

2026

CARACTERIZACIÓN Y MODELADO NUMÉRICO DE UN  
AISLADOR SÍSMICO DE BASE TIPO *LEAD RUBBER BEARING* (LFB)  
DE SECCIÓN CILÍNDRICA

Ing. Nestor Quiroz Núñez



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO  
FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN CIENCIAS (ESTRUCTURAS)

**“CARACTERIZACIÓN Y MODELADO NUMÉRICO DE UN  
AISLADOR SÍSMICO DE BASE TIPO *LEAD RUBBER BEARING*  
(LFB) DE SECCIÓN CILÍNDRICA”.**

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Ciencias (Estructuras)

Presenta:

Ing. Néstor Quiroz Núñez

Dirigido por:

Dr. Iván Fermín Arjona Catzim

Querétaro, Querétaro, Junio 2026

La presente obra está bajo la licencia:  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

### Usted es libre de:

**Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

### Bajo los siguientes términos:



**Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



**NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



**SinDerivadas** — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

**No hay restricciones adicionales** — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

### Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN CIENCIAS (ESTRUCTURAS)

**“CARACTERIZACIÓN Y MODELADO NUMÉRICO DE UN AISLADOR  
SÍSMICO DE BASE TIPO *LEAD RUBBER BEARING* (LRB) DE SECCIÓN  
CILÍNDRICA”.**

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias (Estructuras)

Presenta:

Ing. Néstor Quiroz Núñez

Dirigido por:

Dr. Iván Fermín Arjona Catzim

Dr. Iván Fermín Arjona Catzim  
Presidente

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel  
Secretario

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández  
Vocal

Dr. Luis Francisco Pérez Moreno  
Suplente

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza  
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.  
Junio 2026  
México

## DEDICATORIA

A mis padres por el apoyo, la paciencia y el amor otorgado durante esta etapa de mi vida, por nunca dejarme y siempre creer en mí, gracias por acompañarme en cada paso y por ser los mejores padres que pudiera pedir.

A mis hermanos, por todo el apoyo brindado y por estar al pendiente de mí en todo momento, por cada risa y alegría en cada oportunidad que podíamos vernos, tanto físicas como virtuales, son los mejores hermanos, gracias por cada pelea y disociación que nos caracteriza.

Zuleika por estar al pendiente de mí en todo momento, por el gran apoyo brindado emocional durante toda esta maravillosa etapa, gracias por ser un pilar y la mejor hermana que pudiera tener.

## AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología por brindarme el apoyo económico para mi investigación y poder concluir mis estudios de Posgrado.

A la Universidad Autónoma de Querétaro por la oportunidad de formar parte de su comunidad.

Al Dr. Iván Fermín Arjona Catzim por el apoyo y guía durante mi estancia en la Universidad, así como su amistad incondicional, gracias por las pláticas y los ánimos otorgado en cada paso, gracias por siempre traerme de vuelta y caminar en esta etapa.

Al Dr. Jaime Moisés Horta Rangel por el gran apoyo y conocimiento brindado a lo largo de mi investigación.

Al Dr. Luis Francisco Pérez Moreno por su gran apoyo y su amistad, gracias por ser quien es, y siempre estar al pendiente.

Al Dr. Miguel Ángel Pérez y Hernández por darme la oportunidad de ingresar y formar parte de la comunidad científica y por el apoyo brindado a lo largo del posgrado.

A mis compañeros de cubículo, gracias por hacer más amena la estancia en la universidad y por cada momento que vivimos juntos dentro y fuera de la universidad, gracias por su compañía y amistad.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

|                                                   |      |
|---------------------------------------------------|------|
| DEDICATORIA                                       | I    |
| AGRADECIMIENTOS                                   | II   |
| ÍNDICE DE CONTENIDO                               | III  |
| ÍNDICE DE FIGURAS                                 | V    |
| ÍNDICE DE TABLAS                                  | VII  |
| RESUMEN                                           | VIII |
| ABSTRACT                                          | IX   |
| 1. INTRODUCCIÓN                                   | 1    |
| 1.1. Justificación                                | 2    |
| 1.2. Descripción del problema                     | 4    |
| 2. ANTECEDENTES                                   | 6    |
| 2.1. Dispositivos de aislamiento de base.         | 7    |
| 2.2. Aislador de Caucho con Núcleo de Plomo (LRB) | 11   |
| 2.2.1. Descripción de los aisladores LRB          | 14   |
| 2.2.2. Materiales del dispositivo                 | 15   |
| 2.2.2.1. Elastómero                               | 15   |
| 2.2.2.2. Acero                                    | 17   |
| 2.2.2.3. Plomo                                    | 17   |
| 2.2.3. Tipos de contactos                         | 18   |
| 2.3. Análisis de los materiales                   | 21   |
| 2.3.1. Elastómero                                 | 21   |
| 2.3.2. Acero                                      | 23   |
| 2.3.3. Plomo                                      | 24   |
| 2.3.4. Rigidez                                    | 25   |
| 2.4. Newton Raphson                               | 26   |
| 3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS                          | 28   |
| 3.1. Hipótesis                                    | 28   |
| 3.2. Objetivo general                             | 28   |

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| 3.3. Objetivos específicos                                   | 28 |
| 4. METODOLOGÍA                                               | 29 |
| 4.1. Modelación del aislador tipo LRB                        | 30 |
| 4.2. Calibración del dispositivo.                            | 31 |
| 4.2.1. Análisis de los materiales                            | 31 |
| 4.2.2. Tipo de elemento finito.                              | 32 |
| 4.2.3. Discretización del dispositivo                        | 33 |
| 4.2.4. Tipo de contacto                                      | 34 |
| 4.2.5. Calibración                                           | 34 |
| 4.3. Modificación las propiedades geométricas                | 36 |
| 4.3.1. Diámetro                                              | 37 |
| 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS                                    | 38 |
| 5.1. Análisis de contactos                                   | 38 |
| 5.2. Gráficas de histéresis                                  | 40 |
| 5.3. Propiedades Mecánicas                                   | 44 |
| 5.4. Comportamiento del dispositivo bajo cargas controladas. | 47 |
| 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES                            | 51 |
| 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS                                | 53 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Sismo de Kobe, Japón. 1995. (El Comercio, 2020)                                                                   | 3  |
| Figura 2. Respuesta sísmica de una estructura                                                                               | 6  |
| Figura 3. Primer aislador sísmico de base                                                                                   | 7  |
| Figura 4. Aislador de Elastómero. Extraído de Tchamo & Zhou, (2018)                                                         | 9  |
| Figura 5. Sistema de aislamiento de la Biblioteca internacional de literatura infantil, Japón. Adaptado de Zeballos, (2008) | 10 |
| Figura 6. Foothill Communities Law and Justice Center, Ranch Cucamonga.                                                     | 11 |
| Figura 7. Aislador de caucho con núcleo de plomo. Extraído de UNAM, (2018).                                                 | 15 |
| Figura 8. Modelo analizado por Ahmadipour & Alam, (2017).                                                                   | 18 |
| Figura 9. Curva de esfuerzo-deformación característico de un material hiperelástico.                                        | 22 |
| Figura 10. Grafica Esfuerzo-Deformación del acero.                                                                          | 24 |
| Figura 11. Gráfica de histéresis. Adaptado de Zakariya et al., (2023)                                                       | 25 |
| Figura 12. Método de Newton Raphson.                                                                                        | 27 |
| Figura 13. Resumen de la metodología a seguir.                                                                              | 29 |
| Figura 14. Características del dispositivo. Adaptado de Kalpakidis & Constantinou, (2010)                                   | 30 |
| Figura 15. Elemento hexaédrico de 20 nodos. Adaptado de Ansys (2023)                                                        | 32 |
| Figura 16. Discretización del dispositivo LRB.                                                                              | 33 |
| Figura 17. Corte central de la discretización del dispositivo LRB.                                                          | 33 |
| Figura 18. Función senoidal y fuerzas aplicadas al modelo.                                                                  | 35 |
| Figura 19. Gráfica esfuerzo -Deformación (Kalpakidis & Constantinou, 2008)                                                  | 36 |
| Figura 20. Contacto tipo Fricción considerando en el plomo.                                                                 | 38 |
| Figura 21. Contacto tipo “Bonded” considerado en todo el dispositivo.                                                       | 39 |
| Figura 22. Resultados del análisis de mesa vibratoria vs modelo numérico                                                    | 40 |
| Figura 23. Resultados de la reducción del diámetro del dispositivo.                                                         | 41 |
| Figura 24. Resultados de variación del plomo del 10% y dispositivo de 0 al 30%                                              | 42 |
| Figura 25. Resultados de variación del plomo del 20% y dispositivo de 0 al 30%.                                             | 43 |
| Figura 26. Resultados de variación del plomo del 30% y dispositivo de 0 al 30%                                              | 44 |

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 27. Grafica de amortiguamiento del dispositivo LRB.          | 45 |
| Figura 28. Grafica de Rigidez del dispositivo LRB.                  | 46 |
| Figura 29. Grafica de esfuerzo cortante del dispositivo LRB.        | 47 |
| Figura 30. Deformación vertical del dispositivo cuando L-0% y C-30% | 48 |
| Figura 31. Deformación horizontal cuando L-0% y C-30%.              | 49 |
| Figura 32. Esfuerzos de Von Mises en 104mm de desplazamiento.       | 50 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Sistema pasivo de aislamiento                                                                                                | 8  |
| Tabla 2. Propiedades mecánicas de los elementos y sus contactos de acuerdo a diferentes autores. (Ren et al., 2020; Tan et al., 2022) | 21 |
| Tabla 3. Propiedades de los materiales                                                                                                | 31 |
| Tabla 4. Coeficientes del elastómero.                                                                                                 | 32 |
| Tabla 5. Variaciones del diámetro del dispositivo.                                                                                    | 37 |

## RESUMEN

El uso de sistemas de aislamiento en estructuras, como los dispositivos de caucho con núcleo de plomo, se ha vuelto cada vez más popular para mitigar los efectos dañinos de las fuerzas sísmicas en edificios e infraestructura. Estos sistemas de aislamiento proporcionan una interfaz flexible entre la estructura y el suelo, permitiendo la absorción y disipación de energía sísmica. El presente trabajo de investigación se centra en el desarrollo de un modelo numérico que tiene como objetivo analizar y determinar las propiedades del aislador de caucho de plomo bajo fuerzas dinámicas y de esta manera evitar las pruebas experimentales. El modelo tiene en cuenta las características específicas del dispositivo e incorpora varios factores, como las propiedades del material, la geometría y las condiciones de carga. El proceso de investigación consistió en calibrar un modelo tridimensional utilizando funciones sinusoidales y cargas axiales basadas en datos experimentales de la literatura, aplicando posteriormente un análisis paramétrico ANOVA para evaluar variaciones geométricas del 0% al 30% en los diámetros del núcleo de plomo y las capas de elastómero. Los hallazgos principales demostraron que el contacto tipo fricción entre el plomo y los demás componentes modela con mayor fidelidad la respuesta física real en comparación con el contacto de unión simple. Se encontró que la configuración más eficiente se alcanza al reducir el diámetro del elastómero en un 30% manteniendo el núcleo de plomo original (L-0% C-30%), lo que incrementó el cortante efectivo unitario en un 76% ( $0.0037 \text{ kN/mm}^2$ ) respecto al modelo de control, operando de forma segura en un rango tensional de 1,380 a 4,140 MPa. Se concluye que este estudio es vital porque proporciona una herramienta de alta confiabilidad para predecir el desempeño mecánico de los aisladores sin depender de costosos y complejos ensayos físicos a escala real. El trabajo finaliza ratificando que la manipulación geométrica controlada permite proyectar dispositivos más esbeltos, económicos y eficientes que optimizan la disipación de energía ante demandas sísmicas extremas bajo la normativa vigente.

**Palabras clave:** Análisis paramétrico, Modelo numérico, MEF, Amortiguamiento efectivo, Optimización

## ABSTRACT

The use of isolation systems in structures, such as lead-rubber devices, has become increasingly popular for mitigating the damaging effects of seismic forces on buildings and infrastructure. These isolation systems provide a flexible interface between the structure and the ground, allowing for the absorption and dissipation of seismic energy. This research focuses on developing a numerical model aimed at analyzing and determining the properties of the lead-rubber isolator under dynamic forces, thereby avoiding the need for experimental testing. The model accounts for the specific characteristics of the device and incorporates various factors, such as material properties, geometry, and loading conditions. The research process consisted of calibrating a three-dimensional model using sinusoidal functions and axial loads based on experimental data from the literature, subsequently applying a parametric ANOVA analysis to evaluate geometric variations ranging from 0% to 30% in the diameters of the lead core and elastomer layers. The main findings showed that frictional contact between the lead and the other components more accurately models the actual physical response compared to simple bond contact. It was found that the most efficient configuration is achieved by reducing the elastomer diameter by 30% while maintaining the original lead core (L-0% C-30%), which increased the effective unit shear strength by 76% (0.0037 kN/mm<sup>2</sup>) compared to the control model, operating safely within a stress range of 1,380 to 4,140 MPa. It is concluded that this study is vital because it provides a highly reliable tool for predicting the mechanical performance of isolators without relying on costly and complex full-scale physical tests. The study concludes by confirming that controlled geometric manipulation allows for the design of slimmer, more economical, and more efficient devices that optimize energy dissipation under extreme seismic demands in accordance with current regulations.

**Keywords:** Parametric analysis, Numerical model, FEM, Effective damping, Optimization

## 1. INTRODUCCIÓN

El aislamiento sísmico es una técnica de diseño utilizada globalmente para mitigar el daño en el sistema estructural primario, así como en los componentes no estructurales y el contenido que se encuentra almacenado en las edificaciones. Su implementación es crítica en infraestructura de importancia estratégica como es el caso de centrales nucleares, centros hospitalarios y terminales aeroportuarias, donde la continuidad operativa es fundamental tras un evento sísmico (Reys, 1993).

La implementación de dispositivos de aislamiento de base busca incrementar la seguridad estructural desacoplando la superestructura de la subestructura, incrementando el periodo natural de la edificación, alejándose de las frecuencias con mayor pico energético del movimiento del suelo, minimizando la probabilidad de que el sistema entre en resonancia y reduciendo drásticamente las fuerzas inerciales transmitidas (Naeim, 2007).

Existen diferentes dispositivos de aislamiento, entre el cual destacan los aisladores elastoméricos, ampliamente utilizado a nivel mundial. Al aumentar el periodo fundamental del edificio, se obtiene una reducción considerable en las aceleraciones de los pisos y los cortantes basales de la estructura. Sin embargo, en los puntos de aislamiento se presentan grandes desplazamientos horizontales debido a su baja rigidez lateral de estos dispositivos, exigiendo el diseño de una separación adecuada entre construcciones adyacentes para evitar choque entre ellos (Naeim, 2007; Naeim & Kelly, 1999) .

Dentro de este tipo de dispositivos el aislador de elastómero con núcleo de plomo (LRB, por sus siglas en inglés), puede disipar entre el 25% y el 30% de la energía sísmica. Estos dispositivos están compuestos por multicapas de acero estructural, elastómero vulcanizado y un núcleo de plomo. Sus características geométricas y de amortiguamiento se determinan de acuerdo con el código de diseño y las consideraciones del especialista (Warn & Ryan, 2012). Dentro de esta categoría de sistemas, a pesar de la eficiencia comprobada, la caracterización precisa de su comportamiento mecánico bajo condiciones extremas, presentan desafíos significativos. Uno de los principales problemas radica en la complejidad y el alto costo de las pruebas experimentales a escala real, las cuales requieren laboratorios de alta capacidad

para simular velocidades y cargas verticales simultáneas, lo que motiva al desarrollo de estudios que permitan predecir con mayor exactitud la respuesta del dispositivo sin depender exclusivamente de ensayos físicos exhaustivos.

Esta investigación logró caracterizar numéricamente el aislador tipo LRB de sección circular mediante el método de elementos finitos, validando las propiedades mecánicas del dispositivo sin recurrir a ensayos físicos directos. Los resultados demuestran que el modelado es una herramienta de alta fidelidad, identificando que la configuración más eficiente (plomo L-0% y las cuñas C-30%) incrementa el cortante efectivo unitario en un 76% respecto al modelo de control. Este hallazgo ratifica que la optimización geométrica permite proyectar dispositivos más esbeltos y económicos, garantizando una disipación de energía superior y un comportamiento seguro.

### 1.1. Justificación

En diversos países latinoamericanos, el diseño sismorresistente convencional se basa en la filosofía de diseño por desempeño, la cual concede a la estructura capacidad, rigidez y resistencia necesaria para entrar en el rango inelástico. Bajo este enfoque, se acepta la presencia de daño estructural controlado mediante el aprovechamiento de la ductilidad del sistema (Gaxiola Camacho, 2022; Rodríguez, 2016). No obstante, la evidencia histórica de eventos sísmicos recientes, ha puesto de manifiesto las limitaciones de este paradigma, impulsando la implementación de sistemas de control de respuesta sísmica. Esta tecnología permite mitigar el daño en elementos estructurales, asegurar la continuidad operativa y superar el objetivo mínimo de salvaguardar la vida humana y evitar el colapso.

El 19 de septiembre de 1985 la Ciudad de México fue azotada por un sismo de magnitud de momento  $M_w = 8.0$  con origen en la costa de Michoacán de tipo interplaca y debido a las características del suelo, el cual en la zona del lago está compuesto por arcilla altamente compresible y contenido de agua considerable, provocó una sacudida considerable a las edificaciones, teniendo periodos de suelo de 2.0 segundos y aceleraciones máximas de 760 gal en las estructuras más altas, entre 21 y 50 metros de altura, donde alrededor de 757

edificaciones sufrieron desde daños severos hasta el colapso de la estructura, en edificaciones que poseían de 7 a 15 niveles. Este evento sísmico es uno de los desastres más devastadores que la Ciudad de México ha presentado, donde más de 10,000 personas perdieron la vida y hubo más de 5,000 desaparecidos y cerca de 300,000 personas perdieron sus hogares (Meli Piralla et al., 1986).

Por otra parte, en 1995, Japón fue golpeado por el terremoto de Kobe, con una magnitud de momento de  $M_w = 7.3$ , donde más de 6,400 personas fallecieron y más de 640,000 viviendas presentaron daños estructurales severos o tuvieron un colapso total, resultado del sismo y de eventos subsecuentes (Figura 1). Como consecuencia de este desastre, Japón se vio obligado de manera masiva en la creación y estudio de aisladores sísmicos, debido a la gran pérdida humana y económica, lo cual ocasionó la búsqueda de alternativas al diseño sísmico tradicional (Pan et al., 2004).



Figura 1. Sismo de Kobe, Japón. 1995. (El Comercio, 2020)

Para el 19 de septiembre de 2017 la Ciudad de México presentó por segunda ocasión la presencia de un terremoto, ocasionado por una falla de tipo con magnitud de momento  $M_w = 7.1$ , provocando un periodo de suelo en promedio de 1.3s y con aceleraciones alrededor de 460 gal en las estructuras más altas, donde 37 edificaciones colapsaron parcial o completamente, siendo aproximadamente el 70% edificios multifamiliares de entre 4 y 10 niveles (Catalán Pérez, 2020).

Por otra parte, el 90% de las edificaciones que colapsaron habían sido construidos antes de 1985, por lo que se puede entender que, para el sismo de ese año, habían presentado algún tipo de daños no considerable para su seguridad estructural, sin embargo, la presencia de un segundo fenómeno no fue soportado por la estructura. En ambos sismos las edificaciones más afectadas fueron del tipo multifamiliar, de acuerdo al INEGI, éstas ocupan el 29.85% del total de viviendas registradas en la Ciudad de México (Cruz A et al., 2017).

México ha experimentado eventos sísmicos con mecanismos de ruptura y contenido de frecuencias constantes que han evidenciado la vulnerabilidad de la zona metropolitana. Mientras que el sismo de 1985 se caracterizó por una gran duración y predominación de periodos largos, el sismo de 2017, generó altas aceleraciones en componentes de periodo corto debido a su cercanía al epicentro (Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2022). Esta dualidad en la demanda sísmica resalta la necesidad de sistemas de aislamiento versátiles, capaces de disipar energía ante espectros de respuesta con distintas profundidades y aceleraciones pico.

## 1.2. Descripción del problema

El dispositivo de aislamiento sísmico tipo LRB, es uno de los elementos más utilizado a nivel mundial, sin embargo, la mayoría de los estudios se orientan a modelos a escala, lo que impide la visualización de fenómenos físicos complejos presenten en prototipos reales, como el calentamiento del núcleo del plomo, y la degradación térmica asociada a la resistencia de las capas de caucho (Kalpakidis & Constantinou, 2010).

Adicionalmente, existen limitaciones en la capacidad de vulcanizado industrial, que en países líderes como Japón se limita a un diámetro máximo de 1500 mm. Lo ideal en la práctica de la ingeniería estructural es contar con modelo numéricos de alta confiabilidad que permitan predecir estas variables térmicas y mecánicas sin las restricciones de escala ni los altos costos de los ensayos físicos. Por lo tanto, la presente investigación contribuye a este objetivo mediante la simulación de elemento finito que permite caracterizar el comportamiento del

dispositivo de manera sostenible y segura, superando las limitaciones de los ensayos convencionales.

A partir del panorama internacional descrito, es evidente que el éxito de las estructuras aisladas radica en la correcta selección del dispositivo según el estudio y la demanda del sitio. Aunque el sistema de soluciones incluye dispositivos deslizantes y elastoméricos de diversas configuraciones, la presente investigación se enfocará exclusivamente en los aisladores de elastómero con núcleo de plomo (LRB, por sus siglas en inglés). Esta elección se justifica debido a que representan la tecnología de control más amplia comercialmente y la que ofrece una solución integral de flexibilidad y amortiguamiento en un solo elemento. No obstante, dado que su comportamiento numérico y térmico sigue presentando incertidumbres bajo las condiciones particulares de demanda sísmica local, se vuelve indispensable profundizar en su caracterización numérica y estructural, objetivo central de este documento.

## 2. ANTECEDENTES

El principal objetivo de los dispositivos de aislamiento sísmico de base es el separar la superestructura de la subestructura, donde el aislamiento de los elementos ocasiona que las oscilaciones máximas se presenten en el dispositivo y no sobre la estructura, de esta manera se puede evitar que la estructura entre en resonancia con los movimientos del suelo, puesto que el aislador permite aumentar el periodo del edificio debido a la flexibilidad horizontal que posee (Luis & Villafañe, 2010; Oviedo et al., 2006).

En una edificación diseñada bajo desempeño, al recibir fuerzas dinámicas como el sismo, se generan daños sobre los elementos estructurales, debido a la disipación de energía provocada por esas fuerzas, además de que los desplazamientos presentes son mayores a los permitidos (Figura 2 a), en cambio una edificación con aislamiento de base, los desplazamientos máximos se presentan sobre el dispositivo y debido a las características que presente el aislador, tiene la capacidad de disipar la energía y poder reducir los desplazamientos, aceleraciones y fuerzas cortantes de la superestructura (Figura 2 b) (Gioacchini et al., 2013).

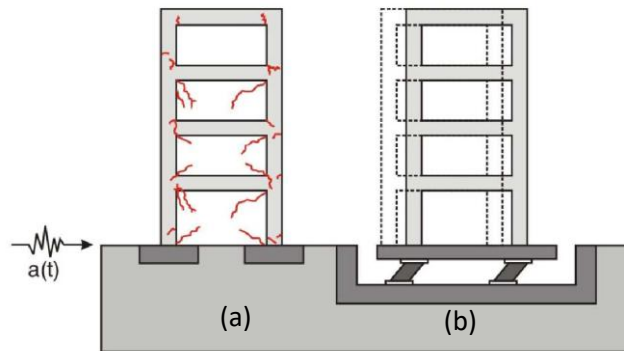


Figura 2. Respuesta sísmica de una estructura  
a) convencional b) aislada. (Gioacchini et al., 2013)

El primer dispositivo en aislamiento sísmico de base (IB) fue presentado por Tournalli en 1870, dicho dispositivo corresponde a un plato inferior y superior de acero cóncavo, que descansa sobre la cimentación y la superestructura respectivamente, al centro es colocado una esfera de acero (Figura 3), la cual ocasiona un movimiento libre en todas direcciones

(Touaillon Jules, 1870) y disipa la energía mediante fricción, este tipo de dispositivos son mejor conocidos como Péndulo friccional.

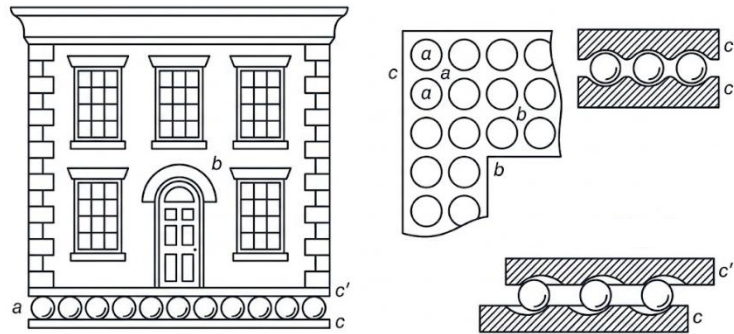


Figura 3. Primer aislador sísmico de base  
(Touaillon Jules, 1870)

Uno de los principales problemas que muestran este tipo de dispositivos, se encuentra en las deformaciones horizontales que exhibe ante la presencia de un terremoto, esto ocasiona que las construcciones que cuentan con un aislamiento de base presenten desplazamientos horizontales excesivos, obligando a la estructura tener una separación adecuada entre las construcciones aledañas, para que de esta manera no tengan impacto una con la otra. (Kapasakalis et al., 2021).

### 2.1. Dispositivos de aislamiento de base.

A nivel mundial los dispositivos de protección sísmica se clasifican en 3 grandes grupos: sistema de control pasivo, sistema de control activo e híbrido (Tabla 1). Los sistemas de control pasivo son dispositivos que no requieren ningún tipo de energía externa para su funcionamiento, es decir su activación es por sí solo y la disipación de la energía sísmica está dado por los materiales que lo componen (Higashino & Okamoto, 2006; Oviedo et al., 2006; Luis & Villafañe, 2010). Mientras que los dispositivos de control activo son elementos que requieren algún tipo de energía externa continua para su óptimo funcionamiento, ya que

reciben la información de sensores para poder ejercer fuerza de manera opuesta a la de la estructura.

Los dispositivos de control híbrido, son elementos que combinan las características de un dispositivo pasivo y activo, de esta manera se cuenta con una mayor eficiencia en comparación de ambos dispositivos por separado.

Tabla 1. Sistema pasivo de aislamiento

| Sistema Control  | Tipo                                 | Dispositivo                                         |
|------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Pasivo           | Mecanismos deslizantes o de rodillos | Apoyo de rodillos                                   |
|                  |                                      | Apoyo de placa deslizante, tipo péndulo, basculante |
|                  |                                      | Capa deslizante                                     |
|                  |                                      | Otros                                               |
|                  | Elemento flexible                    | Elastómero de multicapas                            |
|                  |                                      | Dispositivo flexible                                |
|                  |                                      | Otros                                               |
| Activo e Híbrido | Efectos de masa                      | Amortiguamiento activo de masa                      |
|                  |                                      | Amortiguado híbrido de masa                         |
|                  | Control de fuerza                    | Tendón activo                                       |
|                  |                                      | otro                                                |

Entre los dispositivos de control pasivo más utilizado, se encuentran los aisladores de base elastoméricos (Figura 4), de los cuales destacan los aisladores de alto amortiguamiento y los dispositivos con núcleo de plomo.



Figura 4. Aislador de Elastómero. Extraído de *Tchamo & Zhou, (2018)*

Debido a los grandes desplazamientos que presentan los aisladores de base, existen más investigaciones como la de Tsai (1995) y Palazzo et al. (1997) quienes para complementar a los aisladores de base incorporaron dispositivos de masa agregada y amortiguadores de inercia (TDM y TID respectivamente, por sus siglas en inglés), colocándolos en la primera planta y trabajando en conjunto con el aislador y a su vez reduciendo los desplazamientos antes mencionados. En la investigación de Palazzo et al. (1997) se concluyó que al tener los dos dispositivos se obtiene una reducción en la respuesta del 50%, mientras que la de Tsai se observan ciertas limitaciones debido a su alto grado de amortiguamiento, sin embargo, esta solución aplicaría un sobre costo a la estructura final.

Por otra parte, la técnica de aislamiento de base no solo es implementada en proyectos nuevos, sino también en edificios con alturas considerables, aplicándolos en pisos medios. Por otra parte, también ha sido utilizado en la rehabilitación de edificios históricos, como es el caso de la Biblioteca Internacional de Literatura Infantil en Japón, la cual fue modernizada con un sistema de aislamiento de base y de esta manera poder cumplir con los criterios de diseño sísmicos presentes en el país (Figura 5) (Tasaka et al., 2008).



Figura 5. Sistema de aislamiento de la Biblioteca internacional de literatura infantil, Japón. Adaptado de Zeballos, (2008)

Para 2015 Japón, contaba con menos de 200 edificios con un tipo de aislamiento de base, con alturas desde 60 hasta 180 metros. El uso más común de estos edificios corresponde a condominios residenciales de concreto armado. Este tipo de estructuras poseen periodos prolongados y cuentan con una respuesta reducida en comparación a los edificios de baja o mediana altura, por lo que al implementar un aislamiento de base se busca incrementar su rendimiento. Muchos profesionales ven el uso de aisladores imprácticos en edificaciones altas, de lo cual, el código de Japón demuestra todo lo contrario (Becker et al., 2015).

Por otra parte, el panorama en Estados Unidos presenta restricciones normativas y de aplicación distintas. Debido a la alta complejidad de sus códigos de diseño para estructuras aisladas, la implementación de estos dispositivos se ha limitado mayoritariamente a edificios gubernamentales y de servicios de emergencia, tales como hospitales, ayuntamientos y centros de respuesta inmediata. (Kelly, 1998)

La primera estructura construida en Estados Unidos mediante un sistema de aislamiento de base fue el *Foothill Communities Law and Justice Center, Ranch Cucamonga* el 20 de marzo de 1986 (Figura 6), el cual descansa sobre 98 aisladores elastoméricos (Kdly, 1986; Makris, 2019).

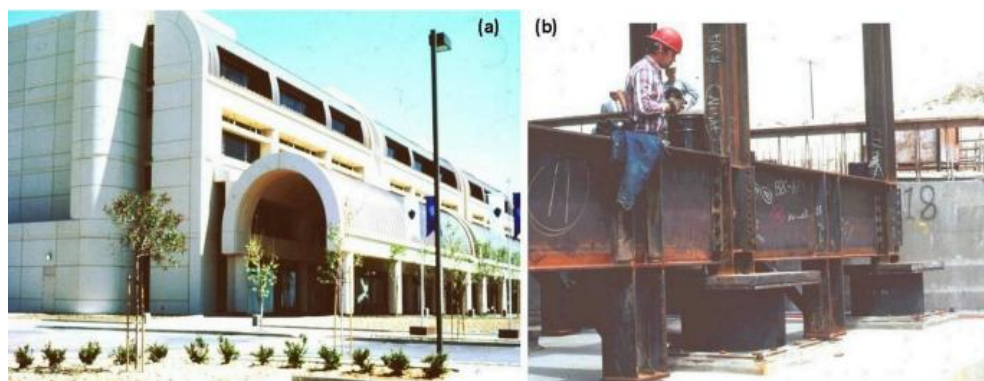


Figura 6. Foothill Communities Law and Justice Center, Ranch Cucamonga.  
Extraído de *De Luca & Guidi, (2019)*  
a) Vista exterior. b) Colocación de aisladores.

Esta diferencia en la aglomeración de la tecnología de aislamiento sísmico no es exclusiva de estas dos naciones, sino que refleja una tendencia global influenciada por las políticas públicas y la evolución de los códigos locales (Martelli & Forni, 2010).

Mientras que en la región de Asia-Pacífico y Europa del Este la adopción de sistemas de protección sísmica ha crecido exponencialmente en el sector residencial y comercial debido a normativas que incentivan la resiliencia urbana como es el caso de China (Zhou & Tan, 2018). Por otro lado, en Latinoamérica el desarrollo ha sido más conservador, países de alta sismicidad como Perú, Chile y México han comenzado a adoptar estas tecnologías principalmente bajo la influencia del código americano, pero enfocado de manera paulatina en la protección de infraestructura hospitalaria crítica (Guerrieri et al., 2015).

## 2.2. Aislador de Caucho con Núcleo de Plomo (LRB)

Los LRB son los dispositivos más utilizados alrededor del mundo, debido a que la cantidad de energía capaz de disipar ronda desde el 25% hasta el 30% (Ozkaya et al., 2011).

La aplicación de este tipo de aislador no solo se limita a edificaciones, sino también es utilizado en el aislamiento de puentes, plantas nucleares, estructuras aeroportuarias, hospitales, remodelación de estructuras históricas y aplicación de edificaciones

multifuncionales de alturas considerables en pisos intermedios (Becker et al., 2015; Kdly, 1986; Makris, 2019; Tasaka et al., 2008).

En el caso de puentes, se ha modificado la guía de diseño propuesta por el código de la *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO por sus siglas en ingles) en su 16ª edición, en el cual Hwang & Chiou (1996) proponen un modelo lineal equivalente, mediante un método de identificación utilizando una relación nominal de endurecimiento por deformación, lo cual es posible extenderse a las almohadillas de caucho con diferentes relaciones de endurecimiento. Dicha propuesta enriqueció la normativa AASHTO al proporcionar a los diseñadores un procedimiento simplificado y de alta fidelidad para la práctica de la ingeniería de puentes.

De manera adicional, en la última década se ha dado mayor relevancia al estudio del comportamiento de las plantas nucleares, debido a la gran cantidad de contaminantes que se podría liberar en caso de una falla estructural durante un evento sísmico. Bajo este escenario, las investigaciones se han centrado en evaluar el desempeño de los dispositivos LRB sometidos a demandas que superan los límites de diseño (M. K. Kim et al., 2013).

Con el fin de validar los criterios de seguridad bajo estas condiciones, se han implementado protocolos experimentales divididos en dos categorías principales: la determinación de propiedades mecánicas básicas mediante modelos a escala, y la evaluación del rendimiento dinámico. Esta última fase comprende ensayos armónicos y dinámicos, aplicando niveles de deformación por cortante de hasta el 100%. De acuerdo con Kim et al. (2013), los resultados de estas caracterizaciones dinámicas demostraron que:

- El comportamiento histerético y amortiguamiento en pruebas armónicas y dinámicas exhiben una geometría similar en los lazos de histéresis obtenidos. No obstante, en los ensayos dinámicos registran un incremento en la capacidad de amortiguamiento debido a la naturaleza de la velocidad de aplicación de la carga.
- Estabilización de ciclos: Tras el tercer ciclo de carga las curvas de respuesta se estabilizan y muestran una coincidencia gráfica significativa, denotando una disipación de energía constante.

En el área de las centrales nucleares, las investigaciones se concentran en comprender el comportamiento no lineal de los dispositivos LRB cuando son sometidos a demandas extremas que superan los límites de diseño. Estas magnitudes de demanda se evalúan en términos de deformación, abarcando rangos que van desde un nivel severo de 100% al 200% hasta condiciones extremas del 300% al 500%; para estas últimas, los protocolos experimentales emplean trayectorias de movimientos elípticos sinusoidales.

La necesidad de evaluar experimentalmente estos rangos extremos de deformación responde directamente a las estrictas exigencias de seguridad internacional. La Comisión de Regulación Nuclear de los Estados Unidos (NUREG, por sus siglas en inglés), en sus reportes establece que las propiedades mecánicas nominales del sistema de aislamiento, como rigidez efectiva y amortiguamiento, no deben de presentar variaciones superiores al 20% a lo largo de la vida útil de la estructura. De este modo, al ensayar a deformaciones del 500% permite garantizar que, incluso ante el sismo de diseño, el dispositivo mantendrá sus propiedades dentro de las tolerancias normativas establecidas a largo plazo.

Pourmasoud et al (2022) en su investigación realizó más de 350 ensayos en 30 dispositivos LRB a escala real, esto para realizar un enfoque y poder estimar con mayor precisión el límite elástico de estos dispositivos con el fin de tener mejores códigos de diseño. Sus resultados establecen que un mejor confinamiento del plomo proporciona un alto nivel elástico y por ende un diseño óptimo, así mismo establece una nueva ecuación para el cálculo del límite elástico del plomo en función de la configuración del aislante y la carga axial aplicada.

Por otra parte, Huang et al. (2023) realiza la modificación de un aislador LRB para obtener una mayor rigidez horizontal al cambiar las rigideces de las capas de elastómero, esto debido a que una rigidez baja es desfavorable para el control de desplazamientos excesivos, lo que podría causar fallas por sobre-límite. Mediante el método de elemento finito investiga las propiedades mecánicas del aislador y mediante SAP2000 realiza el análisis de respuesta estructural, encontrando una mejora al reducir significativamente los costos de reparación y una mayor reserva de seguridad y resistencia al colapso.

Patel et al. (2024) en su investigación busca la manera de proteger infraestructuras críticas (hospitales, plantas nucleares, etc), al identificar problemas de sensibilidad a la temperatura del núcleo de plomo y la degradación del elastómero. Analiza los factores como la interacción suelo-estructura y cargas de impacto, mediante estudios realizados en la india y con simulaciones comparativas en SAP2000, encontrado que los dispositivos LRB, presentan limitaciones en su capacidad vertical bajo grandes desplazamientos y enfatizando que el futuro de la tecnología está en los sistemas de aislamiento tridimensional y materiales más duraderos para garantizar la seguridad total.

Las estructuras ligeras y flexibles, como es el caso de los edificios modulares de acero fallan fácilmente bajo terremotos multidimensionales y los aisladores son demasiados rígidos para estas estructuras livianas, es por ellos que Mo et al. (2024) proponen y prueban un nuevo dispositivo, conocido como *Air Spring-Lead Rubber Bearing* (AS-LRB, por sus siglas en inglés) realizando pruebas físicas de carga vertical y horizontal, seguido de un modelado de elemento finito, encontrando que el resorte de aire gestiona el aislamiento vertical, mientras que el LRB el horizontal, mostrando excelente capacidad de disipación de energía y su rendimiento vertical es influenciado por la fuerza vertical aplicada. Concluyendo que AS-LRB es una solución viable para mejorar la residencia sísmica de construcciones modulares permitiendo superar los límites de alturas debido a su baja resistencia sísmica.

#### 2.2.1. Descripción de los aisladores LRB

Los aisladores tipo LRB están constituidos por un núcleo central de plomo rodeado por un cuerpo laminado de multicapas alternadas de acero estructural (láminas de refuerzo) y caucho vulcanizado. Perimetralmente, el sistema cuenta con un recubrimiento externo de elastómero que protege las placas de acero interiores contra la corrosión y agentes ambientales. Finalmente, en los extremos superior e inferior, se integran placas de conexión de acero de mayor espesor, cuya función es garantizar el anclaje rígido y la transferencia de cargas hacia el sistema estructural.

Las características geométricas de este tipo de aislador están limitadas por el tipo de estructura y el peso que descansa sobre ellos, (Figura 7) (Sun & Soc, 2011), puesto que su diseño depende de estos dos factores y algunos otros, como el espectro de diseño sísmico, para poder establecer las dimensiones finales del elemento.

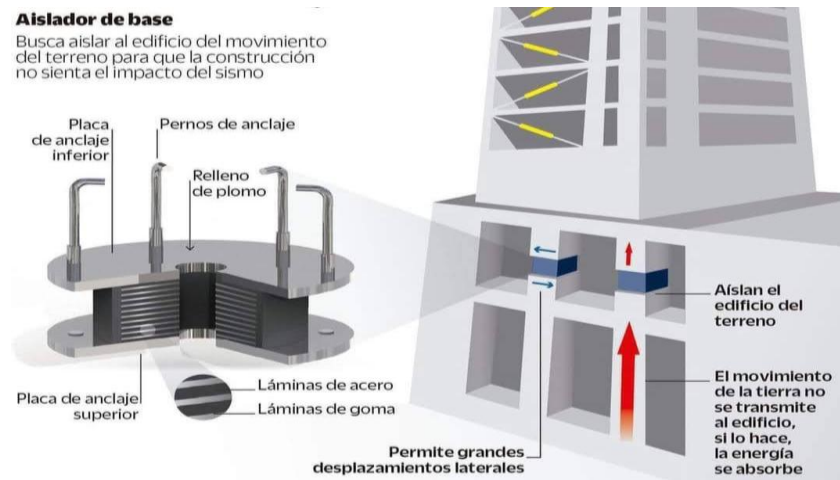


Figura 7. Aislador de caucho con núcleo de plomo. Extraído de UNAM, (2018).

La rigidez y las características de amortiguamiento están dados por el tamaño de las capas de caucho y el núcleo de plomo. Las variables que caracterizan el comportamiento de un LRB, son la rigidez elástica, la rigidez post-elástica, el esfuerzo de fluencia y el peso total de la estructura aislada (Sun & Soc, 2011), características que tienen que ser calculadas de acuerdo con el código de diseño a utilizar y de acuerdo a las consideraciones del especialista.

## 2.2.2. Materiales del dispositivo

### 2.2.2.1. Elastómero

El elastómero empleado en los dispositivos LRB se caracteriza por ser un material con comportamiento hipereelástico, propiedad que le permite experimentar grandes deformaciones no lineales bajo esfuerzos de cortante sin sufrir daño permanente. Al integrarse en el sistema de aislamiento, esta baja rigidez lateral induce un incremento

deliberado en el periodo fundamental de la superestructura, alejando la demanda dinámica de las zonas de mayor aceleración espectral (Naeim & Kelly, 1999). Debido a la complejidad de su respuesta mecánica ante distorsiones severas, la caracterización del caucho mediante modelos de energía de deformación continuo sigue siendo uno de los campos de estudio con mayor vigencia en la ingeniería sísmica.

Yang et al, (2017) ha investigado la degradación de la rigidez vertical del laminado del caucho bajo fuerza lateral, dado que la rigidez vertical solo está determinada por la relación entre la deformación lateral y el radio de la sección, no es afectada por la dirección de la carga, ya sea a compresión o tensión, la forma de la sección y el tamaño de las capas que conforman el aislador. Los resultados muestran que la rigidez vertical se degrada casi a la mitad de la rigidez inicial cuando el desplazamiento lateral es igual al 55% del diámetro del dispositivo.

La resistencia de las almohadillas de caucho, se ve reducido debido a la disipación de la energía y al calentamiento que presenta el núcleo de plomo bajo los movimientos cíclicos presentes. Por lo que Kalpakidis & Constantinou, (2008) proponen un método para incorporar la degradación de la resistencia debido a este calentamiento, para ello realizan un análisis con los límites superiores e inferiores mediante un modelo histerético bilineal, tomando como referencia un análisis conservador dependiente de la temperatura, revelando la importancia de tener en cuenta los efectos del calentamiento del núcleo de plomo, por lo que la incorporación de los factores termodinámicos son un punto importante en el diseño del aislador.

Ante la presencia de movimientos fuertes del suelo, los aisladores tipo LRB, pueden presentar problemas de inestabilidad y deformaciones permanentes, por lo que ocasionaría la necesidad de cambiar las almohadillas de caucho. La investigación de Choi et al. (2006) incorpora la aplicación de alambres de aleación con memoria de forma en el elastómero (SMA, por sus siglas en inglés), presenta una limitación en los desplazamientos relativos de una manera efectiva, teniendo una recuperación a su estado casi original sin deformarse, y, por lo tanto, evitando la rehabilitación del dispositivo al cambiar las almohadillas, como es el caso del aislador de caucho convencional. Este tipo de materiales denominados inteligentes, se han

aplicado en varios tipos de aisladores sísmicos, obteniendo resultados favorables en su implementación.

#### 2.2.2.2. Acero

Las placas de acero interiores actúan como elementos de confinamiento pasivo cuya respuesta mecánica es altamente predecible, por lo que su modelación no introduce las incertidumbres constitutivas asociadas a los componentes no lineales del aislador. Su incorporación es fundamental para configurar la anisotropía del dispositivo, garantizando una rigidez vertical óptima frente a las cargas gravitacionales sin comprometer la flexibilidad lateral necesaria para el aislamiento.

Con el fin de asegurar la integridad del sistema bajo distorsiones severas, se seleccionan aceros de especificación estructural A36 o grado 50, garantizando una rigidez tal que las demandas últimas se concentren en la fluencia y deformación del caucho, previniendo fallas prematuras por desprendimiento en la interfaz vulcanizada (Pérez Barreto, 2019).

#### 2.2.2.3. Plomo

Ahmadipour & Alam (2017) examinaron las variables de diseño que condicionan la respuesta de los aisladores sísmicos LRB a través de un enfoque estadístico inferencial. Su metodología integró un análisis factorial estructurado a partir de tres fuentes de varianza: la geometría del cilindro y las propiedades mecánicas del plomo, y la segmentación laminar del elastómero, evaluados de forma simultánea bajo tres regímenes de deformación. Los resultados numéricos confirmaron de manera concluyente que el núcleo de plomo representa el componente con mayor significancia en la energía disipada por ciclo. La investigación instrumentada en un modelo simétrico a escala cuadrada de 20 cm de base con un núcleo de plomo de 4 cm (Figura 8).

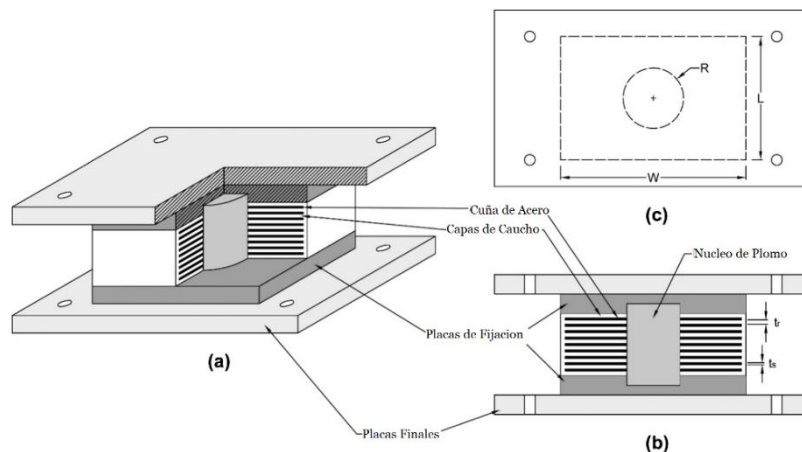


Figura 8. Modelo analizado por Ahmadipour & Alam, (2017).

La incorporación del núcleo de plomo tiene como propósito fundamental dotar al aislador LRB de capacidad de amortiguamiento, sin alterar de forma significativa su rigidez compresiva vertical. Las propiedades geométricas y mecánicas del plomo, específicamente su radio y su esfuerzo de fluencia al cortante, definen el área confinada del lazo de histéresis del dispositivo. Una mayor sección transversal del núcleo incrementa la fuerza característica del sistema, permitiendo una mayor absorción de energía cinética a través de la deformación plástica del metal. Este fenómeno de fluencia continua optimiza la relación de amortiguamiento histerético, controlando los desplazamientos laterales de la base sin necesidad de aumentar las dimensiones del elastómero.

Las características del plomo ayudan al sistema a incrementar la disipación de energía y aumentar el amortiguamiento por histéresis debido a la inelasticidad del material y sus propiedades mecánicas (Ahmadipour & Alam, 2017).

### 2.2.3. Tipos de contactos

De acuerdo con la documentación técnica de Ansys, (2023), un contacto se define como una condición de frontera no lineal que establece restricciones cinemáticas entre dos o más superficies independientes para impedir la interpenetración de los cuerpos durante el análisis

dinámico o estático. Desde la perspectiva del método de los elementos finitos, la formulación de contacto actúa como un algoritmo de acoplamiento que permite la transferencia de esfuerzos normales (compresión) y tangenciales (fricción o cortante) a través de las interfaces del modelo. Al ser una discontinuidad geométrica, su inclusión introduce una no linealidad de estado, lo que exige métodos iterativos para resolver la convergencia de las fuerzas reactivas en la zona de transición estructural (Ansys, 2023).

Existen diferentes tipos de contactos en los modelos numéricos en los diferentes programas que utilizan elementos finitos, esto debido a que se ingresan dos cuerpos separados y distintos como sólidos, superficies o líneas de cuerpo que se tocan entre sí. Estas conexiones pueden transmitir fuerzas de fricción tangencial (Ansys, 2023). Para el programa de ANSYS presenta 6 tipos de contactos los cuales se describen a continuación.

- *Bonded*. Este tipo de contacto se establece predefinido por el sistema, el cual es aplicado en toda la región de contacto. Este tipo de contacto permite una solución lineal, puesto que la longitud/área no cambia durante la aplicación de la carga. Este contacto no permite ningún desplazamiento ni separación de las cargas.
- *No Separation*: Tipo de contacto similar al *Bonded*. Es aplicado solo en regiones de cara o aristas (Sólidos 3D y placas 2D respectivamente).
- *Frictionless*. Solución no lineal, puesto que el área puede cambiar mientras se aplica la carga. Se supone un coeficiente de fricción igual a cero y permite un deslizamiento libre, por lo que el modelo debe de estar bien restringido.
- *Rough*. Esta configuración modela un contacto de fricción perfectamente rugoso donde no hay deslizamiento. Solo es aplicado en regiones de caras en sólidos 3D o aristas en placas 2D. Este caso corresponde a un coeficiente finito de fricción entre los cuerpos en contacto.
- *Frictional*. Las dos geometrías en contacto pueden soportar esfuerzos cortantes hasta una cierta magnitud antes de comenzar a deslizarse entre sí.

- *Forced Frictional Sliding*. Es aplicado una fuerza resistente tangencial en cada punto de contacto. La fuerza tangencial es proporcional a la fuerza de contacto normal.

Para el caso de estudio los contactos que se utilizaron fueron dos, los cuales se asemejan a las condiciones reales del dispositivo LRB. Se selecciona el contacto *Bonded*, en la frontera del elastómero y las cuñas de acero, esto debido a que ambos elementos se unen mediante proceso químico de vulcanizado, por otra parte, para la unión de del plomo-acero y plomo-elastómero, se utiliza un contacto tipo *frictional*, esto debido a que el plomo es colocado a presión.

La información sobre diversos aspectos del comportamiento de los apoyos con dispositivos de aislamiento sísmico LRB con bajo factor de forma sigue siendo escasa. La aplicabilidad de las ecuaciones de diseño existentes a la rigidez a la compresión de los rodamientos de bajo factor de forma sigue siendo desconocida. Es por esto que Ren et al, (2020) desarrollaron un modelo numérico a carga axial con diversos factores de forma y diferentes cargas axiales para comparar su comportamiento a la compresión en términos de su rigidez y relación fuerza-desplazamiento. Los resultados obtenidos indican que la fórmula de diseño existente para la rigidez a la compresión no es aplicable para los rodamientos de plomo-caucho con un factor de forma inferior a 11. Un estudio paramétrico de los modelos numéricos muestra que el fenómeno de endurecimiento está causado por el deslizamiento entre las interfaces plomo-acero y plomo-caucho. Este deslizamiento disminuye la rigidez vertical y reduce la disipación de energía del elastómero. Un aumento del coeficiente de fricción entre las interfaces puede aumentar la rigidez a la compresión de los rodamientos con factores de forma relativamente altos, pero los rodamientos con factores de forma bajos son insensibles a los coeficientes de fricción.

En la Tabla 2 se muestran las propiedades mecánicas de cada uno de los materiales utilizados en el dispositivo LRB, de dos autores distintos, así como el tipo de contacto utilizado y el tipo de prueba ejecutada.

Tabla 2. Propiedades mecánicas de los elementos y sus contactos de acuerdo a diferentes autores.  
(Ren et al., 2020; Tan et al., 2022)

| Plomo                                                                                                                                          | Elastómero                                                                                                    | Acero                                                                                                                                  | Tipo de Contacto                              | Prueba                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------|
| Módulo de Elasticidad<br>E=17.5Gpa<br>Relación de Poisson<br>v=0.44<br>Limite Elástico<br>Rp0.2=7 Mpa<br>Rigidez Post-fluencia<br>Kp=0.392 Mpa | Módulo de Elasticidad<br>E=0.55 Mpa<br>Modelo: Mooney-<br>Rivlin<br>C1=0.19 Mpa<br>C2= 0.006 Mpa<br>D1=1.3E-9 | Módulo de<br>Elasticidad E=205<br>Gpa<br>Relación de Poisson<br>v=0.3                                                                  | Fricción<br>L-R = 4.0<br>L-S=0.4<br>S-R = Tie | Axial                  |
| Modelo: Bilineal<br>Tipo de Elemento:<br>C3D8 ABAQUS                                                                                           |                                                                                                               |                                                                                                                                        |                                               |                        |
| Módulo de Elasticidad<br>E=17500Mpa<br>Relación de Poisson<br>v=0.44<br>Limite Elástico inicial<br>10 Mpa                                      | Módulo de cortante<br>inicial 0.4 Mpa<br>Modulo de Volumen<br>2000Mpa<br>Modelo: Neo Hooke                    | Esfuerzo de<br>Fluencia 250Mpa<br>Modulo de<br>Elasticidad E=2E5<br>Mpa<br>Relación de Poisson<br>v=0.3<br>Modulo Tangente<br>1450 Mpa |                                               | Horizontal<br>Armónica |
| Modelo No-lineal                                                                                                                               |                                                                                                               |                                                                                                                                        |                                               |                        |

### 2.3. Análisis de los materiales

Al realizar un modelo numérico computacional, uno de los pasos más importantes al caracterizar un aislador elastomérico, es el definir el tipo de materiales, en este caso el de mayor importancia es el neopreno, debido a sus propiedades mecánicas.

#### 2.3.1. Elastómero

Los materiales elastoméricos tienen un comportamiento aproximadamente lineal en pequeñas deformaciones, sin embargo, cuando las deformaciones son grandes su comportamiento es altamente no lineal y elástico (Figura 9). Este comportamiento no lineal

hace que las propiedades del material como el módulo de corte y el módulo de elasticidad, cambien a medida que la deformación aumenta (Saedniya & Talaeitaba, 2019).

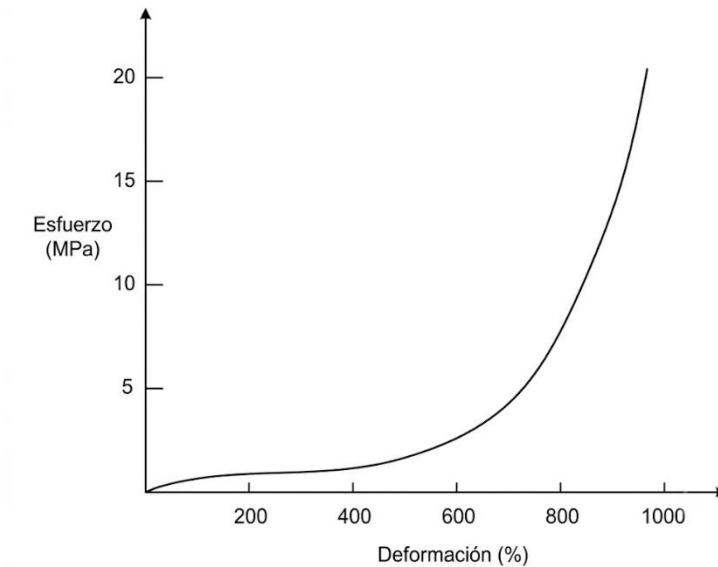


Figura 9. Curva de esfuerzo-deformación característico de un material hiperelástico.

Los materiales cuya curva esfuerzo-deformación presentan deformaciones grandes, tienen un comportamiento no lineal y se denominan materiales hiperelásticos. Para modelar estos materiales se puede suponer que son isotrópicos, isométricos, elásticos e incompresibles.

Los materiales hiperelásticos se describen en términos de energía potencial de deformación ( $U$ ), que define la energía de deformación almacenada en el material por unidad de volumen de referencia.

Estas funciones tienen las siguientes características:

1. La función tensión-deformación del modelo no cambiará para cargas frecuentes.
2. La función tensión -deformación es completamente reversible.
3. Se supone que los materiales son completamente elásticos sin deformación permanente.

Existen varias formas de potenciales de energía de deformación disponibles en ANSYS para modelar materiales hiperelásticos aproximadamente incompresibles. En las ecuaciones presentadas  $I_1, I_2$  e  $I_3$  se refiere a las invariantes de deformación. Las funciones de energía de deformación están definidas por estos coeficientes. Además,  $J$  es la relación de volumen elástico.

a) Mooney Rivlin (Ren et al., 2020)

$$U = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + \frac{1}{D_1}(J - 1)^2$$

Donde  $U$  es el potencial de energía por unidad de volumen de referencia.  $C_{10}$  y  $C_{01}$  es la relación del volumen antes y después de la deformación, mientras que  $D_1$  es el parámetro para evaluar la habilidad de resistencia a la compresión.

b) Neo-Hookean (Saidou et al., 2021)

$$U = C_{10}(I_1 - 3) + \frac{1}{D_1}(J - 1)^2$$

c) Ogden (Zhang et al., 2023)

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} + 3) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D} (J - 1)^{2i}$$

Donde  $\mu_i, \alpha_i$  son los parámetros del material dependientes de la temperatura,  $N$  es el parámetro del material y  $\lambda$  son los alargamientos corregidos.

d) Yeoh (Saedniya & Talaeitaba, 2019)

$$U = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3 + \frac{1}{D_1}(J - 1)^2 + \frac{1}{D_1}(J - 1)^4 + \frac{1}{D_1}(J - 1)^6$$

### 2.3.2. Acero

El acero es definido como un material elastoplástico siguiendo las leyes de Hooke (Figura 10).

$$\sigma = E\varepsilon$$

Donde

$\sigma$ : Esfuerzo por deformación

$E$ : Módulo de elasticidad

$\varepsilon$ : Deformación del material.

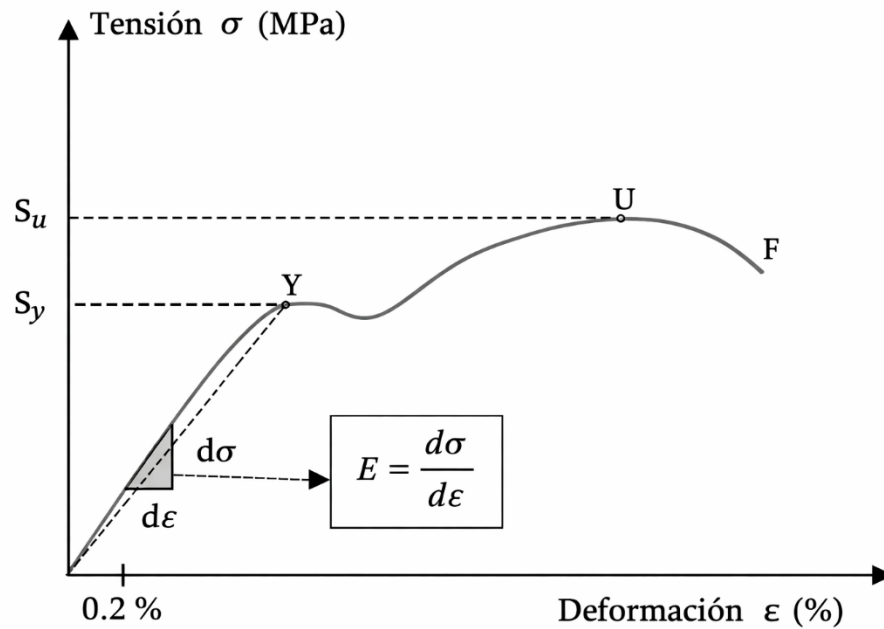


Figura 10. Gráfica Esfuerzo-Deformación del acero.

### 2.3.3. Plomo

El comportamiento no lineal del aislador LRB está regido por la transición de fase mecánica que experimenta el núcleo de plomo. Al ser un material definido bajo una ley constitutiva

elastoplástica, su morfología cristalina se reconfigura en función de la magnitud del desplazamiento horizontal impuesto. El material disipa energía de forma eficiente debido a que su esfuerzo de fluencia al corte es bajo, ubicándose típicamente entre los 8 y 10 MPa, lo cual asegura una activación temprana del sistema protector ante sismos moderados.

#### 2.3.4. Rigidez

Para el cálculo de las propiedades mecánicas del aislador, es necesario calcular la gráfica de histéresis, la cual es la tendencia de un material a conservar una de sus propiedades, en ausencia del estímulo que la ha generado, como se puede observar en la Figura 11.

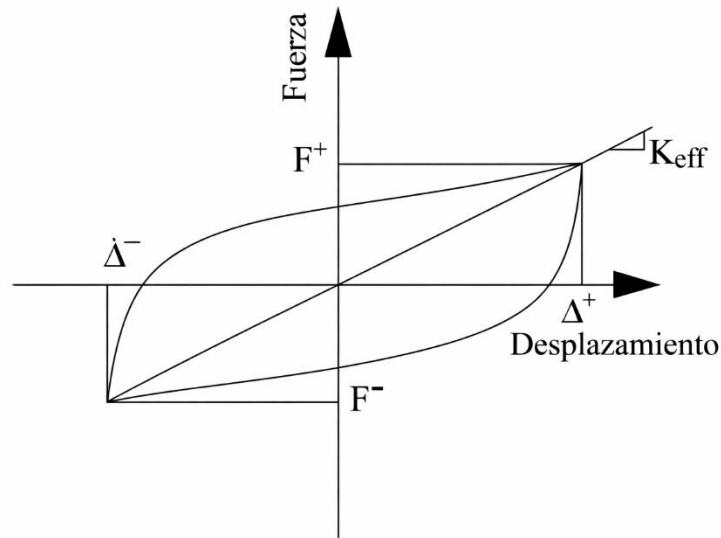


Figura 11. Gráfica de histéresis. Adaptado de Zakariya et al., (2023)

$$K_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|}$$

Donde  $K_{eff}$  es la rigidez efectiva del dispositivo,  $|\Delta^+|$  y  $|\Delta^-|$  son el desplazamiento máximo positivo y mínimo negativo y  $|F^+|$  y  $|F^-|$  son las fuerzas correspondientes a los desplazamientos  $|\Delta^+|$  y  $|\Delta^-|$  respectivamente.

$$G_{eff} = \frac{K_{eff} T_r}{A_r}$$

Donde  $G_{eff}$  es el módulo de cortante efectivo,  $T_r$  es el espesor total del caucho,  $A_r$  es el área del caucho vulcanizado.

$$\beta_{eff} = \frac{2}{\pi} \left[ \frac{EDC}{K_{eff} (|\Delta^+| + |\Delta^-|)^2} \right]$$

Donde  $\beta_{eff}$  amortiguamiento efectivo y EDC es el área encerrada por el ciclo de histéresis.

#### 2.4. Newton Raphson

El método de Newton Raphson, es un algoritmo de aproximación iterativo que encuentra las raíces de una función (Figura 12).

El método se basa en la idea de aproximar la función mediante una tangente en un punto cercano a la raíz y usar la intersección de esta tangente con el eje x para encontrar una mejor aproximación de la raíz.

Para una función  $f(x)$  y su derivada  $f'(x)$ , la fórmula de iteración del método es:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$$

Donde  $x_n$  es la aproximación actual de la raíz,  $x_{n+1}$  es la siguiente aproximación, mientras que  $f(x_n)$  y  $f'(x_n)$  es el valor de la función y su derivada en  $x_n$ .

Para el caso de materiales el procedimiento a seguir es el siguiente:

1. Se supone que  $\{u_0\}$  es igual a cero, primera iteración.
2. Linealiza y evaluar la matriz de rigidez  $\mathbf{K}$  en función de los desplazamientos actuales  $\mathbf{u}$  y otros factores variables como el material no lineal y el estado de contacto.

3. Calcular la fuerza interna  $F_{int}^n$  a partir de las tensiones de los elementos (que se derivan de las deformaciones y, por tanto, de los desplazamientos).
4. Se calcula el incremento de los desplazamientos.

$$\Delta u_n = \frac{F_{ext} - F_{int}^n}{K^n}$$

5. Agregar  $\Delta \mathbf{u}$  a  $\{u_n\}$  para obtener la siguiente aproximación.
6. Calcular la fuerza residual

$$F_{res}^n = F_{ext} - F_{int}^n$$

7. Si  $F_{res}^n \leq \text{Criterio de Convergencia}$  la solución convergió
8. De lo contrario, repetir los pasos 1 al 7.

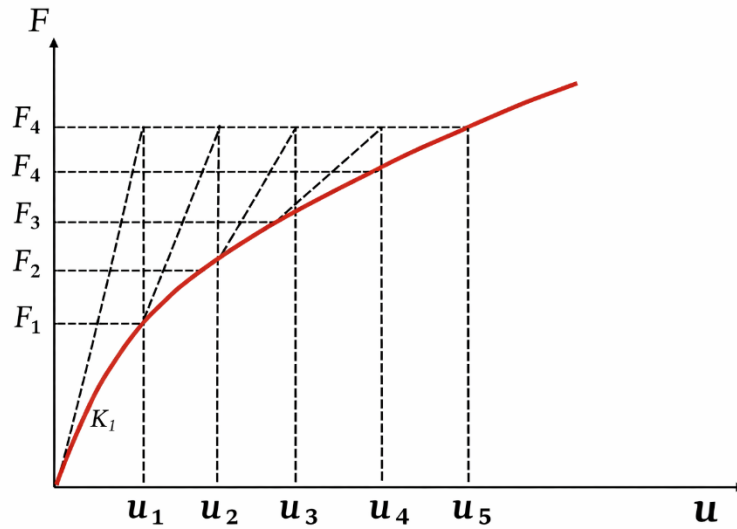


Figura 12. Método de Newton Raphson.

### 3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

#### 3.1. Hipótesis

El análisis paramétrico de un aislador sísmico de Caucho con Núcleo de Plomo (LRB) circular modelado numéricamente, permitirá mejorar sus propiedades mecánicas bajo excitaciones sísmicas, identificando características óptimas para aumentar su eficiencia en un 15% respecto a los comúnmente usados.

#### 3.2. Objetivo general

Establecer un modelo numérico que permita caracterizar las propiedades mecánicas del aislador sísmico de base tipo LRB cilíndrico ante la aplicación de fuerzas dinámicas provocadas por sismo, permitiendo realizar las modificaciones necesarias en cuestión de dimensionamiento de los elementos que lo componen sin la necesidad de un modelo experimental.

#### 3.3. Objetivos específicos

- 1) Modelar un aislador tipo LRB mediante la información de una base de datos.
- 2) Calibrar el dispositivo mediante pruebas experimentales en mesa vibratoria.
- 3) Modificar las propiedades geométricas de los materiales que conforman al aislador en dimensiones de espesor o altura del dispositivo y los elementos que lo conforman.

#### 4. METODOLOGÍA

A continuación, se presenta de manera esquemática la metodología a seguir para el análisis y proceso del modelo paramétrico para la presente investigación (Figura 13).

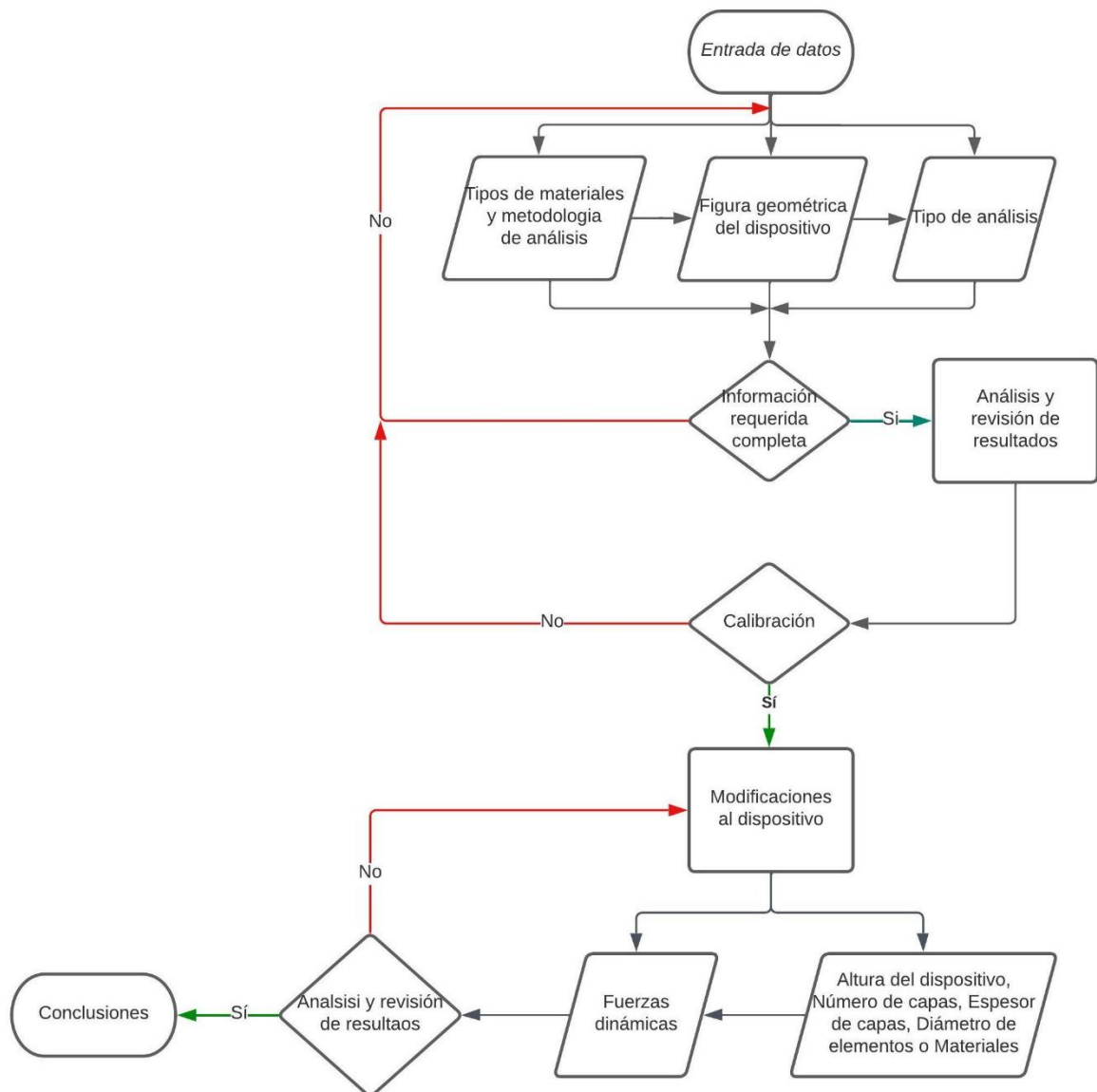


Figura 13. Resumen de la metodología a seguir.

#### 4.1. Modelación del aislador tipo LRB

Para el modelado del dispositivo se realizará de acuerdo al aislador diseñado para el hospital de *Erzurum* en Turkey, se seleccionó este aislador debido a que es la principal referencia en la literatura, el cual está diseñado con un diámetro total de 1,155 mm y un radio de plomo de 305 mm, cuenta con 26 capas de caucho con un espesor de 8 mm cada una y 25 cuñas de acero de 5mm de espesor como se muestra en la Figura 14, considerando las placas internas de 25mm de espesor. Sin embargo, el diámetro de análisis del dispositivo fue de 1,117 mm eliminando el elastómero que cubre el perímetro del aislador, considerándolo irrelevante para el estudio (Li et al., 2023).

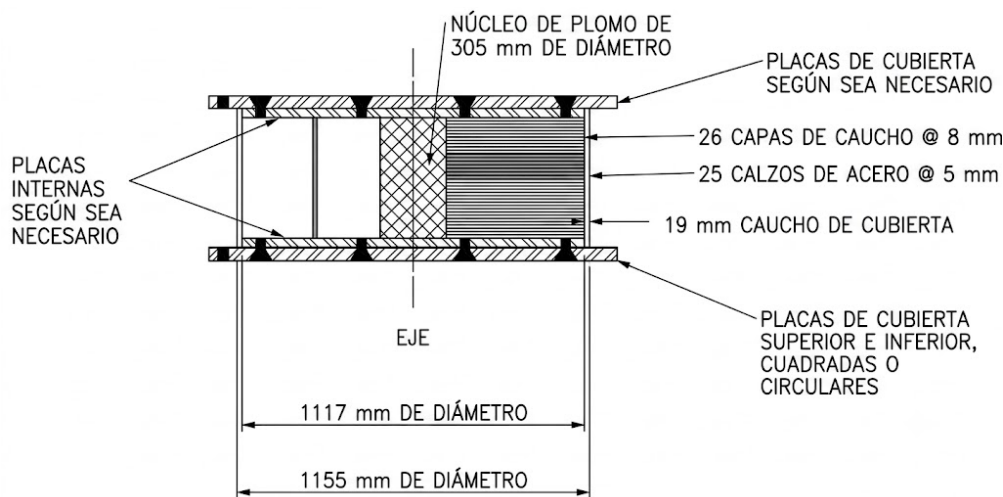


Figura 14. Características del dispositivo. Adaptado de *Kalpakidis & Constantinou, (2010)*

El dispositivo fue diseñado para una carga axial de 10,266 kN, obteniendo un espesor total de caucho  $T_r = 208 \text{ mm}$  y un área total del dispositivo de  $A_r = 906,871 \text{ mm}^2$ , el área de plomo fue  $A_L = 73,062 \text{ mm}^2$  y un factor de forma de 32.3. La relación del diámetro del plomo y el diámetro del dispositivo es de  $S = 0.27$ .

## 4.2. Calibración del dispositivo.

Para la calibración del dispositivo se definieron las características geométricas del dispositivo, propiedades mecánicas de los materiales, tipo de elemento finito, tipo de contacto, las fuerzas aplicadas al dispositivo y finalmente revisar su calibración.

El análisis del dispositivo se realizó en el programa de ANSYS Workbench 2022-R2, mediante un análisis dinámico, en el cual se cargaron las características del material a partir de las pruebas experimentales presentadas en los documentos de Kalpakidis & Constantinou, (2010) y J. H. Kim et al, (2017) concordado en características, propiedades mecánicas y geométricas de acuerdo a la Tabla 3.

Tabla 3. Propiedades de los materiales

| Propiedad de los materiales |                                              |
|-----------------------------|----------------------------------------------|
| Acero                       | Densidad = 7,900 kg/m <sup>3</sup>           |
|                             | Módulo de elasticidad = 205 Gpa              |
|                             | Relación de Poisson = 0.3                    |
|                             | Esfuerzo de Fluencia = 235 Mpa               |
| Caucho                      | Densidad = 1,300 kg/m <sup>3</sup>           |
|                             | Módulo de Cortante = 5.61 Kg/cm <sup>2</sup> |
| Plomo                       | Densidad = 12,000 kg/m <sup>3</sup>          |
|                             | Módulo de elasticidad = 17.5 GPa             |
|                             | Relación de Poisson = 0.44                   |
|                             | Esfuerzo de Fluencia = 7 MPa                 |

### 4.2.1. Análisis de los materiales

Se utilizó el modelo de Mooney-Rivlin para la solución del material hiperelástico debido a su estabilidad y eficiencia en simulación no extremas, deformaciones moderadas hasta el 200% de estiramiento (Bergström, 2015), mientras que para el análisis del acero se realizó mediante el modelo de Young, considerando un material elastoplástico.

Las siguientes expresiones representan el modelo de Mooney -Rivlin (Ren et al., 2020).

$$U = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + \frac{1}{D_1}(J - 1)^2$$

Al resolver esta ecuación a partir de los datos experimentales del elastómero se obtienen los coeficientes de la Tabla 4.

Tabla 4. Coeficientes del elastómero.

| Material | Coeficientes              |
|----------|---------------------------|
| Caucho   | $C_1 = 0.190 \text{ MPa}$ |
|          | $C_2 = 0.006 \text{ MPa}$ |
|          | $D_1 = 1.3\text{E-}9$     |

#### 4.2.2. Tipo de elemento finito.

El tipo de elemento finito seleccionado fue SOILD186 para el análisis de todos los materiales, esto debido a que proporciona una formulación de elemento compatible con deformaciones y tensiones que incluye interpolación cuadrática para el desplazamiento y lineal para el gradiente de deformación. Esta combinación permite una mayor precisión en la modelización de la deformación y la tensión en comparación con los elementos lineales estándar, concordando con el elemento utilizado por Ahmadipour & Alam ( 2017) (Figura 15).

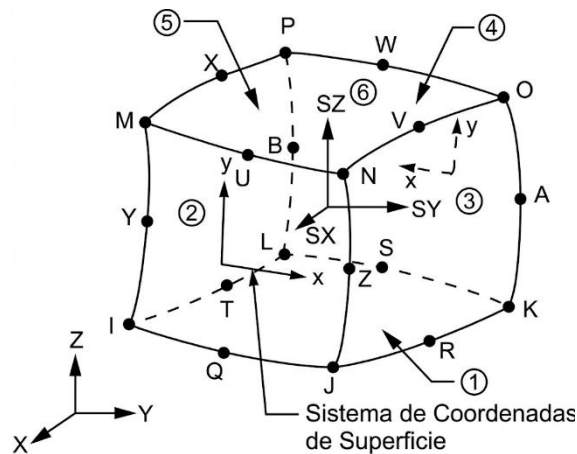


Figura 15. Elemento hexaédrico de 20 nodos. Adaptado de Ansys (2023)

#### 4.2.3. Discretización del dispositivo

Se generó un total de 72 divisiones alrededor del plomo y los elementos en contacto en él, obteniendo un total de 48,230 elementos y 51,138 nodos, esto debido al tipo de elemento seleccionado. La discretización del dispositivo se puede observar en la Figura 16, mientras que en la Figura 17 se puede observar el corte central del dispositivo y como los nodos de los elementos concuerdan entre ellos.

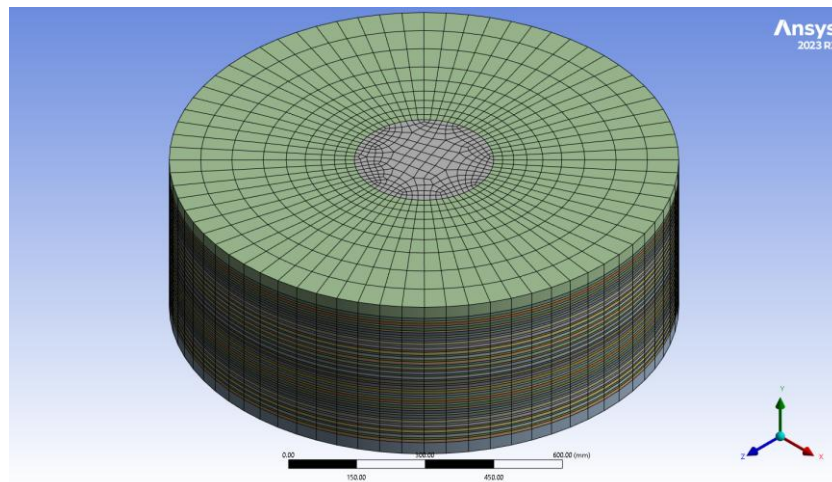


Figura 16. Discretización del dispositivo LRB.

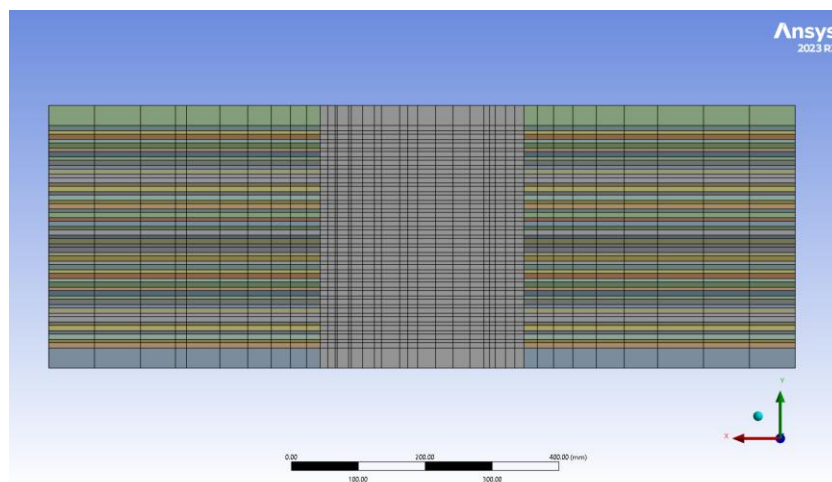


Figura 17. Corte central de la discretización del dispositivo LRB.

#### 4.2.4. Tipo de contacto

La definición de las condiciones de interfaz entre las regiones constituyentes del aislador LRB resulta crítica para modelar la transferencia de esfuerzos de manera realista en Ansys. Para las interacciones entre el núcleo y los componentes circundantes (plomo-caucho y plomo-acero), se implementaron el tipo de contacto de tipo *frictional*.

En el acoplamiento rígido entre las placas de acero estructural y el cilindro de plomo, se estableció un coeficiente de  $\mu=0.4$ , fundamentado en la rugosidad nominal y el comportamiento cinemático típico de superficies metálicas bajo presión. Por el contrario, la frontera entre el material hiperelástico y el plomo se configuró con un coeficiente límite superior de  $\mu= 4.0$ . Si bien la literatura reporta un rango de variabilidad entre 1.0 y 4.0 para esta interacción elastoplástica, se seleccionó el valor máximo para simular numéricamente el efecto de confinamiento severo derivado del proceso de manufactura, donde el plomo es introducido a presión.

En contraposición, la unión entre el caucho y las láminas de acero intermedias se modeló mediante un contacto sólidamente adherido (*Bonded*). Esta simplificación computacional representa de forma fiel el proceso de vulcanización química industrial. Al configurar esta continuidad perfecta en la malla, se simula una compatibilidad de deformaciones totales en los nodos compartidos, asegurando que ante sollicitaciones sísmicas extremas los mecanismos de disipación y eventual degradación se concentren en el cuerpo del neopreno antes de inducir una falla en el plano de contacto.

#### 4.2.5. Calibración

Para la calibración del dispositivo se utilizó una función senoidal con una amplitud de 104 mm y un periodo de 3 segundos como se muestra en la Figura 18, correspondiente al 50% del esfuerzo cortante del elemento el cual corresponde al espesor total de la capa de caucho, en la cual también podemos observar la fuerza axial corresponde a 10,266 KN antes de empezar el desplazamiento (línea verde) y dejándola constante el resto del análisis (línea

aranja). La línea magenta representa la fuerza de gravedad. La gráfica de calibración del dispositivo corresponde a la Figura 18, correspondiente a la presentada por Kalpakidis & Constantinou (2008)

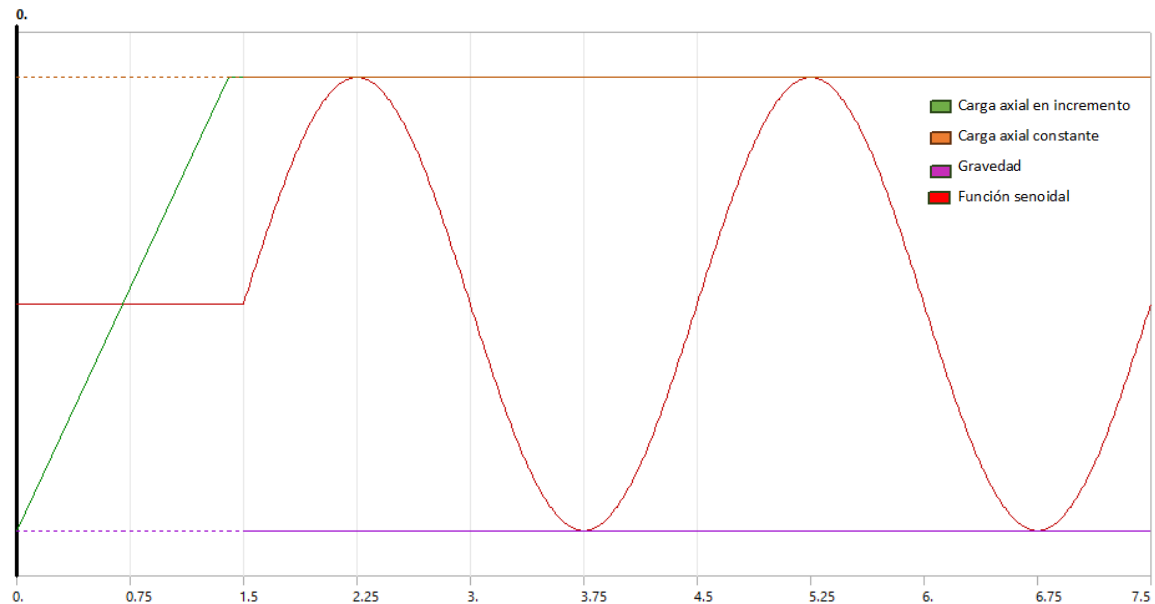


Figura 18. Función senoidal y fuerzas aplicadas al modelo.

El dispositivo fue analizado en mesa vibratoria mediante una función tipo senoidal, para un periodo de 3.0 seg, esto con el propósito de buscar un desplazamiento controlado, y al mismo tiempo corroborar las propiedades mecánicas del dispositivo por las que fue diseñado.

Bajo condiciones ordinarias de diseño, los aisladores elastoméricos con núcleo de plomo se proyectan para mitigar distorsiones laterales que no superen el 100% del espesor neto del caucho. Sin embargo, con el objetivo de caracterizar el comportamiento no lineal en condiciones críticas de cizallamiento, el dispositivo se analizó bajo un escenario de carga extrema que alcanzó una deformación de 232%, correspondiente a una traslación horizontal de 483 mm (Figura 18). La exploración en este rango de deformaciones volumétricas de gran magnitud permite validar la respuesta de las interfaces de contacto y confirmar que, aun duplicando las demandas de servicio normativas, el amortiguador conserva su integridad

estructural y no manifiesta fenómenos de inestabilidad lateral o delaminación prematura en las placas intermedias.

Generalmente los dispositivos LRB se diseñan para soportar un desplazamiento del 100%, el cual corresponde al espesor total del elastómero, correspondiendo al esfuerzo cortante del dispositivo. Para este caso el dispositivo fue analizado experimentalmente a un desplazamiento del 232%, el cual pertenece a un desplazamiento horizontal de 483 mm., Figura 19.

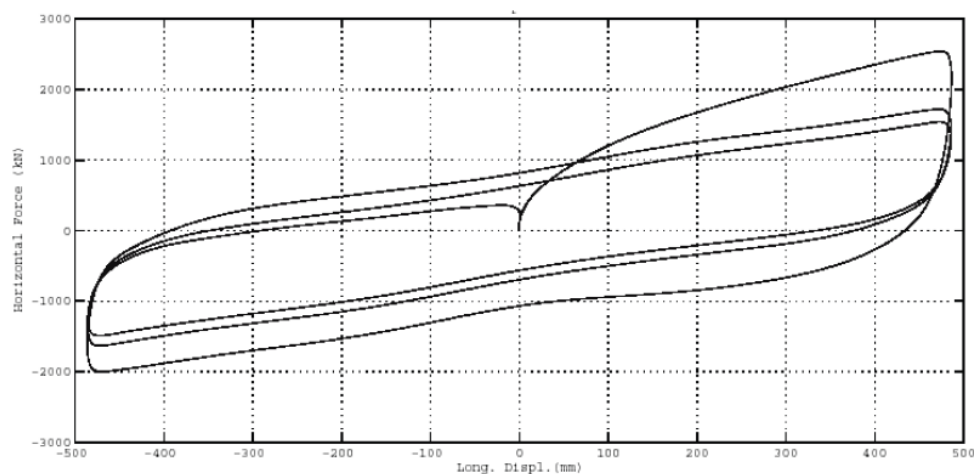


Figura 19. Gráfica esfuerzo -Deformación (Kalpakidis & Constantinou, 2008)

#### 4.3. Modificación las propiedades geométricas

Para comparar los parámetros que puedan mejorar la eficiencia del dispositivo se realizó mediante la modificación de los diámetros de los elementos del plomo y las capas de acero y caucho, disminuyendo el diámetro de los materiales sin alterar el diámetro del plomo y de la misma forma disminuyendo el diámetro del plomo sin alterar el diámetro de los demás elementos.

#### 4.3.1. Diámetro

Las modificaciones del dispositivo fueron en relación al diámetro del dispositivo mediante un ANOVA, teniendo como niveles el diámetro del dispositivo y el diámetro del núcleo, es decir las variaciones serán acorde al diámetro de las capas de acero y caucho y del diámetro del plomo, estas variaciones son de 0%, 10%, 20% y 30% del diámetro, obteniendo un total de 15 combinaciones tal como se muestran en la Tabla 5, mientras que la combinación 16 corresponde al resultado de comparación.

Tabla 5. Variaciones del diámetro del dispositivo.

| No. | Diámetro Placas (mm) | Diámetro Núcleo (mm) | Diámetro Total (mm) | Relación S |
|-----|----------------------|----------------------|---------------------|------------|
| 0   | 812                  | 305                  | 1117                | 0.27       |
| 1   | 812                  | 274.5                | 1086.5              | 0.25       |
| 2   | 812                  | 244                  | 1056                | 0.23       |
| 3   | 812                  | 213.5                | 1025.5              | 0.21       |
| 4   | 730.8                | 305                  | 1035.8              | 0.29       |
| 5   | 649.6                | 305                  | 954.6               | 0.32       |
| 6   | 568.4                | 305                  | 873.4               | 0.35       |
| 7   | 730.8                | 274.5                | 1005.3              | 0.27       |
| 8   | 730.8                | 244                  | 974.8               | 0.25       |
| 9   | 730.8                | 213.5                | 944.3               | 0.23       |
| 10  | 649.6                | 274.5                | 924.1               | 0.30       |
| 11  | 649.6                | 244                  | 893.6               | 0.27       |
| 12  | 649.6                | 213.5                | 863.1               | 0.25       |
| 13  | 568.4                | 274.5                | 842.9               | 0.33       |
| 14  | 568.4                | 244                  | 812.4               | 0.30       |
| 15  | 568.4                | 213.5                | 781.9               | 0.27       |

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1. Análisis de contactos

De acuerdo a la base de datos analizada se puede realizar el modelo con dos diferentes tipos de contactos. El primero es considerando un solo dispositivo donde los contactos entre los elementos se encuentran unidos y trabajan como un solo elemento. El segundo es considerando los contactos tipo fricción, como se describió en secciones pasadas, el núcleo de plomo es colocado mediante presión y por lo que la superficie del mismo presenta fricción en los demás elementos, mientras que el contacto entre el caucho y el acero es unido mediante el proceso de vulcanizado y es considerado como un contacto tipo “bonded”.

Mediante un análisis previo comparando los resultados de las dos consideraciones vistas en los contactos de los materiales del dispositivo, donde el primer análisis fue considerando el contactos de fricción entre la superficie de contacto entre el plomo y el acero y caucho, mientras que el contacto “bonded” es considerado en la unión entre el acero y caucho, las iteraciones y el tiempo de análisis se puede observar en la Figura 20, teniendo 158 iteraciones en un tiempo ingresado de análisis de 7.5s. Los pasos de tiempo fueron de 0.1 segundos con un tiempo de análisis de 2h 20m 32s.

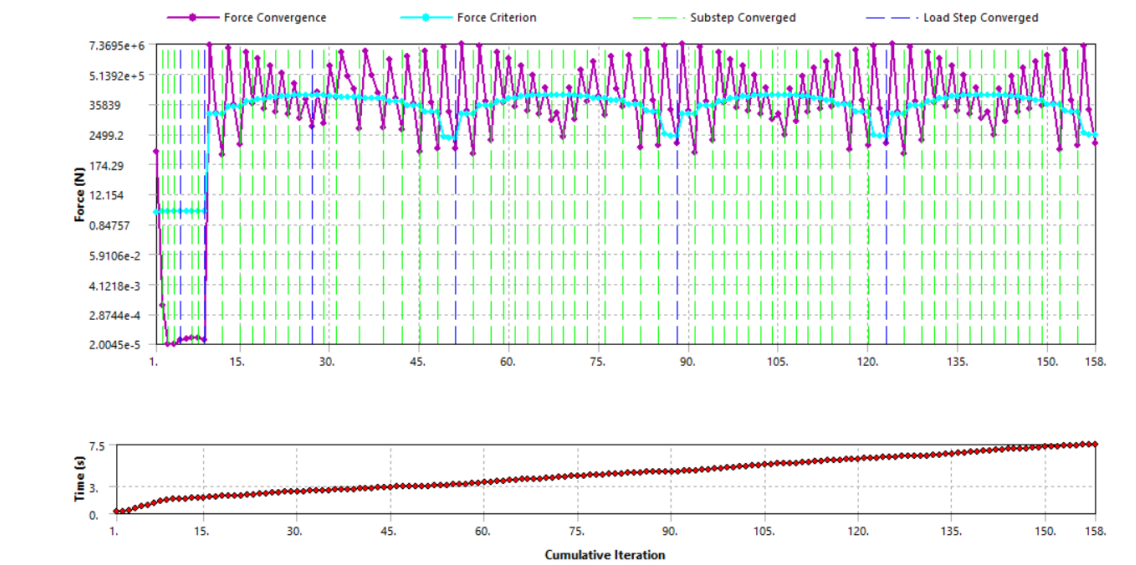


Figura 20. Contacto tipo Fricción considerado en el plomo.

El segundo análisis se realizó considerando un solo elemento, el cual corresponde a un tipo de contacto tipo *bonded* entre todos los elementos que involucra el dispositivo. Los pasos de tiempo fueron de 0.02 segundos con un tiempo de análisis de 1h 23m, como se puede observar en la Figura 21.

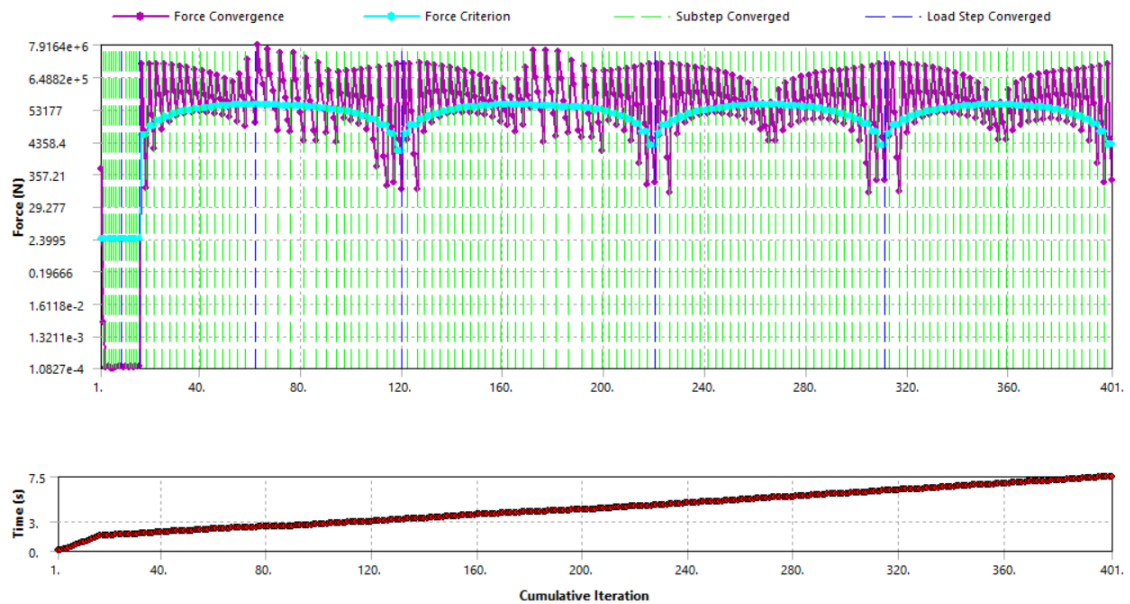


Figura 21. Contacto tipo “Bonded” considerado en todo el dispositivo.

Como se puede observar el tiempo de análisis es reducido casi al 50% considerando todo el dispositivo como un solo elemento, a simple vista se puede llegar a la conclusión de que la eficiencia en tiempo es el contacto tipo “*bonded*” así como un mayor número de iteraciones.

Para el análisis de calibración se utiliza una función sinusoidal con un desplazamiento de 483 mm a un periodo de 3s como se ha mostrado en el capítulo de metodología, sin embargo, por el consumo computacional requerido y el tiempo de análisis, se decide utilizar un desplazamiento de 104mm, correspondiente al 50% del esfuerzo cortante diseñado, . Los resultados presentes siguen la tendencia con los datos mostrados por los autores Constantinou et al. (2007) y Kalpakidis & Constantinou (2010) los cuales concuerdan con la Figura 22.

## 5.2. Gráficas de histéresis

En la Figura 22 se puede observar los resultados obtenidos del análisis de calibración del dispositivo, los cuales se ven reflejados los dos resultados obtenidos de acuerdo a los contactos analizados, como se observa, el contacto tipo fricción tiene una mayor amplitud en comparación con el contacto “*Bonded*”, reflejando que este tipo de contacto representa mejor las condiciones del dispositivo en pruebas experimentales.

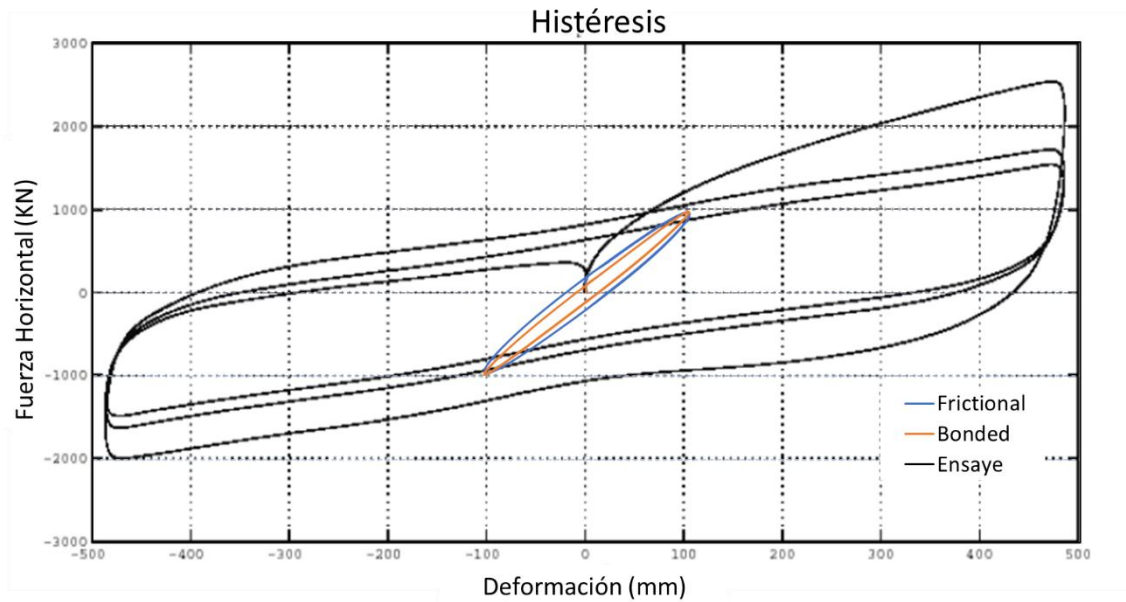


Figura 22. Resultados del análisis de mesa vibratoria vs modelo numérico

Para el primer análisis de resultados se obtienen las siguientes gráficas, las cuales representan las variaciones del diámetro exterior del dispositivo y del plomo de acuerdo al ANOVA presentado en el capítulo anterior, considerando la variación del 0%, 10%, 20% y 30%.

En la Figura 23 se ilustra el estudio de sensibilidad paramétrica realizado al variar el diámetro del dispositivo en reducciones del 10%, 20% y 30% respecto a la geometría original, manteniendo constante la sección transversal del núcleo de plomo. Los lazos de histéresis resultantes muestran una convergencia gráfica significativa, lo que indica que, para el rango de deformaciones evaluado (104 mm), la respuesta del dispositivo está gobernada

primordialmente por la fluencia del plomo. Esta invariabilidad sugiere que la reducción del volumen de caucho no altera sustancialmente la capacidad de disipación de energía por ciclo; sin embargo, desde un enfoque de diseño, dicha reducción incrementa los esfuerzos de compresión sobre el elastómero, aspecto que debe contrastarse con los límites de estabilidad al pandeo del aislador.

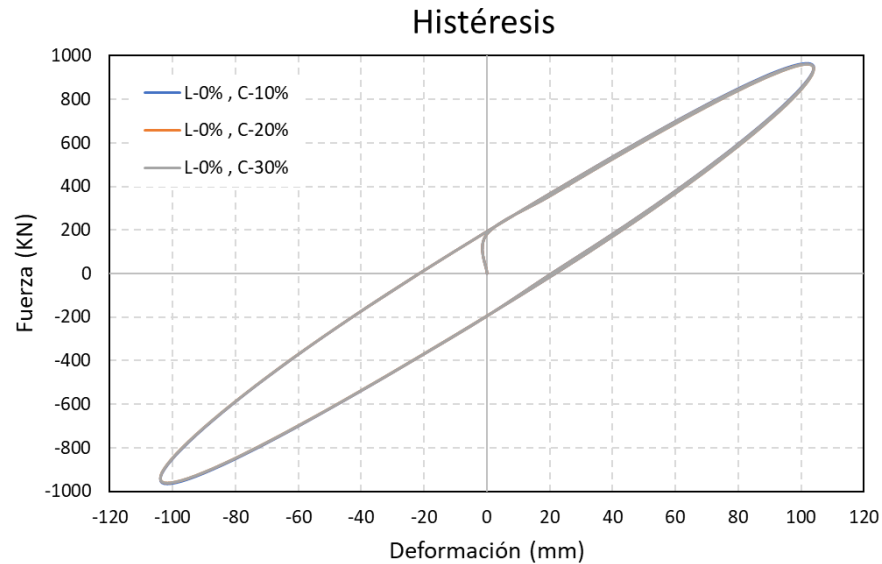


Figura 23. Resultados de la reducción del diámetro del dispositivo.

En la Figura 24 se analiza la respuesta histerética del aislador LRB aplicando una reducción constante del 10% en el diámetro del núcleo de plomo (L-10%), combinada con disminuciones progresivas en el diámetro del elastómero. Los resultados demuestran que las configuraciones con modificaciones sutiles del caucho (C-0% y C-10%) mantienen un comportamiento redundante con fuerzas cortantes máximas cercanas a los 760 kN. Sin embargo, al contraer el diámetro exterior del dispositivo a niveles del 20% y 30%, se manifiesta una degradación notable en la pendiente y una caída de la fuerza lateral límite hasta aproximadamente 430 kN para el escenario más severo (C-30%).

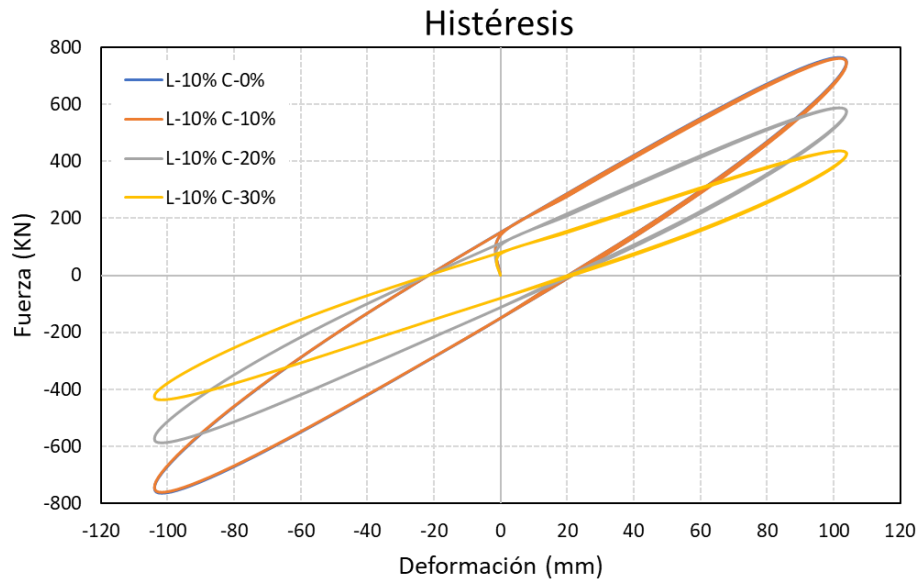


Figura 24. Resultados de variación del plomo del 10% y dispositivo de 0 al 30%

Por otra parte, en la Figura 25 se presenta el comportamiento histerético del dispositivo aislador bajo una reducción fija del 20% en el diámetro del núcleo de plomo (L-20%), evaluado de manera simultánea con disminuciones del 0% al 30% en el diámetro del caucho.

A diferencia de las tendencias paramétricas lineales previas, los resultados revelan una respuesta no monótona altamente singular: la configuración con una reducción geométrica del 20% en el elastómero (C-20%) desarrolla la mayor rigidez post-fluencia y una fuerza cortante máxima de aproximadamente 760 kN, superando a las variantes con menores niveles de reducción (C-0% y C-10%). Este fenómeno denota que al reducir proporcionalmente ambas entidades en un 20%, se conserva una relación de aspecto óptima entre el núcleo disipador y el área de confinamiento elastomérico. Dicha condición maximiza la eficiencia cinemática del caucho sin inducir el colapso de rigidez observado en la curva de máxima contracción (C-30%), la cual decae críticamente hasta los 420 kN.

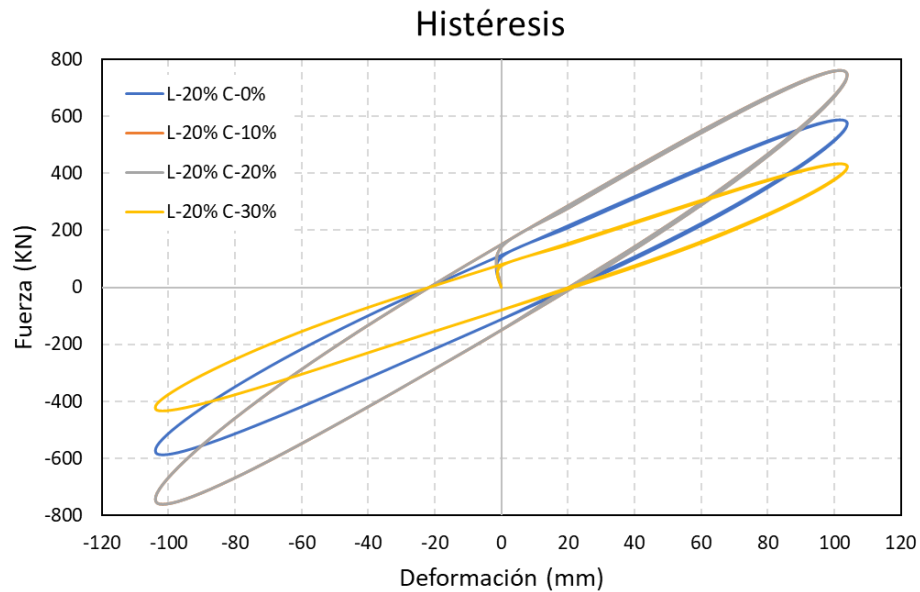


Figura 25. Resultados de variación del plomo del 20% y dispositivo de 0 al 30%.

En la Figura 26 se examina el comportamiento de histéresis ante una reducción drástica del 30% en el diámetro del núcleo de plomo (L-30%), evaluado en combinación con disminuciones del 0% al 30% en el diámetro exterior del elastómero.

Un hallazgo analítico relevante es la coincidencia y superposición de la respuesta geométrica basales del escenario sin reducción de caucho (C-0%) frente a la variante del 30%, desplazando el desempeño óptimo hacia la configuración con una contracción del 10% en el elastómero (C-10%). Este modelo en particular desarrolla la mayor rigidez y una fuerza cortante máxima de 760 kN. Físicamente, este fenómeno indica que, ante un núcleo disipador considerablemente reducido, es necesaria una disminución geométrica inicial en el bloque de caucho para restituir el estado de confinamiento pasivo en las capas internas, evitando la pérdida de rigidez que sí se manifiesta de forma progresiva en las reducciones del 20% y 30%, cuyas fuerzas pico caen a 580 kN y 430 kN respectivamente

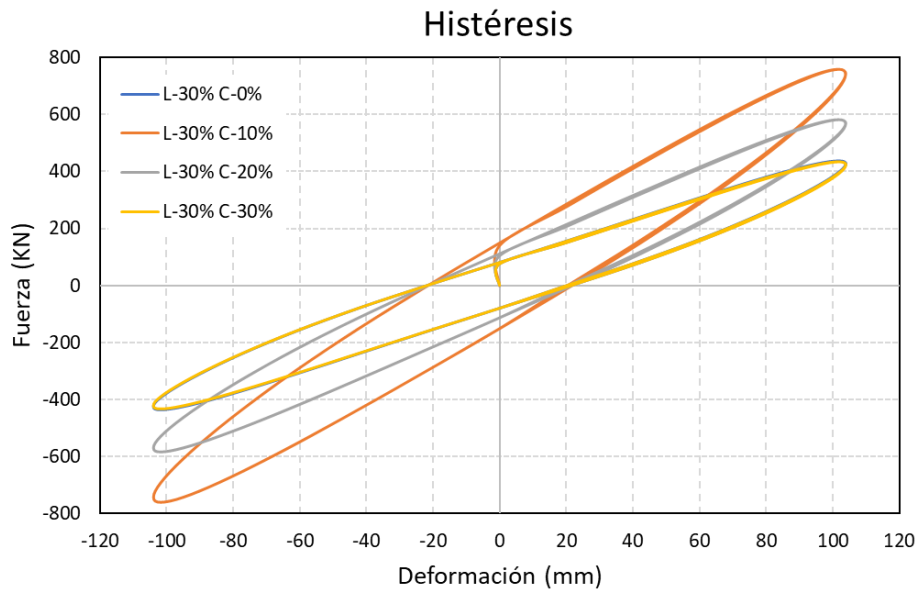


Figura 26. Resultados de variación del plomo del 30% y dispositivo de 0 al 30%

### 5.3. Propiedades Mecánicas

Al conocer el comportamiento de histéresis con las modificaciones efectuados en el diámetro del dispositivo, se calcularon las propiedades del elemento de estudio, amortiguamiento efectivo, la rigidez efectiva y la Energía de cortante efectiva, se realizaron las gráficas correspondientes a cada uno de ellas, para de esta manera obtener gráficamente las variaciones de las propiedades del dispositivo en relación a las modificaciones efectuadas.

En la Figura 27 se presenta la superficie de respuesta tridimensional para el amortiguamiento efectivo ( $\beta_{eff}$ ) del dispositivo, analizado en función de las modificaciones paramétricas del núcleo de plomo y el volumen elastomérico (cuñas). La distribución revela que el amortiguamiento no experimenta un comportamiento lineal, sino que se configura una cresta de máxima eficiencia (zona amarilla) que alcanza valores pico de  $6.2 \times 10^{-3}$  bajo niveles mínimos de reducción en el núcleo de plomo (0% a 10%) combinados con una reducción moderada del caucho. Este incremento en la propiedad disipativa sustenta el principio de optimización de la hipótesis, demostrando que es viable reconfigurar la geometría del

elemento para maximizar la absorción de energía cinética. Por el contrario, al inducir reducciones severas y simultáneas del 30% en ambas variables, la superficie exhibe un valle pronunciado (zona azul) donde el amortiguamiento decae críticamente a  $5.2 \times 10^{-3}$ , evidenciando que la pérdida excesiva de volumen material deprime la capacidad histerética del aislador, demostrando la importancia del plomo para el amortiguamiento del dispositivo.

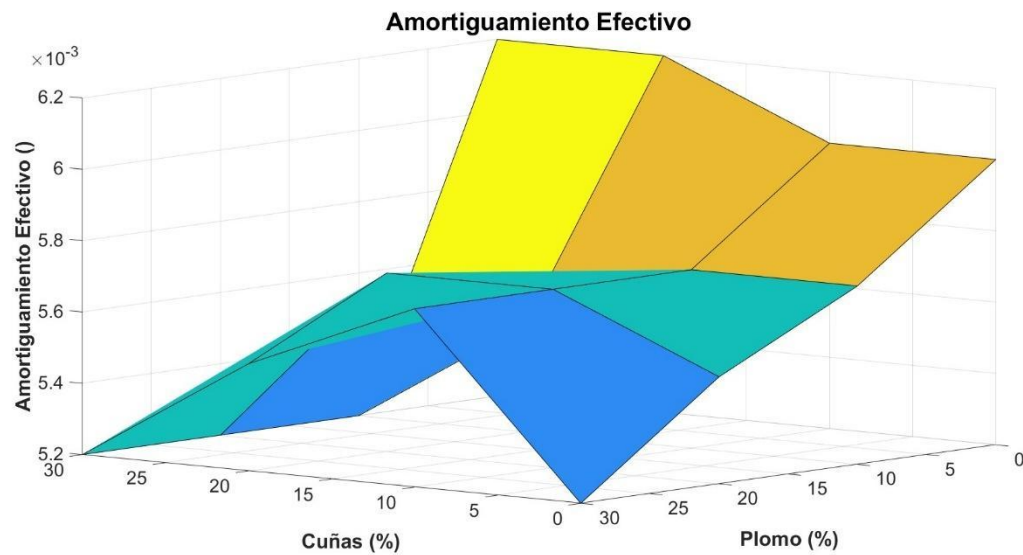


Figura 27. Gráfica de amortiguamiento del dispositivo LRB.

En la Figura 28 se exhibe la caracterización tridimensional de la rigidez efectiva ( $K_{eff}$ ) del amortiguador sísmico bajo las distintas variantes del análisis paramétrico. Los resultados demuestran que la rigidez horizontal del elemento oscila en un espectro continuo que va desde los 4 kN/mm hasta valores cercanos a los 10 kN/mm.

La meseta superior de la superficie (zona amarilla) se concentra en la región con nula o baja modificación en el diámetro del núcleo de plomo (0% a 10%). Estos resultados se deben a que al preservar la sección transversal del cilindro metálico se retiene la rigidez elástica inicial del conjunto. Por otra parte, conforme se incrementan simultáneamente los porcentajes de reducción en las cuñas del elastómero y en el núcleo de plomo hasta niveles del 30%, se genera una pendiente descendente pronunciada que reduce la rigidez global del

elemento a su valor mínimo (zona azul), confirmando la fuerte interdependencia geométrica de ambos componentes en la respuesta elastoplástica del aislador.

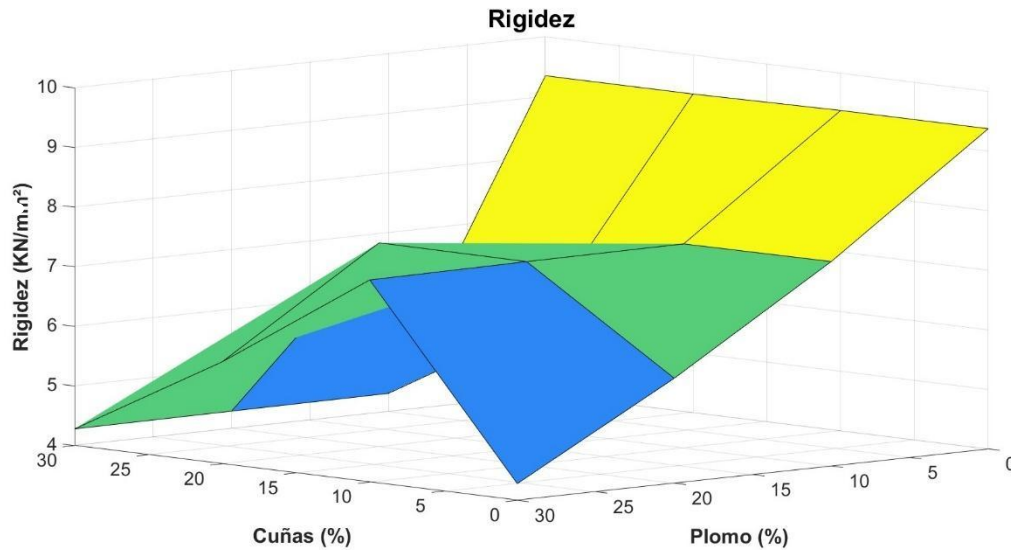


Figura 28. Gráfica de Rigidez del dispositivo LRB.

Por último, se presenta la Figura 29, donde se expone el espacio de solución tridimensional para el esfuerzo cortante efectivo del aislador, evaluado bajo las distintas combinaciones de reducción del núcleo de plomo y de las cuñas elastoméricas. Los valores del eje vertical, condicionados por un factor de escala de  $\times 10^{-3}$ , revelan una distribución topográfica no uniforme que oscila entre  $1 \times 10^{-3}$  y  $4 \times 10^{-3}$ . El aspecto más destacable de este mapa mecánico es la formación de una cúspide aislada, la cual delimita el máximo absoluto del cortante efectivo. Esta singularidad se localiza de manera precisa al conjugar una reducción intermedia en el diámetro del núcleo de plomo con un decremento drástico del 30% en las cuñas de caucho. Físicamente, este fenómeno demuestra que al conservar la capacidad de fluencia íntegra del plomo y al reducir drásticamente el área de desplante del caucho, se maximiza la transferencia de demandas tangenciales unitarias en la interfaz, aportando un escenario crítico de alta eficiencia por corte que sustenta la meta de optimización planteada en la hipótesis.

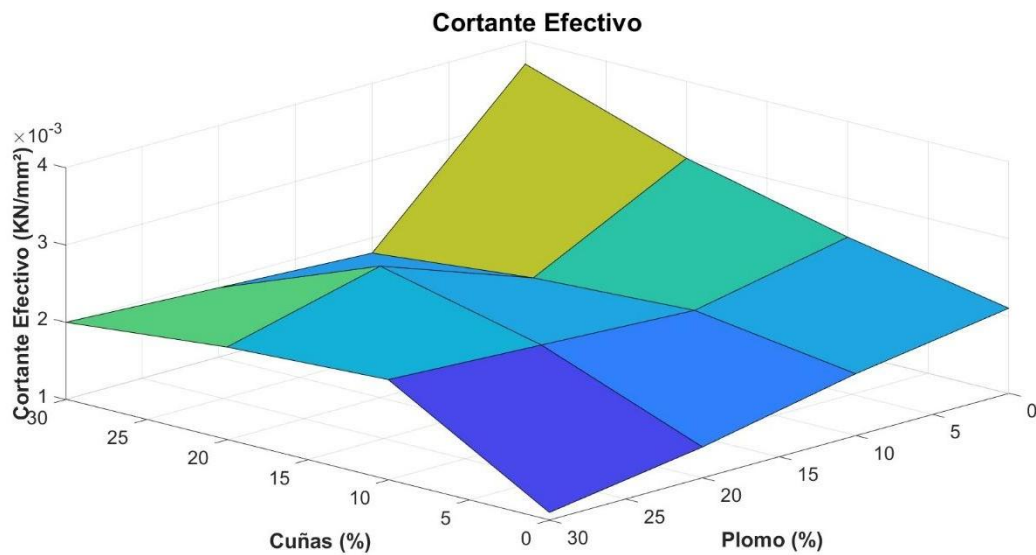


Figura 29. Gráfica de esfuerzo cortante del dispositivo LRB.

#### 5.4. Comportamiento del dispositivo bajo cargas controladas.

Al revisar los resultados de las gráficas de histéresis y las propiedades mecánicas de las variaciones propuestas con el ANOVA, se observa que el dispositivo óptimo al reducir su diámetro, da una mejora en sus propiedades, esto sucede cuando se reduce el elastómero en un 30%, mientras que el plomo conserva su diámetro sin alteraciones, mostrando el comportamiento del dispositivo de acuerdo a los resultados obteniendo en Ansys.

La Figura 30 se presenta el mapa de contornos de deformación total obtenido mediante el módulo Static Structural de Ansys para el estado de carga vertical el cual es la carga inicial a la que es sometido. Los resultados numéricos revelan que el dispositivo muestra un comportamiento altamente rígido ante solicitaciones axiales, registrando un desplazamiento máximo absoluto de apenas  $2.296 \times 10^{-4}$  mm. Esta deformación pico se localiza simétricamente alrededor del dispositivo de manera central de las cuñas (bandas de coloración roja), lo cual describe el fenómeno físico de abultamiento lateral pasivo derivado del módulo de compresibilidad del caucho y la restricción impuesta por las placas de acero intermedias. Por su parte, la zona correspondiente al núcleo central (cilindro de plomo) manifiesta magnitudes inferiores que oscilan en el orden de  $1.02 \times 10^{-4}$  mm, demostrando

que el núcleo se encuentra confinado eficientemente, garantizando la estabilidad volumétrica del aislador antes de la introducción de las demandas dinámicas por cortante.

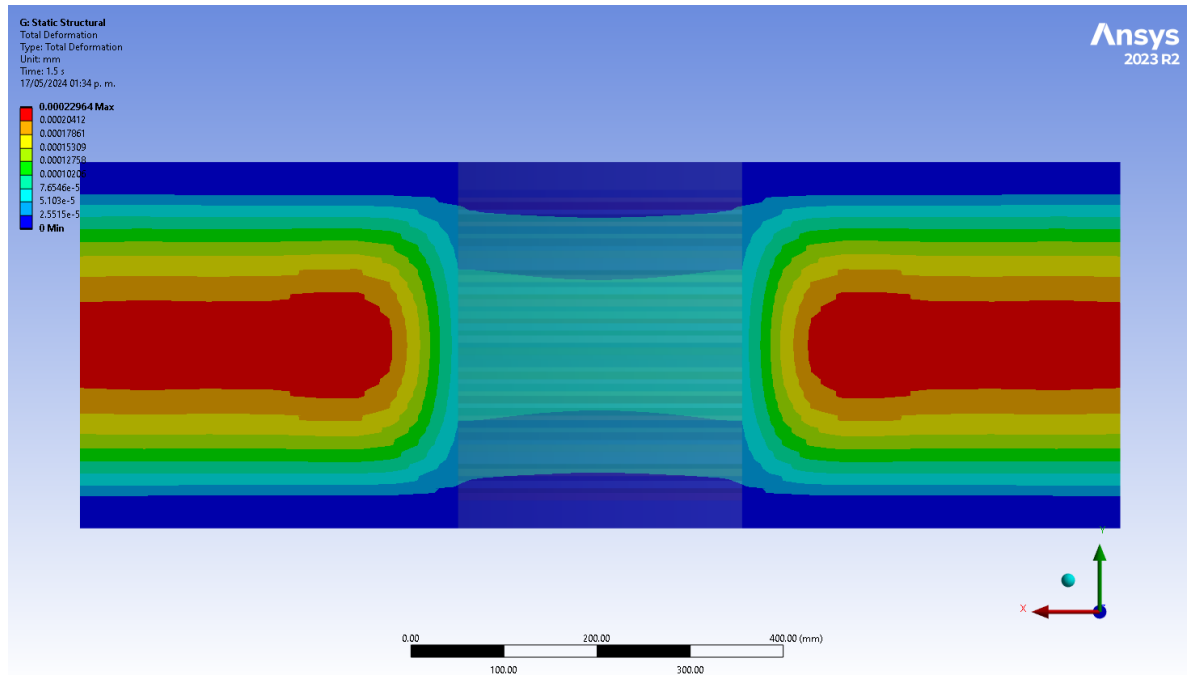


Figura 30. Deformación vertical del dispositivo cuando L-0% y C-30%

Por otra parte, al analizar el desplazamiento horizontal, en la Figura 31 se ilustra el campo de deformaciones totales del aislador LRB ante una sollicitación de corte máximo. El post-procesamiento en Ansys revela que el dispositivo desarrolla un desplazamiento horizontal pico de 104.01 mm.

La distribución de contornos evidencia una distorsión angular uniforme a través del espesor del elastómero, pasando de una condición de restricción total en la base (0 mm) a una traslación rígida en la placa superior. Este comportamiento cinemático es característico de un sistema de aislamiento eficiente, donde la flexibilidad lateral del caucho permite absorber la demanda sísmica impuesta, mientras que el núcleo central acompaña la deformación

plástica necesaria para la disipación de energía, manteniendo la integridad geométrica del conjunto bajo deformaciones de gran magnitud.

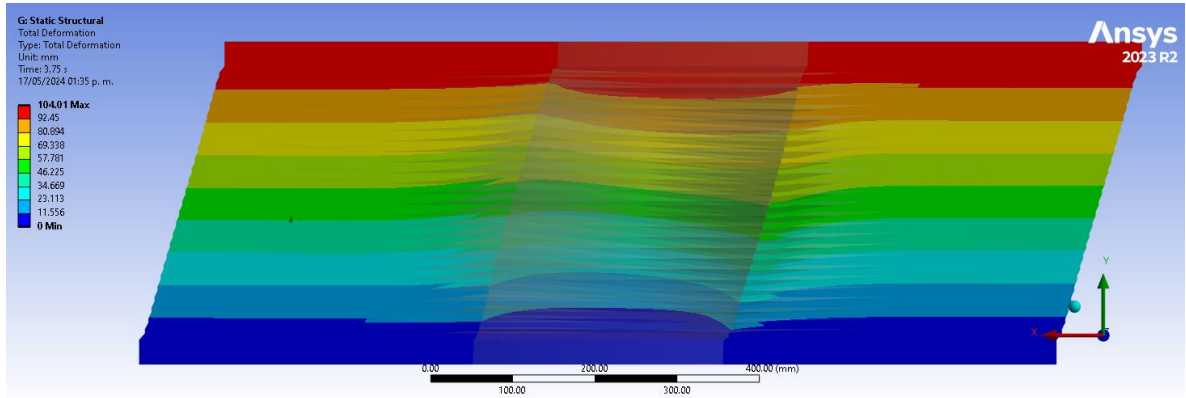


Figura 31. Deformación horizontal cuando L-0% y C-30%.

Por último, se realiza la revisión de los esfuerzos de Von-Mises, los cuales se pueden observar en la Figura 32 se ilustra el estado tensional del dispositivo mediante los contornos de esfuerzo bajo la demanda cinemática máxima.

Los resultados numéricos registran un valor pico absoluto de 12,422 MPa localizado en las esquinas de la interfaz de las placas de conexión. Este valor extremo corresponde a un punto crítico por concentración de esfuerzos generada por las condiciones de frontera rígidas en el software, un fenómeno común en la modelación por elementos finitos. Desestimando este efecto local, el cuerpo del aislador manifiesta una distribución tensional homogénea en la escala azul-celeste, situándose en un rango operativo real de entre 1,380.40 MPa y 4,140.90 MPa. Esta distribución confirma que el núcleo disipador experimenta un estado de esfuerzos tangenciales uniforme que activa la fluencia plástica del material, logrando la disipación elástica requerida sin inducir fallas por inestabilidad tensional en la matriz circundante.

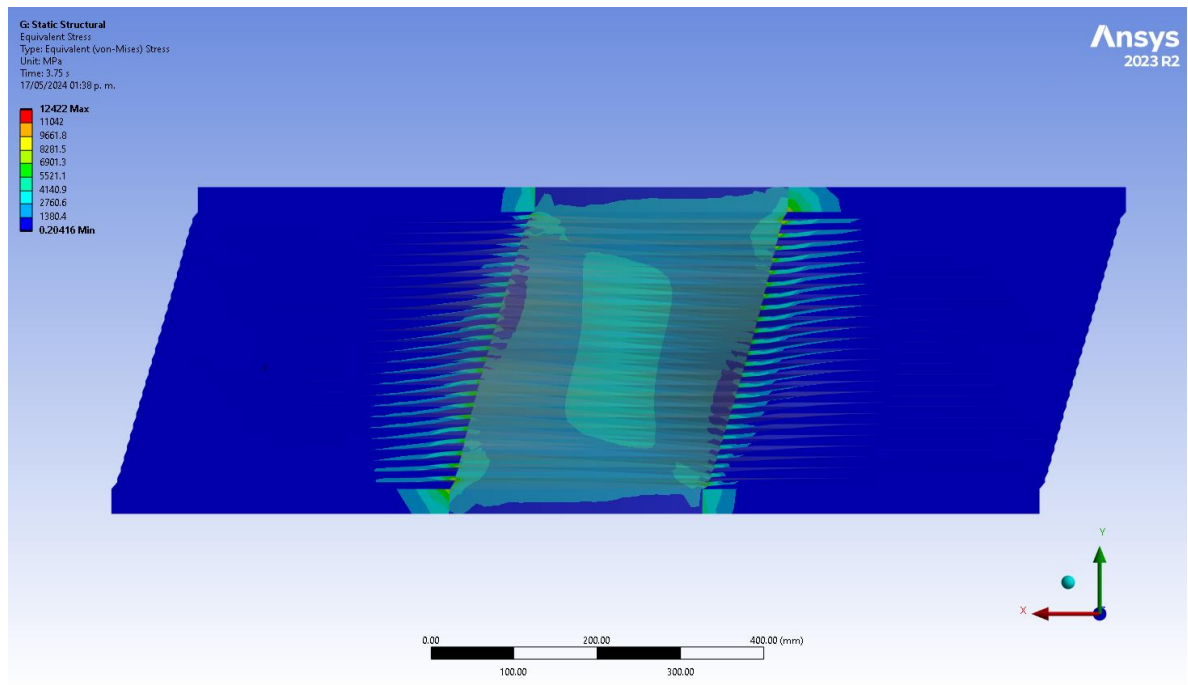


Figura 32. Esfuerzos de Von Mises en 104 mm de desplazamiento.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La evaluación integral de las gráficas de histéresis, las propiedades mecánicas del dispositivo y el post-procesamiento por elementos finitos desarrollados en esta investigación permiten concluir de forma contundente el cumplimiento de la hipótesis general de trabajo.

El núcleo de la propuesta planteaba que la manipulación geométrica controlada de las dimensiones constitutivas de un aislador tipo Lead Rubber Bearing (LRB) reconfiguraría sus propiedades mecánicas hacia un régimen de mayor eficiencia tensional sin demeritar su estabilidad volumétrica ni su capacidad disipativa. Los resultados numéricos ratifican esta afirmación, identificando un escenario óptimo de diseño muy delimitado.

A través de la inspección cruzada de las superficies de respuesta tridimensionales, se demostró que el dispositivo no experimenta una degradación mecánica lineal cuando se altera su volumen material. El hallazgo más relevante de la fase paramétrica es:

- En la coordenada geométrica donde el núcleo de plomo se mantiene intacto (0% de reducción) y el elastómero periférico (cuñas) experimenta su máxima contracción del 30% (L-0% y C-30%). En este espécimen, el cortante efectivo se incrementó un 76% en comparación con la geometría de control, alcanzando un valor máximo absoluto de 0.0037 kN/mm<sup>2</sup>.
- Bajo la demanda de desplazamiento máxima horizontal de 104 mm, los contornos de deformación evidenciaron un régimen de cizallamiento puro homogéneo, garantizando la continuidad en las interfaces de contacto.
- Los campos de esfuerzo equivalente de Von Mises demostró que, al margen de las singularidades numéricas inevitables localizadas en las aristas de sujeción rígida 12,422 MPa, el cuerpo disipador opera de manera segura en un rango de entre 1,380.40 MPa y 4,140.90 MPa, rebasando controladamente el límite de fluencia del plomo para activar el amortiguamiento histerético.
- Al comprobarse que esta configuración compacta retiene los valores más altos de rigidez efectiva 10 kN/mm y mantiene el amortiguamiento en la meseta de máxima

eficiencia elástica, se consolida un criterio de diseño avanzado que permite proyectar dispositivos más esbeltos, económicos y eficientes.

La invariabilidad observada en la fuerza de fluencia y en la rigidez efectiva ( $K_{eff}$ ) sugiere que la reducción del volumen de caucho no altera sustancialmente la capacidad de disipación de energía por ciclo; sin embargo, desde un enfoque de diseño, dicha reducción incrementa los esfuerzos de compresión sobre el elastómero, aspecto que debe contrastarse con los límites de estabilidad al pandeo del aislador.

Se recomienda para futuras investigaciones:

- Realizar un análisis superando el rango elástico del dispositivo, con los resultados de la presente investigación, con el propósito de verificar las propiedades mecánicas del dispositivo y la estabilidad del mismo, de acuerdo al factor de forma, el cual está relacionado con el área de las cuñas de elastómero.
- Debido a que uno de los principales problemas en el análisis de los elementos hiperelásticos es su alta deformabilidad en un lapso de tiempo corto, se recomienda extender el tiempo de análisis y reducir los puntos de estudio, de lo contrario las altas deformaciones arrojaran un error en el jacobiano.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmadipour, M., & Alam, M. S. (2017). Sensitivity analysis on mechanical characteristics of lead-core steel-reinforced elastomeric bearings under cyclic loading. *Engineering Structures*, 140, 39–50. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.02.014>
- Ansys. (2023). *Ansys help*. [https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/wb\\_sim/ds\\_Home.html](https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/wb_sim/ds_Home.html).
- Becker, T. C., Yamamoto, S., Hamaguchi, H., Higashino, M., & Nakashima, M. (2015). Application of Isolation to High-Rise Buildings: A Japanese Design Case Study through a U.S. Design Code Lens. *Earthquake Spectra*, 31(3), 1451–1470. <https://doi.org/10.1193/052813EQS136M>
- Bergström, J. (2015). Elasticity/Hyperelasticity. En *Mechanics of Solid Polymers* (pp. 209–307). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-31150-2.00005-4>
- Catalán Pérez, V. I. (2020). ¿Cómo se comportaron los multifamiliares que tenían daño previo después del sismo del 19 de septiembre de 2017? *Academia XXII*, 11(21), 83–113. <https://doi.org/10.22201/fa.2007252Xp.2020.21.76660>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2022, septiembre 19). *Los sismos históricos de septiembre*. <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/los-sismos-historicos-de-septiembre?idiom=es>.
- Choi, E., Nam, T. H., Oh, J. T., & Cho, B. S. (2006). An isolation bearing for highway bridges using shape memory alloys. *Materials Science and Engineering A*, 438–440(SPEC. ISS.), 1081–1084. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.05.098>
- Constantinou, M., Whittaker, A., Kalpakidis, I., Fenz, D., & Warn, G. (2007). *Performance of seismic isolation hardware under service and seismic loading*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4633.8166>
- Cruz A, V., Krishna, S., & Ordaz, M. (2017, septiembre 28). *¿Qué ocurrió el 19 de septiembre de 2017 en México?*
- De Luca, A., & Guidi, L. G. (2019). State of art in the worldwide evolution of base isolation design. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 125, 105722. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105722>
- El Comercio. (2020, enero 17). *El poderoso terremoto que destruyó la ciudad japonesa de Kobe hace 25 años*. EL COMERCIO PERÚ.
- Gaxiola Camacho, J. R. (2022). *DISEÑO SÍSMICO BASADO EN DESEMPEÑO-REVISIÓN DE UNA FILOSOFÍA ALTERNATIVA DE DISEÑO* (Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, Ed.; pp. 1–14). XXIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica.

- Gioacchini, G., Tornello, M. E., Frau, C. D., García Garino, C. G., Mirasso, A. E., Storti, M. A., & Mendoza, A. (2013). *VALIDACIÓN DE UN MODELO NUMERICO PARA UN NUEVO DISPOSITIVO DE AISLAMIENTO SÍSMICO*.
- Guerrieri, L., Michetti, A. M., & Silva, P. G. (2015). EEE Catalogue: A Global Database of Earthquake Environmental Effects. En *Encyclopedia of Earthquake Engineering* (pp. 932–944). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-35344-4\\_32](https://doi.org/10.1007/978-3-642-35344-4_32)
- Higashino, M., & Okamoto, S. (2006). *Response Control and Seismic Isolation of Buildings*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203018866>
- Huang, J., Wang, P., Shi, Q., Rong, C., & Wang, B. (2023). Mechanical Properties and Seismic Loss Assessment of Improved Isolation Bearing with Variable Stiffness. *Buildings*, 13(5), 1134. <https://doi.org/10.3390/buildings13051134>
- Hwang, J. S., & Chiou, J. M. (1996). An equivalent linear model of lead-rubber seismic isolation bearings. En *Engineering Structures* (Vol. 18, Número 7).
- Kalpakidis, I. V., & Constantinou, M. C. (2008). *Effects of Heating and Load History on the Behavior of Lead-Rubber Bearings*. <http://mceer.buffalo.edu>
- Kalpakidis, I. V., & Constantinou, M. C. (2010). Principles of scaling and similarity for testing of lead-rubber bearings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 39(13), 1551–1568. <https://doi.org/10.1002/eqe.1041>
- Kapasakalis, K. A., Antoniadis, I. A., & Sapountzakis, E. J. (2021). Constrained optimal design of seismic base absorbers based on an extended KDamper concept. *Engineering Structures*, 226. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111312>
- Kdly, J. M. (1986). *Aseismic base isolation: review and bibliography*.
- Kelly, J. M. (1998). Seismic isolation of civil buildings in the USA. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 1(3), 279–285. <https://doi.org/10.1002/pse.2260010309>
- Kim, J. H., Kim, M. K., & Choi, I. (2017). *EXPERIMENTAL STUDY ON THE BIDIRECTIONAL BEHAVIOR OF A LEAD-RUBBER BEARING*.
- Kim, M. K., Kime, J. H., & Choi, I. K. (2013). *A Seismic Isolation Device Test for the evaluation of Performance Criteria of Seismic Isolated NPPs*. [https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:45082516](https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:45082516)
- Li, Y., Ma, Y., Zhao, G., & Liu, R. (2023). Study on the Basic Performance Deterioration Law and the Application of Lead Rubber Bearings under the Alternation of Aging and Seawater Erosion. *Buildings*, 13(2), 360. <https://doi.org/10.3390/buildings13020360>
- Luis, J., & Villafañe, A. (2010). *SISTEMAS DE CONTROL EN ESTRUCTURAS*.
- Makris, N. (2019). Seismic isolation: Early history. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 48(2), 269–283. <https://doi.org/10.1002/eqe.3124>

- Martelli, A., & Forni, M. (2010). Seismic isolation and other antiseismic systems: Recent applications in Italy and worldwide. *Seismic Isolation and Protective Systems*, 1(1), 75–123.  
<https://doi.org/10.2140/siaps.2010.1.75>
- Meli Piralla, R., Miranda Mijares, E., López Navarrete, C., & López Bátiz, Ó. (1986). *Evaluación de los efectos de los sismos de septiembre de 1985 en los edificios de la CDMX* (IIUNAM, Ed.; Primer Edición).
- Mo, Z., Shu, G., Lai, B., Ventura, C. E., & Yang, T. Y. (2024). Experimental behavior, numerical modeling and parameters evaluation of three-dimensional seismic isolation device. *Journal of Constructional Steel Research*, 220, 108817. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.108817>
- Naeim, F. (2007). Dynamics of Structures—Theory and Applications to Earthquake Engineering, Third Edition Anil K. Chopra 2007. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 912 pp., \$139.00. *Earthquake Spectra*, 23(2), 491–492. <https://doi.org/10.1193/1.2720354>
- Naeim, F., & Kelly, J. M. (1999). *Design of Seismic Isolated Structures*. Wiley.  
<https://doi.org/10.1002/9780470172742>
- Oviedo, C., Andrés, J., Duque, J., & Del Pilar, M. (2006). SISTEMAS DE CONTROL DE RESPUESTA SÍSMICA EN EDIFICACIONES. (6), 105–120. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=149216907009>
- Ozkaya, C., Akyuz, U., Caner, A., Dicleli, M., & Pinarbasi, S. (2011). Development of a new rubber seismic isolator: “Ball Rubber Bearing (BRB)”. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 40(12), 1337–1352. <https://doi.org/10.1002/eqe.1091>
- Palazzo, B., Petti, L., & de Ligio, M. (1997). Response of base isolated systems equipped with tuned mass dampers to random excitations. *Journal of Structural Control*, 4(1).  
<https://doi.org/10.1002/stc.4300040105>
- Pan, P., Zamfirescu, D., Nakashima, M., Nakayasu, N., & Kashiwa, H. (2004). BASE-ISOLATION DESIGN PRACTICE IN JAPAN: INTRODUCTION TO THE POST-KOBE APPROACH. *JEE Journal of Earthquake Engineering*, 9(1), 147–171. [www.worldscientific.com](http://www.worldscientific.com)
- Patel, D., Mourya, V. K., Pandey, G., & Kumar, R. (2024). Advancements in base isolation for seismic mitigation: Perspectives on elastomeric and lead rubber bearings. *Research on Engineering Structures and Materials*. <https://doi.org/10.17515/resm2024.15ma0927rv>
- Pérez Barreto, A. A. (2019). AISLADORES ELASTOMERICOS CON NUCLEO DE PLOMO EN LA REDUCCION DE DAÑOS SISMICOS EN EDIFICACIONES ESENCIALES, SURCO-LIMA. UNIVERSIDAD PERUANA LOS ANDES.
- Pourmasoud, M., Hajirasouliha, I., Park, A., & Lim, J. B. P. (2022). A new approach to estimate the lead core characteristic strength of lead rubber bearings. *Engineering Structures*, 270, 114817.  
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114817>

- Ren, X., Lu, W., Zhu, Y., He, Y., & Li, T. (2020). Compressive behavior of low shape factor lead-rubber bearings: Full-scale testing and numerical modeling. *Engineering Structures*, 209, 110030. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110030>
- Reys, M. E. (1993). An introduction to seismic isolation by R.I. Skinner, W.H. Robinson and G.H. McVerry. *Strain*, 29(3), 99–100. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.1993.tb00842.x>
- Rodríguez, M. E. (2016). UNA REVISIÓN CRÍTICA DE LA PRÁCTICA DE DISEÑO POR SISMO DE ESTRUCTURAS EN MÉXICO A CRITICAL REVIEW OF THE SEISMIC DESIGN PRACTICE OF STRUCTURES IN MEXICO. En *Revista de Ingeniería Sísmica* (Vol. 94).
- Saedniya, M., & Talaeitaba, S. B. (2019). Numerical modeling of elastomeric seismic isolators for determining force–displacement curve from cyclic loading. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 11(3), 361–376. <https://doi.org/10.1007/s40091-019-00238-6>
- Saidou, A., Gauron, O., Busson, A., & Paultre, P. (2021). High-order finite element model of bridge rubber bearings for the prediction of buckling and shear failure. *Engineering Structures*, 240, 112314. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112314>
- Sun, W., & Soc, B. E. (2011). *PERFORMANCE ASSESSMENT AND DESIGN OF LEAD RUBBER SEISMIC ISOLATORS USING A BILINEAR SPECTRUM METHOD*.
- Tan, K. C., Hejazi, F., Mohammadi Esfahani, H., & Chong, T. (2022). Development of Elastomeric Rubber Bearing Utilizing Core-and-Filler System. *Structures*, 37, 125–139. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.12.074>
- Tasaka, M., Mori, N., Yamamoto, H., Murakami, K., Sekkei Ltd, N., & Toshiyuki Sueoka, nikkencojp. (2008). *Applying Seismic Isolation to Buildings in Japan-Retrofitting and Middle-story Isolation*.
- Tchamo, J., & Zhou, Y. (2018). *Innovative and Advanced Techniques for Seismic Retrofitting*.
- Touaillon Jules. (1870). *Improvement in buildings* (Patent 99973).
- Tsai, H. C. (1995). The effect of tuned-mass dampers on the seismic response of base-isolated structures. *International Journal of Solids and Structures*, 32(8–9). [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(94\)00150-U](https://doi.org/10.1016/0020-7683(94)00150-U)
- Warn, G. P., & Ryan, K. L. (2012). A Review of Seismic Isolation for Buildings: Historical Development and Research Needs. *Buildings*, 2(3), 300–325. <https://doi.org/10.3390/buildings2030300>
- Yang, W., Sun, X., Wang, M., & Liu, P. (2017). Vertical stiffness degradation of laminated rubber bearings under lateral deformation. *Construction and Building Materials*, 152, 310–318. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.004>
- Zakariya, A., Rifa'i, A., & Ismanti, S. (2023). SEISMIC LOAD REDUCTION ON THE BRIDGE OVER LIQUEFACTION VULNERABILITY ZONE BY LEAD RUBBER BEARING. *Proceedings of the 7th International Conference in Sustainable Built Environment*, 373–390. <https://doi.org/10.20885/icsbe.vol4.art35>

- Zhang, Z., Zhou, Y., & Vassiliou, M. F. (2023). Experimental, numerical, and theoretical studies on vertical stiffness reduction of lead thick rubber bearings. *Construction and Building Materials*, 384, 131421. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131421>
- Zhou, F., & Tan, P. (2018). Recent progress and application on seismic isolation energy dissipation and control for structures in China. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 17(1), 19–27. <https://doi.org/10.1007/s11803-018-0422-4>