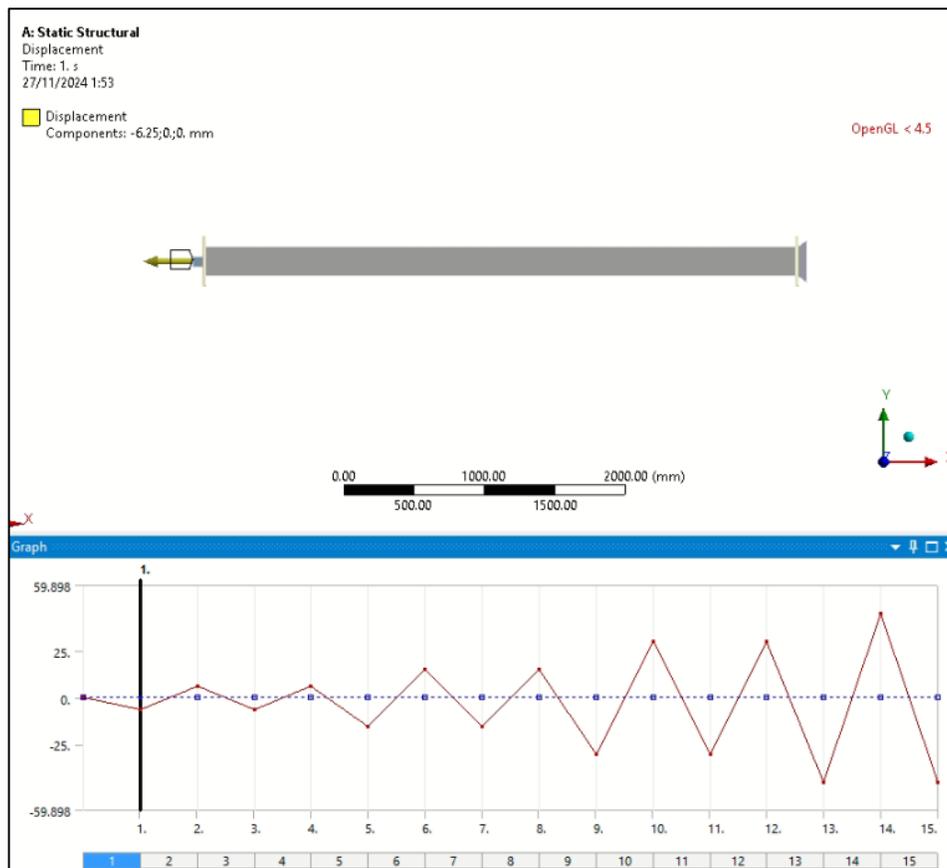


Figura 36. Ingreso del protocolo de carga en ANSYS. Fuente: Propia.

### 3.5.5 Desempeño de Pórticos con y sin BRB Mediante Análisis Pushover en SAP2000

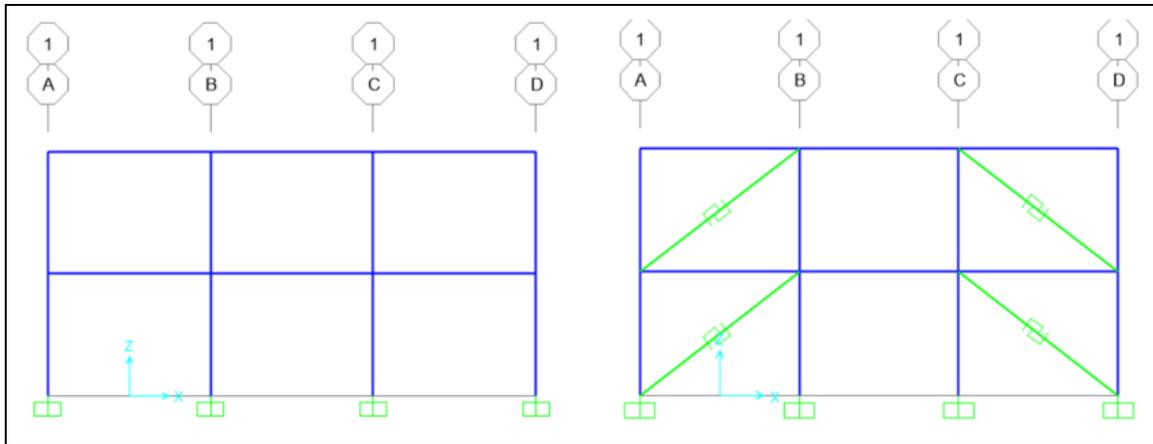
Para analizar el desempeño estructural con y sin sistemas de arriostramiento de pandeo restringido (BRB), se utilizó un modelo en 2D en SAP2000 para representar el sistema constructivo en construcciones menores. Aunque esta es una simplificación de la realidad, permite evaluar el comportamiento estructural a través de un análisis Pushover, proporcionando información sobre el desempeño de las construcciones menores en términos de capacidad y estabilidad.

#### Configuración de los Modelos

Se utilizó una cuantía de acero del 2 % en las columnas y el doble de la cuantía mínima en las vigas para simular estructuras de baja escala que no siguen un diseño normativo, representando prácticas constructivas informales. Estos valores permiten garantizar una capacidad de carga básica sin sobrepasar los límites de una construcción no reglamentada, reflejando las condiciones reales de edificaciones donde la cantidad de acero empleado no siempre cumple con los estándares de diseño establecidos. La elección de estos parámetros asegura que las estructuras modeladas sean funcionales desde el punto de vista estructural, pero también realistas en cuanto a las informalidades típicas de la construcción no normativa.

#### Esquema de Modelos

- **Sin BRB:** Los primeros cinco modelos consisten en un marco de un piso con un número variable de vanos, desde uno hasta cinco. Los siguientes cinco modelos corresponden a un marco de dos pisos, nuevamente con un rango de uno a cinco vanos (Ver Figura 37).
- **Con BRB:** Los diez modelos anteriores se replicaron, integrando arriostramientos BRB para analizar los efectos del sistema de pandeo restringido(Ver Figura 37).



**Figura 37.** Configuración geométrica de los modelos de marcos con y sin BRB en SAP2000.  
Fuente: Propia.

### Propiedades y Condiciones de Borde

Se asignaron las propiedades del concreto y del acero de refuerzo a través de las funciones de materiales disponibles en SAP2000. Posteriormente, se definieron las secciones transversales para columnas y vigas. La base de cada marco fue configurada como empotrada, mientras que las vigas fueron sometidas a una carga muerta uniforme de 0.5 tonf/m.

### Análisis y Cargas Aplicadas

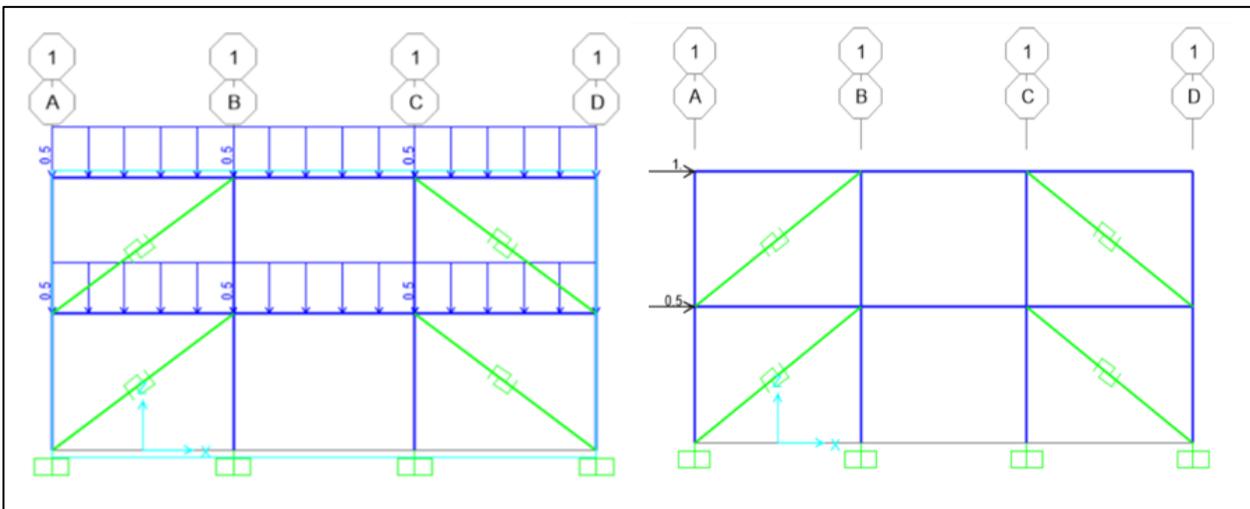
Para simular las condiciones de carga, se definieron los siguientes patrones y casos de carga:

- **Load Pattern:** Un patrón de carga denominado P se empleó para aplicar desplazamientos laterales controlados.
- **Mass Source:** Se asignó la carga muerta al patrón definido, para calcular las masas dinámicas asociadas.

## Casos de Carga:

- GRAVITY NL: Caso no lineal para cargas gravitatorias.
- PUSHOVER: Caso no lineal para análisis de desplazamiento lateral progresivo.
- P: Caso para aplicar cargas puntuales en dirección  $X$ .

En el caso de los modelos de un piso, la carga puntual aplicada al vértice superior izquierdo tuvo un valor de 1.0 tonf. Para los modelos de dos pisos, se asignaron cargas puntuales de 0.5 tonf y 1.0 tonf en los vértices superiores del primer y segundo piso, respectivamente, asemejando el patrón de carga lateral establecido en el ASCE 41, que distribuye las cargas de manera equivalente a los pesos o de forma “triangular” (Ver Figura 38).



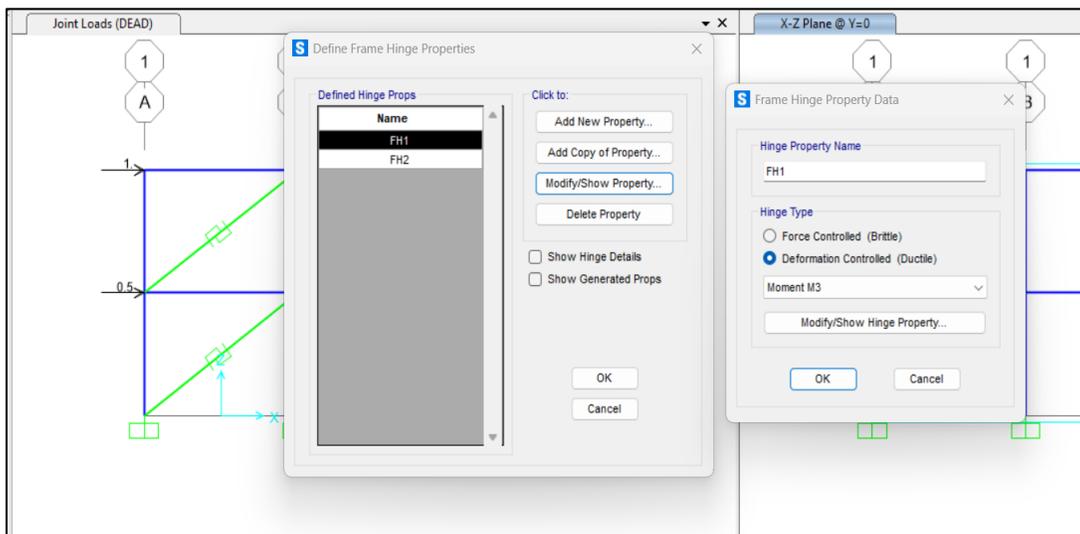
**Figura 38.** Esquema de condiciones de borde y cargas asignadas en el modelo numérico.

Fuente: Propia.

## Asignación de Rótulas Plásticas

Se definieron rótulas plásticas predefinidas por defecto en base a los criterios y parámetros del ASCE 41-23 en las vigas y columnas para simular su comportamiento bajo cargas laterales (Ver Figura 39):

- Vigas: Se asignaron rótulas tipo M3 con distancias relativas de 0.05 y 0.95 a lo largo de su longitud.
- Columnas: Se definieron rótulas tipo P-M3 que consideran la interacción de carga axial y momento, con las mismas distancias relativas.



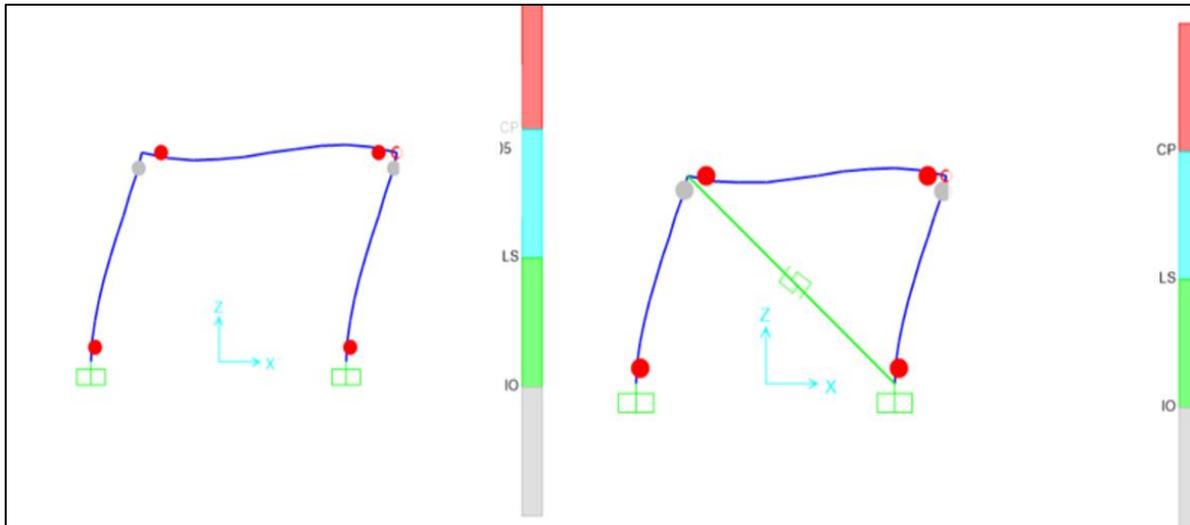
**Figura 39.** Asignación de rótulas plásticas en vigas y columnas en SAP2000.  
Fuente: Propia.

## Evaluación de los Modelos

Se realizó un análisis estructural para cada modelo, evaluando los desplazamientos laterales, el estado de las rótulas plásticas y la curva de capacidad obtenida mediante el análisis Pushover.

En los modelos con BRB, se introdujeron enlaces (link/support) del tipo multilinear plastic en la dirección Axial que es el comportamiento esperado del brb, por lo que se conecta articulado en los extremos, configurando las propiedades de histéresis según las

curvas obtenidas previamente en ANSYS. Estas curvas, de tipo BRB hardening, fueron asignadas al marco mediante los elementos definidos.



**Figura 40.** Rotulas plásticas en marco. Fuente: Propia.

## **CAPITULO IV: ANALISIS DE RESULTADOS**

## **4.1 Análisis de Resultados del Modelamiento en Elementos Finitos del BRB**

Se desarrollaron 35 modelos de elementos finitos en ANSYS para evaluar el comportamiento del Buckling-Restrained Brace (BRB). Del total de modelos analizados, se seleccionaron 6 casos representativos para su análisis detallado, dado que los restantes presentaron comportamientos similares. Es importante mencionar que 20 de estos modelos se realizaron implementando la propiedad de endurecimiento cinemático bilineal (bilinear kinematic hardening) buscando evaluar la convergencia del modelo numérico.

### **Consideraciones sobre el Modelamiento Material**

La implementación del endurecimiento cinemático bilineal como propiedad del acero no lineal generó problemas de convergencia en todos los modelos analizados. Esta propiedad se seleccionó inicialmente con el propósito de capturar el efecto Bauschinger, un fenómeno característico en materiales metálicos sometidos a cargas cíclicas. Sin embargo, debido a las dificultades numéricas, se optó por utilizar el endurecimiento isotrópico bilineal como una aproximación razonable. Aunque esta propiedad puede subestimar el comportamiento del material bajo condiciones de carga cíclica, su uso se considera adecuado como solución práctica para este estudio.

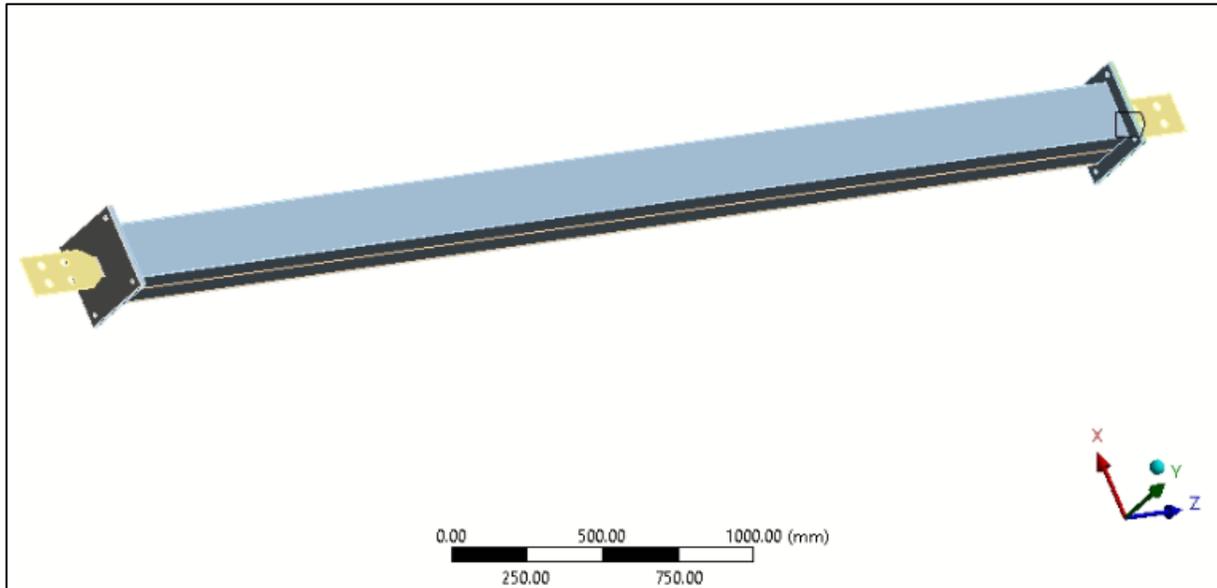
### **Análisis de Modelos Secuenciales**

#### **Primer Modelo**

El modelo inicial presentó las siguientes características geométricas (Ver Figura 41):

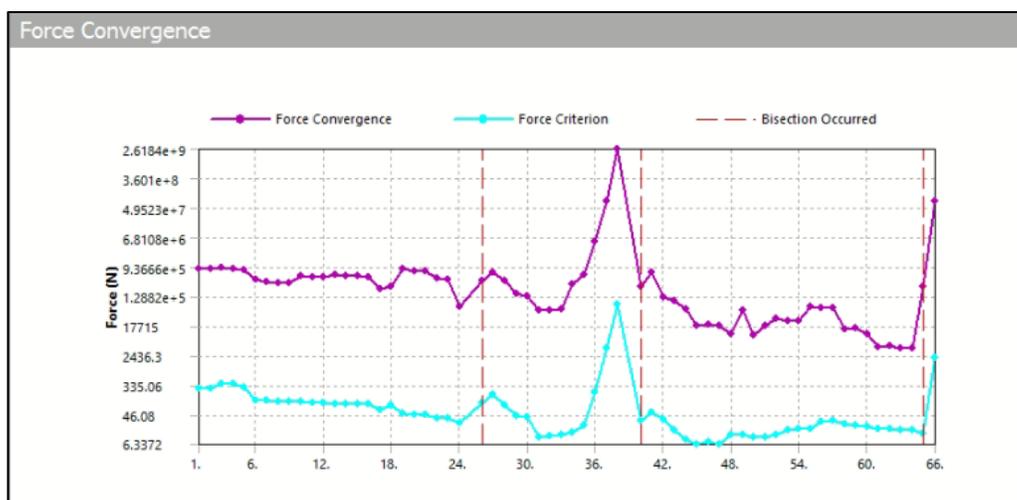
- Ancho de zona de conexión: 140 mm.
- Ancho del núcleo: 70 mm.
- Calado en madera: limitado a la zona del núcleo confinado.
- Tolerancia del calado: 0.5 mm por lado.

- Altura del calado: 2 mm por lado (4 mm total).
- Distanciamiento de perforaciones: 75 mm desde el borde hasta el centro de las primeras perforaciones.
- Espaciamiento entre perforaciones: 100 mm y 66 mm.



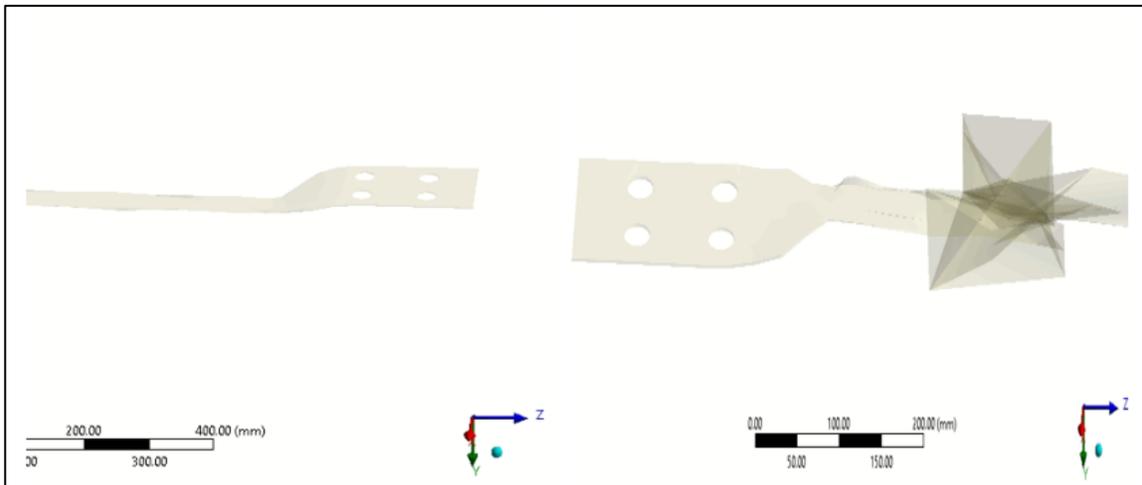
**Figura 41.** Modelo 1 en ANSYS. Fuente: Propia.

Este modelo no alcanzó convergencia (Ver Figura 42) debido a la placa de cierre del BRB presenta una abertura de 71 mm, mientras que la pletina tiene un ancho inicial de 140 mm que se reduce a 70 mm. Durante el desplazamiento, el núcleo de acero entra en contacto con la placa de cierre (Ver Figura 43), lo que provoca deformaciones



**Figura 42.** No convergencia del modelo 1 en ANSYS. Fuente: Propia.

significativas en esa área y conduce a la plastificación del material confinado en su interior (Ver Figura 44).



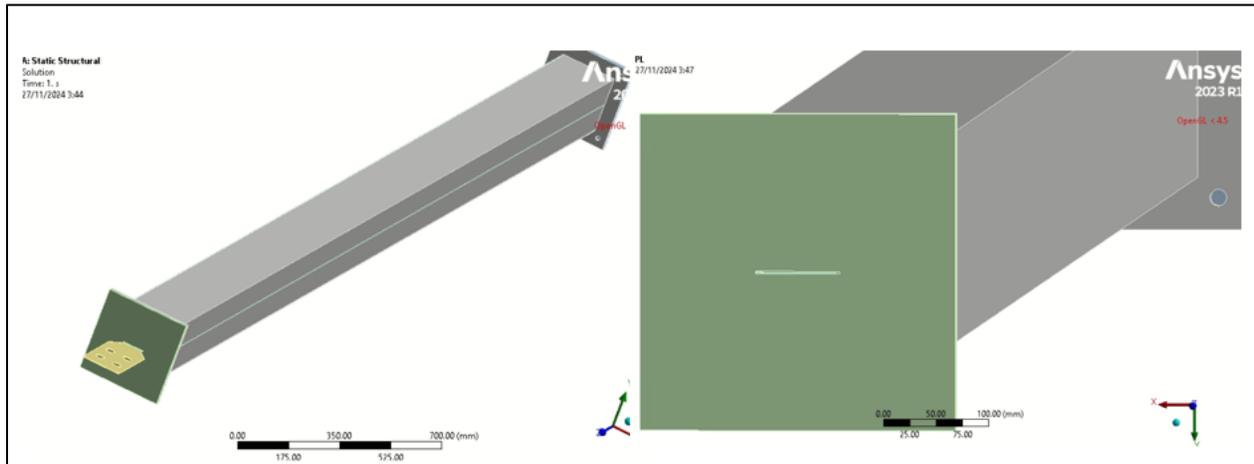
**Figura 43.** Deformaciones plásticas excesivas en la zona de transición del núcleo de acero en ANSYS. Fuente: Propia.



**Figura 44.** Deformación plástica en la zona de fluencia del núcleo de acero en ANSYS. Fuente: Propia.

## Segundo Modelo:

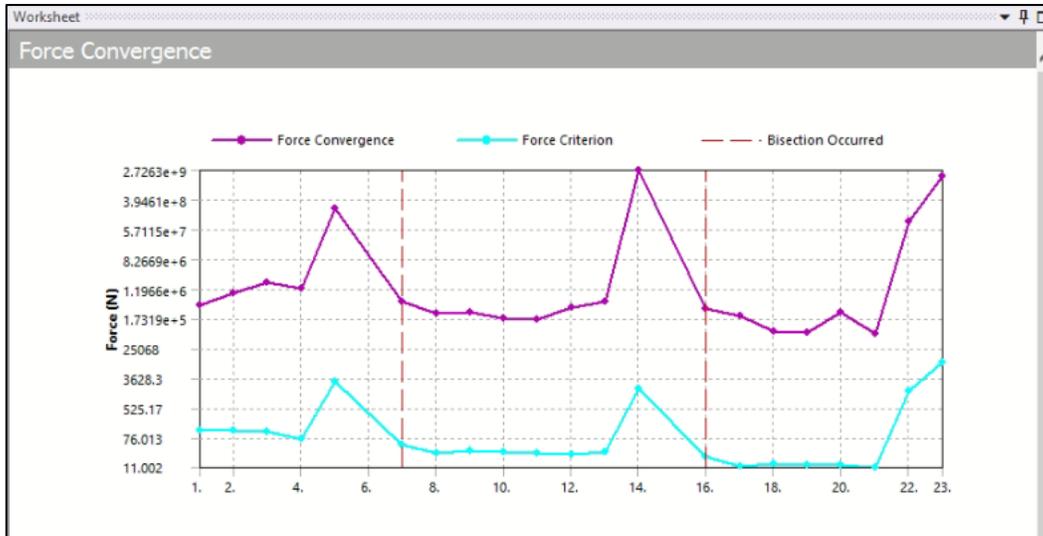
Se modificó la abertura en la placa a 80 mm para facilitar el desplazamiento sin interferencia (Ver Figura 45).



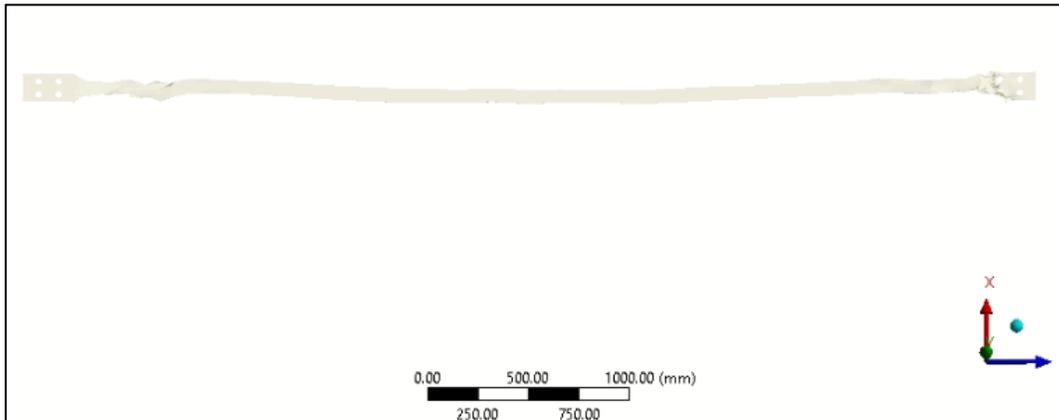
**Figura 45.** Modelo 2 con abertura en placa de cierre de 80 mm en ANSYS.  
Fuente: Propia.

El modelo no convergió (Ver Figura 46). Sin embargo, se obtuvo los siguientes resultados:

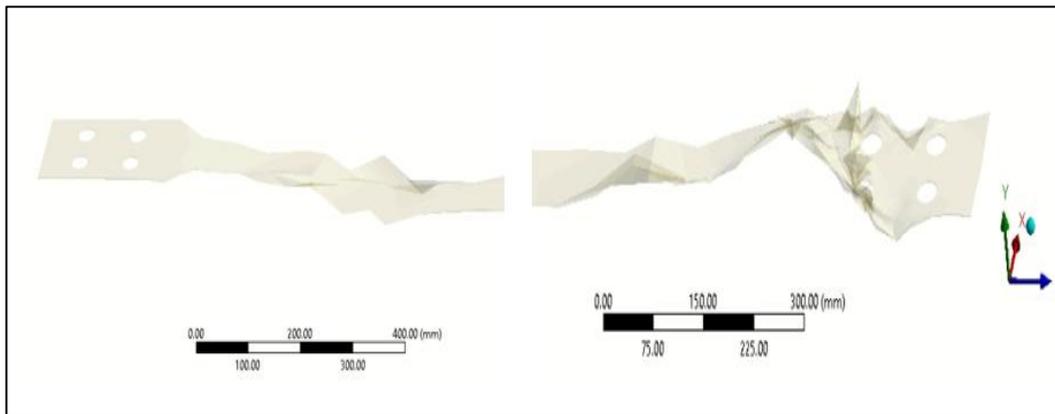
- Reducción en la deformación plástica del núcleo de acero, en la zona de fluencia (Ver Figura 47).
- Deformaciones excesivas en las zonas de transición y conexión (Ver Figura 48).
- Persistencia de problemas de convergencia debido a la interferencia entre madera y pletina



**Figura 46.** No convergencia del modelo 2 en ANSYS. Fuente: Propia.



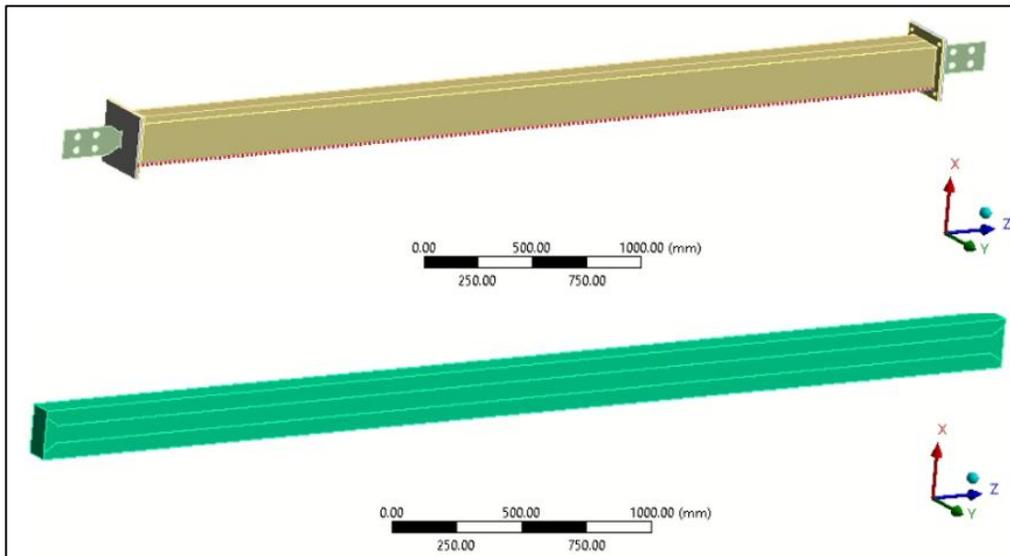
**Figura 47.** Núcleo de acero sin mayor deformación plástica en la zona de fluencia en ANSYS. Fuente: Propia.



**Figura 48.** Deformación plástica excesiva en la zona de transición y conexión del BRB en ANSYS. Fuente: Propia.

### Tercer Modelo:

Debido a la interacción entre el núcleo de acero y la madera, producto del desplazamiento, el núcleo tenderá a entrar en el confinamiento de la madera. Sin embargo, el calado en la madera tiene un ancho de 71 mm, mientras que la zona de transición de la pletina tiene un ancho variable, superando el ancho del calado de madera, lo que provoca el choque entre ambas y se produzca las deformaciones excesivas vistas en el modelo anterior. Por esta razón, se realiza un calado adicional en la madera, considerando la zona de transición de la pletina (Ver figura 49).



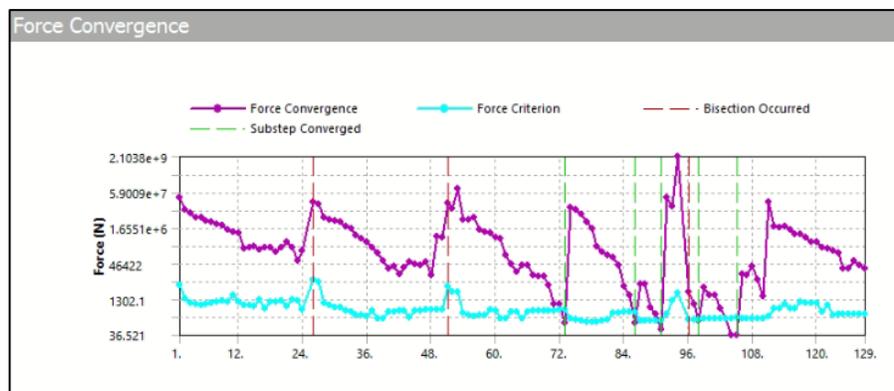
**Figura 49.** Modelo 3 en ANSYS considerando calado de la zona de transición del núcleo en la madera. Fuente: Propia.

En el modelo considerado, la ausencia del calado adecuado en la madera no representa un problema de convergencia numérica, sino un problema de diseño relacionado con la interacción física entre los componentes. La falta de un calado adecuado provoca interferencias entre el núcleo de acero y la madera, lo que genera un choque entre ambos. Este contacto produce deformaciones excesivas en el sistema, lo que puede llevar a una plastificación de los materiales involucrados. Como consecuencia, las grandes deformaciones impiden que el modelo complete correctamente los pasos de

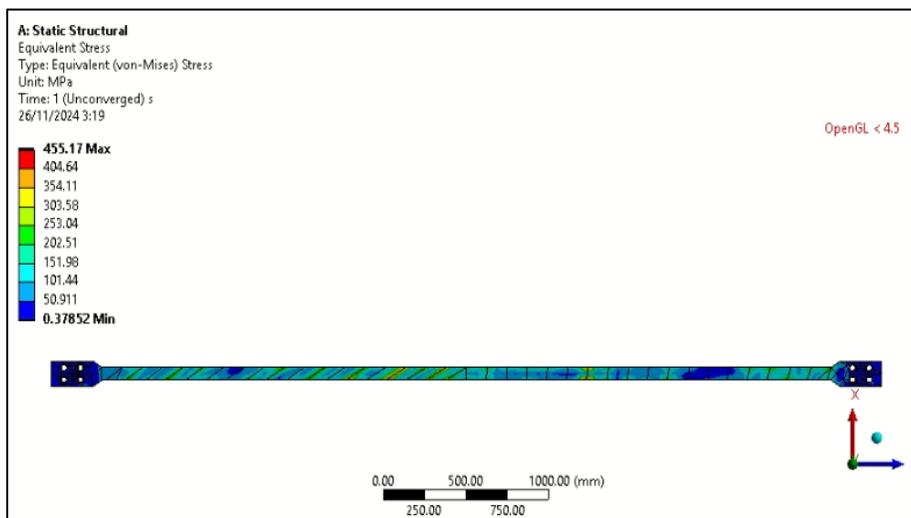
cálculo durante las simulaciones, lo que resulta en la falta de convergencia en los resultados.

Los resultados indicaron:

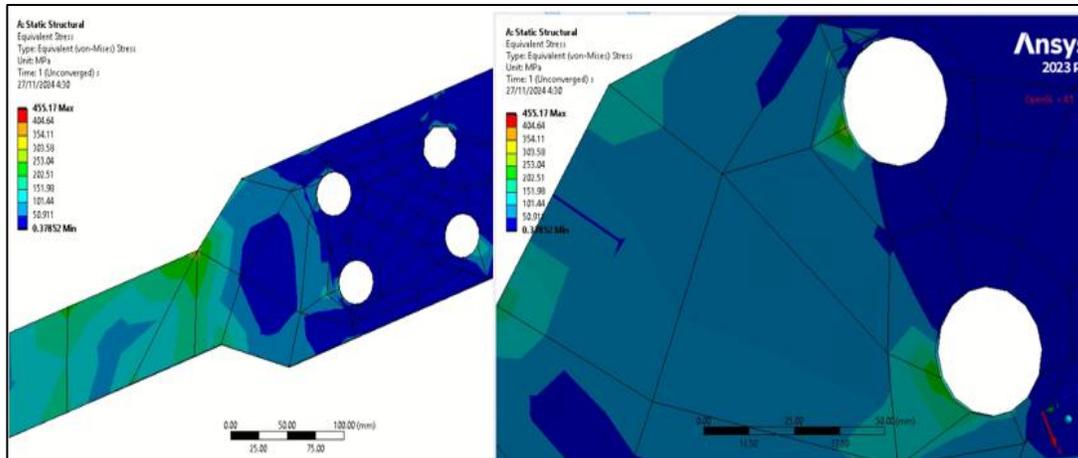
- Convergencia parcial en los primeros substeps (Ver Figura 50).
- Tensiones elevadas (253 MPa) en la zona de conexiones y transición, superando el límite elástico del acero A36 (Ver Figura 51,52).



**Figura 50.** Convergencia de substeps del modelo 3 en ANSYS. Fuente: Propia.



**Figura 51.** Esfuerzo elástico núcleo. Fuente: Propia.



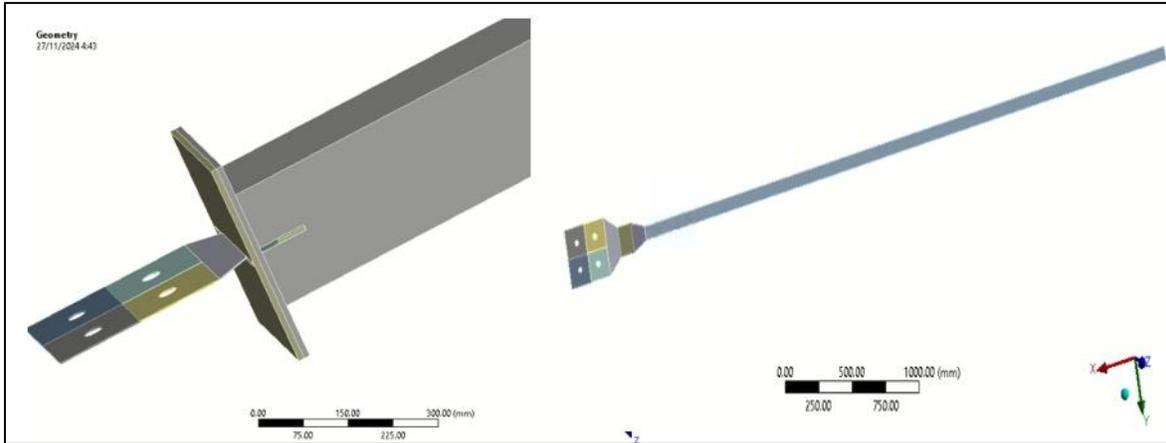
**Figura 52.** Esfuerzos elásticos en la zona transición y conexión del núcleo.  
Fuente: Propia.

#### Cuarto Modelo:

Dado que los esfuerzos elásticos superaron el límite de fluencia de 250 MPa en la zona de transición del núcleo en el modelo tres, se rediseñó la geometría del núcleo para garantizar que la fluencia y la plastificación se concentren exclusivamente en la zona de fluencia del núcleo, evitando que ocurran en las zonas de transición o conexión. Este rediseño se llevó a cabo aplicando las ecuaciones de diseño para elementos traccionados y elementos sometidos a compresión según las directrices del AISC 360-22. Además, con el fin de optimizar el costo computacional, se modeló únicamente la zona de conexión y transición en un solo lado.

A continuación, se detalla la nueva geometría propuesta (Ver Figura 53):

- Ancho de la zona de conexión: 300 mm.
- Zonas de transición: 150 mm (dos secciones).
- Ancho del núcleo: 70 mm.
- Altura de calado: 2 mm, para prevenir pandeo.
- Se considera un calado en el encamisado para que pueda desplazarse libremente la pletina sin que haya interferencia.



**Figura 53.** Modelo 4 con aumento en el ancho de la zona conexión y transición.  
Fuente: Propia.

Se puede apreciar en la figura 54 que el modelo pudo converger en varios pasos, sin embargo, no logro la convergencia del todo.



**Figura 54.** Convergencia de substeps del modelo 4 en ANSYS.  
Fuente: Propia.

El motivo de la no convergencia radica en la plastificación en la zona de conexión como se observa en la figura 55.

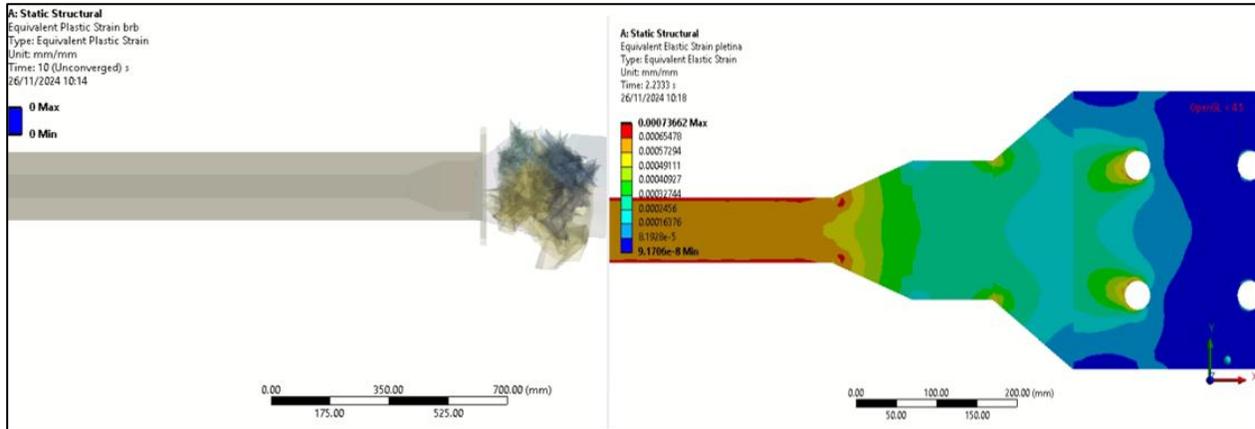
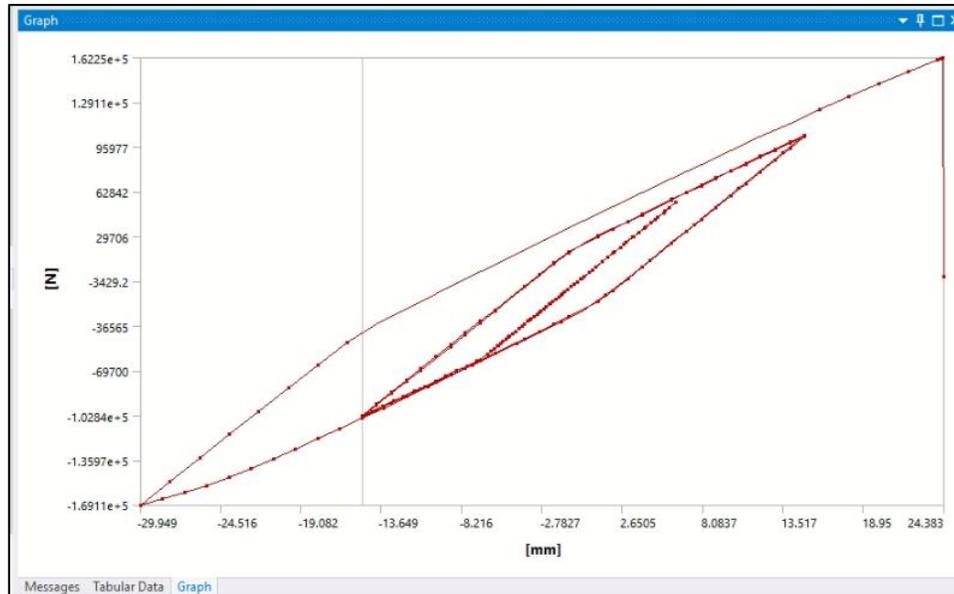


Figura 55. Plastificación en la zona de conexión. Fuente: Propia.

En los cálculos iniciales realizados manualmente, no se consideró la posibilidad de que pudiera ocurrir un aplastamiento en la conexión en la zona del tubo de acero. Aunque se consideró un calado en el encamisado para permitir que la pletina se desplace libremente sin interferencias, este calado no fue suficiente para garantizar un desplazamiento adecuado. Como resultado, se produjo el aplastamiento debido a la falta de espacio necesario para que los componentes se comportaran correctamente bajo las cargas. Este problema evidenció que el diseño inicial no contempló de manera adecuada la interacción entre los elementos en esa zona específica, lo que generó una deformación no prevista en la conexión.

A pesar de la plastificación excesiva en la zona de conexión se pudo capturar disipación de energía que se observa en la curva histerética del BRB (Ver Figura 56), se concluye que se necesita aumentar el espesor en la zona de conexión para que pueda tener un comportamiento óptimo. En este modelo también se realizó con la propiedad Bilinear Kinimetic Hardening y obtuvo un comportamiento similar con el comportamiento isotrópico.



**Figura 56.** Fuerza vs desplazamiento. Fuente: Propia.

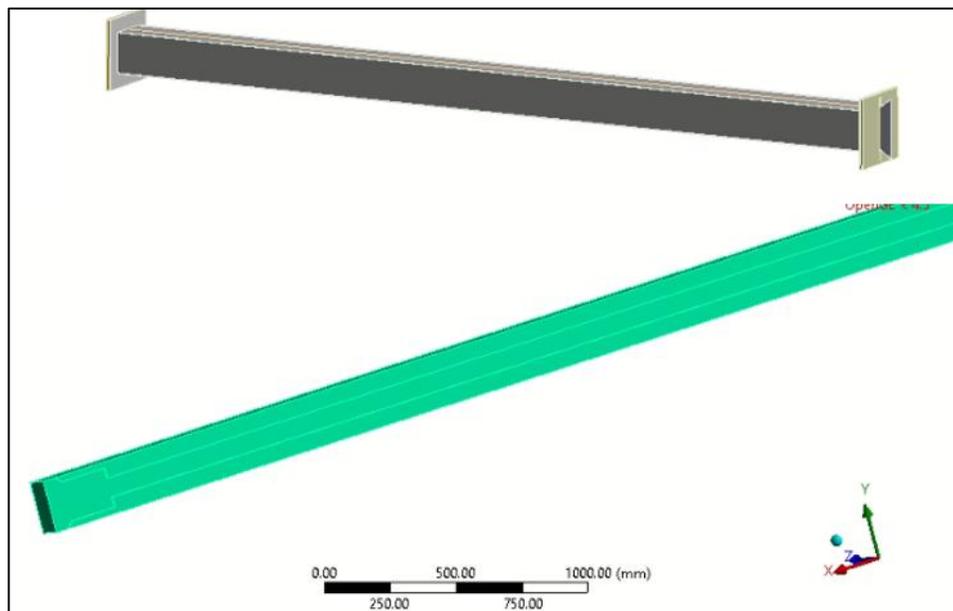
### Quinto Modelo:

Se incrementó el espesor de la pletina a 5 mm en la zona de conexión con el objetivo de evitar el posible aplastamiento de esa área. Además, se evaluó el desplazamiento máximo proporcionado por el protocolo calculado según el AISC 341-22 para realizar el calado tanto en la madera como en el perfil tubular, asegurando que no se comprometiera la interacción entre los componentes al momento del desplazamiento. Sin embargo, El modelo presentó inestabilidad numérica debido a una discontinuidad en el espesor en la zona de conexión con la transición. Esta discontinuidad se produjo por un cambio brusco de espesor, lo que generó una concentración excesiva de esfuerzos en ese punto. Como resultado, el dispositivo no convergió, incluso al utilizar contactos tipo bonded. Por esta razón, en la siguiente modelación se excluyó la zona de conexión y se consideró únicamente hasta la zona de transición del núcleo de acero. Esta modificación permitió enfocar el análisis en la capacidad estructural del BRB con la confinación de madera.

## Modelo Final

El último modelo incorporó optimizaciones en (Ver Figura 57):

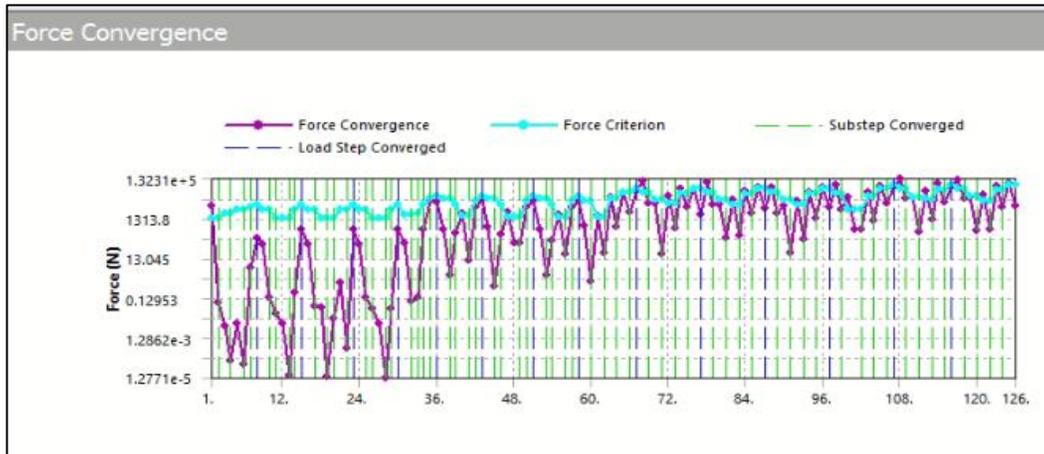
- Se modela el núcleo solo con una sola zona de transición.
- El calado de la madera no presenta tolerancia alguna, lo que garantiza que el núcleo de acero está completamente encapsulado por el material confinante.
- El calado en la madera se ha diseñado considerando el desplazamiento de la zona de transición del núcleo, asegurando que no ocurran interferencias durante su funcionamiento.



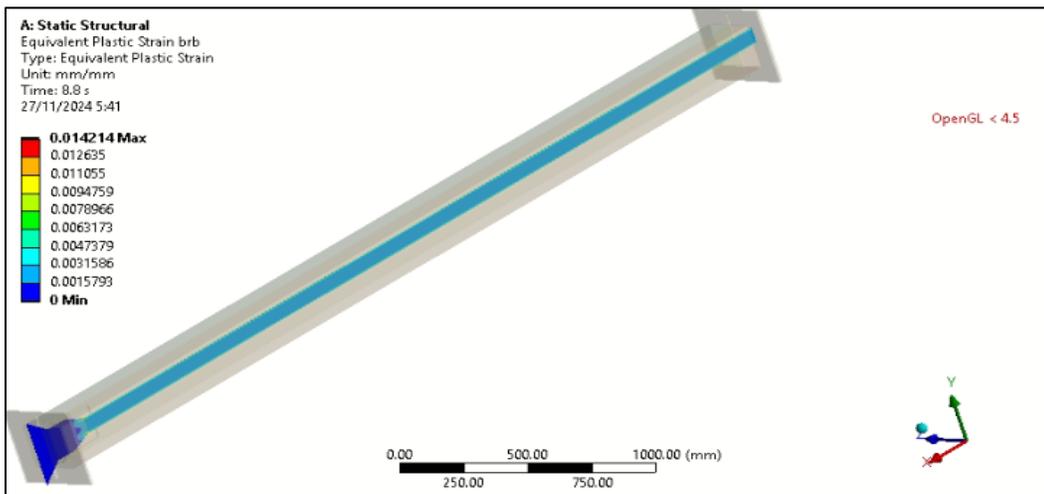
**Figura 57.** Modelo final en ANSYS. Fuente: Propia.

Los resultados fueron satisfactorios:

- Convergencia completa del modelo (Ver figura 58).
- Deformación plástica controlada en la zona confinada por la madera (Ver Figura 59).
- Curva histerética estable con evidencia de disipación de energía efectiva (Ver Figura 60).



**Figura 60.** Convergencia total del modelo final en ANSYS. Fuente: Propia.



**Figura 61.** Deformación plástica del núcleo de acero. Fuente: Propia.

### Comparativa de las curvas obtenidas con investigaciones anteriores

El análisis de las tres curvas histeréticas permite identificar diferencias significativas en el comportamiento estructural de los sistemas de arriostramiento de pandeo restringido (BRB), los cuales han sido diseñados bajo distintas metodologías y materiales. La curva de este estudio (Ver Figura 60), con una fuerza máxima de 267 kN, refleja un comportamiento más limitado en términos de disipación de energía y rigidez, lo cual se explica principalmente por el uso de un núcleo de acero de solo 2 mm de espesor, acompañado por madera como material confinante, la cual está encapsulada con un perfil

tubular de acero. Este diseño, aunque menos robusto, está enfocado en edificaciones de menor escala, donde las demandas sísmicas son moderadas y no requieren un alto nivel de disipación de energía ni de resistencia a deformaciones laterales. Si bien este sistema es eficiente y seguro para su propósito, su desempeño es significativamente menor en comparación con los sistemas analizados en los otros estudios.

Por otro lado, la curva obtenida en el análisis computacional de Morral, 2015 (Ver Figura 61) exhibe una fuerza máxima de 4903 kN (1100 kips), siendo la más alta entre las tres. Esto refleja una capacidad superior de disipación de energía y una rigidez lateral destacada, gracias a su diseño que combina un núcleo de acero de 10 mm de espesor con un sistema de confinamiento compuesto por un encamisado metálico y un material elastomérico. Este último desempeña un papel fundamental, ya que soporta las deformaciones del núcleo y distribuye las tensiones, previniendo el pandeo y permitiendo que el sistema mantenga su integridad estructural durante ciclos cíclicos de gran intensidad. El diseño computacional de Morral, al incluir estas características, logra una mayor disipación de energía y un rango de deformación más amplio antes de alcanzar la fluencia. Sin embargo, cabe señalar que, al tratarse de un modelo numérico, este comportamiento idealizado puede diferir de las condiciones prácticas en campo.

En contraste, el estudio de Blomgreen H. et al., 2016, (Ver Figura 62) basado en experimentos, muestra una fuerza máxima de 400 kN (90 kips), intermedia entre las otras dos curvas. Este sistema utiliza un núcleo metálico más grueso, de 12,7 mm, combinado con madera laminada como material confinante, lo que permite un equilibrio entre rigidez, capacidad de disipación de energía y sostenibilidad. Sin embargo, debido a la naturaleza del material, cuando la carga supera ciertos límites, la madera falla al no ser capaz de soportar deformaciones extremas. Esto limita el desempeño general del sistema en comparación con el modelo de Morral, que, además de utilizar el elastómero como material confinante, incorpora un encamisado de acero que le permite alcanzar una mayor capacidad de disipación de energía.

En términos generales, las diferencias en el desempeño de los tres sistemas son el resultado de los materiales utilizados, los espesores de los núcleos y los métodos de confinamiento empleados. El sistema de Morral, 2015, con su configuración robusta y su enfoque computacional, es ideal para estructuras con alta demanda sísmica gracias a su elevada rigidez y capacidad de disipación de energía. Por su parte, el diseño experimental de Blomgreen H. et al., 2016 representa una solución innovadora y sostenible, adecuada para demandas moderadas, aunque limitada por la vulnerabilidad de la madera laminada bajo cargas extremas. En cuanto al BRB del presente estudio, se adapta perfectamente a demandas sísmicas menores, priorizando simplicidad y eficiencia dentro de su contexto de aplicación, con la posibilidad de mejorar su desempeño al implementar una propuesta de encapsulado en acero, lo que aumentaría su capacidad estructural y de disipación.

Las diferencias observadas en las curvas histeréticas son reflejo de las decisiones de diseño y los materiales empleados. Mientras que el modelo de Morral, 2015 destaca por su desempeño superior en disipación de energía y rigidez gracias a su diseño con elastómero y encamisado metálico, el sistema de Blomgreen H. et al., 2016 muestra un enfoque intermedio que optimiza sostenibilidad y desempeño, aunque limitado por el fallo de la madera laminada. Por otro lado, el diseño del presente estudio se adapta perfectamente a demandas sísmicas menores, priorizando simplicidad y eficiencia dentro de su contexto de aplicación, con la propuesta de un núcleo de acero de 2 mm, madera como confinante y una camisa de acero, representando una evolución significativa que podría mejorar tanto la rigidez como la capacidad de disipación de energía del sistema.

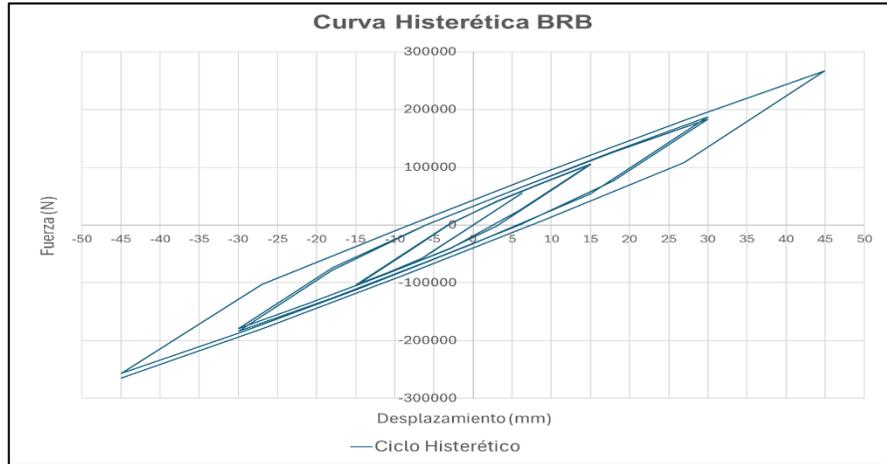


Figura 62. Curva histerética estable modelo final. Fuente: Propia.

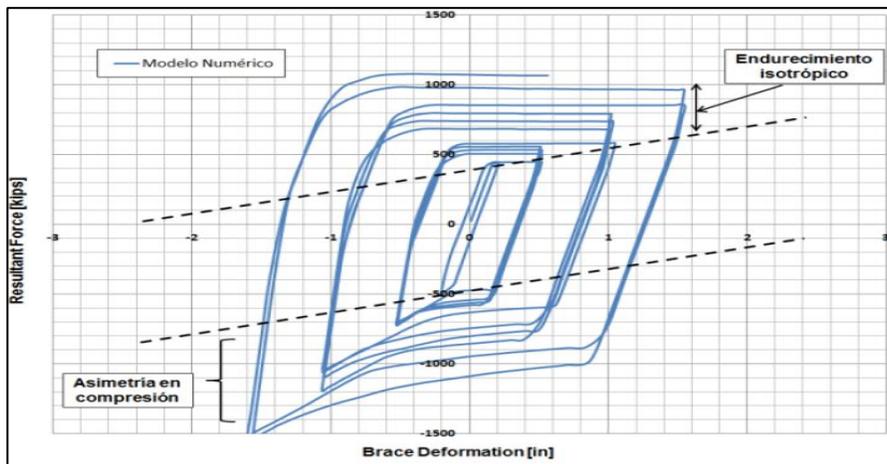


Figura 65. Curva histerética BRB con elastómero como material confinante. Fuente: Morral, 2015.

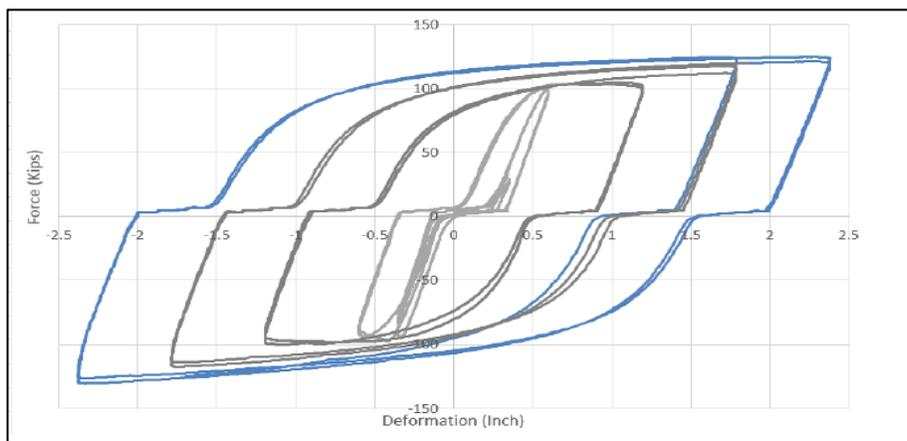


Figura 63. Curva histerética de Mass timber buckling restrained. Fuente: Blomgren H. et al., 2016

En las siguientes figuras se los esfuerzos normales de la madera (Ver Figura 64,65).

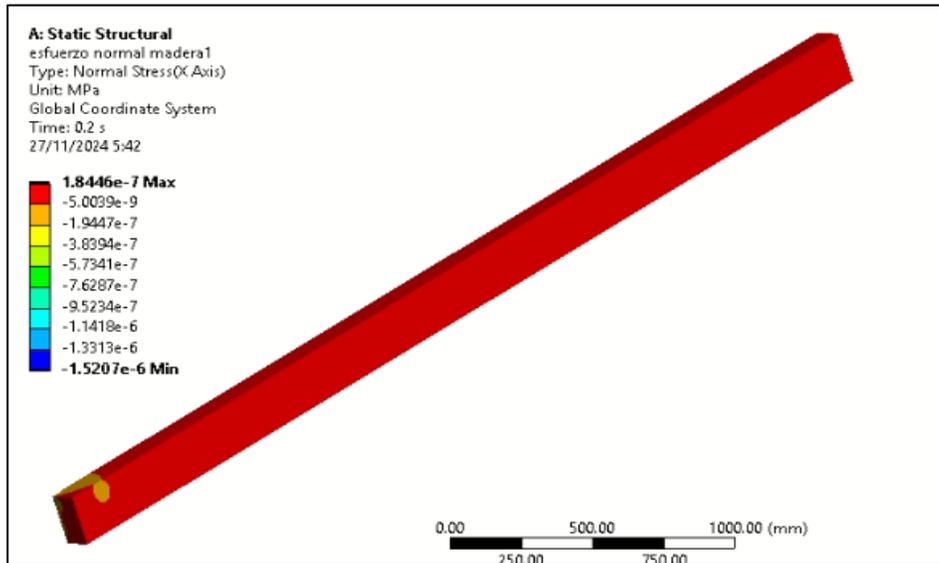


Figura 68: Esfuerzo normal madera 1 en ANSYS. Fuente: Propia.

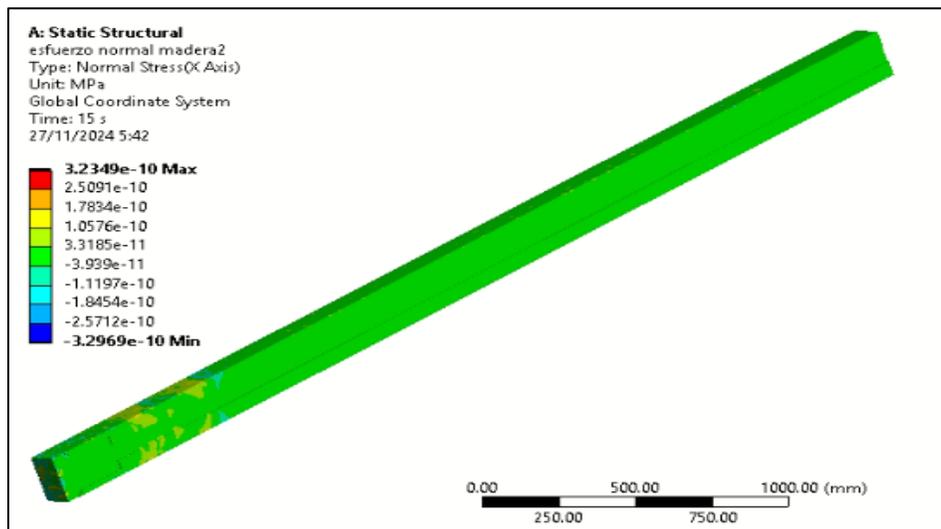
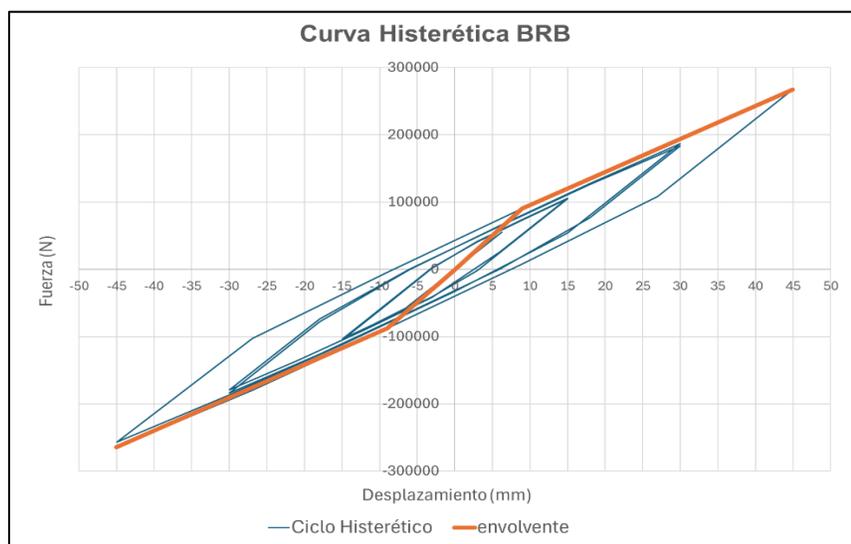


Figura 69: Esfuerzo normal madera 2 en ANSYS. Fuente: Propia.

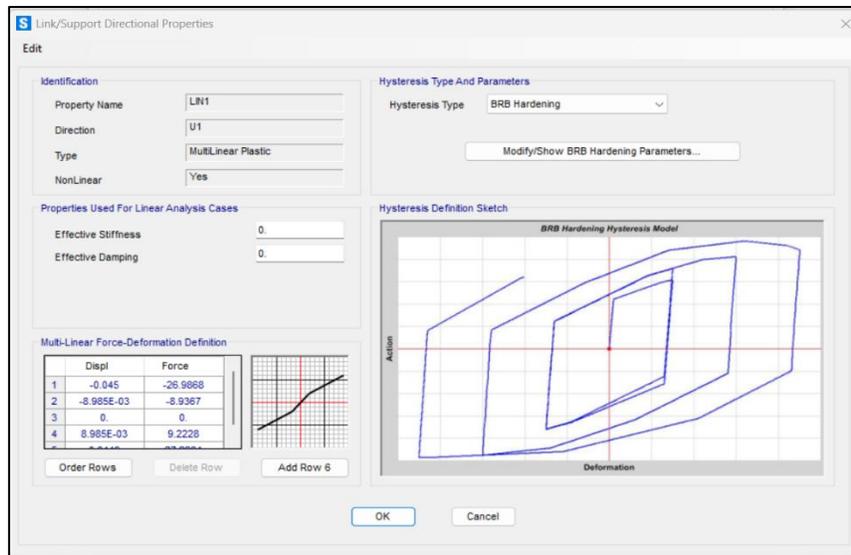
## 4.2 Análisis de resultado de la capacidad estructural a través de SAP200

El presente análisis examina el comportamiento estructural de un marco de hormigón armado mediante un análisis no lineal estático (Pushover), evaluando dos configuraciones: marcos sin riostra de pandeo restringido (BRB) y marcos con la inclusión de este elemento. En este contexto, se emplea el modelo de elementos finitos desarrollado en ANSYS, cuya envolvente de la curva histerética (ver Figura 66) es transferida al software SAP 2000 (ver Figura 67) para evaluar el desempeño estructural de estructuras de pequeña escala al incorporar el dispositivo propuesto.

Además, se realizan estudios de 10 marcos, con configuraciones de 1 a 5 vanos y de uno a dos pisos. El propósito de este análisis es evaluar cómo la redundancia en la disposición de los vanos influye en el comportamiento global de la estructura, y determinar si la utilización de la propuesta de BRB es efectiva en marcos de 5 vanos. Este enfoque busca optimizar el diseño y mejorar la resistencia sísmica de las estructuras analizadas, considerando la incorporación del dispositivo en diferentes configuraciones estructurales.



**Figura 70:** Envolvente Curva Histerética del BRB analizado.  
Fuente: Propia.



**Figura 71.** Ingreso de envolvente en SAP 2000. Fuente: Propia.

A continuación, se presenta el análisis detallado de los primeros cinco marcos, correspondientes a una estructura de un piso con vanos que varían entre uno y cinco.

### **Marco de 1 vano, primer piso.**

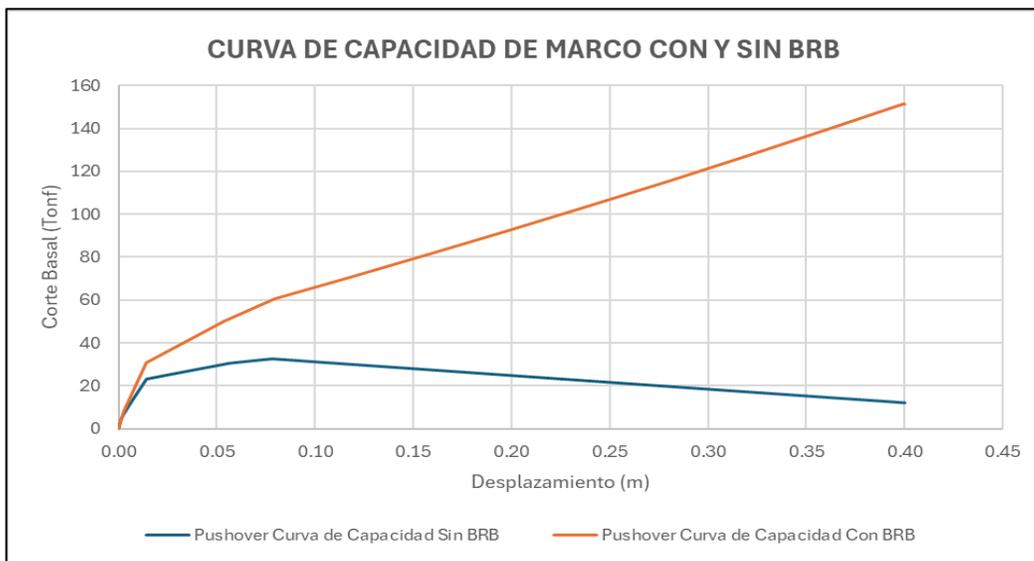
#### **Curva Pushover (Fuerza vs. Desplazamiento):**

En la Figura 68 se observa que la rigidez lateral de la curva de capacidad del marco sin BRB es inferior a la del marco con BRB, lo que indica que el BRB aporta un 37% más de rigidez a la estructura. Además, en la fase plástica se aprecia un aumento considerable en la capacidad de la estructura con BRB.

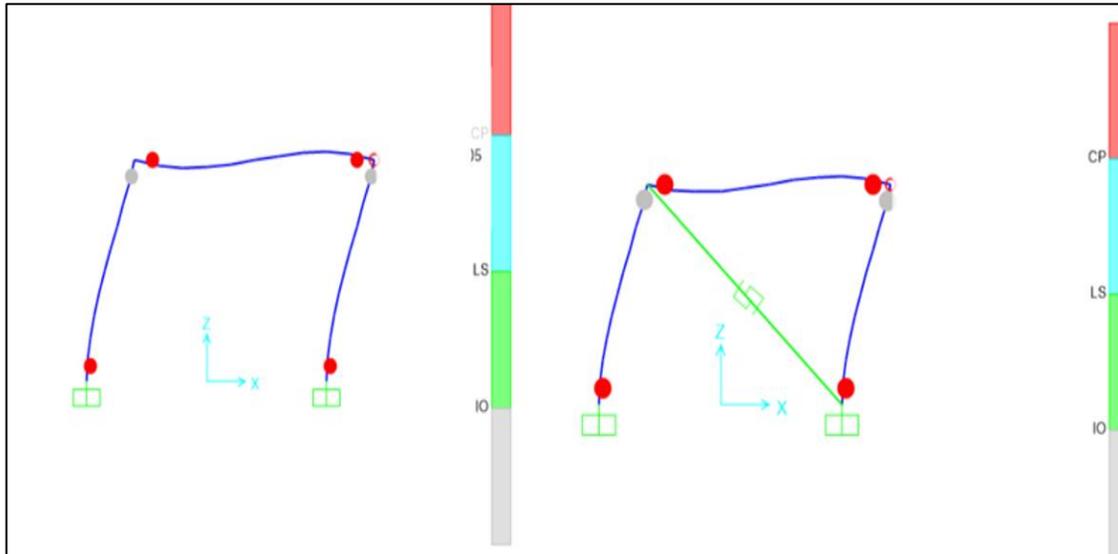
Para un desplazamiento de 0.4 m, el cortante en el marco sin BRB es de 11.98 tonf, mientras que en el marco con BRB aumenta a 151.335 tonf, lo que representa un incremento de aproximadamente 1164.6%. Este aumento se debe a la mayor capacidad del sistema con BRB para resistir cargas laterales, actuando como un elemento adicional de restricción que disipa de manera más eficiente la energía sísmica. Como resultado, el cortante absorbido por el marco principal se incrementa significativamente, mejorando el control de las deformaciones y aumentando la protección frente a fallas estructurales.

Este comportamiento implica que el marco con BRB es capaz de manejar las fuerzas sísmicas de manera más eficiente, mejorando la seguridad y estabilidad de la estructura sin generar grandes deformaciones en los elementos principales del marco

En la Figura 69 se observa la generación de rótulas plásticas en los elementos estructurales, identificando aquellas que alcanzan un nivel de daño severo según los criterios establecidos en la ASCE-41. Estas rótulas, representadas con color rojo, indican que los elementos han alcanzado su capacidad límite en el rango inelástico, lo que refleja un comportamiento crítico bajo las demandas sísmicas evaluadas.



**Figura 72.** Curva de capacidad de marco de un piso y un vano. Fuente: Propia.



**Figura 73.** Rotulas plásticas en marco de un piso y un vano. Fuente: Propia.

No obstante, aunque los elementos del marco con BRB estén fallando, este sistema contribuye a mantener la estabilidad del marco y la capacidad general de la estructura, como se puede observar en la curva de capacidad.

### **Marco de 2 vanos, primer piso.**

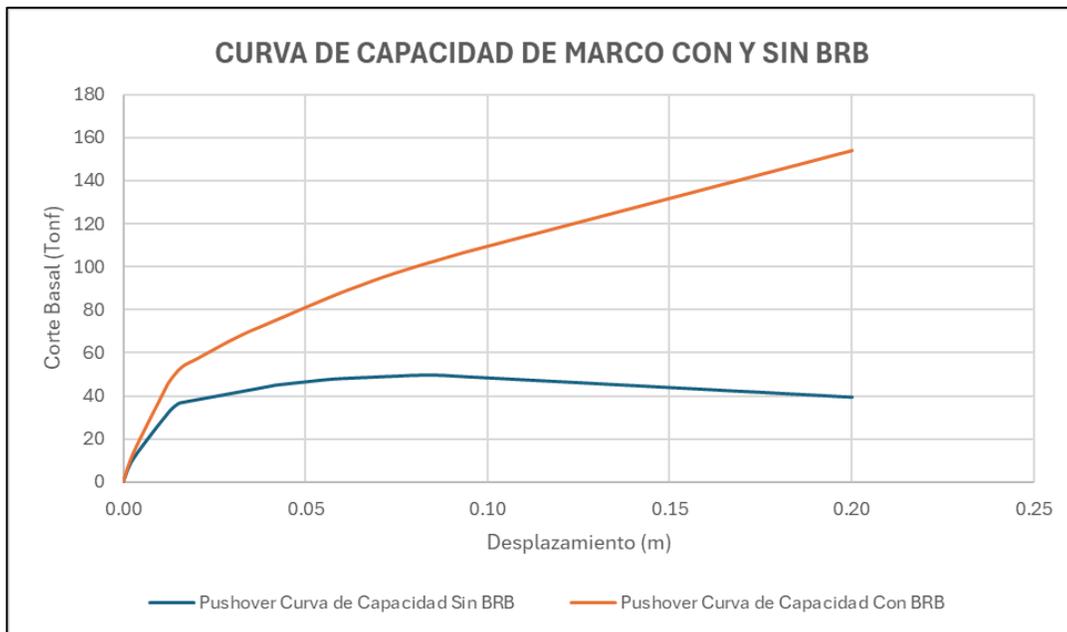
#### **Curva Pushover (Fuerza vs. Desplazamiento):**

En la Figura 70, se presenta la curva de capacidad, la cual compara el desempeño estructural del marco con BRB y el marco sin BRB. Se observa que la rigidez lateral del marco con BRB es 46% mayor que la del marco sin BRB, lo que indica que el sistema con BRB tiene una resistencia inicial significativamente superior frente a desplazamientos laterales.

Además, durante la fase de plastificación, el marco con BRB muestra una notable capacidad de carga adicional, mientras que el marco sin BRB experimenta una caída de capacidad una vez que sus elementos alcanzan la formación de rótulas plásticas. Esto demuestra que el marco con BRB no solo mejora la rigidez inicial, sino también su

capacidad de mantener cargas en condiciones inelásticas, aumentando así su ductilidad y evitando colapsos prematuros.

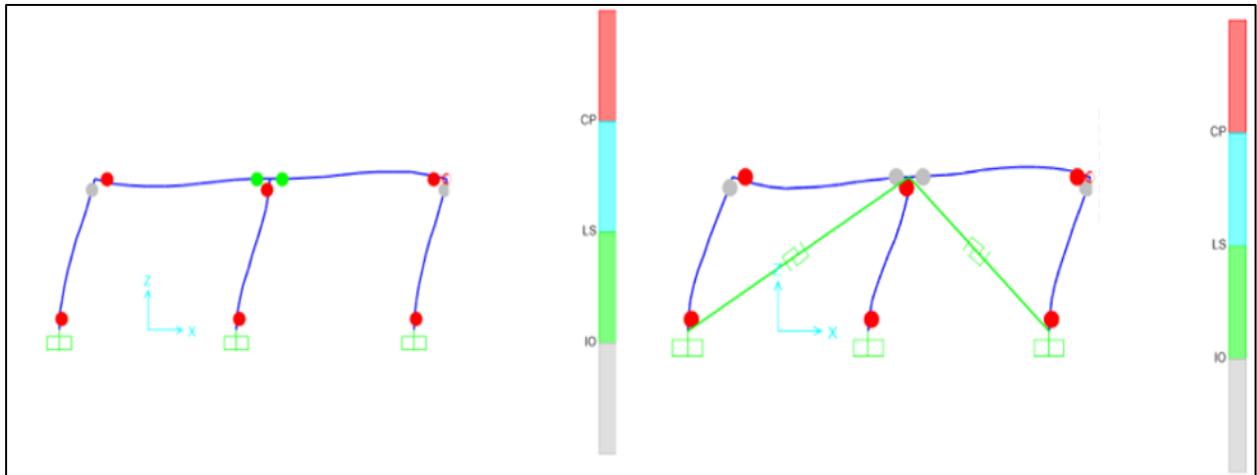
Por otro lado, la capacidad máxima del marco con BRB es tres veces superior a la del marco sin BRB, lo que subraya la efectividad del sistema BRB en disipar energía durante cargas sísmicas progresivas.



**Figura 74.** Curva de capacidad de marco de un piso y dos vanos.

Fuente: Propia.

En la Figura 71, se analizan las rótulas plásticas formadas en ambos marcos. En el marco sin BRB, las rótulas plásticas de la viga y la columna central muestran un daño leve, dentro del rango de ocupación inmediata (IO), lo que indica un comienzo de degradación estructural. Sin embargo, en el marco con BRB, las mismas rótulas plásticas no alcanzan ningún nivel de daño significativo, lo que evidencia que los BRB ayudan a proteger los elementos principales de la estructura al absorber las fuerzas sísmicas.



**Figura 75.** Rotulas plásticas en marco de un piso y dos vanos.

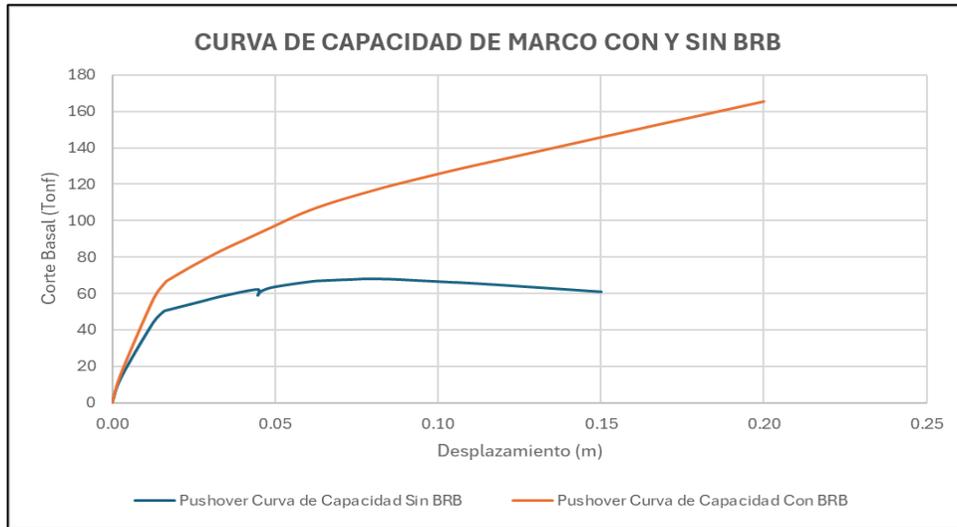
Fuente: Propia.

### **Marco de 3 vanos, primer piso.**

#### **Curva Pushover (Fuerza vs. Desplazamiento):**

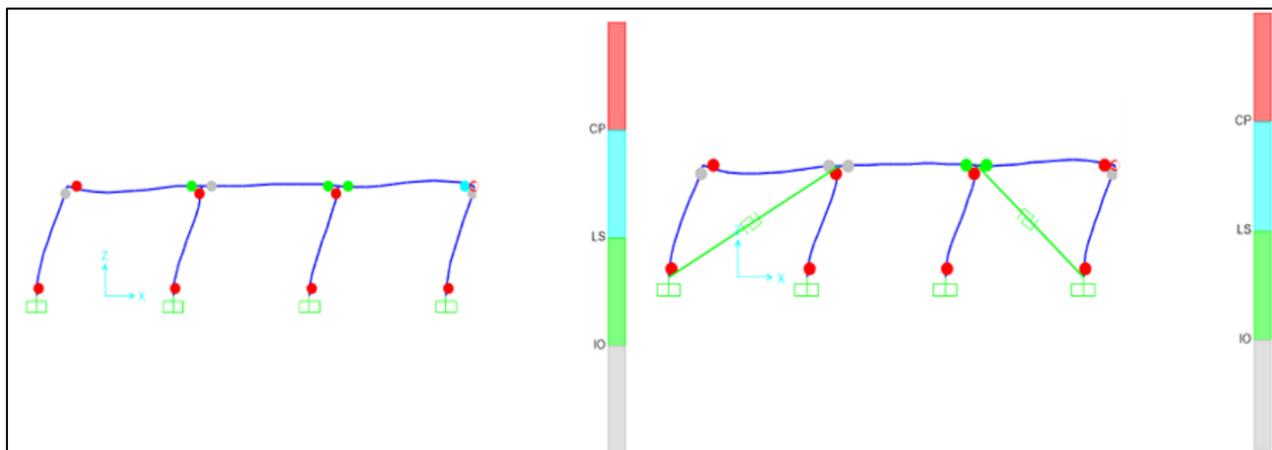
En la curva de capacidad presentada (ver Figura 72), se observa que el marco sin BRB, en la fase plástica de la curva, experimenta una pequeña caída inicial en su capacidad. Esto puede atribuirse al desarrollo de un mecanismo de falla localizado, probablemente asociado con la formación inicial de rótulas plásticas en alguna de las columnas o vigas críticas. Tras este punto, la estructura logra movilizar recursos adicionales mediante la redistribución de momentos, lo que permite un incremento continuo de su capacidad, aunque a un ritmo reducido.

Por otro lado, el marco con BRB mantiene una rigidez lateral superior en un 29% respecto al marco sin BRB. Sin embargo, al aumentar el número de vanos en el marco, el sistema sin BRB tiende a ganar rigidez, lo que reduce la diferencia entre ambos sistemas. Esto implica que, en estructuras con más vanos, la rigidez lateral del marco sin BRB se acerca progresivamente a la del marco con BRB, como se evidenciará en análisis posteriores. Cabe destacar que la capacidad máxima del marco con BRB es 2,4 veces mayor que la del marco sin BRB, lo que confirma su efectividad en el refuerzo estructural.



**Figura 76.** Curva de capacidad de marco de un piso y tres vanos.  
Fuente: Propia.

En cuanto a la formación de rótulas plásticas (Ver Figura 73), el marco con BRB muestra un comportamiento favorable al limitar el daño significativo a las vigas, como es el caso de la viga de la segunda columna. No obstante, se detectan daños severos y deformaciones permanentes en las columnas en la conexión con las vigas. Es importante resaltar que estas deformaciones ocurren bajo una carga lateral equivalente a 2,4 veces la carga del marco sin BRB, lo que refuerza la utilidad de los BRB como una solución efectiva para incrementar la capacidad y mejorar el desempeño estructural.



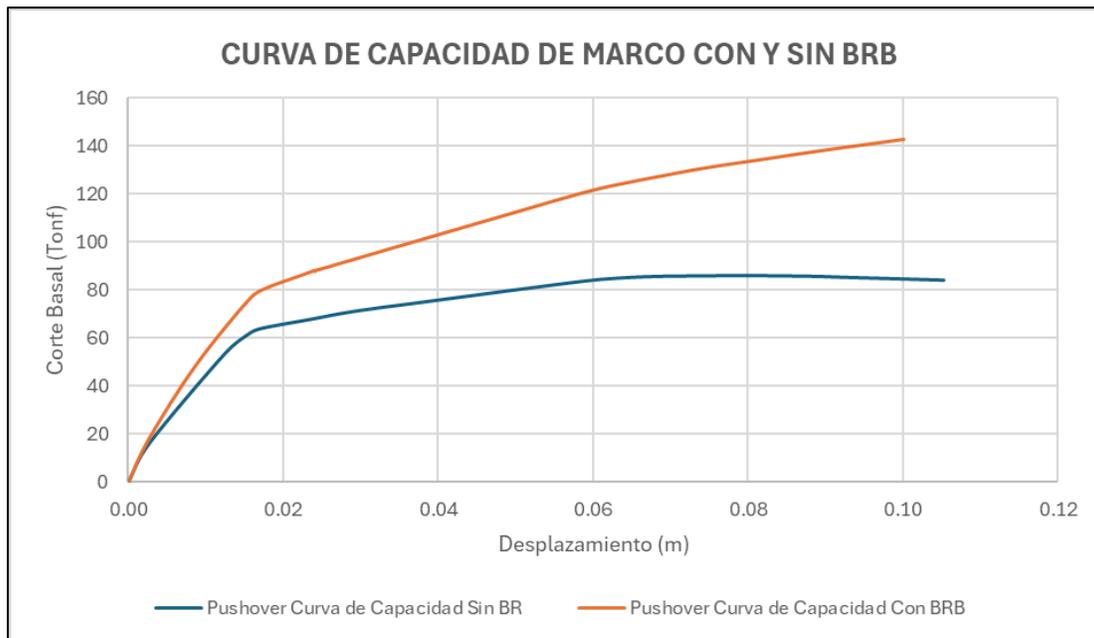
**Figura 77.** Rotulas plásticas en marco de un piso y tres vanos. Fuente: Propia.

## Marco de 4 vanos, primer piso.

### Curva Pushover (Fuerza vs. Desplazamiento):

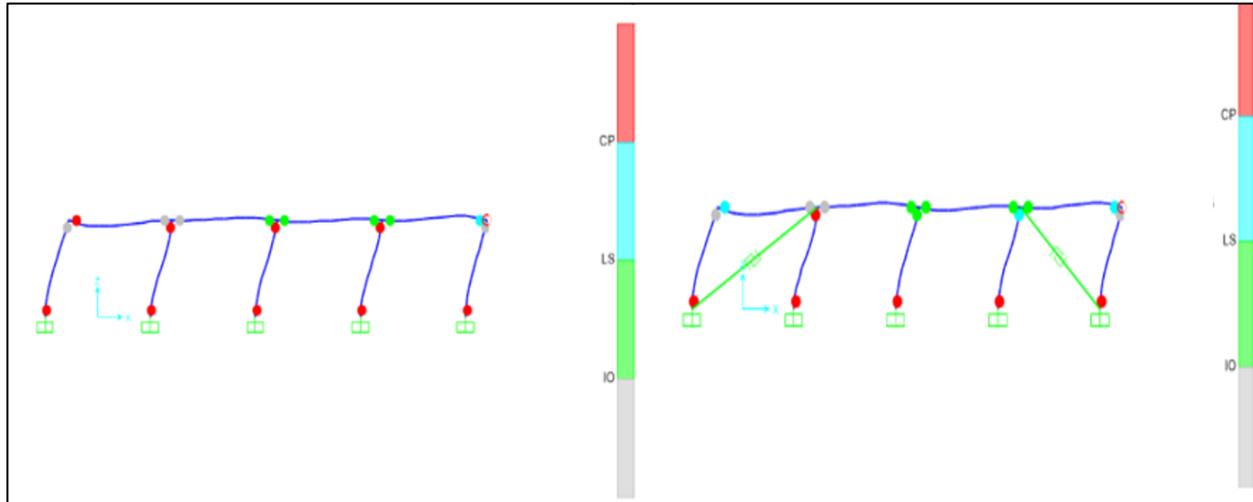
Tal como se mencionó anteriormente, el aumento en el número de vanos en la estructura incrementa su rigidez, lo que genera una tendencia a que el marco sin BRB se acerque en rigidez al marco con BRB. Sin embargo, este último continúa mostrando una rigidez lateral superior, con un 28% más respecto al marco sin BRB (Ver Figura 74). Además, el marco con BRB alcanza una capacidad máxima que es 1,6 veces mayor que la del marco sin BRB, destacando su ventaja en términos de capacidad estructural.

En cuanto a la formación de rótulas plásticas, y como se observa en la Figura 75, el marco con BRB presenta una mejora significativa en las rótulas generadas en las columnas conectadas con las vigas. Estas rótulas muestran un nivel de daño leve (IO, Immediate Occupancy), mientras que en el marco sin BRB se evidencia un daño severo (CP, Collapse Prevention). Esto refuerza el impacto positivo del uso de BRB para reducir el nivel de daño en las zonas críticas de la estructura bajo cargas extremas.



**Figura 80.** Curva de capacidad de marco de un piso y cuatro vanos.

Fuente: Propia.



**Figura 81.** Rotulas plásticas en marco de un piso y cuatro vanos.

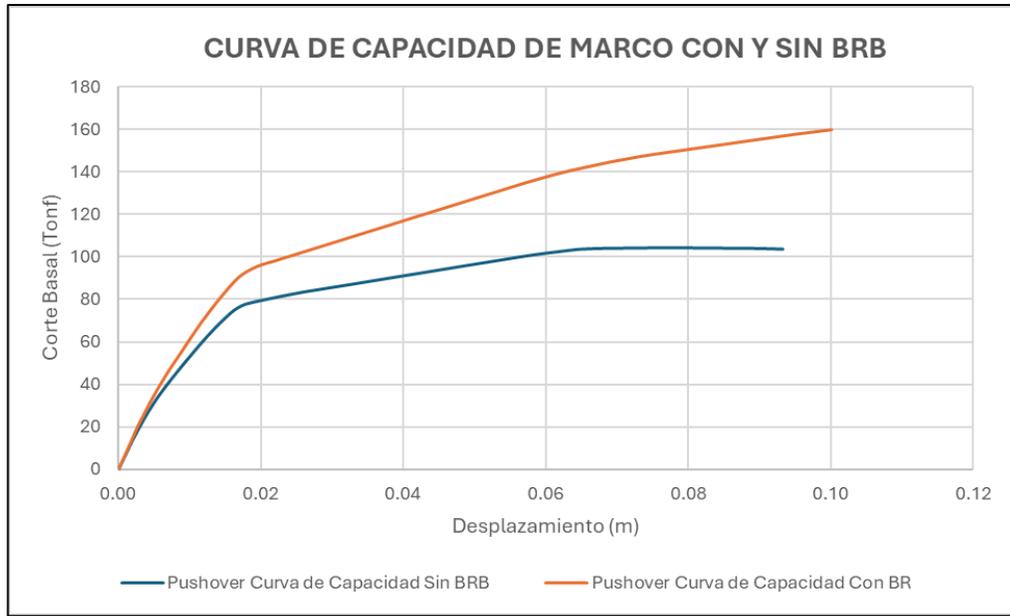
Fuente: Propia.

### Marco de 5 vanos, primer piso.

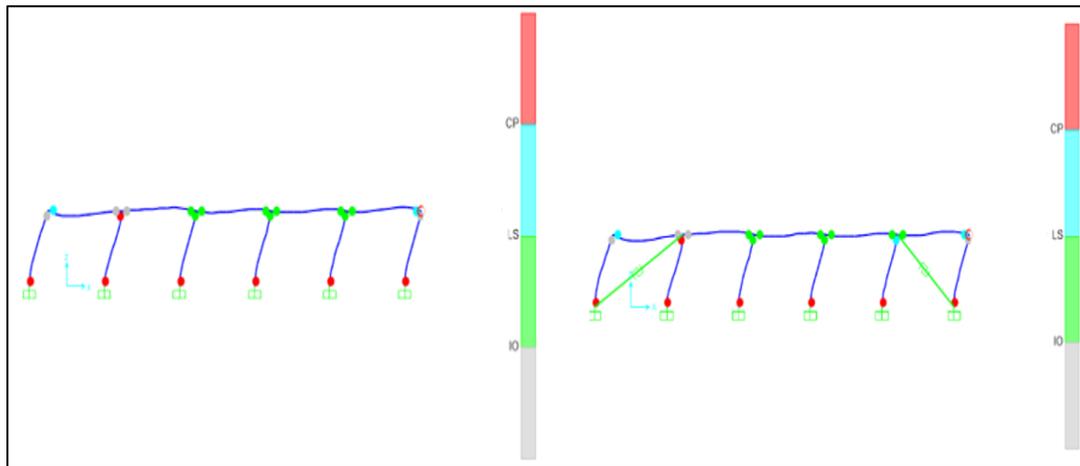
#### Curva Pushover (Fuerza vs. Desplazamiento):

Al igual que en los análisis previos, se evidencia que en el marco con 5 vanos la rigidez aumenta progresivamente. Sin embargo, la rigidez lateral del marco con BRB sigue siendo un 18% superior en comparación con el marco sin BRB. Además, la capacidad máxima del marco con BRB es 1,5 veces mayor que la del marco sin BRB, confirmando su ventaja en capacidad estructural (Ver Figura 76).

En cuanto a la formación de rótulas plásticas, no se observa una diferencia significativa entre ambos marcos, lo que sugiere que el uso de BRB no afecta de manera notable la distribución o el nivel de daño en este aspecto específico (Ver Figura 77).



**Figura 82.** Curva de capacidad de marco de un piso y cinco vanos.  
Fuente: Propia.



**Figura 83.** Rotulas plásticas en marco de un piso y cinco vanos.  
Fuente: Propia.

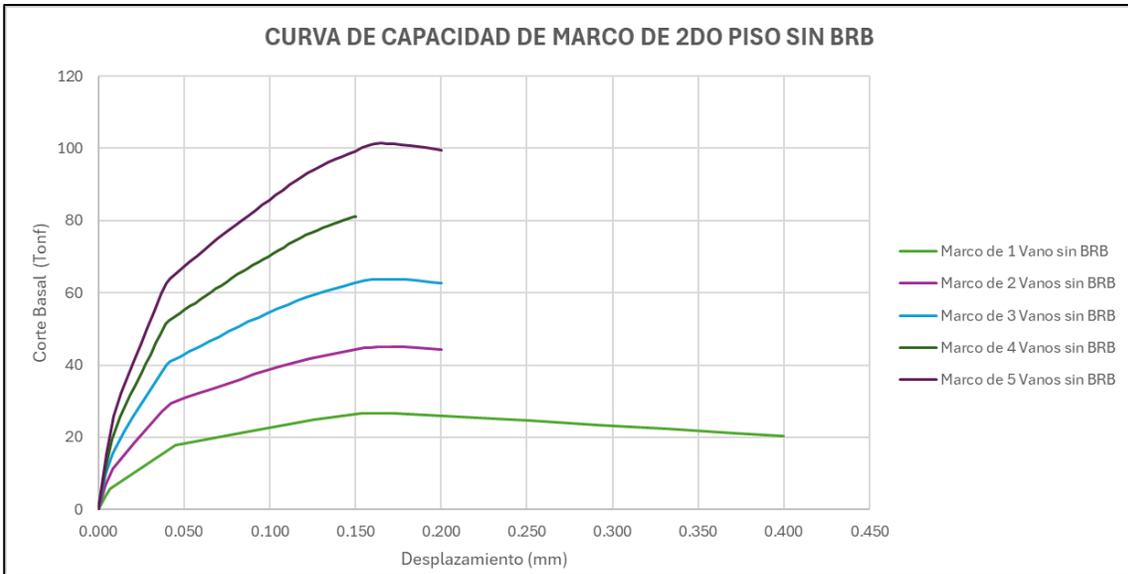
## **Marcos con segundo piso de 1 a 5 vanos.**

### **Curva Pushover (Fuerza vs. Desplazamiento):**

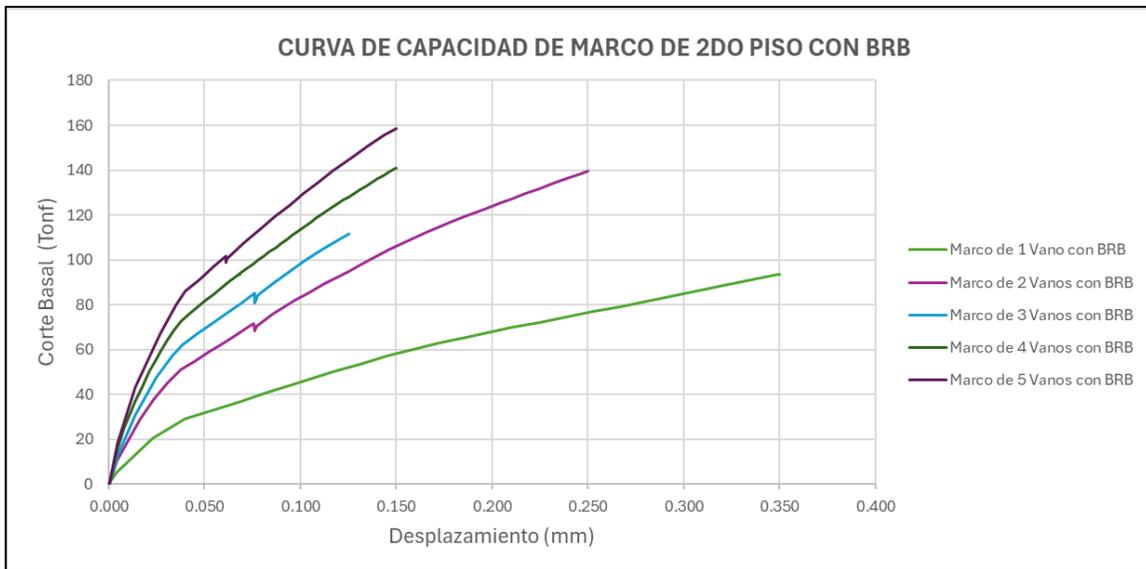
Al igual que en los análisis realizados para marcos de un piso, a continuación, se presenta la curva de capacidad correspondiente a marcos de 2 pisos con y sin BRB (Ver Figura 78 y 79). Este análisis permite evidenciar cómo, al aumentar la cantidad de vanos, la rigidez de la estructura incrementa gradualmente. Sin embargo, los marcos con BRB continúan demostrando una superioridad tanto en rigidez lateral como en capacidad máxima en comparación con los marcos sin BRB.

En el caso de los marcos con BRB, se observa un comportamiento particular en la fase plástica de la curva, donde experimentan una pequeña caída inicial en su capacidad (Ver Figura 79). Este fenómeno puede atribuirse al desarrollo de un mecanismo de falla localizado, probablemente asociado con la formación temprana de rótulas plásticas en columnas o vigas críticas. Pese a esta caída inicial, el marco con BRB logra movilizar recursos adicionales, como la redistribución de esfuerzos, lo que permite que su capacidad siga aumentando, aunque a un ritmo más moderado.

Es importante destacar que, aunque los marcos con BRB presentan una caída inicial en la fase plástica, la rigidez lateral y la capacidad máxima siguen siendo significativamente mayores que las de los marcos sin BRB. Este comportamiento resalta la efectividad de los BRB en mejorar el desempeño estructural, especialmente bajo cargas extremas, al proporcionar una mayor capacidad de absorción de energía y un mejor control de los daños estructurales.

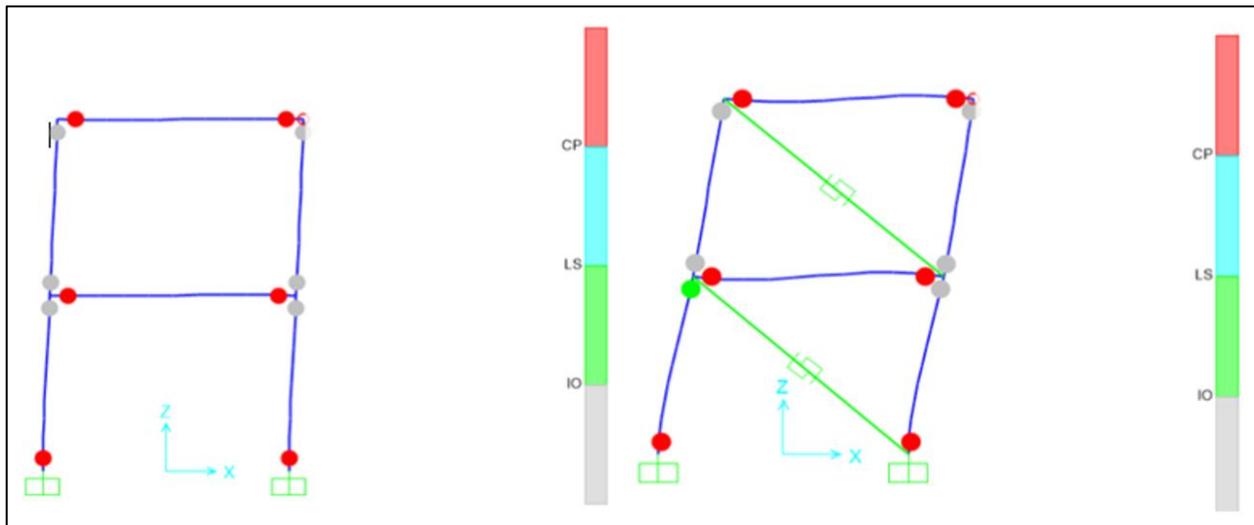


**Figura 85.** Curva de capacidad de marcos de dos pisos de 1 a 5 vanos sin BRB.  
Fuente: Propia.

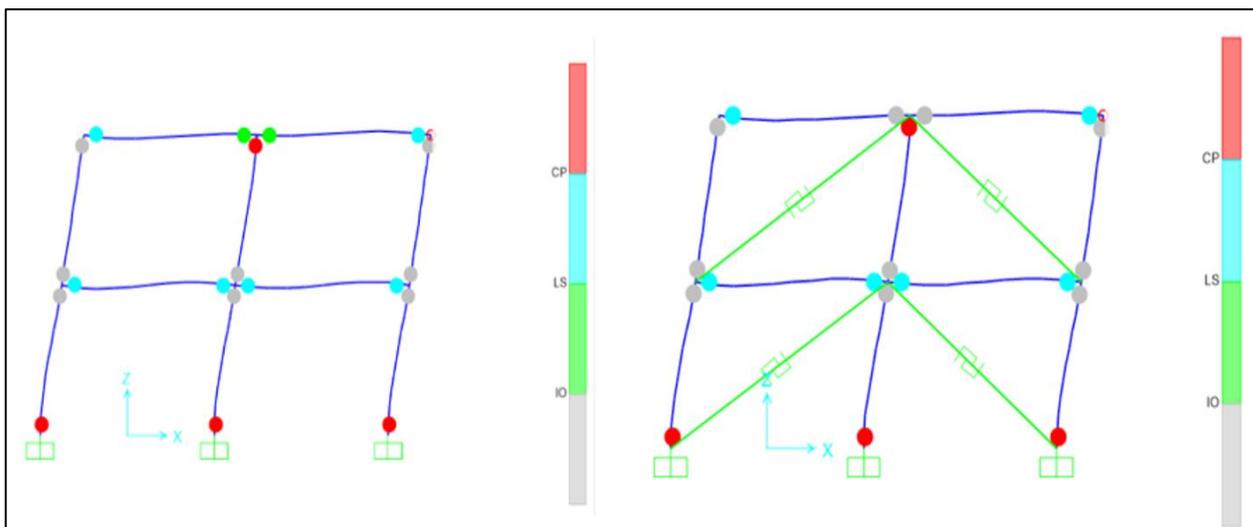


**Figura 84.** Curva de capacidad de marcos de dos pisos de 1 a 5 vanos con BRB.  
Fuente: Propia.

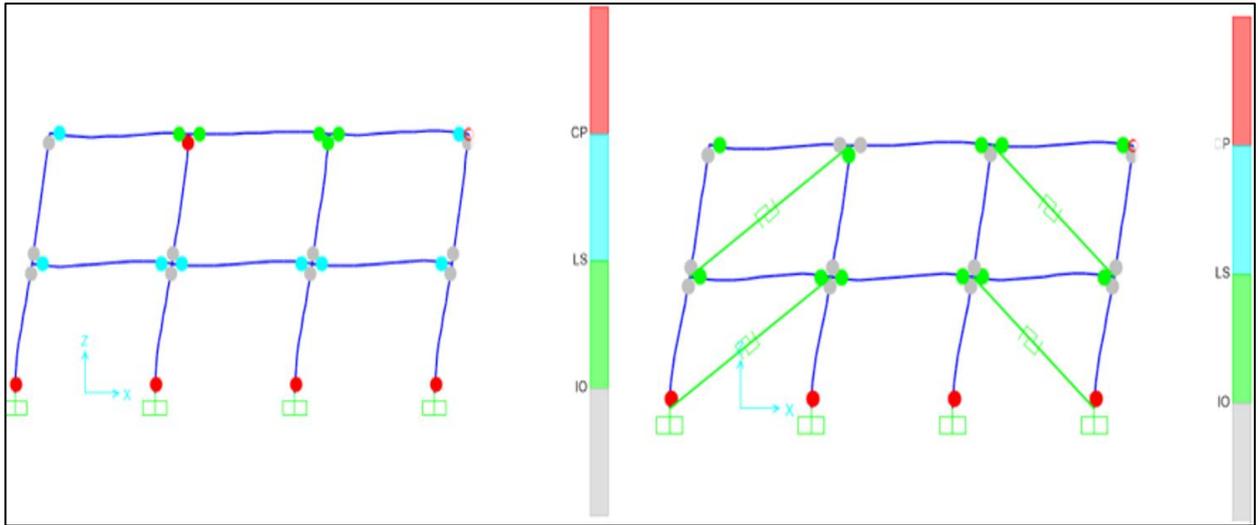
En las siguientes figuras la formación de rotulas plásticas para los marcos con segundo.



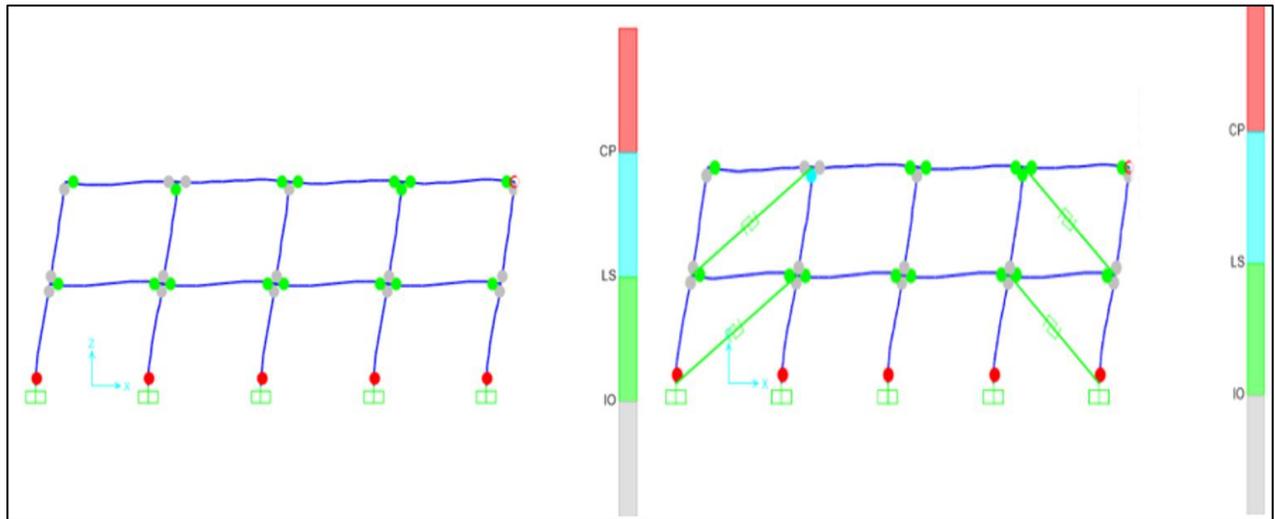
**Figura 86.** Rotulas plásticas en marco de dos pisos y un vano. Fuente: Propia.



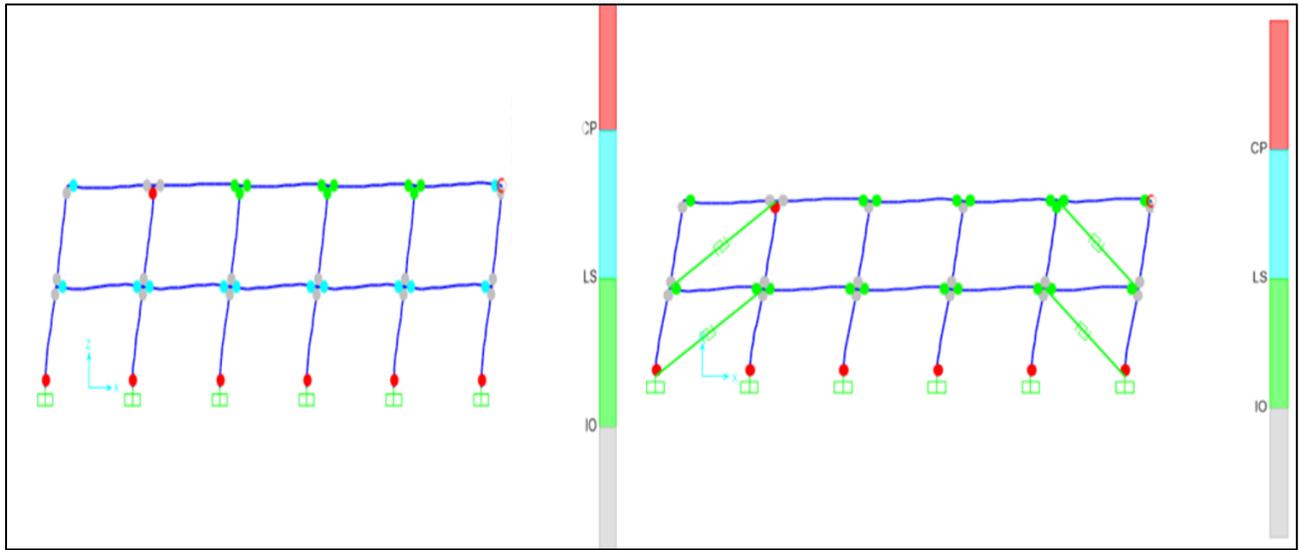
**Figura 87.** Rotulas plásticas en marco de dos piso y dos vanos. Fuente: Propia.



**Figura 88.** Rotulas plásticas en marco de dos piso y tres vanos. Fuente: Propia.



**Figura 91.** Rotulas plásticas en marco de dos piso y cuatro vanos. Fuente: Propia.



**Figura 92.** Rotulas plásticas en marco de dos piso y cinco vanos. Fuente: Propia.

## CONCLUSIÓN

La presente investigación se centró en el diseño y análisis de una propuesta de riostras de pandeo restringido (BRB) adaptadas para estructuras de menor escala, utilizando métodos de elementos finitos con el software ANSYS. El objetivo principal fue evaluar su desempeño bajo condiciones de carga cíclica y analizar su efectividad para mejorar la respuesta estructural frente a eventos sísmicos. A lo largo de este estudio, se evaluaron las capacidades y el comportamiento del dispositivo, permitiendo obtener conclusiones que abordan las preguntas de investigación planteadas.

En cuanto al primer objetivo específico, la capacidad estructural de las riostras de pandeo restringido con madera como material confinante se estimó en 267,000 N en compresión y 264,650 N en tracción. En el comportamiento de los componentes, se observó que el núcleo de acero del dispositivo se plastifica en la zona de fluencia, donde se encuentra confinada por la madera. Esto optimiza el comportamiento general al evitar la sobrecarga de la madera. Al comparar el esfuerzo normal de la madera con la tensión admisible a flexión según la normativa chilena, se concluyó que el esfuerzo normal es significativamente inferior a la tensión admisible, lo que demuestra que el encamisado de acero cumple su función al evitar la flexión de la madera y, por ende, reducir la tensión en la estructura.

El dispositivo fue modelado utilizando el método de elementos finitos con el software ANSYS, considerando la no linealidad de los materiales y los contactos, siguiendo el protocolo de descarga establecido por el AISC 341. El comportamiento histerético obtenido mostró que el BRB presenta una disipación de energía, lo que es fundamental para el rendimiento de este tipo de sistemas en situaciones sísmicas.

En la comparación del comportamiento de los marcos con y sin BRB, se observó que la capacidad estructural de los marcos con BRB aumenta considerablemente, multiplicándose de 2 a 3 veces la capacidad máxima de la estructura. Además, la rigidez lateral del sistema experimenta un aumento superior al 40% en algunos casos, lo que evidencia una mejora considerable en la respuesta sísmica de las estructuras. Aunque la

rigidez lateral de los marcos sin BRB se acerca a la de los marcos con BRB a medida que aumentan los vanos, el uso del BRB sigue siendo superior en términos de desempeño estructural.

A partir de los resultados obtenidos, se identificaron diversas líneas de investigación que podrían complementar y expandir los hallazgos de esta tesis. Una de las áreas clave es la realización de análisis detallados de las conexiones del BRB, dado que estas tienen una influencia significativa en el comportamiento global del dispositivo y en la transferencia eficiente de fuerzas.

Asimismo, se destaca la necesidad de implementar modelos más avanzados que permitan capturar con mayor precisión el comportamiento no lineal de los materiales, considerando efectos como el endurecimiento cinemático y la degradación del material bajo cargas cíclicas. Esto facilitaría una representación más realista de los mecanismos de falla y deformación, mejorando la confiabilidad de los resultados numéricos.

Una línea de investigación prioritaria es la realización de estudios experimentales para comparar el comportamiento histerético obtenido mediante simulaciones computacionales con los resultados observados en ensayos físicos. Este enfoque permitiría validar los modelos desarrollados, identificar posibles discrepancias y ajustar parámetros críticos para mejorar la precisión de las simulaciones.

Además, se sugiere evaluar el desempeño del BRB en modelos estructurales más representativos, como edificios o sistemas metálicos completos. Estos estudios permitirían analizar su eficacia y adaptabilidad en escenarios prácticos, considerando factores como la interacción entre componentes, la distribución de cargas y el impacto en el comportamiento global de las estructuras. La combinación de estudios experimentales y computacionales en estas áreas puede ofrecer una visión integral y abrir nuevas oportunidades para el desarrollo y optimización de dispositivos BRB.

Esta investigación demostró que la propuesta de un BRB adaptado para estructuras de menor escala es una solución técnica viable y efectiva para mejorar el desempeño estructural frente a sismos. A pesar de los desafíos enfrentados, los resultados obtenidos confirman que esta innovación tiene el potencial de contribuir significativamente al desarrollo de soluciones estructurales más accesibles y resilientes. La implementación de estas riostras no solo responde a la necesidad de mejorar la seguridad de las edificaciones en contextos sísmicos, sino que también representa un avance hacia la democratización de tecnologías estructurales más eficientes y sostenibles.

## BIBLIOGRAFIA

Alemayehu, R. W., Kim, Y., Bae, J., & Ju, Y. K. (2020). Cyclic load test and finite element analysis of NOVEL buckling-restrained brace. *Materials*, 13(22), 5103. <https://doi.org/10.3390/ma13225103>.

AllQuakes. (2 de 07 de 2024). allquakes. Obtenido de <https://allquakes.com/es/terremotos/chile/stats.html>.

American Institute of Steel Construction. (2022). *Seismic provisions for structural steel buildings (AISC 341-22)*. Chicago, IL: Author.

American Institute of Steel Construction. (2022). *Specification for structural steel buildings (AISC 360-22)*. Chicago, IL: Author.

American Concrete Institute. (2019). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19)*. Farmington Hills, MI: Author.

American Society of Civil Engineers. (2023). *Seismic evaluation and retrofit of existing buildings (ASCE 41-23)*

Bahrami, A., & Heidari, M. (2020). Evaluation of structural response of composite steel-concrete eccentrically buckling-restrained braced frames. *Journal of Applied Engineering Science*, 18(4), 591-600. <https://doi.org/10.5937/jaes0-25497>.

Black, C., Makris, N., & Aiken, I. (2002). "Component test-ting, stability analysis and characterization of blucking-restrained braces". Pacific Earthquake Engineering Research Center University of California, Report N° PEER-002/08.

Blomgren, H.-E., Koppitz, J.-P., Díaz Valdés, A., & Ko, E. (2016). The heavy timber buckling-restrained braced frame as a solution for commercial buildings in regions of high seismicity. Conference Paper presented at the World Conference on Timber Engineering, August 2016.

Canales, M., Herrera, R., Fahnestock, L., Zaruma, S., & Tremblay, R. (2017). Seismic performance of buckling restrained braced frames in a Chilean building. Paper presented at the 16th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chile, January 9-13, 2017. Paper No. 4295.

Cancelado, R. A. (2013). Caracterización experimental de riostras de pandeo restringido a escala sometidas a cargas cíclicas. *Revista de Ingeniería*, (39), 17-23. <https://doi.org/10.16924/riua.v0i39.413>.

Centro UC de Innovación en Madera. (2019). Análisis del estado de la construcción en madera en Chile: Estadística de elección de materialidad y costo de construcción.

Clark, P., Aiken, I. G., Kasai, K. K., & Kimura, I. (1999). "Design Procedures for Buildings Incorporating Hysteretic Damping Devices". Proceedings 68th Annual Convention, 355-371. Structural Engineers Association of California, Sacramento, CA.

Crisafulli, F. J. (2012). "Diseño sismorresistente de contrucciones de acero". Santiago, Chile: Asociación Latinoamericana del Acero - Alacero.

Dorrance, W. P., Huang, M. A., MacRae, G. A., Bashiri, M., & Li, M-H. (2023). Design considerations for buckling restrained braces in timber frames subject to out-of-plane deformations. En NZSEE 2023 Annual Conference. Universidad de Canterbury, Christchurch, Nueva Zelanda; Universidad de Columbia Británica, Vancouver, Canadá.

Ehsani, M. R. (2017). Buckling reinforcement for structural members (US Patent No. 9,719,255 B1). United States Patent and Trademark Office.

Gilbert, C. F. (2016). Development of an innovative method for the adaptation of advanced structural bracing systems into heavy timber structures for seismic applications [Tesis de maestría, Carleton University]. Ottawa, Ontario: Faculty of Graduate and Postdoctoral Affairs.

Gray, M., Christopoulos, C., Packer, J., & De Oliveira, C. (2012, febrero). A new brace option for ductile braced frames: The Scorpion Yielding Brace System (YBS). Modern Steel Construction. Cast Connex Corporation.

Guda, T. S. (2022). Mass timber buckling restrained braces installed in MT1 project (Master's project). California State Polytechnic University, Pomona.

Guerrero, H., Ji, T., & Escobar, J. A. (2016). Experimental studies of a steel frame model with and without buckling-restrained braces. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 95, 33-52. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica. Available in: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61849772002>.

Guerrero, H., Zamora, E., Escobar, J. A., & Gómez, R. (2020). Experimental behavior of a low-cost seismic energy dissipation device. *Ingeniería sísmica*, (102), 65-81. <https://doi.org/10.18867/ris.102.507>.

Hoyos Aristizábal, D. (2014). Calibración de un modelo matemático para determinar el desempeño de un elemento estructural de disipación de energía por deformación

para la F´C Control y Diseño de Estructuras S. A. S. [Trabajo de grado, Escuela de Ingeniería de Antioquia].

Hussain, H., & Kim, D.-K. (2023). Advancements and future prospects of buckling restrained braces for corrosive environments: A comprehensive literature review. *Buildings*, 13(9), 2156. <https://doi.org/10.3390/buildings13092156>.

Instituto Nacional de Normalización. (2014). NCh 1198 Of.2014: Madera - Construcciones en madera - Cálculo. Santiago, Chile: INN.

Instituto Nacional de Normalización. (2003). NCh 2369 Of.2003: Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales. Santiago, Chile: INN.

Jin, Y., Xu, M., & Jia, J. (2023). Analysis of the seismic performances of structures reinforced by self-centering buckling-restrained braces. *Archives of Civil Engineering*, 69(3), 645–663. <https://doi.org/10.24425/ace.2023.146103>.

Manosalva Ludeña, J. (2023). Diseño de un disipador energético de tipo Buckling – restrained braces (BRB) para edificaciones en las zonas sísmicas II y III del Perú [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas]. Repositorio Institucional de la UNTRM.

Maurya, A., Eatherton, M. R., Matsui, R., & Florig, S. H. (2016). Experimental investigation of miniature buckling restrained braces for use as structural fuses. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.ijstr.2016.08.018>.

Muñoz, T. L. (2011). Evolución del espacio doméstico en "Blocks" de Vivienda Social. Autoconstrucción y Vulnerabilidad en conjuntos de vivienda Básica. *Revistacis*.

Modi, A. A., Sayagavi, V. G., & Salunke, P. J. (2019). Optimization of Buckling Restrained Bracings (BRB) by Comparative Study of Energy Dissipation in Commercial Structures. *International Journal of Engineering Development and Research*, 7(4), 53-58. Retrieved from <https://ppl-ai-file-upload.s3.amazonaws.com/web/direct-files/27467970/68e384ca-5e41-44c6-a178-53b188b09025/40.-Optimization-of-Buckling-Restrained-Bracings.pdf>.

Morral Faúndez, M. J. (2015). Modelamiento numérico de arriostamientos de acero con pandeo restringido mediante el uso de elastómeros. Santiago de Chile.

Nuñez, I., Boroschek, R., Comte, D., & Contreras, V. (2015). NUEVO PELIGROSÍSMICO PARA CHILE. XI Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica ACHISINA, 1-12.

Orellana Ayre, A. K. (2020). Análisis de factibilidad de la aplicación de arriostres de pandeo restringido como sistema de control de respuesta (Tesis de maestría). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.

Ostovar, N., & Hejazi, F. (2023). Buckling-restrained bracing system with ultra-high-performance fiber concrete. *Applied Sciences*, 13(14), 8250. <https://doi.org/10.3390/app13148250>.

Oviedo, J. A., & Duque, M. P. (2009). Disipadores histeréticos metálicos como técnica de control de respuesta sísmica en edificaciones colombianas. *Revista EIA*, 11, 51-63.

Ozcelik, R., Dikiciasik, Y., Civelek, K. B., Erdil, E. F., & Erdal, F. (2020). Design of buckling restrained braces with composite technique. *Steel and Composite Structures*, 35(5), 687-699. <https://doi.org/10.12989/scs.2020.35.5.687>.

Palazzo, G., Lopez-Almansa, F., Cahís, X., & Crisafulli, F. (2009). "A low-tech dissipative buckling restrained brace. Design, analysis, production and testing". *Engineering Structures*, Vol. 31, No.9, pp 2152-2161.

Pantelides, C. P., Murphy, C., Blomgren, H. E., & Rammer, D. R. (2020). Mass timber buckling-restrained brace for seismic regions. En 17th World Conference on Earthquake Engineering (Paper No. C000302). Sendai, Japón.

Pit, K., & Liu, J. (2019). Heavy timber buckling-restrained braces [Senior project, California Polytechnic State University]. Advisor: Kevin J. Dong. Print date: March 9, 2019.

Resta, J. (2019). The Timber Buckling Restrained Brace Frame [Senior Project Report]. University of California, San Diego. Prepared for Prof. Kevin Dong, sponsored by SSG Structural Engineers, LLP. Retrieved from <https://ppl-ai-file-upload.s3.amazonaws.com/web/direct-files/27573249/10c2c39c-80e4-49bf-8752-16fa1313ce7b/2.-The-Timber-Buckling-Restrained-Brace-Frame.pdf>.

Sabelli, R., & López, W. (2006). Buckling-restrained braced frames. [Informe]. Walter P Moore y Rutherford & Chekene.

Sánchez Mera, B. A. (2023). Implementación de arriostres de pandeo restringido como protección sísmica en una edificación de concreto armado de 8 niveles [Tesis de Ingeniería Civil, Universidad Católica Sedes Sapientiae]. Repositorio Institucional. <https://ppl-ai-file-upload.s3.amazonaws.com/web/direct-files/27467970/52d66cc7-172c-49e0-8342-a155ef5dfd5b/35.-Implementacion-de-arriostres-de-pandeo-restringido-como.pdf>.

San Martín Tapia, I. A. (2021). Evaluación del desempeño sísmico de un edificio de acero con diagonales restringidas al pandeo [Tesis de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción]. [https://ppl-ai-file-upload.s3.amazonaws.com/web/direct-files/201111153/b658b2b4-59cf-4078-97c5-e72e45eef6c2/37.-San-Martin-Tapia\\_Ignacio-Tesis.pdf](https://ppl-ai-file-upload.s3.amazonaws.com/web/direct-files/201111153/b658b2b4-59cf-4078-97c5-e72e45eef6c2/37.-San-Martin-Tapia_Ignacio-Tesis.pdf).

Shadiya, K. P., & Anjusha, R. (2015). Bracing configurations effect on buckling restrained braced frames. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 4(4), 2552-2559. <https://doi.org/10.15680/IJIRSET.2015.0404063>.

Sharp, F., Castaneda, A., & Dong, K. (2022). Timber buckling restrained brace (TBRB). California Polytechnic State University, San Luis Obispo.

Shallan, O., Abd-El-Mottaleb, H. E., El-Kahlawy, A., & Fathy, E. (2024). Buckling restrained braces: A review on classifications, design strategy, and applications. *Engineering Sciences and Technology*, 46, 24–38. <https://doi.org/10.21608/EIJEST.2023.210867.1230>.

Surendran, N., & Varma, A. P. (2017). Buckling restrained braces (BRB) – A review. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4(3), 2320-2324. e-ISSN: 2395-0056. Retrieved from <https://www.irjet.net/archives/V4/i3/IRJET-V4I3109.pdf>.

Suzuki, K., Nakao, S., Sagara, R., & Miyata, Y. (2020). Seismic performance of buckling-restrained brace for middle-rise timber frame structure. En *Proceedings of the 17th World Conference on Earthquake Engineering (Paper No. C002521)*. Sendai, Japón.

Takeuchi, T., Terazawa, Y., Komuro, S., Kurata, T., & Sitler, B. (2022). Performance and failure modes of mass timber buckling-restrained braces under cyclic loading. *Engineering Structures*, 266, 114462. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114462>.

Takeuchi, T. (2018). Buckling-Restrained Brace: History, Design and Applications. *Key Engineering Materials*, 763, 50-60. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.763.50>.

Tectonus Resilient Seismic Solutions. (2022, octubre). Seismic protection devices: Tectonus vs BRB. Recuperado de <https://www.tectonus.com/resources/blog/seismic-protection-devices-tectonus-rsfj-vs-brb>.

Tremblay, R., Poncet, L., Bolduc, P., Neville, R., & DeVall, R. (2004). Testing and design of buckling restrained braces for Canadian applications. Paper presented at the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada. Paper No. 2893.

Uang, C., & Nakashima, M. (2004). "Steel Buckling-Restrained Braced Frames in Earthquake Engineering". Engineering Seismology to Performance-based Engineering, Bozorgnia, Y and Bertero V.V (Ed.), 16-1 a 16-37 USA: CRC Press.

Wada, A., & Takeuchi, T. (2018). Buckling restrained braces and applications. Tokyo: The Japan Society of Seismic Isolation

Xie, Q. (2005). "State of the art of buckling-restrained braces in Asia". Journal of Constructional Steel Research. 61(6) ,727-748.

Yousef-beik, S. M. M., Veismoradi, S., Zarnani, P., Hashemi, A., & Quenneville, P. (2020). Self-centring bracing system: avoidance of elastic buckling for braces with one intermediate damper. Paper presented at the NZSEE 2020 Annual Conference. Auckland University of Technology, Auckland; University of Auckland, Auckland. Retrieved from <https://ppl-ai-file-upload.s3.amazonaws.com/web/direct-files/20444331/0fe28b3b-cbba-4a49-957a-48651a8b0a01/13.-Self-centring-bracing-system-avoidance-of-elastic-buckling-for-braces-with-one-intermediate-damper.pdf>.

Zhao, J., Wang, H., Dong, J., & Zhang, L. (2022). Experimental study of maintenance-free steel-composite buckling restrained braces. Materials, 15(15), 5538. <https://doi.org/10.3390/ma15165538>.

Zub, C. I. (2018). Seismic protection of building framed structures with buckling restrained braces (Protecția antiseismică a structurilor în cadre cu contravântuiri cu flambaj împiedecat) (Teze de doctorat ale UPT, Seria 5, Nr. 143). Editura Politehnica.