

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y DINÁMICAS DE
AISLADORES ELASTOMÉRICOS CON NÚCLEO DE PLOMO EN
BASE A SU DIMENSIONAMIENTO INTERNO**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR:

Luis Manuel San Martín Altamirano

ASESOR:

Christian Alberto Asmat Garaycochea

Lima, Enero, 2022

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por brindarme su apoyo durante todos estos años. Sin ellos nada de esto sería posible.

Al Mg. Christian Asmat Garaycochea, por su tiempo, dedicación y asesoría para poder realizar la presente tesis.



RESUMEN

Desde los inicios de la humanidad, gran parte de la población mundial, en distintas regiones, han sufrido las pérdidas de vidas y daños a sus propiedades debido a los terremotos. Es por esto que los ingenieros, a lo largo de los años, han venido desarrollando varios diseños y tecnologías de construcción para intentar mitigar los efectos de los terremotos en edificios, puentes y contenidos potencialmente vulnerables. El aislamiento sísmico es un dispositivo relativamente reciente que salvaguarda las estructuras frente a consecuencias destructivas de un sismo, aislando la estructura de la superficie y de esa manera, impidiendo que los movimientos sísmicos se transmitan a la misma.

Para lograr esta separación se utilizan dispositivos llamados aisladores, que; por estar colocados de manera eficiente debajo de las columnas de la superestructura, pueden cumplir un rol significativo durante la acción de un sismo. En particular, los aisladores con corazón de plomo (LRB), se fabrican de caucho de bajo amortiguamiento y capas intercaladas de acero y en el corazón un núcleo de plomo. Este núcleo de plomo, permite aumentar su rigidez inicial y aumentar la cantidad de disipación de energía a través del incremento del amortiguamiento del aislador entre 25 y 30%.

Esta tesis pretende investigar acerca de la obtención de las propiedades mecánicas del aislador LRB a partir de su dimensionamiento interno para su posterior testeo y fabricación. Asimismo, se generará una plantilla de cálculo que facilitará la obtención de las propiedades del aislador en base a las dimensiones propuestas. Como resultado se espera aportar conocimiento que pueda servir de ayuda para que en un futuro se puedan fabricar este tipo de aisladores en el país y no depender de patentes extranjeras. Entonces, se concluye que el aislamiento sísmico acrecienta el periodo y el amortiguamiento de la estructura, lo cual se interpreta en una disminución de la demanda sísmica del terremoto hacia la estructura. Pese a ello, se puede afirmar que la mejor opción para utilizar este sistema es sobre estructuras rígidas situadas en suelos también rígidos, lo cual puede aplicarse en la ciudad de Lima debido a su edafología.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.2.1. OBJETIVO GENERAL	2
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3. JUSTIFICACIÓN Y ALCANCE	3
1.4. METODOLOGÍA Y PLAN DE TRABAJO.....	4
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. HISTORIA Y DESARROLLO DE LOS AISLADORES	5
2.2. CONDICIONES Y DEFINICIÓN DEL AISLAMIENTO SÍSMICO.....	11
2.3. DESEMPEÑO DE ESTRUCTURAS AISLADAS.....	15
2.4. NORMAS TÉCNICAS DE DISEÑO	17
2.4.1. NORMA ASCE 7-16.....	17
2.4.2. NORMA AASHTO LRFD 2007.....	21
2.4.3. NORMA CHILENA NCh-2745-2013	32
CAPÍTULO 3: ANÁLISIS PREVIO SOBRE AISLADORES SÍSMICOS LRB.....	36
3.1. DESCRIPCIÓN DE AISLADORES ELASTOMÉRICOS CON NÚCLEO DE PLOMO.....	36
3.2. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.....	39
3.2.1. PROPIEDADES DEL CAUCHO	39
3.2.2. PROPIEDADES DEL ACERO.....	42
3.2.3. PROPIEDADES DEL PLOMO.....	42
3.3. ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES.....	42
3.3.1. COMPORTAMIENTO DEL AISLADOR ELASTOMÉRICO BAJO COMPRESIÓN.....	42
3.3.2. COMPORTAMIENTO DEL AISLADOR ELASTOMÉRICO BAJO FLEXIÓN.....	48
3.3.3. COMPORTAMIENTO DE PANDEO DE AISLADORES ELASTOMÉRICOS.....	51

3.3.4. INFLUENCIA DE LA CARGA VERTICAL EN LA RIGIDEZ HORIZONTAL.....AQ	<.55
3.4. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL AISLADOR LRB.....57	
CAPÍTULO 4: ELABORACIÓN DE UNA HOJA DE CÁLCULO PARA EL DISEÑO DE UN AISLADOR LRB.....62	
4.1. CONSIDERACIONES INICIALES.....62	
4.2. PLANTILLA DE DISEÑO PARA UN AISLADOR LRB.....66	
4.3. PREDIMENSIONAMIENTO DE UN AISLADOR LRB.....73	
4.4 REVISIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....77	
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....79	
CAPÍTULO 6: BIBLIOGRAFÍA.....81	



CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

Los ingenieros, desde fines del siglo XIX, ya tenían la idea de proveer a sus estructuras de un esquema dinámico que permita disminuir los daños causados por los terremotos a la estructura. Investigadores como John Milne y James M. Kelly realizaron numerosos experimentos sobre sistemas de aislamiento y dispositivos de absorción de energía; obteniendo buenos resultados en la aplicación del caucho de alto amortiguamiento. Entonces, a lo largo de los años se ha venido realizando varios diseños y tecnologías de construcción que mitigan los daños causados por los terremotos a los edificios. Entre estas tecnologías destaca el aislamiento sísmico, el cual consiste en separar la estructura del suelo y al mismo tiempo otorgarle amortiguamiento para así proteger a la estructura del terremoto. Este aislamiento sísmico se obtiene mediante el uso de una serie de aisladores colocados entre la subestructura y la superestructura.

Esta definición de aislamiento sísmico se ha transformado en una realidad práctica en las últimas 2 décadas con el crecimiento de apoyos elastoméricos multicapa, elaborados mediante la vulcanización de finas capas de acero a capas de caucho. Estos cojinetes son muy rígidos en la dirección vertical, por lo que pueden llevar la carga vertical del edificio sin problemas. Asimismo, dado que el aislador aumenta el periodo de la estructura, y por ser más flexible absorbe gran parte de los movimientos laterales, resulta en una estructura aislada con una reducción considerable de las fuerzas sísmicas lo cual genera que las vidas de los habitantes sean resguardadas, los materiales y/o equipos conservados y las edificaciones permanezcan en funcionamiento.

Entonces, el aislamiento sísmico se puede usar para proporcionar soluciones efectivas para una amplia gama de problemas de diseño sismorresistente; sin embargo, ¿Cuándo es recomendable usar aisladores sísmicos? efectivamente, se obtienen mejores resultados en edificios rígidos ubicados en suelos también rígidos, ya que al sobreestimarse el periodo de la estructura el sistema no cae en resonancia con el sismo. Lo mismo no ocurre en suelos y/o edificios flexibles. (Kelly, 2011).

Existen varias clases de aisladores, como el aislador elastoméricos con núcleo de plomo (LRB), que fue inventado en 1977 por W.H. Robinson y consiste en capas vulcanizadas de caucho y acero con un núcleo central de plomo, con lo cual se consigue obtener mayor disipación de energía. (Korswagen Eguren, Arias Ricse y Huaranga Huamaní, 2012). Una razón principal: disipa energía mediante procesos simultáneos de recuperación, recristalización y crecimiento de grano. (Wulff et al., (1956); Birchenall (1959); Van Vlack (1985)).

El buen comportamiento de estructuras aisladas se pudo observar en distintos proyectos alrededor del mundo, por ejemplo, el gran desempeño que tuvieron dos estructuras aisladas durante y después del terremoto de Kobe, Japón en 1995. Esto causó una tendencia en el uso de aislamiento sísmico en el país de Japón. Esta misma tendencia fue adoptada por muchas potencias en el mundo, creando diversos proveedores del sistema.

En el Perú, esta tendencia también está siendo aceptada en los últimos años con la finalidad de mitigar los daños causados por los sismos; sin embargo, todos los aisladores empleados en las estructuras son traídos desde el extranjero ya que, en la actualidad, no existen laboratorios para ensayarlos.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

- El objetivo principal de esta tesis es aportar conocimiento sobre el dimensionamiento interno de los aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB) sometidos a diferentes solicitaciones de fuerza cortante y carga axial. Este dimensionamiento será adecuado a la realidad peruana, para lo cual, se realizará un estudio de las propiedades mecánicas del aislador propuestas por patentes extranjeras.

1.2.2. Objetivos específicos

- Comprender los conceptos generales de análisis y diseño de sistemas con aislamiento sísmica.

- Estudiar las propiedades y comportamiento de los materiales que conforman un aislador elastoméricos con núcleo de plomo (LRB) producidas por los efectos del sismo en la estructura.
- Realizar el diseño particular de un aislador para conocer su comportamiento elástico.

1.3. JUSTIFICACIÓN Y ALCANCE

Al estar ubicados en una zona denominada “cinturón de fuego del pacífico”, nuestro país está expuesto a movimientos sísmicos de gran magnitud, es por esto que la demanda de tener edificios aislados sísmicamente ha aumentado en los últimos años. Por esto es que ahora la nueva actualización de la Normade Diseño Sismorresistente (E.030) contempla el empleo de aisladores sísmicos a la hora de proyectar estructuras. Incluso, obliga a que todos los establecimientos de salud y hospitales estén provistos de dispositivos de aislamiento sísmico en la base. Esto permite reducir en un 50% hasta 90% la sensación sísmica dentro de un establecimiento en comparación con lo que se sienta en el exterior del edificio. (Hernández Morales, 2017).

Esta tendencia de aislamiento sísmico ha sido aceptada por diversos proveedores necesario al excelente desempeño de las estructuras; los principales proveedores de estos aisladores provienen de Estados Unidos, Japón, Italia y en un gran crecimiento el país de Chile. Es por esta razón, que la presente investigación busca aportar conocimiento sobre el dimensionamiento de las partes internas de un aislador LRB, y con ayuda de las plantillas de dimensionamiento creadas, en un futuro en el Perú se pueda realizar la fabricación de aisladores sísmicos, en caso particular los aisladores elastoméricos con corazón de plomo (LRB), para su empleo en las estructuras que lo requieran. (CDV, 2017)

1.4. METODOLOGÍA Y PLAN DE TRABAJO:

Este trabajo de investigación está dividido de la siguiente manera:

- Recopilación de información

Se realizará una inspección de la circunstancia del arte de aislamiento sísmico en estructuras, así como su mención en la normativa nacional e internacional. Asimismo, se escogerá el aislador LRB como caso de estudio y análisis.

- Revisión de las características mecánicas de los materiales del aislador LRB

Se realizará un estudio del comportamiento de los principales componentes de un aislador LRB, al igual que son las hojas de caucho-acero y el centro de plomo, tanto en el rango elástico e inelástico, frente a las solicitaciones de fuerza cortante y carga axial producidas por la demanda del sismo en la estructura.

- Diseño particular de un aislador LRB

Se realizará el diseño particular de un aislador LRB, para lo cual se tomarán consideraciones iniciales, como propiedades del caucho, acero y plomo en el rango inelástico; así como también, desplazamientos de diseño iniciales y máximos. Por otra parte, con la creación de plantillas de cálculo se facilitará el dimensionamiento de los componentes del aislador LRB y obtención de sus propiedades.

- Comentarios y Conclusiones

Se presentarán las conclusiones alcanzadas tras la obtención de las rigideces, desplazamientos máximos alcanzados y amortiguamiento de la unidad de aislamiento, todo generado a través de las plantillas de cálculo.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

En este acápite se realizará una exploración del estado de arte del aislamiento sísmico desde 1895 con el inglés John Milne, pasando por el buen desempeño de estructuras aisladas tras el terremoto en Kobe en 1995, hasta ser incluido en las normas internacionales. Luego, se describirán las condiciones y desempeño de estructuras aisladas. Finalmente, se desarrollarán las normas del ASCE 7-16, AASHTO LRFD 2007 y la norma chilena NCh-2745-2013 que serán utilizadas como referencia en los próximos capítulos.

2.1. HISTORIA Y DESARROLLO DE LOS AISLADORES

La definición de aislamiento sísmico ha sido investigado desde hace más de 1 siglo; no obstante, recién en las últimas 4 décadas se ha podido aplicar de modo práctica, y en las terminantes 2 décadas, su uso se ha incrementado de forma acelerada por el buen desempeño que mostraron las edificaciones aisladas en comparación a las que no, durante un terremoto. (Korswagen, 2012)

El inglés John Milne, referido como padre de la sismología moderna por sus investigaciones, fue un docente de ingeniería de minas en Tokio por los años 1876 a 1895. Estuvo muy interesado en los fenómenos del terremoto, por lo cual, ideó y mejoró muchos sismógrafos; así como también, reflexionó mucho sobre el diseño de edificios en zonas activas, desarrollando algunos experimentos. (Naeim, Fazard & Kelly, 1999)

En 1885, Milne, escribió un informe, a la Asociación Británica de Avance de la Ciencia, describiendo su primer experimento, el cual consistía en construir un edificio aislado sobre bolas de deslizamiento de 10 pulgadas de diámetro. Sin embargo, no estaba completamente satisfecho con el desempeño de su edificio bajo cargas de viento, por lo que cambió su sistema de aislamiento. En 1886 describió, en un nuevo informe a la asociación, dando a conocer la nueva versión de su experimento. Concluyendo, tras varios ensayos, que la estructura se volvía estable frente a cargas de viento colocándola sobre bolas de $\frac{1}{4}$ de pulgada. (Naeim, Fazard & Kelly, 1999)

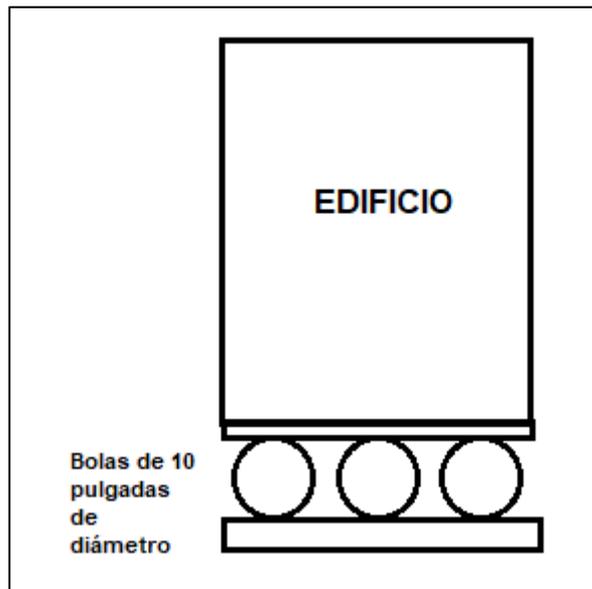


Figura 2.1: Esquema del edificio aislado sobre bolas de deslizamiento planteado por Milne en 1885.

James M. Kelly, profesor de la Universidad de California en Berkeley, ha llevado a cabo numerosos estudios experimentales a gran escala de sistemas de aislamiento, estructuras con dispositivos de absorción de energía y estructuras consistemas de tuberías en la gran mesa de agitación del Earthquake Engineering Research Center (EERC) de la U.C. Berkeley. Por varios años, los investigadores han tratado de crear un mecanismo que separe la estructura del suelo, con el principal objetivo de disminuir las fuerzas producidas por el sismo.

Desde entonces, ha llevado a cabo muchos estudios pioneros de estructuras aisladas sísmicamente, y tras probar varios soportes, logró avances importantes, incluida la aplicación de caucho de alto amortiguamiento para soportes de aislamiento sísmico, utilizado en el primer edificio aislado de EE.UU. y en muchos edificios y puentes de todo el mundo. Ha desarrollado análisis teóricos del comportamiento dinámico y definitivo del aislamiento sísmico con elastómeros de gran deformación. Dirigió el progreso de dispositivos de absorción de actividad para la protección sísmica de estructuras altas para las cuales el aislamiento de bases no es factible. Asimismo, todo su trabajo es la base de muchos de los Códigos de Diseño de Aislamiento Sísmico utilizados en la actualidad, incluidos UBC, IBC y CBC. (Kelly, 2011)

En 1996 James M. Kelly nos revela las tres primeras estructuras aisladas. Dos de ellos fueron realizados sobre esferas: un edificio en Sevastopol, Ucrania y un edificio en México; y el tercero, un edificio de 4 niveles para el observatorio

sismológico del estado de Beijing sobre una superficie de arena. (Naeim, Fazard y Kelly, 1999)

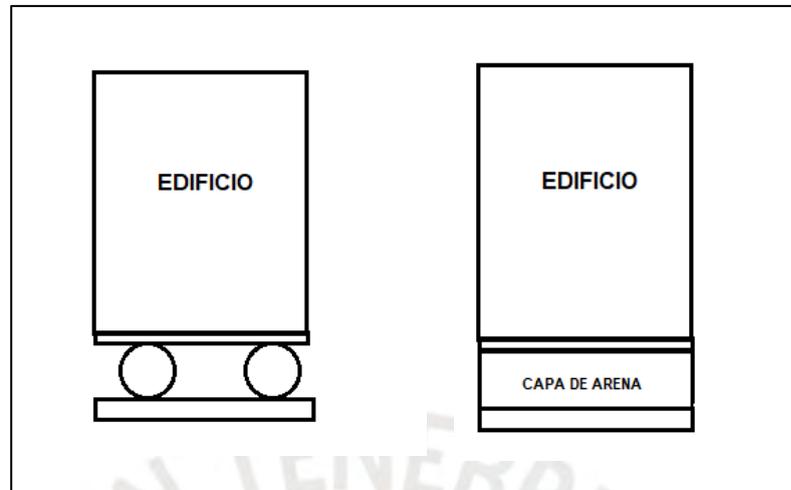


Figura 2.2: Esquema del edificio aislado sobre 2 esferas y con una capa de arena.

La idea de utilizar láminas delgadas de acero como refuerzo en bloques de goma fue aparentemente sugerida por el famoso ingeniero francés Eugène Freyssinet (1879-1962). Declaró que la suficiencia vertical de una almohadilla de goma era inversamente proporcional a su grosor, mientras que su flexibilidad horizontal era directamente proporcional al grosor. (Kelly, 2011)

Recién en 1956 se adoptó la unión de placas de acero finas a láminas de caucho durante la vulcanización en todo el mundo y condujo a la extraordinaria variedad de aplicaciones en las que se usan goma. Esta combinación de flexibilidad horizontal y rigidez vertical, lograda al reforzar la goma mediante finas cuñas de acero perpendiculares a la carga vertical, les permite ser utilizadas en muchas aplicaciones, incluida la protección sísmica de edificios y puentes y el aislamiento de vibraciones de maquinaria y edificios.

El primer edificio que se aisló, de la vibración terrestre de baja frecuencia, realizada con caucho natural, consistía en un bloque de departamentos elaborados en Londres en 1966 conocido como Albany Court, este edificio se halla directamente, encima de la estación St James Park del metro de Londres. Este proyecto fue experimental hasta cierto punto, y el rendimiento y la durabilidad del sistema de aislamiento en los años

posteriores a su construcción fue monitoreado durante varios años por la Asociación de Investigación de Productores de Caucho de Malasia (MRPRA), ahora el Centro de Investigación Tun Abdul Razak, junto con Investigación y desarrollo (Aktins Derham & Waller, 1975).

Otra edificación en donde se usó caucho para la protección contra terremotos de una estructura fue en el colegio Pestalozzi de 3 pisos realizada de concreto situada en Skopje, Macedonia del Norte. (Naeim, Fazard & Kelly, 1999).



Figura 2.3: El 1er edificio aislado con caucho: La escuela primaria Pestalozzi terminada en 1969 en Skopje. (Kelly, 2011).



Figura 2.4: Aislador no reforzado en el edificio de la escuela Pestalozzi en Skopje. (Kelly 2011).

Desde entonces, muchos proyectos se han completado en el Reino Unido utilizando aisladores de caucho natural. Otro ejemplo es Grafton 16, un complejo de viviendas públicas de bajo costo que se construyó en un sitio adyacente a dos líneas ferroviarias de ocho pistas que llevan tráfico las 24 horas. (Kelly, 2011).

El primer edificio en ser aislado de la base con aisladores LRB fue el William Clayton, construido en 1981 en Wellington, Nueva Zelanda. (Naeim, Fazard y Kelly, 1999).

En Europa el aislamiento de la base fue estudiado más activamente en Italia bajo los auspicios del grupo de trabajo nacional sobre aislamiento sísmico. Varios edificios se han construido utilizando aislamiento en la base, uno de ellos es el centro de administración de la Compañía Telefónica Nacional, un complejo de 5 edificios de 7 pisos en Ancona. (Naeim, Fazard y Kelly, 1999).

En tanto, las estructuras aisladas de base más considerables del mundo es el Centro de Computación Postal del Oeste de Japón, que se encuentra en Sanda, Prefectura de Kobe. Esta estructura de seis pisos y 47 000 m² (500 000 pies²) fue aislado de su base a través de 120 aisladores de caucho, acero y plomo. El edificio, que tiene un período aislado de 3.9 s, se hallan usualmente a 30 km (19 millas) del epicentro del terremoto de 1995 en Hyogo-KenNanbu (Kobe) y experimentó un fuerte movimiento del suelo en ese sismo. La aceleración máxima del terreno bajo los aisladores fue de 400 cm / s² (0,41 g) y se redujo por el sistema de aislamiento a 127 cm / s² (0,13 g) en el sexto piso.

La estimación del desplazamiento de los aisladores es de alrededor de 12 cm (4.8 in). No hubo daños en el edificio aislado; sin embargo, un edificio fijo adyacente al centro de cómputo sufrió algún daño. (Kelly, 2011)

El uso del aislamiento en Japón continúa aumentando, especialmente a raíz del terremoto de Kobe. Como resultado del desempeño superior del Centro de Computadores Postales del Oeste de Japón, ha habido un rápido aumento en el número de aplicaciones de aislamiento de bases, incluidos muchos apartamentos y condominios. En los últimos años, el número de edificios aislados de base construidos en Japón cada año ha sido de alrededor de 100, y el número total es probablemente alrededor de 1500 (Kamada y Fujita 2007).

A continuación, se puede observar la tendencia de uso de aislamiento sísmico en el país de Japón antes y después del terremoto ocurrido en Kobe. Previamente al sismo de Kobe(1995) había 85 edificios apartados en Japón. El excelente comportamiento que mantuvieron 2 estructuras aisladas en Kobe, hicieron que el empleo de aisladores se vuelva una tendencia y creciera exponencialmente.

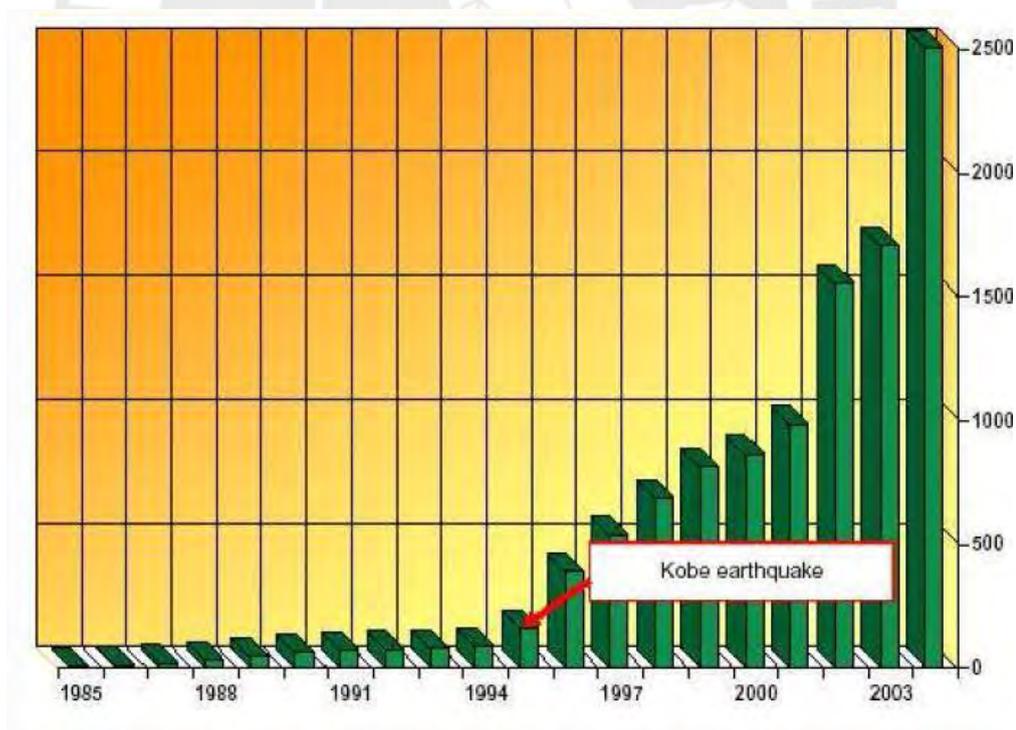


Figura 2.5: Evolución del aislamiento en Japón antes y después del terremoto en Kobe. CEREDETEC (Centro regional de desarrollo tecnológico para la construcción, sismología e ingeniería sísmica).

En Estados Unidos, el 1er edificio aislado en la base que se elaboró fue Foothill Communities Law and Justice Center (FCLJC), un centro de servicios legales para el Condado de San Bernardino que se encuentra en la ciudad de Rancho Cucamonga, California. Fue uno de los primeros edificios a nivel global en implementar soportes de caucho natural de elevado amortiguamiento. (Naeim, Fazard y Kelly, 1999)

En Estados Unidos, la confección de códigos que adjuntaran reglas para el cálculo con aisladores sísmicos inició con una simple comunicación de la Asociación de Ingenieros estructurales del Norte de California titulados "Tentative Seismic Isolation Design Requirements" (SEAOC 1986), estas pautas se basaban en el diseño bajo procedimientos estáticos.

En el año 1990 los integrantes del comité sismológico, del SEAOC disponen incorporar en su "Blue Book", un apéndice con los requisitos generales para el cálculo y construcción de aisladores sísmicos en estructuras. Posteriormente, la comisión sismológica del SEAOC y de la UBC han ido actualizando periódicamente sus códigos, pasando de emplear métodos estáticos a emplear un análisis dinámico en las estructuras. Sin embargo; en el año 1995, el Consejo de Seguridad Sísmica para Edificios solicitó incorporar los diseños de estructuras con aislamiento sísmico y disipación de energía en los requisitos de NEHRP (National Earthquake Hazard Reduction Program). Estos requisitos fueron transformados en la versión del año 1997, en la que los informes del SEAOC, UBC y NEHRP fueron conciliados. (Korswagen, 2012)

En Sudamérica, Chile fue uno de los principales países en implementar el aislamiento sísmico, el cual cuenta desde el 2003 con su propia norma para el estudio y cálculo de estructuras con aislación sísmica NCh2745 - 2003. Esta norma es una adaptación del código UBC y a su vez compatibilizada con la norma chilena de diseño sísmico de edificios NCh433.Of1996.

2.2. CONDICIONES Y DEFINICIÓN DEL AISLAMIENTO SÍSMICO

Desde hace muchos años gran parte de la población mundial, en distintas regiones, han sufrido las pérdidas de vidas y daños a sus propiedades debido a los terremotos. Es por esto que los ingenieros, desde fines del siglo XIX, ya poseían la idea de incorporar a las estructuras de un esquema dinámico especial que les permita disminuir los daños causados por los terremotos.

A lo largo de los años, se han desarrollado varios diseños y tecnologías de construcción sísmica para intentar mitigar los efectos de los terremotos en edificios, puentes y contenidos potencialmente vulnerables. El aislamiento sísmico es una ciencia relativamente reciente que cuida las estructuras contra las consecuencias nocivas de los sismos, desintegrando la estructura de la superficie y otorgándole amortiguamiento.

Para lograr esta separación, el sistema de aislamiento consiste en aisladores colocados estratégicamente debajo de las columnas de la estructura que separan la subestructura de la superestructura, estos dispositivos desempeñarán un rol importante durante el evento telúrico. Asimismo, la energía producida por el sismo es absorbida y disipada por los aisladores, disminuyendo los desplazamientos por entrepiso de la estructura. (DIS, 2007)

En los últimos 20 años se desarrollaron aisladores elastoméricos multicapa, que se construyen por medio de la vulcanización de láminas de caucho a finas armaduras de acero. Estos cojinetes son muy rígidos en la dirección vertical, por lo que pueden llevar la carga vertical del edificio sin problemas. Asimismo, dado que los aisladores son más flexibles que la estructura, considerablemente de los movimientos laterales surgen en los aisladores. Como producto, que la estructura aislada experimenta bajo movimiento y una considerable disminución de las cargas sísmicas, lo cual, origina que las vidas de los habitantes sean cuidadas, los contenidos preservados y las edificaciones permanezcan operativas.

A continuación, se puede observar una estructura sin aislamiento en la base y otra que si lo presenta. Claramente, en la estructura sin aislar las demandas producidas por el sismo causarán desplazamientos que terminarán en daños hacia la estructura. Sin embargo, la estructura aislada disipa la energía producida por el terremoto gracias a la presencia de los aisladores, causando que la superestructura se desplace como un sólido rígido; en otras palabras, los desplazamientos relativos de entrepiso serán prácticamente nulos lo cual ocasionarán menos o casi ningún daño.

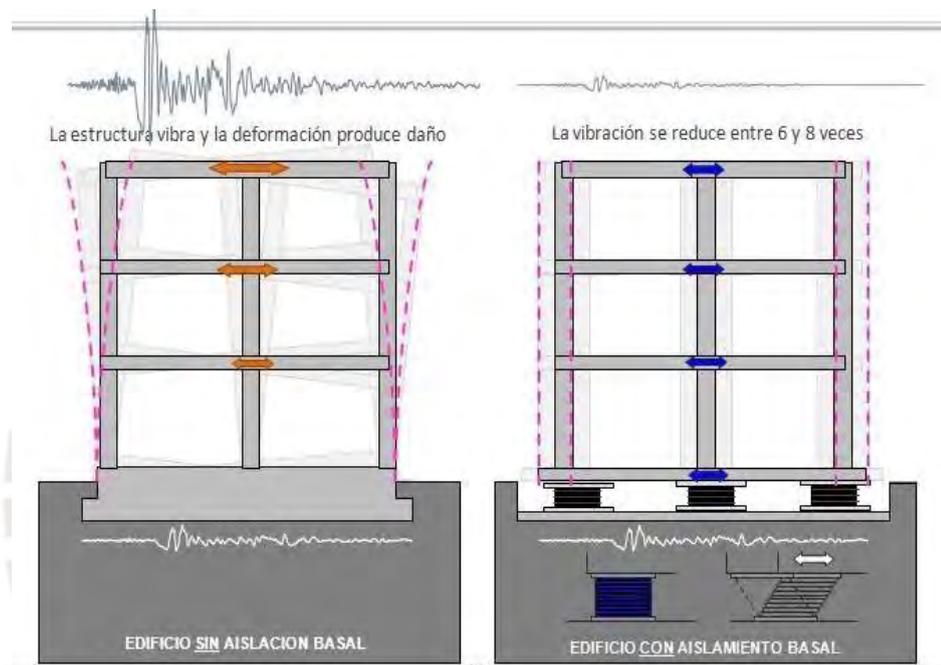


Figura 2.6: Diferencia en la conducta de una estructura aislada y una estructura sin aislar.
Fuente: Carlos Méndez Galindo (2013)

Los aisladores sísmicos hacen que el periodo fundamental de la estructura aumente debido a la flexibilidad otorgada; por lo tanto, esta modificación del periodo de la estructura evita el efecto de resonancia con el terremoto, lo cual reduce considerablemente los daños o colapso de la estructura, tal como se muestra en la figura 2.7 y 2.8.

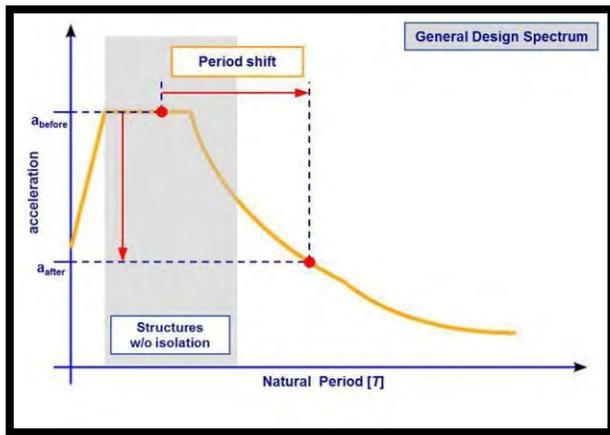


Figura 2.7: Reducción de aceleraciones por cambio de periodo.

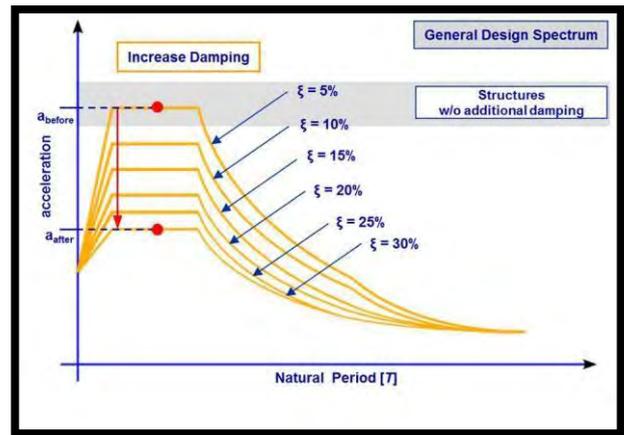


Figura 2.8: Reducción de aceleraciones por incremento de amortiguamiento.

Fuente: Carlos Méndez Galindo (2013)

Entonces, el aislamiento sísmico se puede usar para proporcionar soluciones efectivas para una amplia gama de problemas de diseño sísmico; sin embargo, ¿Cuáles son las condiciones para utilizar aisladores sísmicos en la estructura? Por supuesto, los mejores resultados se obtienen en edificios rígidos ubicados sobre suelos también rígidos, ya que, al incrementarse grandemente el periodo fundamental del sistema estructural las fuerzas sísmicas se reducen; asimismo, al incrementarse el amortiguamiento en la estructura se reducen aún más los desplazamientos. Por lo tanto, no es recomendable aislar edificaciones con un periodo fundamental mayor a 1 segundo ya que al aumentar el periodo provocaríamos resonancia con el sismo; ni aislar edificios ubicados sobre perfiles de suelos tipo S2, S3 o S4.

Hay que considerar además lo dicho anteriormente que el peligro sísmico es un factor que se debe de tener en cuenta si se desea implementar aislamiento sísmico en una estructura. Ya que, depende de la geología local, historia registrada de terremotos y cualquier factor sobre las características probables de un sismo.

Entonces, varias soluciones propuestas para el problema de diseño pueden presentarse con una variedad de posibles formas estructurales y materiales, y con algunos diseños que incorporan aislamiento sísmico y otros no. El nivel probable de daño sísmico se puede evaluar para cada diseño, donde el grado de daño sísmico se puede clasificar en términos generales como:

- (1) Menor del 30%
- (2) Reparable (hasta aproximadamente el 30% del costo de construcción)
- (3) No reparable, lo que resulta en la condena del edificio.

Todo el impulso del aislamiento sísmico es cambiar el nivel de daño probable de (3) o (2) hacia (1) y, por lo tanto, reducir los precios de los perjuicios y, probablemente, también los precios del seguro. (Skinner, 1993)

Luego se pueden evaluar los "costos" y "beneficios" totales de las diversas soluciones, donde el análisis debe incluir el "valor" de tener la estructura o sus contenidos en la mejor condición posible después de un terremoto, y la reducción del riesgo de bajas con daño reducido. En muchos casos, tales beneficios adicionales pueden seguir a la adopción de la opción de aislamiento sísmico. (Skinner, 1993)

Las estructuras que son recomendables de aislar son las que requieren estar operativas durante y después del sismo, tales como hospitales, puentes y centros de emergencia. Asimismo, los que almacenan contenidos valiosos, tales como data centers, locales de fabricación de alta tecnología, museos e instalaciones de comunicaciones. Los edificios con gran número de personas, tales como residenciales / multifamiliares de reducida y mediana elevación, y edificios de oficinas. Por último, los edificios manifestados como patrimonio. (DIS, 2007)

2.3. DESEMPEÑO DE ESTRUCTURAS AISLADAS

Tanto en el aislamiento sísmico como en el enfoque de modo de falla, los componentes dúctiles especialmente seleccionados están diseñados para resistir varios ciclos más allá del rendimiento bajo carga invertida. Los niveles de rendimiento se eligen de modo que las fortalezas transferidas a otros componentes de la estructura se limiten a elasticidad o baja ductilidad.

El rendimiento alarga el periodo fundamental de la estructura, desafiando la respuesta lejos del rango de periodos energéticos de la mayor parte del movimiento del terremoto. El comportamiento histerético de los componentes dúctiles proporciona disipación de energía para amortiguar los movimientos de respuesta. El comportamiento dúctil de los componentes seleccionados asegura una capacidad de deformación suficiente, durante un número de ciclos de movimiento,

para que la estructura en su totalidad pueda resistir la demanda del terremoto. (Naeim, Fazard y Kelly, 1999)

Sin embargo, el aislamiento sísmico difiere fundamentalmente de los enfoques de diseño antisísmico convencionales en el método por el cual se proporcionan los mecanismos de disipación de alargamiento de tiempo (desintonización) y de energía histerética, así como en la filosofía de cómo se resiste el ataque sísmico.

En estructuras convencionales bien diseñadas, la acción de fluencia está diseñada para que ocurra dentro de los miembros estructurales en ubicaciones especialmente seleccionadas, principalmente en las zonas adyacentes a las juntas viga-columna en las estructuras resistentes al momento. El rendimiento de los miembros estructurales es un mecanismo intrínsecamente dañino, aunque la selección adecuada de los elementos de la estructura y los detalles cuidadosos pueden garantizar la integridad estructural. Se requieren grandes deformaciones dentro de la estructura para soportar fuertes movimientos sísmicos.

Estas deformaciones causan problemas para el diseño de componentes que no están destinados a proporcionar resistencia sísmica, porque es difícil garantizar que no se transmitan cargas cuando la estructura se deforma considerablemente desde su posición de reposo. Además, se producen otros problemas en el detalle de elementos tales como ventanas y particiones.

En el enfoque convencional, se acepta que la energía y las fuerzas sísmicas considerables se transmitirán a la estructura desde el suelo. El problema de diseño es proporcionar a la estructura la capacidad de soportar estas fuerzas sustanciales. (Naeim, Fazard y Kelly, 1999)

El diseño estructural convencional está enfocado a prever las fallas y pérdidas de vidas; sin embargo, no contempla la ocupación inmediata ni garantiza una reparación fácil. Para dispersar la energía, este diseño, recurre a las deformaciones elásticas y plásticas que se presentan como daños a la estructura. Asimismo, el cálculo dúctil de los complementos a flexión aporta a eludir el desplome de la estructura, pero existe la posibilidad de que algunos contenidos queden dañados o que la estructura quede inservible después del terremoto. (DIS, 2007)

Por otra parte, el aislamiento sísmico proporciona un mejor comportamiento de la estructura en comparación al diseño convencional. Los esfuerzos y desplazamientos en la estructura se disminuyen de un 75% hasta un 90%. En otras palabras, el esquema de aislamiento logra distorsionar lateralmente a lo largo de un sismo, pero gracias a que la estructura está desacoplada del suelo, la estructura no se desplazará tanto, resultando operativa y funcional.

Durante el terremoto de Northridge de 1994 el Hospital USC, aislado en su base, no sufrió ningún daño y se mantuvo operativo durante y después del sismo; por otro lado, el Centro Médico del condado de Los Ángeles, ubicado muy cerca, sufrió perjuicios presupuestado en 400 millones de dólares y quedó inoperativa después del terremoto.

A lo largo del terremoto de Loma Prieta en 1989, el Stanford Linear Accelerator en Palo Alto en California resultó sin ningún daño y completamente operativa; sin embargo, en otros lugares cercanos se registraron daños alrededor de 160 millones de dólares.

De manera similar, durante el terremoto de Petrolia en 1992 el Puente El River en el condado de Humboldt, aislado en su base, sufrió aceleraciones de 0.55 g, lo que ocasionó que se desplace 9 pulgadas lateralmente, pero retornó a su posición sin ningún daño.

2.4. NORMAS TÉCNICAS DE DISEÑO

Se realizará una concisa descripción del procedimiento y especificaciones empleadas en las 3 normativas, que se espera, son características.

2.4.1 NORMA ASCE 7-16

El comité ASCE / SEI 7 fue integrado por organismos y profesionales connotados de la ingeniería estructural que publicaban sus publicaciones cada seis años, encajando con las publicaciones del International Building Code (IBC).. Entre los puntos más importantes del capítulo 17 sobre el sistema de aislamiento se puede obtener lo siguiente:

La determinación de las estructuras aisladas sísmicamente, incorporando a

la subestructura, los aisladores, y la superestructura, deberán tener en cuenta las alteraciones de las características de los componentes para el aislador sísmico a lo largo de su vida útil planificada, que incorpora alteraciones debidas al deterioro, la contaminación, la exhibición del medio ambiente, velocidad de carga, peso cíclico de servicio, y la temperatura.

El esquema de aislamiento se modelará competentemente con minucia para obtener losiguiente:

- Reparto espacial de unidades aislantes
- Traslación, en ambas direcciones horizontales, y torsión de la estructura sobre la interfaz de aislamiento.
- Cargas de vuelco y elevación en unidades aislantes individuales.
- Consecuencias de la carga vertical, la carga bilateral y/o la velocidad de carga.

a) Requisitos generales de diseño para el esquema de aislamiento

Condiciones Ambientales

El sistema de aislamiento deberá prevenir las condiciones ambientales tales como las consecuencias de vejez, cedencia, fatiga, temperatura de funcionamiento, y la exhibición a la humedad o elementos perjudiciales.

Fuerzas de viento

Las estructuras aisladas deberán soportar las cargas de viento de cálculo en todos los niveles por encima de la interfaz de aislamiento.

Resistencia al fuego

La fortaleza al fuego para el esquema de aislamiento debe de ser por lo menos la misma que soportan las columnas, paredes u otros componentes de la estructura.

Fuerza de restauración lateral

Este esquema será configurado para producir una fortaleza de recuperación de tal manera que la fortaleza lateral en el desplazamiento máximo sea al menos 0.025W mayor que la fortaleza lateral al 50 por ciento del máximo desplazamiento siguiente.

Restricción de desplazamiento

El esquema de aislamiento no debe ser conformar para insertar un sistema de retención de desplazamiento, que término en el desplazamiento lateral debido al máximo terremoto.

Estabilidad de la carga vertical

Cada componente del sistema de aislamiento se calculará para que sea invariable sometida a la carga vertical, cuando se someta al máximo desplazamiento horizontal.

Vuelco

El coeficiente de seguridad contra el vuelco estructural de la interfaz de aislamiento no será inferior a 1.0 para mixturas de cargas establecidas. Toda la gravedad y la índole de carga sísmica serán investigadas. Las fortalezas sísmicas para el cómputo de cálculo de vuelco se basarán en los movimientos de tierra MCER, y el peso se empelará para la fortaleza de renovación vertical.

La elevación local de los elementos individuales no se permitirá a menos que las deflexiones resultantes no causen tensiones excesivas o inestabilidad de las unidades aislantes u otros elementos de la estructura.

Inspección y reemplazo

- a) El acceso se concederá para la supervisión y reemplazo de todos los elementos del esquema de aislamiento.
- b) Un profesional de cálculo registrado deberá completar una serie final de observaciones. Estas observaciones deben indicar que las restricciones consienten el desplazamiento liberado y sin estorbos de la estructura de los niveles máximos de diseño; asimismo, que todos los elementos que cruzan la interfaz de aislamiento, como instalaciones, son competentes de ajustar los desplazamientos predicho.
- c) Las estructuras aisladas deberán tener un plan de monitoreo, inspección y programa de sostenimiento para el esquema de aislamiento establecido por el profesional responsable del cálculo del sistema de aislamiento.
- d) Remodelación, reparación y reconversión en la interfaz del esquema de aislamiento, insertando el de los elementos que cruzan la interfaz de

aislamiento, se lleva a cabo bajo la ubicación de un profesional de cálculo acreditado.

Control de calidad

Un programa de ensayos de control de calidad para unidades aislantes será establecido por el encargado del diseño estructural.

a) Características del método de aislamiento en desplazamientos máximos

En el desplazamiento máximo, DM , se calculará la rigidez efectiva, K_M , utilizando el comportamiento de desviación de carga límite superior e inferior de las unidades de aislador individuales.

$$k_M = \frac{\sum |F_M^+| + \sum |F_M^-|}{2DM}$$

La amortiguación efectiva, β_M , del sistema de aislamiento en el desplazamiento máximo, DM , se calculará utilizando el comportamiento de desviación de fuerza límite superior e inferior de las unidades de aislador individuales.

$$\beta_M = \frac{\sum E_M}{2\pi k_M D^2_M}$$

Donde

$\sum E_M$ = Energía total disipada en el sistema de aislamiento durante un ciclo completo de respuesta en el desplazamiento DM .

$\sum |F_M^+|$ = Suma del valor absoluto de la fuerza P para todas las unidades de aislamiento en un desplazamiento positivo igual a DM .

$\sum |F_M^-|$ = Suma del valor absoluto de la fuerza P para todas las unidades de aislamiento en un desplazamiento negativo igual a DM .

b) Obtención de las propiedades de fuerza-deflexión

Las cualidades de esfuerzo-deformación del método de aislamiento se basarán en los ensayos de carga cíclicas del aislador prototipo especificado en la norma.

Según se requiera, la rigidez efectiva de una unidad de aislamiento, K_{eff} , se calculará para cada ciclo de carga según lo descrito en la siguiente ecuación:

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

Dónde:

F^+ y F^- son las fuerzas positivas y negativas, en Δ^+ y Δ^- , respectivamente.

Según se requiera, la amortiguación efectiva, β_{eff} , de una unidad de aislamiento se calculará para cada periodo de sobrecarga por la siguiente ecuación:

$$\beta_{eff} = \frac{2}{\pi} \frac{\sum E_{loop}}{k_{eff} (|\Delta^+| + |\Delta^-|)^2}$$

Dónde:

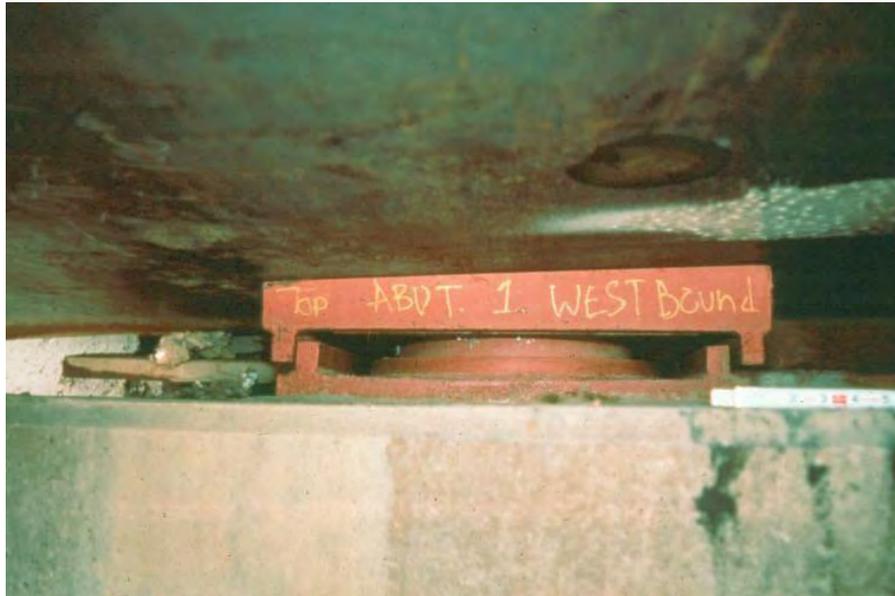
La energía desvanecida por periodo de sobrecarga, E_{loop} y la rigidez efectiva, k_{eff} , se basarán en los desplazamientos de prueba pico de Δ^+ y Δ^- .

2.4.2 NORMA ASSHTO LRFD

Las normas AASHTO LRFD y AASHTO STANDARD son una de las más utilizadas para el análisis sísmico en puentes. En este capítulo se tomará en cuenta sólo la norma AASHTO LRFD, porque se basa en disposiciones de diseño para puentes según sus últimas investigaciones. Asimismo, emplea nuevos criterios de cálculo y corrige deficiencias que presenta la norma AASHTO Standard.

Los aisladores en los puentes se encuentran en medio de la superestructura y la subestructura. Subexiste varias clases de aisladores que se usan en los puentes; sin embargo, todos realizan la misma función básica. Todos ellos transmiten cargas desde la superestructura a la subestructura y facilitan las traslaciones y / o rotaciones. El tipo y tamaño del aislador es simplemente una función de los requisitos de diseño y las magnitudes de las cargas y movimientos.

Figura 2.7: Aislador de acero guiado ubicado entre la sub y superestructura del puente.



Fuente: AASHTO. (2007). LRFD for Highway Bridge Superstructures, Reference Manual.

Figura 2.8: Aislador elastomérico LRB ubicado entre la sub y superestructura del puente.



Fuente: AASHTO. (2007). LRFD for Highway Bridge Superstructures, Reference Manual.

Según la norma, la selección y diseño de aisladores generalmente implica tres pasos básicos:

I. Obtener la entrada de diseño requerida:

La entrada del diseño del aislador generalmente depende de si el aislador es fijo o de expansión. La siguiente figura 2.9 representa un esquema común

utilizado por los ingenieros de puentes para representar los aisladores fijos y de expansión.

Figura 2.9: Representación común de los aisladores fijos y de expansión en un puente.



Fuente: AASHTO. (2007). LRFD for Highway Bridge Superstructures, Reference Manual.

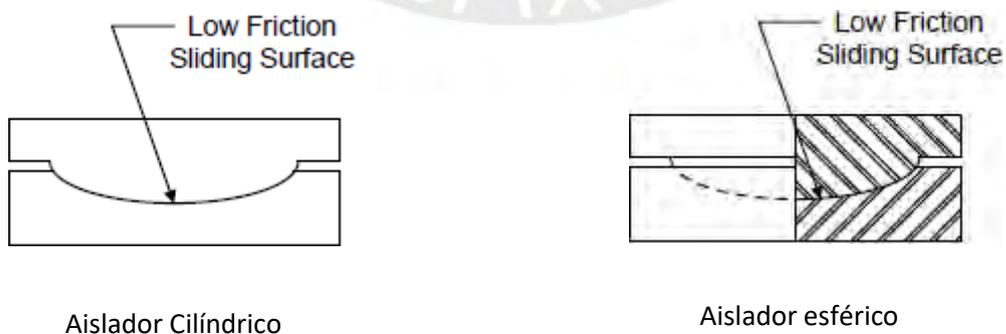
Los aisladores fijos pueden resistir las fuerzas verticales, las fuerzas horizontales y facilitan la rotación; sin embargo, no facilitan los movimientos verticales y horizontales.

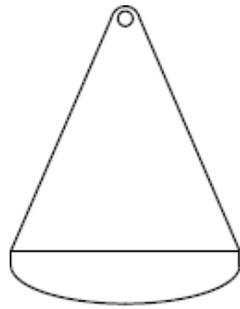
Los aisladores de expansión al igual que los fijos pueden resistir las fuerzas verticales más no las fuerzas horizontales. Asimismo, facilitan la rotación y los movimientos horizontales en el puente.

II. Seleccionar el tipo de aislador más factible

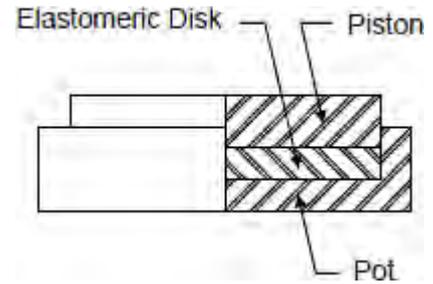
Hay muchos tipos de aisladores, y cada uno tiene sus propias aplicaciones únicas, basadas en la magnitud de las cargas, las traslaciones y las rotaciones de los diversos ejes del puente. En la siguiente figura 2.10 se ilustran cinco tipos de aisladores comunes.

Figura 2.10: Cinco clases de aisladores de baja fricción más comunes usados en los puentes, según AASHTO LRFD.

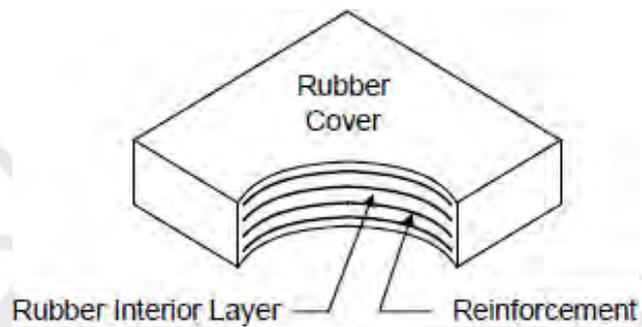




Aislador de balancín



Aislador lento



Aislador elastomérico

Fuente: AASHTO. (2007). LRFD for Highway Bridge Superstructures, Reference Manual.

En particular los aisladores elastoméricos se usan comúnmente en puentes de tamaño pequeño a moderado. El diseño de los aisladores elastoméricos generalmente es responsabilidad del ingeniero de diseño estructural, a diferencia del fabricante del aislador.

Una vez escogido el tipo de aislador a emplearse se tiene que tener en cuenta que para el diseño se tomarán en las cargas aplicadas y los posibles movimientos que pueda presentar el puente. Las cargas se pueden aplicar a los aisladores en varias direcciones diferentes, y las rotaciones y las traducciones también pueden ocurrir en varias direcciones. Las cargas y los movimientos del aislador resultan en deformaciones del aislador, como se ilustran en las siguientes figuras, 2.11 y 2.12, respectivamente.

Figura 2.11: Aislador elastoméricos deformado debido a efectos de cargas verticales, horizontales y movimientos en el puente.

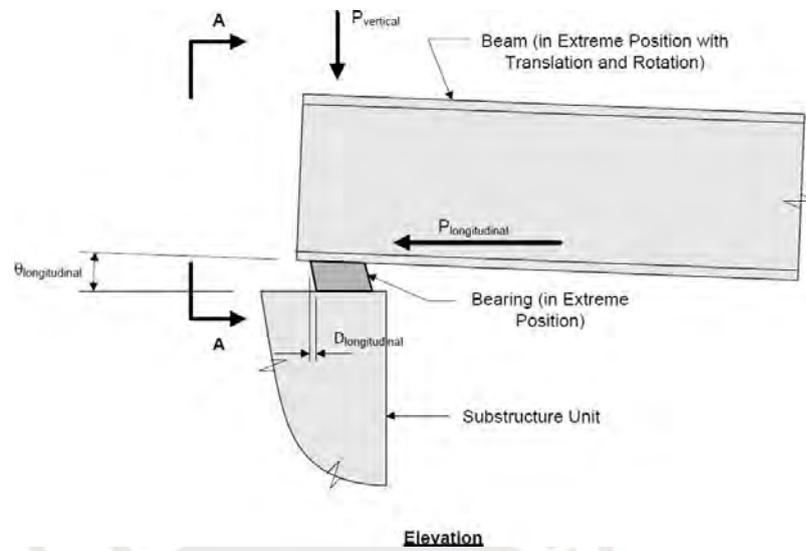
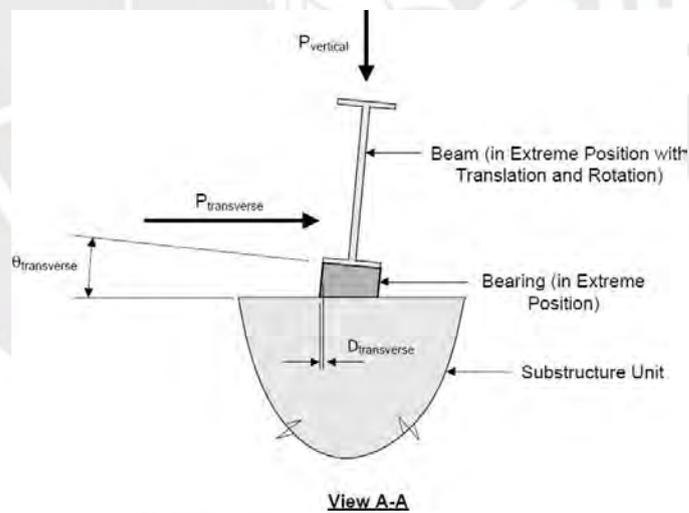


Figura 2.12: Corte A-A del aislador elastomérico en la que se aprecia el efecto de traslación y rotación del aislador y la viga del puente debido a las cargas verticales y horizontales.



Fuente: AASHTO. (2007). LRFD for Highway Bridge Superstructures, Reference Manual.

III. Requerimientos de Diseño

Después de definir los requisitos de diseño del aislador y evaluar los tipos de aisladores más adecuados a emplearse, el siguiente paso es diseñar el tipo de aislador más factible. Hay varios requisitos de diseño generales que se imputen a todas las clases de aisladores, para lo cual, se deben de considerar los movimientos de los aisladores y las cargas de las siguientes fuentes durante el diseño de prácticamente todos los tipos de aisladores:

- ✓ Puente sesgado: los puentes se mueven longitudinal y transversalmente, y el movimiento transversal se vuelve más significativo a medida que aumenta el ángulo de inclinación.
- ✓ Curvatura del puente: los puentes curvos se mueven tangencialmente y radialmente, y el movimiento radial se hace más significativo a medida que disminuye el radio de curvatura.
- ✓ Viga peraltada o curva: la inclinación inicial puede causar una gran rotación inicial del aislador, pero esta rotación puede disminuir a medida que avanza la construcción del puente.
- ✓ Construcción: se deben considerar los movimientos de construcción, aunque tienen una duración corta.
- ✓ Procedimientos de desalineación o construcción: también se deben considerar las cargas de construcción y los movimientos debidos a las tolerancias.
- ✓ Carga de tráfico: los movimientos del aislador causados por la carga del tráfico pueden causar un desgaste considerable del aislador.
- ✓ Efectos térmicos: la magnitud del cambio térmico de longitud, ΔL , es una función de las propiedades del material, el cambio de temperatura y la longitud de expansión.

En el caso de aisladores elastoméricos, reforzados con acero, existen dos métodos comunes para diseñar. El primer método, denominado Método A, generalmente resulta en un aislador con una resistencia más baja que un aislador diseñado con el Método B. Sin embargo, el Método B requiere pruebas adicionales y control de calidad. A continuación, se realizará, solamente, el diseño a través del método A ya que el método B es muy similar.

➤ **Método A:**

Para el método de diseño A, se empleará el siguiente ejemplo de diseño para un aislador elastomérico reforzado con acero en un tope, propuesto en la norma. Los aisladores son de expansión en la dirección longitudinal, a su vez, están fijos en la dirección transversal. Los siguientes requisitos para el Método de diseño A se describen con más detalle en AASHTO LRFD Artículo 14.7.6.

La entrada de diseño requerida para este aislador para el estado límite del servicio es la siguiente:

$$DL = 1551275.34 \text{ kN}$$

$$LL + I = 2184449 \text{ kN}$$

$$LL = 1642294.05 \text{ kN (excluyendo la asignación de carga dinámica)}$$

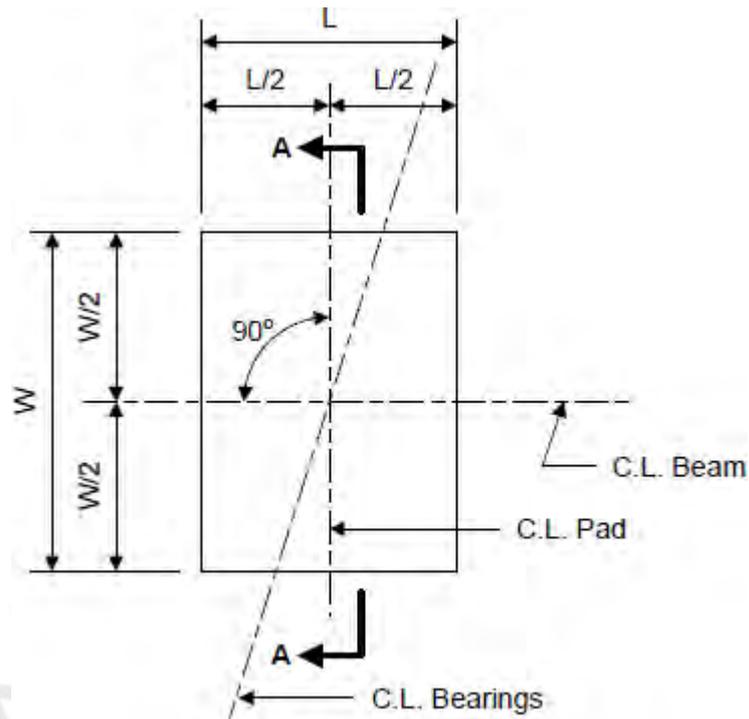
$$\text{Diseño de la traslación longitudinal} = 0.019304 \text{ metros}$$

Por lo tanto, la carga de gravedad del estado fin de servicio total es la siguiente:

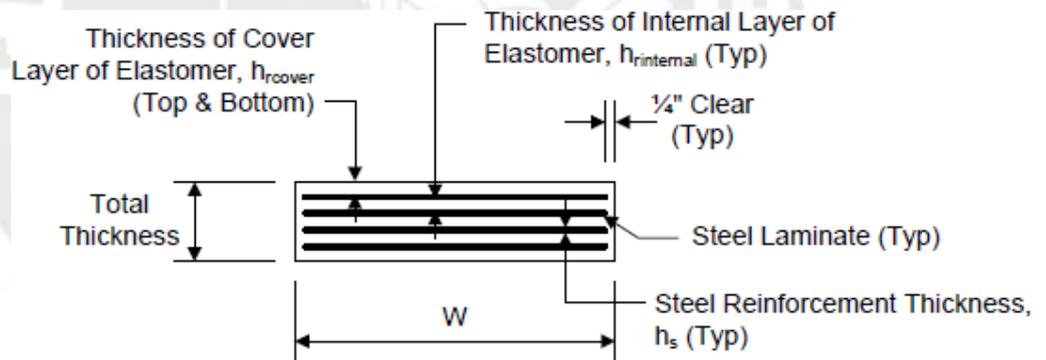
$$DL + LL + I = 1551275.34 \text{ kN} + 2184449 \text{ kN} = 3735724.34 \text{ kN}$$

• **Propiedades de los materiales**

El siguiente paso es seleccionar las propiedades preliminares del aislador. Para este diseño, se seleccionó la siguiente configuración preliminar del aislador, como lo muestra la figura 2.13.



Plan



Section A-A

Figura 2.13: Conformación preliminar del aislador elastomérico a diseñarse. Fuente: AASHTO. (2007). LRFD for Highway Bridge Superstructures, Reference Manual.

Longitud de la plataforma, $L = 0.3556$ metros

Ancho de la plataforma, $W = 9.677$ milímetros

Espesor de la cubierta del elastómero, $h_{cover} = 0.00635$ metros

Grosor de la capa interna del elastómero, $h_{internal} = 0.241935$ milímetros

Número de capas de refuerzo de acero = 9

Espesor del refuerzo de acero, $h_s = 0.0771611$ milímetros

Además, se seleccionaron las siguientes propiedades del material: Dureza del elastómero = 50 (AASHTO LRFD Artículo 14.7.6.2) equivalente a 0.64 MPa.

Módulo de cizallamiento del elastómero, $G = 655001.943$ Pa, basándose en la tabla 2.1 que se muestra a continuación:

	Hardness (Shore A)		
	50	60	70
Shear Modulus @ 23°C (Mpa)	0.66-0.90	0.90-1.38	1.38-2.07
Creep deflection @ 25 years divided by Initial deflection	0.25	0.35	0.45

Tabla 2.1: Propiedades del material sacado de la tabla 14.7.6.2-1 del AASHTO LRFD.

Desviación de fluencia del elastómero a los 25 años dividida por deflexión inicial = 0.25 (AASHTO LRFD, Tabla 14.7.6.2-1)

Fuerza de fluencia del refuerzo de acero, $F_y = 344.74$ MPa

Umbral de fatiga de amplitud constante de refuerzo de acero para la Categoría de detalle A, $\Delta F_{TH} = 165.47$ MPa (AASHTO LRFD Tabla 6.6.1.2.5-3)

El siguiente paso es diseñar el factor de forma. Para capas de elastómero individuales se calcula como el área del aislador dividida por el área del perímetro libre a abultarse. Para aisladores elastoméricos reforzados con acero, se deben cumplir los siguientes requisitos:

- ✓ Las láminas internas de elastómero deben tener que el mismo grosor.
- ✓ El grosor de las capas de cubierta no puede exceder el 70% del grosor de las láminas internas.

Para este ejemplo de diseño, todas las capas internas tienen 9.525 milímetros de grosor. El grosor de las capas de cobertura (6.35 milímetros) es 66.7% del grosor de las láminas internas (9.525 milímetros). Por lo tanto, ambos requisitos se cumplen.

Para aisladores rectangulares sin agujeros, el factor de forma para la capa i -ésima es:

$$S_i = \frac{LW}{2h_{ri}(L + W)}$$

Para las láminas internas del elastómero, el factor de forma se calcula de la siguiente manera:

$$S_{internal} = \frac{(35.56cm)(38.1cm)}{2(0.953cm)(35.56cm + 38.1cm)} = 9.66$$

Para las capas de cobertura del elastómero, el factor de forma se calcula de la siguiente manera:

$$S_{cover} = \frac{(35.56cm)(38.1cm)}{2(0.635cm)(35.56cm + 38.1cm)} = 14.48$$

El Método A se aplica al diseño de los aisladores elastoméricos reforzados con acero si la rotación primaria es alrededor del eje paralelo al eje transversal del puente y si se cumple la siguiente condición:

$$\frac{S_i^2}{n} < 22$$

Para este ejemplo:

$$n = 8 + \frac{11}{22} = 9$$

$$\frac{S_i^2}{n} = \frac{(9.66)^2}{9} = 10.4 < 22 \quad \text{OK}$$

• Esfuerzo de compresión

Dicha compresión del aislador elastomérico está basado en las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_s = 1.25 G S_i \quad \text{y} \quad \sigma_s = 8.62 G \text{ MPa}$$

- **Deflexión compresiva**

La deflexión de la carga viva instantánea se calcula usando la siguiente ecuación:

$$\delta_L = \sum \varepsilon_{Li} h_{ri}$$

Donde:

ε_{Li} : deformación de compresión de la carga viva instantánea en la i-ésima capa del elastómero.

h_{ri} : espesor de la i-ésima capa elastomérica.

De manera similar, la deflexión inicial de carga muerta se calcula usando la siguiente ecuación:

$$\delta_d = \sum \varepsilon_{di} h_{ri}$$

Donde:

ε_{di} : deformación de compresión de la carga muerta inicial en la i-ésima capa de elastómero

h_{ri} : espesor de la i-ésima capa elastomérica

- **Cortante**

La deformación del cortante se verifica para garantizar que el aislador pueda facilitar el movimiento anticipado del puente horizontal. Además, la deformación de cortante está limitada para evitar el vuelco en los bordes y la deslaminación debido a la fatiga. La deformación máxima de corte de la plataforma en el estado límite de servicio, Δ_s , debe tomarse como el desplazamiento horizontal máximo de la superestructura. Además, si se utiliza una superficie deslizante de baja fricción, entonces no es necesario tomar Δ_s mayores que la deformación correspondiente al primer deslizamiento. Para un aislador elastomérico, se debe cumplir la siguiente ecuación:

$$h_{rt} \geq 2\Delta_s$$

Donde:

hrt: menor del grosor total del elastómero o del aislador.

Δ_s : deformación de corte total máxima del rodamiento a partir de las combinaciones de carga de servicio aplicables.

2.4.3 NORMA CHILENA-2745-2013

De acuerdo a Korwagen (2012), la normativa chilena NCh2745 es la conclusión del trabajo de la Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Sísmica, ACHISINA, creada en 1999 y es el resultado del cambio de lengua, comentarios y adaptación del código UBC del año 1997 a la vivencia chilena y su compatibilización con la norma chilena NCh433 del 1996, modificando principalmente la filosofía de diseño a un criterio de desempeño. Esta norma está desarrollada bajo el concepto de que el esquema estructural consagrado a aguantar las cargas laterales se diseño para soportar las deformaciones y esfuerzos originados por el terremoto; sin embargo, si las fuerzas producidas por el viento son lo suficientemente fuertes para crear esfuerzos y deformaciones superiores, entonces se utilizarán estas en reemplazo de las del terremoto.

El propósito de aislar una estructura es que luego de un terremoto no solo se proteja la vida, sino también se disminuya el daño a la estructura y los contenidos se encuentren operativos y funcionales. En las condiciones se conceptualizan 2 plantas de sismo: el terremoto de cálculo (SDI), el que generalmente se utiliza y el terremoto superior posible (SMP), que contiene una probabilidad de demasía del 10% en 1000 años.

Todos los elementos que componen el sistema de aislamiento se diseñarán para que soporte las deformaciones y esfuerzos producto por el SMP sin falla. La superestructura se calculará para que se comporte elásticamente a lo largo del SDI. En las edificaciones aisladas se analizará el desempeño para el SMP analítica y prácticamente, de modo que se afiance que en el mal de as circunstancias de la estructura será al menos tan infalible como una tradicional. En tanto, es vital las pruebas de esquemas de aisladores para el SMP.

Para terremotos severos no debe pronunciarse falla en el esquema de aislamiento, ni daño importante en los elementos estructurales y no estructurales. Esto detalla que las derivas deberán ser mucho inferior que las que eventualmente se darían en un

edificio tradicional y que el desplazamiento lateral se condensará en el esquema de aislamiento y no pasará hacia la estructura. El SDI se empleará para diseñar la respuesta y el cálculo de la sub y superestructura; en tanto, el SMP se desempeñará para analizar la demanda de los desplazamientos y chequear la estabilidad en el esquema de aislamiento.

a) Modelación de aisladores

Una de las finalidades principales del esquema estructural debe de ser reducir las diversas irregularidades encontradas en sus características mecánicas de los aisladores como obtención de variar la sobrecarga vertical, la velocidad de carga, traslado bidireccional, calor y frío y encanecimiento del aislador.

• Modelos lineales

Para los procedimientos lineales establecidos por esta norma, el sistema de aislamiento se puede presentar por un modelo lineal equivalente. Las propiedades de este modelo son la rigidez secante del aislador, también denominada como equivalente, K_{ef} :

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

Y el argumento de amortiguamiento lineal viscoso similar, β_{ef} :

$$\beta_{ef} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\sum E_{di}}{K_{ef} D^2} \right]$$

Donde:

$\sum E_{di}$ = suma de las energías disipadas por todos los aisladores en un ciclo.
 $K_{ef} = \sum K_{ef}$ = rigidez efectiva o secante de todos los aisladores del sistema de aislamiento.

b) Desplazamientos laterales mínimos

- **Desplazamientos de diseño**

El esquema de aislamiento se debe calcular y crear para ser capaz de aguantar, como mínimo, desplazamientos sísmicos laterales que influyan en la dirección de los ejes principales de la estructura según la ecuación:
 $D_D = C_D / B_D$.

C_D se halla según la clase de suelo y B_D se puede diseñar u obtenerlo de la Tabla 2 de la norma.

- **Desplazamiento total**

Deben incorporar los desplazamientos agregados sometidos a la torsión natural y accidental analizada teniendo en cuenta la organización espacial de la rigidez lateral del esquema de aislamiento y la localización menos favorable de la excentricidad de masa. La excentricidad de masa en planta se cuantifica con respecto al centro de rigidez. El desplazamiento total de diseño D_{TD} se obtiene con:

$$D_{TD} = D_D \left[1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right]$$

El desplazamiento total puede ser inferior al calculado con esta fórmula, pero no inferior a 1.1 D_D ni a 1.1 D_M .

c) Fuerzas laterales mínimas

Los componentes estructurales en un nivel inmediato o reducido nivel de aislamiento, se deben diseñar para soportar una fortaleza sísmica lateral mínima V_b .

$$V_b = K_{Dmáx} D_D^2$$

Y los componentes estructurales sobre el esquema de aislamiento:

$$V_s = \frac{K_{Dmáx} D_D}{R_1}$$

Donde R1 es siempre menor a dos para comprometer a la edificación y perdure elásticamente a lo largo del terremoto de diseño. Aún a 1.5 veces la fuerza solicitada para avivar el esquema de aislamiento.

d) Aisladores con corazón de plomo

La capacidad del aislador a cero deformaciones, Q, se puede aproximar por:

$$Q = A_p r_y$$

Donde:

A_p : Área de plomo.

r_y : Tensión de fluencia.

Por otra parte, la rigidez post-fluencia del aislador K_p es en general mayor que la rigidez de la goma del aislador sin el corazón de plomo. De esta forma:

$$K_p = f_L \frac{GA_r}{H_r}$$

Donde:

G: Módulo de corte de la goma, calculado típicamente a 0.5.

A_r : Área de la goma adherida al acero.

H_r : Altura total de la goma en el aislador

f_L : Esfuerzo de fluencia= 1.15.

Como normativa práctica, la rigidez inicial del aislador oscila entre 6.5 a 10 veces su rigidez post-fluencia.

El ciclo fuerza-deformación de un aislador LRB se puede representar por un comportamiento bilineal. El modelo bilineal requiere la definición de tres parámetros: la fuerza de fluencia F_y , la rigidez post-fluencia k_p , y el desplazamiento de fluencia D_y . Conocido el desplazamiento de fluencia, la fuerza de fluencia es:

$$F_y = Q + k_p D_y$$

En donde:

$$D_y = \frac{Q}{K} = \text{con } K = (5.5 \text{ a } 9)k_p$$

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS PREVIO SOBRE AISLADORES SÍSMICOS LRB

En esta sección se describen los elementos que está compuesta un aislador elastomérico con núcleo de plomo, que son el caucho, acero y plomo. Luego, se mencionan las propiedades de cada uno de estos materiales. Finalmente, se realiza un análisis de esfuerzos y deformaciones del aislador bajo compresión, flexión y pandeo. Concluyendo que la presencia de un agujero provoca una disminución considerable de E_c pero causa una disminución insignificante a la rigidez a la flexión. Si reemplazamos ese vacío por plomo compensaríamos la pérdida de E_c y aportaríamos aún mayor amortiguamiento y mayores ciclos histeréticos.

3.1 DESCRIPCIÓN DE AISLADORES ELASTOMÉRICOS CON NÚCLEO DE PLOMO

El aislador de goma-plomo fue inventado en abril de 1977 por W.H. Robinson cuando por accidente observó un cojinete elastomérico de goma mientras intentaba, con poco éxito, obtener un amortiguador cilíndrico de plomo para poder operar grandes esfuerzos cortantes.

Las placas de acero, en el cojinete elastomérico, sirvieron inmediatamente para presentar una solución al problema de cómo controlar la forma del plomo durante una deformación plástica grande. Se perforó un aislador elastomérico para luego adicionarle un tapón de plomo, se probó de inmediato, y los resultados se enviaron al Ministerio de Obras y Desarrollo (MWD) de Nueva Zelanda. En las siguientes semanas, el MWD rediseñó los aisladores para el Edificio William Clayton, reemplazando el diseño planificado (aisladores elastoméricos más amortiguadores de acero) por aisladores de caucho con plomo, que eran sustancialmente menos costosos para instalar. Al mismo tiempo, la Sección de Puentes del MWD diseñó los puentes Toe y Waiotukupuna para implementarles aisladores de caucho-plomo. Por lo tanto, durante un tiempo muy corto, los aisladores de caucho y plomo se inventaron, probaron y usaron en aplicaciones prácticas.

Antes de describir los aisladores elastoméricos con núcleo de plomo en detalle, vale la pena considerar las razones para elegir el plomo como material para el inserto en los aisladores.

La razón principal es que el plomo brinda una tensión relativamente baja de ~ 10

MPa, y se comporta aproximadamente como un sólido plástico elástico. Por lo tanto, se requiere un diámetro de plomo de tamaño razonable ~ 100 mm de diámetro para producir las fuerzas de amortiguación de plástico necesarias de ~ 100 kN para un cojinete de caucho típico de 2 MN.

El plomo también se elige porque se "trabaja en caliente" cuando se deforma plásticamente a temperatura ambiente. Las propiedades mecánicas del plomo se restauran continuamente mediante los procesos simultáneos interrelacionados de recuperación, recristalización y crecimiento de grano (Wulff et al (1956), Birchenall (1959) y Van Vlack (1985)).

De hecho, deformar el plomo plásticamente a 20 ° C equivale a deformar el hierro o el acero plásticamente a una temperatura superior a 400 ° C. Por lo tanto, el plomo tiene buenas propiedades de fatiga durante el ciclismo en cepas plásticas (Robinson & Greenbank (1976)). Otra ventaja del plomo es que se usa en baterías, por lo que está disponible con la alta pureza del 99.9 %.

Los aisladores con corazón de plomo (LRB) se fabrican usualmente de caucho de reducido amortiguamiento intercalado con capas de acero, unidos a través de la vulcanización, en el centro se deja un orificio en el que se inserta el núcleo de plomo, que es un más espacioso que el orificio, entonces se une sometida a presión y se transforman en una unidad. Estos aisladores son similares a los LDRB, pero al incluir un núcleo de plomo le permite al aislador aumentar su rigidez inicial y la capacidad de disipación de energía mediante el incremento del nivel de amortiguamiento del sistema entre 25 y 30%. (DIS, 2007).

En la Figura 3.1 se presentan los implementos del LRB y en la Figura 3.2 se muestra el gráfico de un ciclo histerético de un aislador LRB, el cual nos indica sobre la tendencia de un material a conservar una de sus propiedades, en ausencia del estímulo que la ha generado.

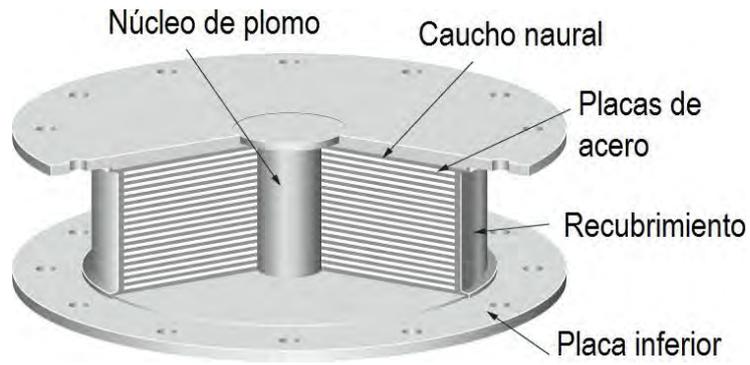


Figura 3.1: Componentes de un aislador LRB. BRIDGESTONE (2015).

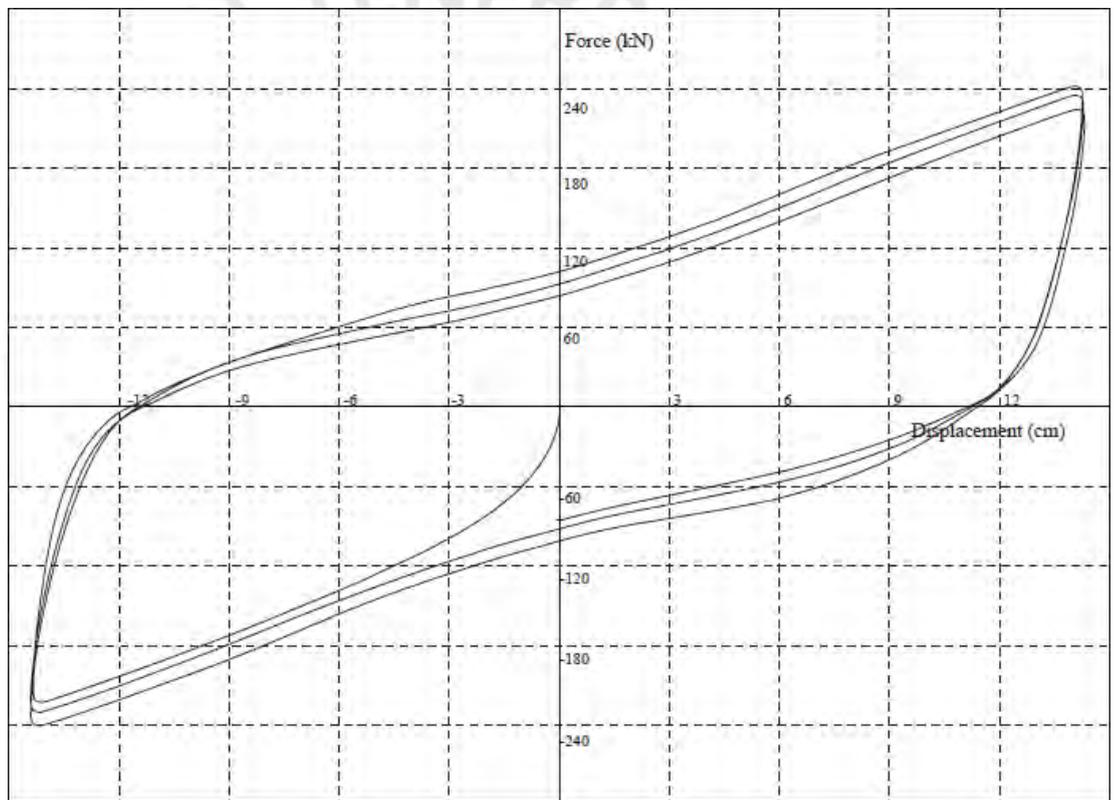


Figura 3.2: Fuerza de corte vs deformación lateral para un ciclo histerético. DIS (2013). *PRODUCTION ISOLATOR TEST REPORT.*

3.2 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES QUE COMPONEN UN AISLADOR LRB

En el presente acápite se mencionarán las principales propiedades mecánicas de los elementos que conforman un aislador LRB, tales como el caucho, acero y plomo.

3.2.1 PROPIEDADES DEL CAUCHO

El caucho es un polímero reticulado que se puede producir en numerosos compuestos con diferentes propiedades. Posee una gran deformación elástica, un alargamiento de rotura muy grande (es el material más deformable que se conoce) y es prácticamente incompresible. A continuación, se hará una descripción general de las características más importantes encontradas en las propiedades mecánicas del caucho.

- **Dureza (IRHD)**

En los Estados Unidos, la dureza se mide típicamente como dureza del durómetro tipo Shore A según ASTM Standard D2240 (American Society for Testing and Materials, 1988). La dureza es una medida de sangría impuesta con un instrumento llamado durómetro. El estándar británico BS5400 (British Standards Institution, 1983) utiliza una medida de dureza diferente llamada International Rubber Hardness Degrees o IRHD para caracterizar el caucho (también, descrito en ASTM Standard D1415). La dureza IRHD y Durómetro A son casi idénticas (con IRHD ligeramente menor que Shore A) para el rango de dureza de 40 a 70 que es típico de los cauchos utilizados para aplicaciones de aislamiento sísmico. Para los realizadores, esta es la forma más clásica de catalogar al caucho; por esta razón, es relevante detallar la consistencia teniendo en cuenta en el cálculo, ya que de ella está sujeta a características del componente.

- **Módulo de elasticidad (E_c)**

El módulo de elasticidad del caucho figura el enlace entre el esfuerzo y la distorsión axial del caucho, que a su vez depende directamente de la dureza del material. Esta propiedad permite al caucho recobrar su forma y dimensiones originales cuando se anula la carga que lo deformaba. Seguidamente, se muestra una tabla con cifras de E_c según la dureza del elastómero. (LEYTON, 2017)

IRHD	37	40	45	50	55	60
E_c (MPa)	1.35	1.50	1.80	2.20	3.25	4.45

Tabla 2.2: Tabla de valores IRHD (graduación internacional de dureza de goma) vs Módulo de elasticidad E_c (MPa)

- **Módulo de corte (G_c)**

Es el enlace entre el esfuerzo y la deformación angular del componente. Este resultado puede cambiar al modificarse químicamente del material, obteniéndose un incremento de hasta un 250% según la dureza del material. A continuación, se muestra una tabla con valores del módulo de corte según la dureza del caucho. (LEYTON, 2017)

IRHD	37	40	45	50	55	60
G_c (MPa)	0.40	0.45	0.54	0.64	0.81	1.06

Tabla 2.3: Tabla de valores IRHD (graduación internacional de dureza de goma) vs Módulo de corte G_c (Mpa)

- **Constante del material (k)**

La variable del componente es un valor ligado a la dureza que sintetiza el diseño del módulo de compresibilidad, dato prioritario para adquirir la rigidez vertical del aislador, tal como se presenta en la tabla 2.4. (LEYTON, 2017)

IRHD	37	40	45	50	55	60
k	0.87	0.85	0.80	0.73	0.64	0.57

Tabla 2.4: Tabla de valores IRHD (graduación internacional de dureza de goma) vs Constante del material k

- **Módulo de Volumen (K)**

El caucho es un material casi incompresible con una relación de Poisson muy cercana a 0.5 (entre 0.498 y 0.499). Es mejor describir el comportamiento del caucho con el módulo de volumen en lugar de la relación de Poisson. El módulo de volumen es grande y muy difícil de medir. Un valor comúnmente utilizado para el módulo de volumen, K, en el análisis de los aisladores elastoméricos es K = 2000 MPa (300 ksi). La relación de módulo de volumen al módulo de corte de caucho está en el orden de 2000 a 3000. (CONSTANTINOU, 2007)

- **Vulcanización**

El caucho natural vulcanizado se caracteriza por un bajo módulo de corte, bajo módulo de elasticidad, un comportamiento casi incompresible y un alargamiento de rotura extremadamente alto. Efectivamente, es viscoelástico no lineal a bajos niveles de tensión y se transforma en un comportamiento histerético no lineal en cepas grandes. Su comportamiento es tal que no vuelve a recorrer la misma ruta al volver a cargar, pero vuelve lentamente a la forma original cuando se elimina la carga.

- **Elongación de rotura (ϵ_u)**

La deformación axial, es cuando el caucho falla por tracción, es un resultado utilizado para el diseño de la capacidad de carga a una deformación dada. Los resultados de elongación a la rotura cambian de manera inversamente proporcional con la fortaleza del caucho, tal como se presenta en la tabla (ASTM, 1994) (LEYTON, 2017)

IRHD	37	40	45	50	55	60
ϵ_u	650%	600%	600%	500%	500%	400%

3.2.2 PROPIEDADES DEL ACERO

Las planchas de acero deben proseguir las descripciones para metal grado 50 o A36 de la normativa ASTM para asegure la falla del caucho antes que la adherencia entre componentes. Asimismo, los aisladores sólo sirven para mantener la funcionalidad y los modelos de calidad.

3.2.3 PROPIEDADES DEL PLOMO

Supeditado a la deformación lateral, el plomo discurre a un esfuerzo de tensión cercana a los 10 MPa a temperatura ambiente, originando cuantiosos periodos histeréticos estables. Preciso a que el plomo recristaliza a temple ambiente (20° aproximadamente), su fluencia repetida no produce falla por fatiga gracias a su propiedad de recristalización. Una de los méritos de los aisladores con núcleo de plomo es que crea en manera natural un nivel de rigidez inicial relevante para imposiciones de servicio y otorgan mayor amortiguamiento al sistema de aislamiento.

3.3 ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES

3.3.1 COMPORTAMIENTO DEL AISLADOR ELASTOMÉRICO BAJO COMPRESIÓN

La frecuencia vertical de un sistema de aislamiento es un criterio de diseño importante, y está controlada por la rigidez vertical. La respuesta inicial del aislador bajo una carga vertical es no lineal; sin embargo, muchos investigadores han desarrollado predicciones simples basadas en la teoría elástica y verificadas mediante pruebas de laboratorio y, más recientemente, mediante análisis de elementos infinitos.

La rigidez vertical de un aislador de caucho se obtiene con la siguiente fórmula:

$$k_v = \frac{E_c A}{t_r}$$

Donde:

A: Área cargada del aislador.

t_r: Espesor total de las capas de caucho del aislador.

E_c: Módulo de compresión compuesto por el caucho y acero.

El valor de E_c, que se calcula para una sola capa de caucho, está en base al factor de forma "S" que se define como:

$$S = \frac{\text{área cargada}}{\text{área libre de fuerza}}$$

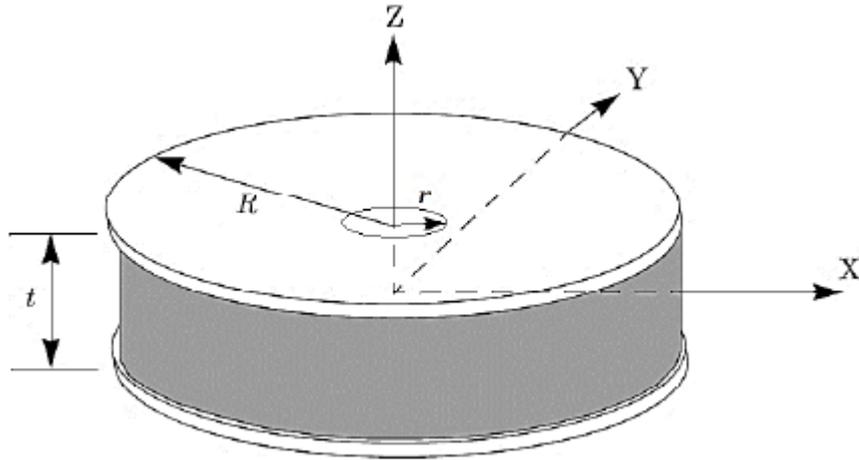


Figura 3.3: Apoyo circular de radio exterior “R” y radio interior “r”. (Kelly, 2011).

Para un aislador elastomérico de radio “b” con un agujero interno de radio “a” y espesor “t” se obtiene:

$$S = \frac{\pi(b^2 - a^2)}{2\pi(a + b)}$$

$$S = \frac{b - a}{2t}$$

Para predecir la consistencia a la compresión se emplea la teoría elástica lineal y se basa en dos supuestos; el primero, los puntos en una línea vertical antes de la deformación se encuentran en una parábola después de la carga; el segundo, los planos horizontales permanecen horizontales.

Consideremos una almohadilla arbitraria de grosor “t”, como se muestra en la figura 3.4 y un sistema de coordenadas cartesiano rectangular (x,y,z) en la superficie de la almohadilla.

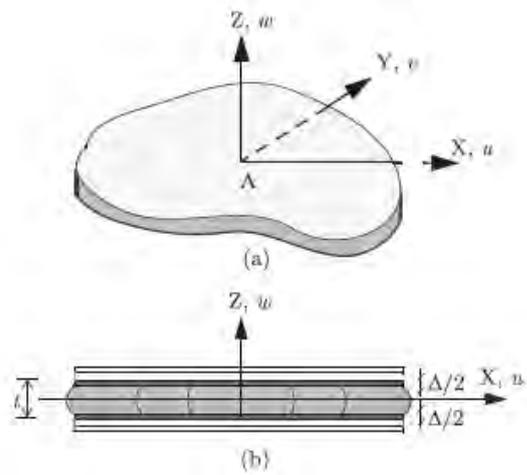


Figura 3.4: (a) Sistema de coordenadas cartesianas en una almohadilla arbitraria; (b) Campos de desplazamiento de una almohadilla de forma arbitraria. (Kelly, 2011).

El desplazamiento en las direcciones (u,v,w) en las direcciones de coordenadas son:

$$u(x, y, z) = u_0(x, y) \left(1 - \frac{4z^2}{t^2} \right)$$

$$v(x, y, z) = v_0(x, y) \left(1 - \frac{4z^2}{t^2} \right)$$

$$\omega(x, y, z) = \omega(z)$$

Este campo de desplazamientos satisface la restricción de que las superficies superior e inferior de la almohadilla están unidas a capas rígidas. En este punto se puede asumir un supuesto de incompresibilidad que produce una nueva restricción en los tres componentes de la deformación, $\epsilon_{xx} = \partial u / \partial x$, $\epsilon_{yy} = \partial v / \partial y$, $\epsilon_{zz} = \partial w / \partial z$.

$$\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz} = 0$$

Resolviendo se obtiene:

$$\frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{\partial v_0}{\partial y} = - \frac{1}{1 - \frac{4z^2}{t^2}} \frac{dw}{dz}$$

$$\frac{dw}{dz} = -k \left(1 - \frac{4z^2}{t^2} \right)$$

$$w_{(z)} = -k \left(z - \frac{4z^3}{3t^2} \right) + c$$

Donde “k” es una constante en función de x e y, “c” es una constante de integración. Usando la condición de $w(t/2) = -\Delta / 2$ y $w(-t/2) = -\Delta / 2$, encontramos que $c = 0$ y $k = 3\Delta / (2t) = 3\varepsilon_c / 2$, donde ε_c se define como:

$$\varepsilon_c = \frac{w(t, 2) - w(-t / 2)}{t}, (\varepsilon_c > 0 \text{ en compresión})$$

El estado de tensión está dominado por la presión interna “p”, que genera esfuerzos cortantes τ_{xz} y τ_{yz} por las restricciones en la parte superior e inferior de la almohadilla en el orden de $(t/l)p$; el esfuerzo cortante en el plano τ_{xy} , se asume en el orden de $(t^2/l^2)p$.

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial y}$$

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = \nabla^2 p = \frac{\partial^2 \sigma_{zz}}{\partial z^2}$$

Asumimos que la materia es linealmente elástica, la fuerza cortante de τ_{xz} y τ_{yz} son a las deformaciones cortantes, γ_{xz} y γ_{yz} . Donde:

$$\tau_{xz} = G\gamma_{xz}, \quad \tau_{yz} = G\gamma_{yz}$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \quad \text{y} \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}$$

$$\tau_{xz} = -\frac{8G}{t^2} z u_0, \quad \tau_{yz} = -\frac{8G}{t^2} z v_0$$

De las ecuaciones tenemos:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{8G}{t^2} u_0, \quad \frac{\partial p}{\partial y} = -\frac{8G}{t^2} v_0$$

Cuando se invierte para dar u_0 y v_0 e insertando la condición de incompresibilidad, obtenemos:

$$\frac{t^2}{8G} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) = \frac{-3\varepsilon_c}{2}$$

Lo cual se puede reducir a:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = \nabla^2 p = \frac{-12G\varepsilon_c}{t^2}$$

Para determinar " E_c ", resolvemos " p " e integramos sobre el área de la almohadilla " A " para determinar la carga normal resultante " P ". Entonces E_c está dado por:

$$E_c = \frac{P}{A\varepsilon_c}$$

Para un aislador elastomérico de radio exterior " b " y agujero interior de radio " a " y espesor " t "

$$\nabla^2 p = \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{-12G\varepsilon_c}{t^2}, r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

Resolviendo para $p(a) = 0$ y $p(b) = 0$, obtenemos:

$$p(r) = \frac{3G}{t^2} \left(\frac{(b^2 - a^2) \ln(r/a)}{\ln(b/a)} - (r^2 - a^2) \right)$$

La carga total " P ", está dado por:

$$P = 2\pi \int_a^b p(r)r dr = \frac{3G\varepsilon_c}{2t^2} \pi(b^2 - a^2) \left(b^2 + a^2 - \frac{b^2 - a^2}{\ln(b/a)} \right)$$

De donde tenemos:

$$E_c = \frac{P}{A\varepsilon_c} = \frac{3G}{2t^2} \left(b^2 + a^2 - \frac{b^2 - a^2}{\ln(b/a)} \right)$$

Usando la expresión de " S ", podemos reescribir esto de la siguiente forma:

$$E_c = 6GS^2\lambda$$

Donde:

$$\lambda = \frac{b^2 + a^2 - \frac{b^2 - a^2}{\ln(b/a)}}{(b-a)^2}$$

Que, en términos de la relación a/b, se convierte en:

$$\lambda = \frac{1 + (a/b)^2 + \frac{1 - (a/b)^2}{\ln(a/b)}}{(1 - a/b)^2}$$

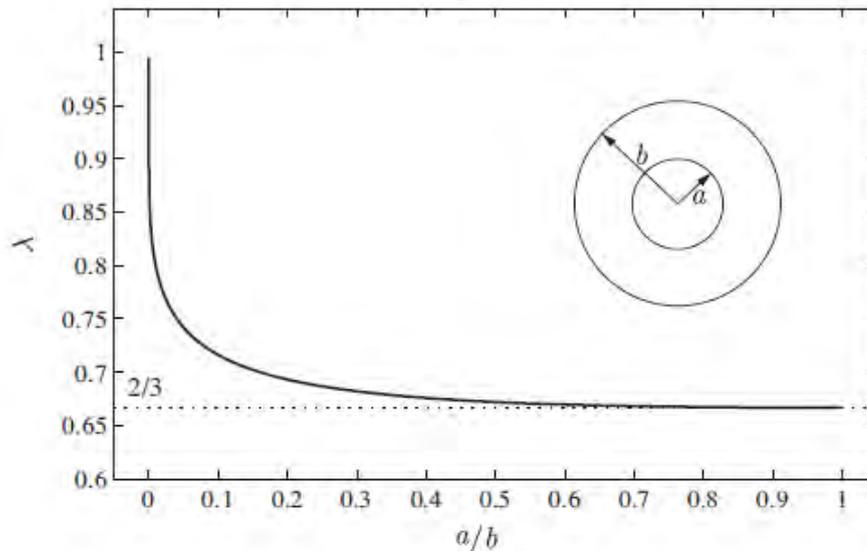


Figura 3.5: Reducción del módulo de compresión para una almohadilla con un hueco interior. (Kelly, 2011).

La solución para λ que se traza frente a la relación a/b desde $0 \leq a/b \leq 1$ en la figura 3.5 muestra que E_c cae rápidamente desde el valor de $6GS^2$, que corresponde a un aislador elastomérico circular, al valor de $4GS^2$. Si dejamos $a = \varepsilon b$ y $\varepsilon \ll 1$ y asumimos que el agujero es lo suficientemente pequeño como para que su efecto sobre el módulo de compresión se puede ignorar, entonces supondríamos que $E_c = 6GS^2$, donde S es dado por $b / 2t$, de modo que la ecuación se convierte en:

$$\lambda = \frac{E_c}{6GS^2} = 1 + \varepsilon^2 \frac{1 - \varepsilon^2}{\ln \varepsilon}$$

Se observa que cuando $\varepsilon \rightarrow 0, \lambda \rightarrow 1$, pero para $\varepsilon \neq 0$ tenemos como resultado inesperado que el módulo de compresión cae rápido con ε . Si denotamos $\lambda = f(\varepsilon)$, la derivada de f a $\varepsilon = 0$ es infinito negativo. Esto demuestra que no se puede ignorar la presencia de un pequeño agujero.

Entonces, cuando $a/b \rightarrow 1$, reemplazando en la ecuación $a/b = 1 - \varepsilon$ y $\varepsilon \rightarrow 0$, se

observa que $\lambda \rightarrow 2/3$ y $E_c \rightarrow 4GS^2$. Por lo tanto, cuando $a/b > 0.10$ el valor de λ es casi dos tercios, lo que indica que incluso el aspecto de un diminuto orificio tiene una gran consecuencia en E_c , se debe considerar el valor de $E_c = 4GS^2$ en lugar de $6GS^2$. (Kelly, 2011).

El anterior análisis se realizó bajo el supuesto de incompresibilidad; sin embargo, cuando el factor de forma “S” se hace superior, la consecuencia de compresibilidad del aislador elastomérico se hace relevante. La compresibilidad puede ser adicionada de forma aproximada en la anterior fórmula de E_c , como:

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1}{E'_c} + \frac{1}{K}$$

En tanto, “ $1/E'_c$ ” es el módulo de compresión admitiendo la conducta de incompresibilidad, y “ K ” es el módulo de volumen del caucho. Este parámetro es una cantidad muy difícil de medir; sin embargo, la cantidad más comúnmente usada es de 2000 MPa.

Entonces, reescribiendo la fórmula para E_c , se obtiene:

$$E_c = \frac{E'_c k}{E'_c + k}$$

$$E_c = 4GS^2 \left(\frac{1}{1 + 4GS^2 / K} \right)$$

3.3.2 COMPORTAMIENTO DEL AISLADOR ELASTOMÉRICO BAJO FLEXIÓN

La inflexibilidad a la flexión tiene un papel relevante en la consideración de la carga de pandeo en un aislador y también es necesaria para obtener el dominio de la carga de gravedad (vertical) sobre la rigidez horizontal (cortante). Además, cuando el aislador está sujeto a deformación por cizallamiento, se genera un momento de flexión por las fuerzas de cizallamiento desequilibradas en la parte superior e inferior del cojinete.

La rigidez a la flexión de una sola almohadilla se calcula utilizando un enfoque similar al de la rigidez por compresión; sin embargo, la configuración desplazada se obtiene en dos etapas. Primero, se visualiza la deformación que ocurrirá si la flexión se ajustara a la teoría de la viga elemental, luego se supone una deformación cortante pura adicional, ya que el supuesto de incompresibilidad no aplicaría. El campo de desplazamiento está dado por:

$$u(x, y, z) = u_0(x, y) \left(1 - \frac{4z^2}{t^2}\right) - \frac{\alpha z^2}{2t}$$

$$v(x, y, z) = v_0(x, y) \left(1 - \frac{4z^2}{t^2}\right)$$

$$w(x, y, z) = \frac{\alpha z x}{t}$$

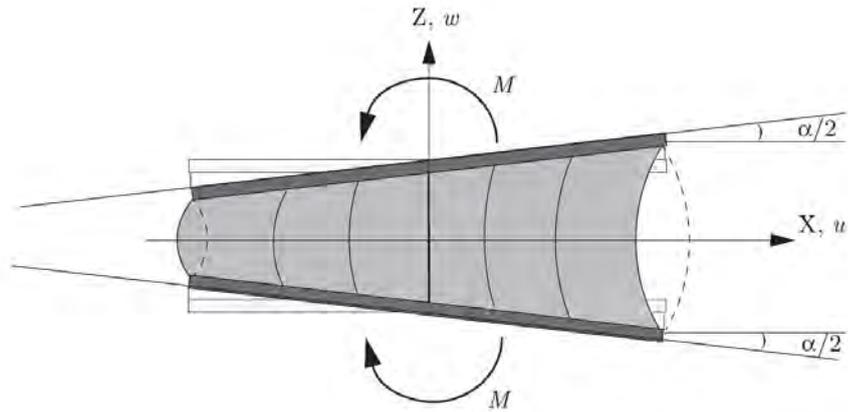


Figura 3.6: Almohadilla de caucho entre placas rígidas en flexión pura. (Kelly, 2011).

Para una almohadilla anular de radio interno (a) radio externo, (b), donde $a \leq r \leq b$, tenemos:

$$p = \frac{3 G \alpha}{2 t^3} \left(\frac{a^2 b^2}{r} + r^3 - (b^2 + a^2) r \right) \cos \theta$$

$$M = -\frac{3 G \alpha}{2 t^3} \int_0^{2\pi} \left[\int_a^b \left(\frac{a^2 b^2}{r} + r^3 - (b^2 + a^2) r \right) r^2 dr \right] \cos^2 \theta d\theta = \frac{G \alpha \pi}{8 t^3} (b^2 - a^2)^3$$

Lo que lleva a

$$\begin{aligned} (EI)_{eff} &= \frac{\pi}{8} G \frac{(b^2 - a^2)^3}{t^2} \\ &= \frac{\pi}{2} G S^2 (b - a)(b + a)^3 \\ &= \frac{\pi}{2} G S^2 I \left(4 \frac{(b - a)(b + a)^3}{\pi (b^4 - a^4)} \right) \\ &= 2 G S^2 I \frac{(b + a)^2}{b^2 + a^2} = 2 G S^2 I \frac{(1 + \rho)^2}{1 + \rho^2} \end{aligned}$$

Donde $\rho = a / b$ es la relación entre el radio interior y el radio exterior. La figura 3.7 muestra un gráfico de $(EI)_{eff} / (2GS^2I)$ como una función de ρ .

Hay dos formas de expresar este resultado. Uno es asumir que a/b es mayor que 0.1, en cuyo caso el módulo de compresión efectivo es $4GS^2$ donde $S=(b-a)/(2t)$, dado:

$$\frac{(EI)_{eff}}{EI} = \frac{1}{2} \frac{\left(1 + \frac{a}{b}\right)^2}{1 + \left(\frac{a}{b}\right)^2}$$

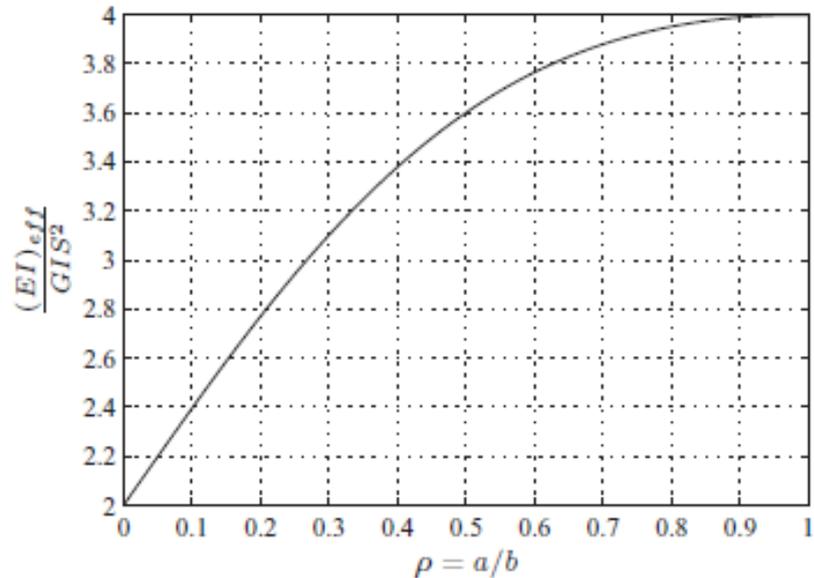


Figura 3.7: El de una almohadilla anular con radio interno (a) y radio externo (b). (Kelly, 2011). Por otro lado, si $a \rightarrow 0$, luego $(EI)_{eff} \rightarrow 6GS^2(I/3)$. Además, si escribimos $a=b\varepsilon$ y $\varepsilon \rightarrow 0$, obtenemos $(EI)_{eff} \rightarrow 4GS^2(1 + 2\varepsilon)(I/2)$, mostrando que, a diferencia del caso de módulo de compresión, la disposición de un diminuto orificio tiene una consecuencia despreciable en la rigidez a la flexión. El argumento, por su puesto, es que la coacción en el borde del orificio, si es pequeña, y relativamente cercana a cero, y la restricción límite de coacción cero ya se concluye.

Si tenemos en cuenta la compresibilidad aparente al estimar la rigidez a la flexión, la ecuación a resolver es:

$$\nabla^2 p - \lambda^2 p = \frac{\lambda^2 K \alpha}{t} x$$

Donde $\lambda^2 = 12G / (kt^2)$ y $p=0$ en el borde de la almohadilla.

Para una almohadilla anular de radio interno (a) radio exteno, (b), donde $a \leq r \leq b$, tenemos:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 p}{\partial \theta^2} - \lambda^2 p = \lambda^2 \frac{K \alpha}{t} r \cos \theta$$

Con condición de contorno $p(a,\theta) = p(b,\theta) = 0$. Suponiendo una solución de la forma:

$$p(r, \theta) = f(r) \cos \theta$$

Y substituyendo se obtiene la ecuación diferencial ordinaria:

$$r^2 \frac{d^2 f}{dr^2} + r \frac{df}{dr} - (1 + \lambda^2 r^2) f = \frac{\lambda^2 K \alpha}{t} r^3$$

$$f(r) = \frac{K \alpha}{t} (B_1 I_1(\lambda r) + B_2 K_1(\lambda r) - r)$$

Luego,

$$p(r, \theta) = \frac{K \alpha}{t} (B_1 I_1(\lambda r) + B_2 K_1(\lambda r) - r) \cos \theta$$

Resolviendo en:

$$M = - \int_0^{2\pi} \int_a^b p(r, \theta) r^2 \cos \theta \, dr \, d\theta$$

Se obtiene la rigidez a la flexión del aislador como:

$$(EI)_{eff} = -\pi K \left[\frac{B_1}{\lambda} (b^2 I_2(\lambda b) - a^2 I_2(\lambda a)) - \frac{B_2}{\lambda} (b^2 K_2(\lambda b) - a^2 K_2(\lambda a)) - \frac{b^4 - a^4}{4} \right]$$

Donde:

$$\vartheta = \sqrt{\frac{48 G}{K} \frac{S}{1 - \eta}}$$

$$B_1' = \frac{4}{\vartheta(1 - \eta^4)} \frac{-K_1(\eta\vartheta) + \eta K_1(\vartheta)}{I_1(\eta\vartheta) K_1(\vartheta) - I_1(\vartheta) K_1(\eta\vartheta)}$$

$$B_2' = \frac{4}{\vartheta(1 - \eta^4)} \frac{I_1(\eta\vartheta) - \eta I_1(\vartheta)}{I_1(\eta\vartheta) K_1(\vartheta) - I_1(\vartheta) K_1(\eta\vartheta)}$$

La rigidez a la flexión de un aislador de caucho es una propiedad de apoyo relevante que debe estar disponible para el cálculo al estimar la conducta de pandeo del aislador. Nos permite evaluar la respuesta del rodamiento comprimido a un momento flector aplicado externamente y es vital para estimar el efecto de la carga por gravedad sobre la rigidez horizontal de un rodamiento. (Kelly, 2011)

3.3.3 COMPORTAMIENTO DE PANDEO DE AISLADORES ELASTOMÉRICOS

Un aislador elastomérico puede ser dispuesto a una clase de inestabilidad de pandeo parecida al de una columna convencional. La teoría del pandeo de los cojinetes de aislamiento es una consecuencia del trabajo de Haringx en 1947 sobre las características mecánicas de los resortes helicoidales de acero y las varillas de goma utilizadas para los montajes de vibración. La teoría de Haringx fue aplicada más tarde por Gent (1964) al problema de la estabilidad de los resortes de compresión de caucho

multicapa, y es esta aplicación la que forma la base de la teoría que se presenta aquí.

El patrón de deformación, se define mediante dos cuantías: $v(x)$ es el desplazamiento de la superficie media del rodamiento, y $\psi(X)$ es la rotación de una cara originalmente normal al eje no deformado. La deformación total por cortante, γ , es la discrepancia entre la rotación del eje horizontal, $v'(X)$, y la rotación de la cara normal, ψ (es decir, $\gamma = v' - \psi$). La figura 3.8 muestra las fuerzas internas y externas sobre el rodamiento en la posición deformada. La fuerza de corte, V , y la fuerza axial, N , se muestran paralelas y perpendiculares, respectivamente, a la cara rotada. Los cargamentos finales, incluidas la carga axial, P , se definen por una respuesta lateral, H_0 , y momento de flexión, M_0 , que pueden ser específicos o desconocidos.

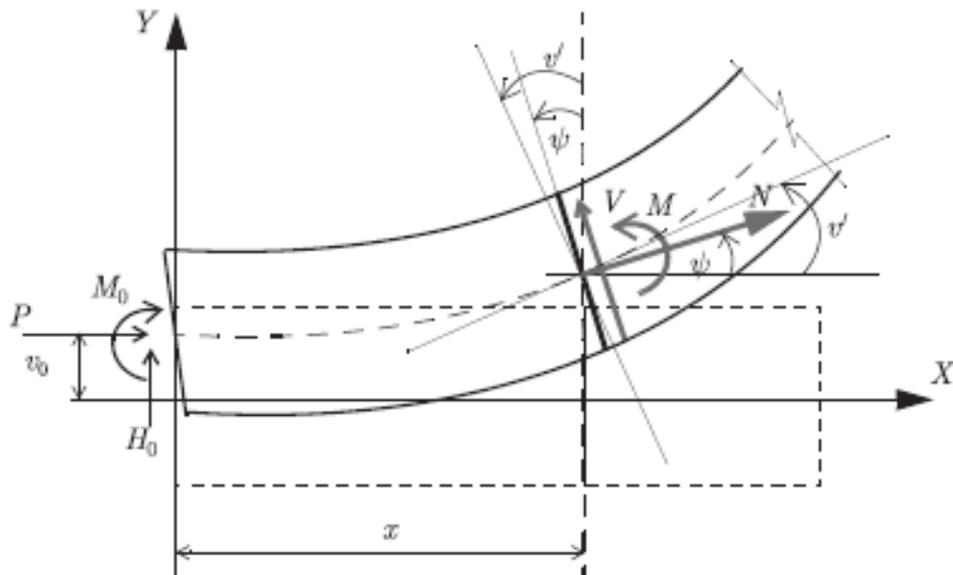


Figura 3.8: Fuerzas internas y cargas externas en un aislador deformado (La fuerza cortante V es paralela y la fuerza axial N es perpendicular a la sección deformada). (Kelly, 2011).

La fuerza cortante interna, V , está relacionada con la deformación por cortante a través de:

$$V = GA_S(v' - \psi)$$

En tanto, A_S no es exactamente el área total de la sección transversal, A , pero $A(h/tr)$, en el cual, h es la elevación total del rodamiento (caucho + acero) y tr es la elevación total del caucho. El aumento en A es necesario tener en cuenta el hecho de que el acero no se deforma en el sistema compuesto.

Aquí, la curvatura, que para una sola almohadilla era α/t , se convierte en ψ ; la relación entre la curvatura y el momento de flexión, M , que por una sola almohadilla era $EI =$

$E_c I_c / 3$, ahora debe modificarse de la misma manera que la rigidez al cortante para tener en cuenta la presencia de las láminas de acero. A continuación, denotamos la inflexibilidad a cortante y flexión del sistema compuesto por $G A_s$, como se ha definido anteriormente, y $E I_s = (1/3) E_c I_c (h/t_r)$, con fuerza cortante V , y momento de flexión M , dada por:

$$V = G A_s (v' - \psi')$$

$$M = E I_s \psi'$$

La fórmula más general de solución sería:

$$v = A \cos(\alpha x) + B \sin(\alpha x) + v_0 + \frac{M_0}{P} + \frac{H_0}{P} x$$

$$\psi = \alpha \beta B \cos(\alpha x) - \alpha \beta A \sin(\alpha x) + \frac{H_0}{P}$$

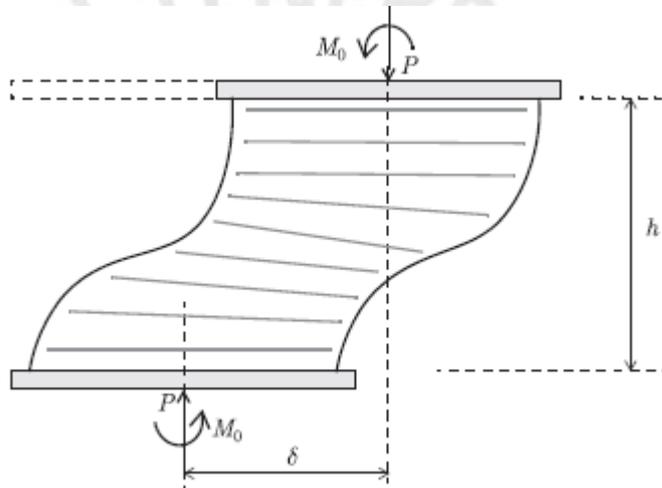


Figura 3.9: Condiciones de contorno para un aislador bajo carga vertical P (el aislador se dobla sin restricción de fuerza lateral, pero se evita que gire en cada extremo). (Kelly, 2011).

En el caso de un aislador elastomérico con un agujero central, ocasiona una reducción en la inflexibilidad horizontal, pero solo tiene una reducida consecuencia sobre la consistencia a la flexión. Utilizando el análisis desarrollado en anteriormente, la rigidez a la flexión de una sola almohadilla anular es:

$$(EI)_{eff} = \frac{\pi G}{8t^2} (b^2 - a^2)^3$$

Donde a y b son los radios interior y exterior de la almohadilla, y t es el grosor de la almohadilla. Si esto se sustituye en la forma aproximada de la carga de pandeo, es decir,

$$P_{crit} = \sqrt{P_S P_E}, \text{ con:}$$

$$P_S = GA \frac{h}{t_r} = G\pi (b^2 - a^2) \frac{h}{t_r}$$

Y,

$$P_E = \pi^2 (EI)_{eff} \frac{h}{t_r} \frac{1}{h^2} = \frac{\pi^2 \pi G}{ht_r 8t^2} (b^2 - a^2)^3$$

Tenemos,

$$P_{crit}^2 = G\pi (b^2 - a^2) \frac{h}{t_r} \frac{\pi^2 \pi G}{ht_r 8t^2} (b^2 - a^2)^3 = \frac{G^2 \pi^4 (b^2 - a^2)^4}{8t_r^2 t^2}$$

$$P_{crit} = \frac{\pi^2 G (b^2 - a^2)^2}{2\sqrt{2}t_r t}$$

La frecuencia horizontal especificada está relacionada con la carga transportada por aislador, W, por:

$$\omega_H^2 = \frac{K_H}{W} g = \frac{G\pi g (b^2 - a^2)}{Wt_r}$$

De modo que el factor de seguridad contra pandeo viene dado por:

$$S.F. = \frac{P_{crit}}{W} = \frac{\pi^2 G (b^2 - a^2)^2}{2\sqrt{2}t_r t} \frac{\omega_H^2 t_r}{G\pi (b^2 - a^2) g} = \frac{\pi (b^2 - a^2) \omega_H^2}{2\sqrt{2}t g}$$

Si arreglamos ω_H y espesor de capa t, entonces el factor de seguridad debe disminuir a medida que aumenta el tamaño del orificio. Este resultado aparentemente contradictorio ocurre porque si mantenemos fijo b y variamos a, la presión no se mantiene constante. Si la presión es fija, entonces $(b^2 - a^2)$ es fijo, por lo que el factor de seguridad permanece constante. Si la presión se mantiene constante, la única forma de aumentar el factor de seguridad es reducir el grosor de la capa individual t. De ello se deduce que la simple sustitución de un cojinete circular por un cojinete anular mejora la estabilidad; es necesario reducir la presión y el espesor de la capa. Un cojinete anular tiene mérito en ciertos casos. Debido a que el espesor total del caucho, t_r , no entra en el factor de seguridad, un valor mayor de t_r se puede utilizar, reduciendo así la deformación máxima por cizallamiento y la relación entre el desplazamiento y el diámetro sin reducir el factor de seguridad contra el pandeo; esto sin duda conducirá a un mejor rendimiento cuando se deban aislar cargas ligeras.

3.3.4 EFECTO DE LA IMPOSICIÓN VERTICAL EN LA RIGIDEZ HORIZONTAL

El análisis que condujo a la carga de pandeo se puede utilizar para determinar la rigidez horizontal efectiva en presencia de carga axial (Koh y Kelly 1987). Considere una fuerza horizontal, F_H , en la parte superior de un rodamiento. Cuando el desplazamiento resultante en la parte superior, $v(h)$, se calcula, entonces la rigidez horizontal, K_H , es dado por:

$$K_H = \frac{F_H}{v(h)}$$

Las ecuaciones básicas, se resuelven usando las condiciones de borde.

$$v(0) = 0, \quad \psi(0) = 0, \quad \psi(h) = 0, \quad H_0 = -F_H$$

Por lo tanto,

$$v(x) = A \cos(\alpha x) + B \sin(\alpha x) + \frac{M_0}{P} - \frac{F_H}{P} x$$

Y,

$$\psi(x) = \alpha \beta B \cos(\alpha x) - \alpha \beta A \sin(\alpha x) - \frac{F_H}{P}$$

Usando las condiciones de contorno, tenemos:

$$A = \frac{F_H \cos(\alpha h) - 1}{P \alpha \beta \sin(\alpha h)}$$

Y,

$$B = \frac{F_H}{\alpha \beta P}$$

Cuando estos se sustituyen en $v(x)$, obtenemos:

$$v(h) = \frac{F_H}{\alpha \beta P} \left(2 \tan\left(\frac{\alpha h}{2}\right) - \alpha \beta h \right)$$

Para el desplazamiento evaluando $x = h$. Por tanto, la rigidez horizontal es:

$$K_H = \frac{F_H}{v(h)} = \frac{\alpha \beta P}{2 \tan\left(\frac{\alpha h}{2}\right) - \alpha \beta h}$$

Cuando $\alpha h \rightarrow \pi$, el término $\tan(\alpha h/2) \rightarrow \infty$ y $K_H \rightarrow 0$. Para valores pequeños de P ,

$$\alpha^2 \rightarrow \frac{P}{EI_S} \quad \text{and} \quad \beta \rightarrow 1 - \frac{P}{GA_S}$$

Expandiendo $2 \tan(\alpha h/2)$ en una serie de Taylor da:

$$2 \tan\left(\frac{\alpha h}{2}\right) = \alpha h + \frac{1}{12}(\alpha h)^3 + \dots$$

$$\begin{aligned} K_H &= \frac{\alpha [1 - P/(GA_S)] P}{\frac{1}{12} \alpha^3 h^3 + \alpha h \frac{P}{GA_S}} \\ &\approx \frac{P}{\frac{1}{12} \frac{P}{EI_S} h^3 + \frac{Ph}{GA_S}} \\ &= \frac{1}{h^3/(12 EI_S) + h/(GA_S)} \approx \frac{GA_S}{h} \left(1 - \frac{GA_S h^2}{12 EI_S}\right) \end{aligned}$$

El segundo término entre paréntesis es el efecto de la flexibilidad de flexión sobre la rigidez. Para aisladores circulares esto es:

$$\frac{h^2}{6 S^2 R^2}$$

Y es generalmente insignificante en comparación con el primer término. Para valores de P entre P_S y P_E , las aproximaciones dan:

$$\alpha^2 = \frac{P^2}{EI_S GA_S}$$

Y,

$$\begin{aligned} \alpha h &= \pi \left(\frac{P}{P_{crit}}\right) \\ \beta &= \frac{GA_S}{P} = \frac{P_S}{P} \end{aligned}$$

Nos lleva a,

$$K_H = \frac{GA_S}{h} \frac{\frac{\pi}{2} \frac{P}{P_{crit}}}{\tan\left(\frac{\pi}{2} \frac{P}{P_{crit}}\right) - \frac{\pi}{2} \frac{P}{P_{crit}} \frac{GA_S}{P}}$$

Cuando P está cerca de P_{crit} , el término tangente domina y se puede hacer una aproximación.

$$K_H = \frac{GA_S}{h} \frac{\frac{\pi}{2} \frac{P}{P_{crit}}}{\tan\left(\frac{\pi}{2} \frac{P}{P_{crit}}\right)}$$

Aunque la ecuación solo es válida cuando P está cerca a P_{crit} , es una buena aproximación en todo el rango de P ; sin embargo, un ajuste aún más simple al exacto usando un análisis elástico resulta en la función:

$$K_H = \frac{GA_S}{h} \left[1 - \left(\frac{P}{P_{crit}} \right)^2 \right]$$

El valor exacto de K_H puede expresarse más fácilmente en términos de cantidades adimensionales p y λ , si introducimos la carga P_A , por:

$$P_A^2 = \frac{\pi^2 EI_S GA_S}{h^2}$$

(P_A es P_{crit} cuando $P_S \ll P_{crit} \ll P_E$) y $p = P/P_A$, $\lambda = GA_S / P_A$. En términos de estas variables, tenemos:

$$K_H = \frac{GA_S}{h} \frac{\frac{\pi}{2} p^{2/3} (p + \lambda)^{-1/2}}{\tan\left[\frac{\pi}{2} p^{1/2} (p + \lambda)^{-1/2}\right] - \frac{\pi}{2} p^{1/2} \lambda (p + \lambda)^{-1/2}}$$

El valor de λ es $\sqrt{2}h(\pi s R)$ y generalmente es pequeño en comparación con uno.

3.4 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL AISLADOR LRB

En este tipo de aisladores, su comportamiento está definido por el conjunto del corazón de plomo y las láminas de caucho.

- **Rigidez lateral**

Los aisladores LRB siempre se modelan como componentes bilineales, con sus cualidades fundadas en estos 3 criterios: K_e (K_1), K_d (K_2) y Q . La inflexibilidad elástica K_e es difícil de medir y usualmente se toma como un múltiplo empírico de k_d , la rigidez posterior a la fluencia, que se facilita estimar con precisión a partir del módulo de cizallamiento del caucho y el diseño del rodamiento. En general, K_e se modela adecuadamente como diez veces K_d .

Rigidez elástica "Ke" (Kelly, 1999):

$$Ke = 10 \cdot Kd$$

La característica de resistencia Q es la intersección del ciclo de histéresis y la coordenada defuerza. Se considera con exactitud a partir del esfuerzo de cedencia del plomo (10,3 MPao 1500 psi) y el área del aislador.

Rigidez posterior a la fluencia "Kd" (Kelly, 1999):

$$Kd = \frac{Ae \cdot Gc}{Hc}$$

Donde:

Ae: Área neta del caucho incluida la cubierta.

Gc: Módulo de cortante del caucho.

Hc: Altura total del caucho.

En tanto, el plomo cede, alrededor al 6.7% de la deformación angular, la inflexibilidad lateral del aislador prioritariamente se somete a las características del caucho. De esto se obtiene la rigidez efectiva como la división entre la fortaleza a un desplazamiento dado entre dicho desplazamiento. Preciso a la sencillez de recristalización del plomo, el corazón recobra sus características elásticas una vez retorna a la distorción cero, lo cual asegura periodos de histéresis estacionarios.

La inflexibilidad (rigidez) efectiva de un aislador LRB, definido sobre la base de cargas de pico a pico, se disminuye constantemente con el desplazamiento. En conclusión, de los indicadores básicos Ke, Kd y Q, está dado por:

Rigidez efectiva "Keff" (Kelly, 1999):

$$k_{eff} = \frac{F_{max}}{D}$$

$$K_{eff} = Kd + \frac{Q}{D} \quad D > Dy$$

Donde Dy es el desplazamiento de fluencia.

Los desplazamientos laterales producen una curva de histéresis, que se representa como

una combinación, de la relación fuerza-desplazamiento elástico lineal del cojinete de caucho más la histéresis plástica perfectamente elástica de un corazón de plomo en cizalla. El corazón de plomo no produce una histéresis perfectamente rectangular ya que existe un "retraso de cizallamiento", la cual depende de la efectividad del confinamiento proporcionado por las calzas de acero internas.

La curva de histéresis resultante, como se muestra en la figura 3.3, tiene una transición curva en la descarga y la recarga. Para el diseño y el análisis se define una aproximación bi-lineal equivalente de modo que el área bajo la curva de histéresis, que define la amortiguación, sea igual al área medida.

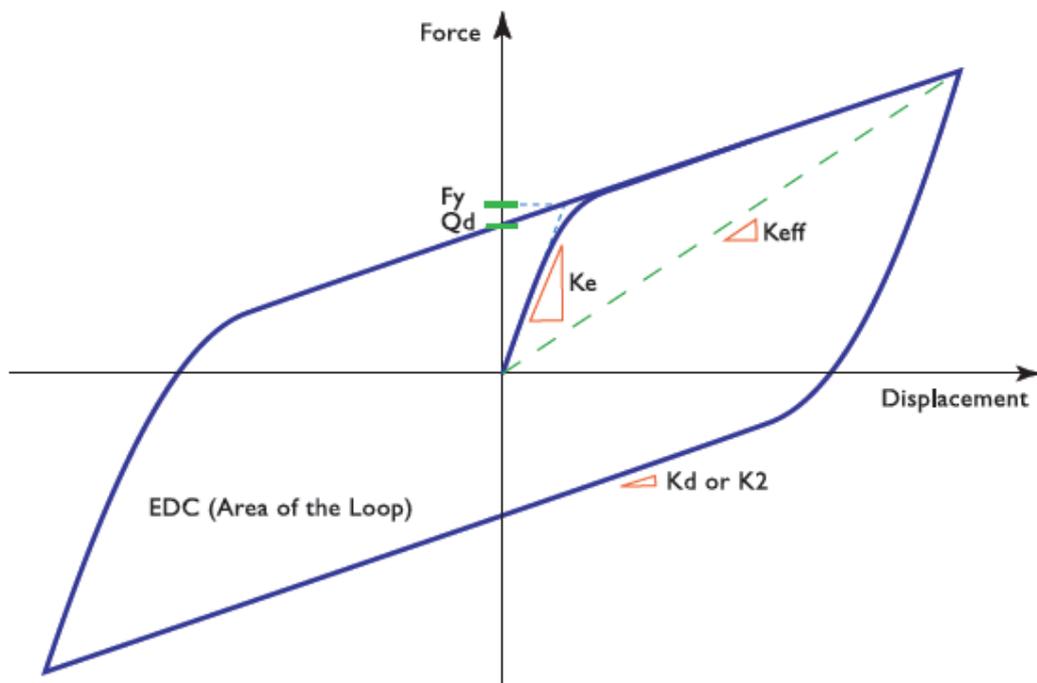


Figura 3.3: Gráfico de la curva de histéresis resultante en un aislador LRB

- **Frecuencia natural**

La frecuencia natural “ ω ” está dada por:

$$\omega = \sqrt{\frac{K_{eff} \cdot g}{W}}$$

$$= \sqrt{\omega_0^2 + \mu \cdot \frac{g}{D}}$$

Donde $\mu = Q/W$, $\omega_0^2 = \sqrt{Kd \cdot g / W}$, y el periodo efectivo T es dado por:

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

- **Amortiguamiento**

El amortiguamiento viscoso se conceptualiza como un % del crítico, se obtiene como una ratio de la labor procesado entre el desplazamiento, a partir de la gráfica de histéresis por medio de la siguiente ecuación (ASCE/SEI 7 16).

$$B_{eff} = \frac{\text{Área del ciclo de histéresis}}{2 \cdot \pi \cdot K_{eff} \cdot D^2}$$

Donde $D > D_y$. Asimismo, el área del periodo de histéresis es dado por 4.Q.(D-D_y).

- **Rigidez vertical**

La inflexibilidad vertical en un aislador que obtiene las deflexiones verticales por pesos de servicio o cargas sísmicas. Para determinar la rigidez vertical es necesario calcular el factor de forma, S, el módulo de compresibilidad, K, y el área de superponer efectivo a un desplazamiento dado.

Coeficiente de forma "S":

$$S = \frac{A_n}{A'} \quad , \quad A_n = A_c - A_p \quad , \quad A' = \pi \cdot D_c \cdot t_c$$

Donde:

A_n: Área neta de caucho

A_c: Área de caucho

A_p: Área del agujero de plomo

A': Área de la superficie lateral de la capa de caucho

T_c: Espesor de la capa de caucho

Modulo de Compresibilidad "E_c":

$$E_c = E_o . (1 + 2 \times k \times S^2)$$

Donde:

Eo: Módulo elástico del caucho, basado en el AASHTO se puede estimar como 4 veces el módulo de cortante del caucho (4G).

k: Constante del material asociada a la dureza.

Rigidez Vertical "Kv":

$$Kv = \frac{Ev \times An}{N \times tc} , \quad Ev = \frac{1}{\frac{1}{Ec} + \frac{1}{K}}$$

Donde:

Ev: Es el módulo de inflexibilidad vertical

An: Área neta de caucho

Tc: Grosor de la lámina de caucho

N: Es el número de láminas de caucho

K: Es el módulo de volumen

CAPÍTULO 4: ELABORACIÓN DE UNA HOJA DE CÁLCULO PARA EL CÁLCULO DE UN AISLADOR LRB

En este acápite se realizará un formato de diseño para el cálculo de aisladores LRB, las fórmulas empleadas en este capítulo están bajo los criterios de la bibliografía de James M. Kelly y R. Ivan Skinner, que a su vez han sido empleados en las normas internacionales del ASCE Y AASHTO.

4.1 CONSIDERACIONES INICIALES

Los materiales que se utilizaron para el diseño de los aisladores, en el proyecto de la Universidad UTEC, fueron los siguientes:

- Placas de montaje de acero ASTM A36
- Cuñas de acero ASTM A1011 Gr. 36
- Caucho Caucho natural (dureza 40)
- Plomo ASTM B29 99.9% puro
- Tornillo de cabeza plana ASTM F835

Como datos de ingreso, para empezar con el diseño del aislador LRB, se consideran las propiedades de los materiales y las dimensiones de las partes que componen el aislador.

- **Propiedades del caucho**

✓ Módulo de cortante del caucho: $G = 0.065 \text{ ksi}$ o $G = 4.57 \text{ kg/cm}^2$

✓ Elongación en el descanso del caucho: $\epsilon_u = 6 \text{ mm/mm}$

La deformación axial, en tanto, el caucho falla por tracción, es un resultado utilizado para el diseño de la capacidad de peso a una deformación dada. Los resultados de elongación varían de forma viceversa con la dureza del material. Así por ejemplo para nuestro caso con un IRHD de 40 obtenemos un $\epsilon_u = 600\%$. (ASTM, 1994).

✓ Módulo de Volúmen (bulk): $K = 300 \text{ ksi}$

Un valor comúnmente utilizado para el módulo de volumen, K , en el análisis de los aisladores elastoméricos, es $K=2000$ MPa (300ksi). La relación con el módulo de corte es de 2000 a 3000 veces mayor. (Constantinou, 2007).

✓ Módulo de elasticidad: $E_o = 0.26$ ksi

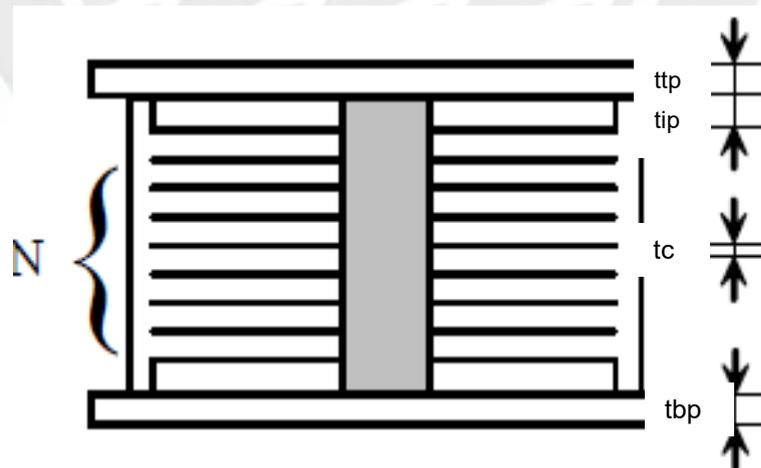
Basándose en AASHTO LRFD, $E_o = 4.G$

✓ Constante empírica k : $k = 0.85$

Esta constante empírica está asociada a la solidez del material, que reduce el diseño del módulo de compresibilidad, valor vital para adquirir la rigidez vertical del aislador. En nuestro caso con un $G = 0.065$ ksi < 0.070 ksi, y una dureza de 40 en la escala del IRHD, obtenemos un valor de $k = 0.85$.

De la figura 3.1 como referencia se obtienen las siguientes dimensiones:

- ✓ Diámetro global del aislador: $D = 749.3$ mm.
- ✓ Cuantía de capas de caucho: $N = 28$
- ✓ Grosor de la capa de caucho: $t_c = 8.001$ mm



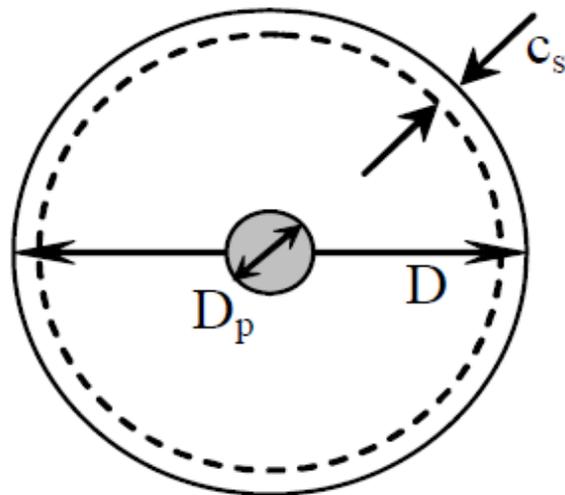


Figura 4.1: Datos de ingreso de las dimensiones de un aislador LRB.

- **Propiedades del acero**

Como se mencionó anteriormente las propiedades del material no altera incondicionalmente el desempeño de los aisladores. Solo sirven para conservar la funcionalidad y los modelos de casta. Por lo tanto, tan solo usaremos las dimensiones de acero obtenidas en el aislador.

- ✓ Grosor de la capa de acero: $t_s = 3.038 \text{ mm}$
- ✓ Grosor de la cubierta lateral: $c_s = 19.05 \text{ mm}$
- ✓ Grosor de la película de montaje elevado: $t_{tp} = 25.4 \text{ mm}$
- ✓ Grosor de la película de montaje bajo: $t_{bp} = 25.4 \text{ mm}$
- ✓ Grosor interno de la película: $t_{ip} = 25.4 \text{ mm}$

- **Propiedades del plomo**

Como se mencionó anteriormente, el plomo ceda cercanamente a 6.7% de la deformación angular; por lo tanto, las propiedades del aislador sólo dependen del caucho.

- ✓ Diámetro del plomo: $D_p = 114.3 \text{ mm}$

- **Datos de la estructura**

Para empezar con el diseño de los tamaños del aislador y obtener sus propiedades serán necesarios los datos de desplazamientos de diseño y cargas del proyecto.

Desplazamientos de diseño:

- ✓ Desplazamiento de diseño: DM = 143 mm
- ✓ Desplazamiento máximo de diseño: DTM = 296 mm

Cargas del proyecto:

- ✓ FS en condición no deformada: FS_o = 3
 - ✓ FS en desplazamiento máximo: FSDTM = 1
- $\Theta_o = 0$
- ✓ Rotación aplicada sobre el aislador:
- $\Theta_{DTM} = 0$
- ✓ Carga en condición no deformada: P_o = 229 ton
 - ✓ Carga en desplazamiento máximo: PDTM = 433 ton

A continuación, se muestra la tabla 4.1, 4.2 y 4.3 de la plantilla generada con los datos iniciales de ingreso.

Tabla 4.1: Propiedades del caucho como datos de ingreso de un aislador LRB.

Propiedades del caucho	
Módulo de cortante	G = <input style="width: 50px;" type="text" value="0.065"/> ksi G = <input style="width: 50px;" type="text" value="4.57"/> kg/cm ²
Elongación en el descanso del caucho	$\epsilon_u =$ <input style="width: 50px;" type="text" value="6"/> mm/mm
Módulo de volumen	K = <input style="width: 50px;" type="text" value="300"/> ksi
Módulo de elasticidad	E _o = <input style="width: 50px;" type="text" value="0.26"/> ksi
Constante empírica	k = <input style="width: 50px;" type="text" value="0.85"/>

Tabla 4.2: Datos de ingreso de las dimensiones de un aislador LRB.

DIMENSIONES DEL AISLADOR		
Diámetro total	D =	749.3 mm
Diámetro del plomo	Dp =	114.3 mm
Número de capas de caucho	N =	28
Espesor de la capa de caucho	tc =	8.001 mm
Espesor del acero	ts =	3.038 mm
Espesor de la cubierta lateral	cs =	19.05 mm
Espesor de la placa de montaje sup.	ttp =	25.4 mm
Espesor de la placa de montaje inf.	tbp =	25.4 mm
Espesor interno de la placa	tip =	25.4 mm

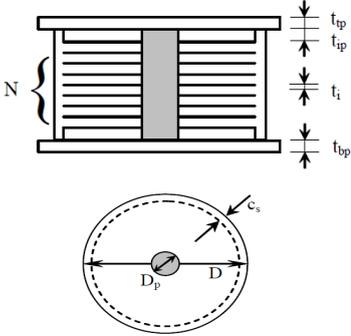


Tabla 4.3: Datos de ingreso de las dimensiones de un aislador LRB.

DATOS DE LA ESTRUCTURA														
DESPLAZAMIENTOS DE DISEÑO	CARGAS DEL PROYECTO													
Desplazamiento de diseño	DM = 143 mm	FS en condición no deformada FS en desplazamiento máximo												
Desplazamiento máximo de diseño	DTM = 296 mm	Rotación aplicada sobre el rodamiento												
		Carga en condición no deformada Carga en desplazamiento máximo												
		<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;"></td> <td style="text-align: right;">FSo = 3</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: right;">FSDTM = 1</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: right;">$\Theta_o = 0$</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: right;">$\Theta_{DTM} = 0$</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: right;">Po = 229 ton</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: right;">PDTM = 433 ton</td> </tr> </table>		FSo = 3		FSDTM = 1		$\Theta_o = 0$		$\Theta_{DTM} = 0$		Po = 229 ton		PDTM = 433 ton
	FSo = 3													
	FSDTM = 1													
	$\Theta_o = 0$													
	$\Theta_{DTM} = 0$													
	Po = 229 ton													
	PDTM = 433 ton													

4.2 PLANTILLA DE DISEÑO PARA UN AISLADOR LRB

Una vez ingresados todos los datos iniciales necesarios, se procede a calcular las dimensiones del aislador.

- **Dimensiones calculadas**

- ✓ Altura total del caucho: $H_c = t_c \times N$

Con nuestros datos iniciales obtendremos una altura igual a 224.028 mm.

- ✓ Diámetro del caucho: $D_c = D - 2 \times c_s$

En este caso obtendríamos un diámetro de caucho igual a 711.2 mm.

- ✓ Área de la superficie lateral de la capa de caucho: $A' = \pi \times D_c \times t_c$

En este caso $A' = 178.766 \text{ cm}^2$.

- ✓ Área del caucho: $A_c = \frac{\pi \times D_c^2}{4}$

En este caso $A_c = 3972.6 \text{ cm}^2$.

- ✓ Área del agujero de plomo: $A_p = \frac{\pi \times D_p^2}{4}$

En este caso $A_p = 102.6 \text{ cm}^2$.

- ✓ Área neta de caucho incluido cubierta: $A_e = \frac{\pi \times D^2}{4} - A_p$

El área neta del caucho incluida la cubierta se obtiene de la resta entre el área de la placa de montaje y el área del núcleo de plomo. En nuestro caso $A_e = 4307 \text{ cm}^2$.

- ✓ Área neta de caucho: $A_n = A_c - A_p$

El área neta de caucho se obtiene al quitarle el área del núcleo de plomo al área de caucho calculada anteriormente. En este caso obtenemos un $A_n = 3870 \text{ cm}^2$.

- ✓ Factor de modelo de capas(S): $S = \frac{A_n}{A'}$

El factor de capas S se calcula como una relación entre el área neta de caucho y el área de superficie lateral de la capa de caucho. Para nuestro caso $S = 21.65$.

Luego de haber calculado todas las dimensiones, se procede a obtener las propiedades mecánicas y dinámicas del aislador. En primer lugar, calcularemos la rigidez de compresión K_v la cual depende del módulo de compresión E_c y el módulo de rigidez vertical E_v . Las siguientes fórmulas están basadas en la norma AASHTO LRFD.

✓ Módulo de compresión: $E_c = E_o \times (1 + 2 \times k \times S^2)$

En este caso $E_c = 1430$ Mpa

✓ Módulo de rigidez vertical: $E_v = \frac{1}{\frac{1}{E_c} + \frac{1}{K}}$

En este caso $E_v = 846$ Mpa

- **Rigidez de compresión**

✓ Rigidez vertical: $K_v = \frac{E_v \times A_n}{H_c}$

Como resultado obtenemos una rigidez de compresión del aislador $K_v = 148939$ ton/m.

- **Propiedades de rigidez de corte**

El elastómero (caucho) contribuye a la rigidez producida, K_d y el plomo contribuye a la resistencia a la histéresis, Q_d . Se usarán las siguientes fórmulas basadas en (Kelly, 2011).

✓ Rigidez de fluencia: $K_d = \frac{A_e \times G}{H_c}$

Como resultado obtenemos una rigidez de fluencia del aislador $K_d = 87.86$ ton/m.

Los valores de la rigidez elástica (K_e), fuerza característica (Q_d) y la fuerza de fluencia (F_y) será calculadas sólo para explicar explícitamente el modelo bi-lineal del aislador elastomérico. El valor de K_e tiene poca influencia sobre la respuesta final de la estructura en DD o DM. En general, como se vio anteriormente, la relación $K_e = 10 \times K_d$ modela adecuadamente a un aislador de caucho y plomo.

✓ Rigidez elástica: $K_e = 10 \times K_d$

Como resultado obtenemos una rigidez elástica del aislador $K_e = 878.6 \text{ ton/m}$.

✓ Fuerza característica: $Qd = \sigma_y \times A_p$

El límite elástico efectivo del plomo, σ_y , se estima en alrededor de 0.8 ksi para condiciones no sísmicas y entre 0.95 y 2.15 ksi para condiciones sísmicas. La variación en la tensión de fluencia efectiva a altas velocidades en la condición sísmica se debe a la acumulación de calor.

Para este caso $\sigma_y = 1.15 \text{ ksi}$; por lo tanto, $Qd = 8.30 \text{ ton}$.

✓ Fuerza de fluencia: $F_y = \frac{Qd \times K_e}{K_e - K_d}$

En este caso la fuerza de fluencia $F_y = 9.22 \text{ ton}$.

✓ Desplazamiento de fluencia: $\Delta y = \frac{F_y}{k_e}$

El desplazamiento debido a la fuerza de fluencia, $\Delta y = 10.49 \text{ mm}$.

• **Propiedades del desplazamiento de diseño**

✓ Fuerza de corte en DM: $F_{max}(\Delta) = Qd + Kd \times \Delta$

Para nuestro desplazamiento de diseño $DM = 143 \text{ mm}$, obtenemos una fuerza de corte máxima de 20.86 ton.

✓ Rigidez efectiva en DM: $K_{eff}(\Delta) = \frac{F_{max}}{\Delta} = \frac{Qd + Kd \times \Delta}{\Delta}$

En este caso la rigidez efectiva en DM, $K_{eff}(DM) = 145.87 \text{ ton/m}$.

✓ Energía disipada por ciclo: $EDC(\Delta) = 4 \times Qd \times (\Delta - \Delta y)$

La energía disipada es el área que encierra el ciclo de histéresis formada por el aislador. En este caso $EDC(DM) = 4.40 \text{ ton.m}$.

✓ Coeficiente de amortiguamiento:
$$\beta(\Delta) = \frac{EDC(\Delta)}{2 \times \pi \times \Delta^2 \times K_{eff}(\Delta)}$$

La amortiguación viscosa equivalente β (DM) = 0.235.

✓ Deformación de corte en el caucho en DM:
$$\gamma(\Delta) = \frac{\Delta}{H_c}$$

La deformación de corte debido al desplazamiento de diseño, γ (DM) = 0.64.

- **Propiedades del desplazamiento total máximo**

Debido a la dependencia de esfuerzo-deformación en el caucho natural, se espera que la rigidez de fluencia, K_d , en el desplazamiento máximo, sea el 95% de K_d en el desplazamiento de diseño.

✓ Fuerza de corte en DTM:
$$F_{max}(\Delta) = Q_d + 0.95 \times K_d \times \Delta$$

En este caso obtenemos una fuerza de corte en desplazamiento máximo $F_{max}(\Delta) = 33$ ton.

✓ Rigidez efectiva en DTM:
$$K_{eff}(\Delta) = \frac{F_{max}}{\Delta} = \frac{Q_d + K_d \times \Delta}{\Delta}$$

La rigidez efectiva debido al desplazamiento total máximo, K_{eff} (DTM) = 111.49 ton/m.

✓ Energía disipada por ciclo:
$$EDC(\Delta) = 4 \times Q_d \times (\Delta - \Delta_y)$$

La máxima energía disipada debido al desplazamiento total máximo, EDC (DTM) = 4.40 tonxm.

✓ Coeficiente de amortiguamiento:
$$\beta(\Delta) = \frac{EDC(\Delta)}{2 \times \pi \times \Delta^2 \times K_{eff}(\Delta)}$$

El coeficiente de amortiguamiento viscoso máximo debido al desplazamiento total máximo, β (DTM) = 0.154.

✓ Deformación de corte en el caucho en DTM:
$$\gamma(\Delta) = \frac{\Delta}{H_c}$$

La deformación de corte en el caucho debido al desplazamiento total máximo, γ (DTM) = 1.32.

- **Amplitud de carga vertical**

La amplitud o capacidad de carga vertical está controlada por el desplazamiento horizontal del soporte, la rotación aplicada y el factor de seguridad en el amortiguamiento máximo. La capacidad es estimada en cero desplazamientos y el DTM a los factores de seguridad.

Las capacidades verticales en desplazamientos distintos de cero se reducen por el factor de reducción de área R. Esto se calcula como la superposición de las áreas desplazadas superior e inferior enlazados. Tal como se muestra en la figura 3.2.

- ✓ Factor de reducción de área:
$$R(\Delta) = 2 \times \frac{Dc^2 \times \sin^{-1}\left(\frac{\sqrt{Dc^2 - \Delta^2}}{Dc}\right) - \Delta \times \sqrt{Dc^2 - \Delta^2}}{\pi \times Dc}$$

- **Capacidad de carga vertical en posición no deformada**

Con un desplazamiento $\Delta_0 = 0$ mm y una rotación $\theta_0 = 0$ radianes, se produce un factor de reducción de área $R = 1$. Seguidamente, se procede a realizar los siguientes cálculos:

- ✓ Desplazamiento de corte debido a Δ_0 y θ_0 :
$$\gamma_0 = \frac{\Delta_0}{Hc} + \frac{Dc^2 \times \theta_0}{2 \times tc \times Hc}$$

El desplazamiento de corte $\gamma_0 = 0$ mm/mm debido a que no hay deformación.

- ✓ Desplazamiento de corte disponible para carga axial:
$$edisp = \varepsilon u - \gamma_0$$

El desplazamiento de corte disponible $edisp = 6$ mm/mm.

- ✓ Carga axial que produce un desplazamiento de corte adicional:

$$Pdespo = \frac{Ec \times Ac \times edisp}{6 \times S} \times R(\Delta_0)$$

La carga axial que produce un desplazamiento de corte adicional, $Pdespo = 2676$ ton.

- ✓ Pandeo de carga axial:
$$Pcrito = \frac{\pi}{8} \times G \times S \times \frac{Dc}{Hc} \times Ac \times R(\Delta_0)$$

La carga axial para la estabilidad de pandeo en una posición no deformada es igual a $Pcrito = 1386$ ton.

- ✓ Mínimo de desplazamiento y pandeo:

$$P_{\text{mino}} = \min (P_{\text{crit}}, P_{\text{despo}}, 3 \times k_{si} \times A_e \times 3)$$

El mínimo de estos 3 valores se tomará como la carga admisible en condiciones no deformadas. Este valor de P_{min} está dividido entre el FS, este factor de seguridad para condiciones no deformadas es de 3. Entonces, para nuestro caso:

- ✓ Carga admisible en condiciones no deformadas: $P_{\text{admo}} = \frac{P_{\text{mino}}}{FS}$

La carga admisible para condiciones no deformadas, $P_{\text{admo}} = 462$ ton.

- **Capacidad de carga vertical en el desplazamiento total máximo (DTM)**

Con un desplazamiento $DTM = 296$ mm y una rotación $\theta_{DTM} = 0$ radianes, se produce un coeficiente de disminución de área $R = 0.486$. Seguidamente, se procede a realizar los siguientes cálculos:

- ✓ Desplazamiento de corte debido a DTM y θ_{DTM} : $Y_{DTM} = \frac{DTM}{H_c} + \frac{D_c^2 \times \theta_{DTM}}{2 \times t_c \times H_c}$

El desplazamiento de corte $Y_{DTM} = 1.32$ mm/mm.

- ✓ Desplazamiento de corte disponible para carga axial: $e_{\text{disp}} = \epsilon_u - Y_{DTM}$

El desplazamiento de corte disponible $e_{\text{disp}} = 4.68$ mm/mm.

- ✓ Carga axial que produce un desplazamiento de corte adicional:

$$P_{\text{despDTM}} = \frac{E_c \times A_c \times e_{\text{disp}}}{6 \times S} \times R(DTM)$$

La carga axial que produce un desplazamiento de corte adicional, $P_{\text{despDTM}} = 1014$ ton.

- ✓ Pandeo de carga axial: $P_{\text{critDTM}} = \frac{\pi}{8} \times G \times S \times \frac{D_c}{H_c} \times A_c \times R(DTM)$

La carga axial para la estabilidad de pandeo en el desplazamiento total máximo es igual a

$P_{critDTM} = 673 \text{ ton.}$

- ✓ Mínimo de desplazamiento y pandeo:

$$P_{min} = \min (P_{critDTM}, P_{despDTM}, 3 \times ksi \times Ae \times 3)$$

El mínimo de estos 3 valores se tomará como la carga admisible en DTM. Este valor de P_{min} está dividido entre el FS, este factor de seguridad para DTM es de 1. Entonces, para nuestro caso:

- ✓ Carga admisible en condiciones no deformadas: $P_{admDTM} = \frac{P_{min}}{FS}$

La carga admisible para condiciones no deformadas, $P_{admDTM} = 462 \text{ ton.}$

4.3 PREDIMENSIONAMIENTO DE UN AISLADOR LRB

Para sistemas elastoméricos, los tamaños iniciales de los componentes del aislador se determinan en función de mantener un factor de seguridad de 3 bajo cargas verticales máximas en la configuración no deformada. El tamaño del aislador y la configuración de las láminas de goma están relacionadas con el rendimiento sísmico, por lo tanto, los valores ingresados en esta etapa de diseño deberán ajustarse dependiendo de los resultados posteriores.

La cuantía de láminas de goma y los tamaños de corazón de plomo se establecen mediante un procedimiento de prueba y error. Como la amortiguación es una función del desplazamiento, esto requiere un procedimiento iterativo.

Para poder variar las dimensiones métricas del diámetro del aislador generalmente se utiliza un incremento de 50 mm, correspondientes al molde, más 20 mm de cubierta lateral, resultando secuencias en el orden de 570 mm, 620 mm, etc.

El grosor de la lámina de caucho es usualmente de diez mm, este grosor suministra un correcto enclaustramiento para el corazón de plomo y es lo ampliamente delgada como para suministrar una elevada suficiencia de carga. Sin embargo, si los pesos verticales son críticos, el grosor del peso puede disminuirse a 8 mm o inclusive

6 mm. Esto conlleva a un mayor costo de fabricación ya que se emplearían más cuñas internas para alcanzar la altura deseada del aislador.

La cuantía de láminas define la flexibilidad del sistema, por lo tanto, el objetivo principal sería mantener la tensión por debajo del 150%. Debido a esto un buen punto de partida para pre-dimensionar la altura del aislador es dividir el desplazamiento total estimado entre 1.5 y a medida que aumente el número de capas puede ser necesario un aumento del diámetro del aislador.

El tamaño del corazón de plomo define la cantidad de amortiguación en el sistema, se puede usar como guía la relación Qd/W .

El proceso iterativo comienza a partir del enlace de Qd/W , la cuantía de láminas de caucho, y el pre dimensionamiento de los componentes del aislador que asignarán valores al diámetro del plomo, indicadores de amortiguamiento e inflexibilidad efectiva. El proceso iterativo terminará cuando se obtengan cualidades parecidas a las diseñadas por medio de las ecuaciones, en que los desplazamientos, periodos, amortiguamiento y capacidad de carga son los convenientes y converjan.

Empresas dedicadas a la fabricación de aisladores cuentan con catálogos, como se puede apreciar en las imágenes 4.2 y 4.3, que brindan las propiedades del aislador según sus dimensiones o desplazamientos, los cuales sirven como un buen punto de partida para empezar el diseño y posterior iteración hasta encontrar el adecuado para nuestro proyecto.

Ingeniería

Propiedades técnicas del Aislador

Propiedades del aislador: Unidades métricas

TAMAÑO DEL DISPOSITIVO				DIMENSIONES DE LA PLACA DE SOPORTE					
Díametro Aislador, D_1 (mm)	Altura Aislador, H (mm)	Número de capas de caucho, N	Díametro del plomo, D_L (mm)	L (mm)	t (mm)	Cantidad Orificios	Orificio ϕ (mm)	A (mm)	B (mm)
305	125-280	4-14	0-100	355	25	4	27	50	-
355	150-305	5-16	0-100	405	25	4	27	50	-
405	175-330	6-20	0-125	455	25	4	27	50	-
455	175-355	6-20	0-125	510	25	4	27	50	-
520	205-380	8-24	0-180	570	25	8	27	50	50
570	205-380	8-24	0-180	620	25	8	27	50	50
650	205-380	8-24	0-205	700	32	8	27	50	50
700	205-430	8-30	0-205	750	32	8	33	65	75
750	230-455	8-30	0-230	800	32	8	33	65	75
800	230-510	8-33	0-230	850	32	8	33	65	75
850	230-535	8-35	0-255	900	38	12	33	65	95
900	255-560	9-37	0-255	955	38	12	33	65	95
950	255-585	10-40	0-280	1005	38	12	33	65	95
1000	280-635	11-40	0-280	1055	38	12	40	75	115
1050	305-660	12-45	0-305	1105	44	12	40	75	115
1160	330-760	14-45	0-330	1205	44	12	40	75	115
1260	355-760	16-45	0-355	1335	44	16	40	75	115
1360	405-760	18-45	0-380	1435	51	16	40	75	115
1450	430-760	20-45	0-405	1525	51	20	40	75	115
1550	455-760	22-45	0-405	1625	51	20	40	75	115

(1) Las capacidades de carga axial corresponden a los máximos desplazamientos basados en los límites de diseño del 250% de tensión de corte del de caucho o 2/3 del diámetro del aislador. El desplazamiento real de un aislador y la capacidad de carga dependen del módulo y número de capas de caucho.

(2) Los Módulos de Corte del Caucho (G) están disponibles desde 0.38 N/mm² hasta 0.70 N/mm².

(3) Para el modelado analítico bilineal de la rigidez elástica, utilice $K_v = 10 \cdot K_d$.

Díametro Aislador, D_1 (mm)	PROPIEDADES DE DISEÑO			Desplazamiento Máximo, D_{max} (mm)	Capacidad Carga Axial P_{max} (kN)
	Rigidez Producida, K_d (kN/mm)	Resistencia Características Q_d (kN)	Rigidez a la compresión, K_v (kN/mm)		
305	0.2-0.9	0-65	>50	150	450
355	0.2-1.2	0-65	>100	150	700
405	0.3-1.6	0-110	>100	200	900
455	0.3-2.0	0-110	>100	250	1,150
520	0.4-2.3	0-180	>200	300	1,350
570	0.5-2.8	0-180	>500	360	1,800
650	0.5-3.5	0-220	>700	410	2,700
700	0.5-4.2	0-220	>800	460	3,100
750	0.7-4.7	0-265	>900	460	3,600
800	0.7-5.3	0-265	>1,000	510	4,000
850	0.7-6.1	0-355	>1,200	560	4,900
900	0.7-6.1	0-355	>1,400	560	5,800
950	0.7-6.1	0-490	>1,800	610	6,700
1000	0.8-6.3	0-490	>1,900	660	7,600
1050	0.9-6.3	0-580	>2,100	710	8,500
1160	1.1-6.5	0-665	>2,800	760	13,800
1260	1.2-6.7	0-755	>3,700	810	20,500
1360	1.4-7.0	0-890	>5,100	860	27,600
1450	1.6-7.2	0-1,025	>5,300	910	33,400
1550	1.8-7.4	0-1,025	>6,500	910	40,000



Figura 4.2: Catálogo DIS de las propiedades de un aislador según su dimensionamiento. DIS(2007).

DESPLAZAMIENTO ± 100 mm

LRB-S	V	F _{zd}	K _e	ξ_e	F ₂	F ₁	d ₁	K _v	D _o	t _e	h	H	Z
	kN	kN	kN/mm	%	KN	KN	mm	kN/mm	mm	mm	mm	mm	mm
	a d ₂ = 83 mm												
LRB-S 500/100-110	2700	3630	1.94	35	162	106	8	1164	500	100	197	247	550
LRB-S 550/100-120	4170	5430	2.33	35	194	126	8	1579	550	100	197	247	600
LRB-S 600/102-120	4830	6500	2.49	33	207	128	8	1715	600	102	190	240	650
LRB-S 650/102-120	6440	9190	2.68	30	223	129	8	2235	650	102	200	260	700
LRB-S 700/105-115	7250	10570	2.74	27	228	121	8	2374	700	105	197	257	750
LRB-S 750/112-125	9240	12530	3.08	28	257	143	9	2754	750	112	207	267	800
LRB-S 800/128-130	10310	13190	3.20	29	267	155	10	2577	800	128	223	283	850
LRB-S 850/128-130	12660	17040	3.40	27	284	157	10	3130	850	128	223	283	900
LRB-S 900/126-140	13490	19250	3.91	28	326	182	10	3359	900	126	228	288	950
LRB-S 1000/135-150	19280	26760	4.50	27	375	210	11	4344	1000	135	251	331	1050
LRB-S 1100/150-160	24050	32410	5.01	27	418	241	12	4725	1100	150	266	346	1150
LRB-S 1200/154-160	29180	38760	5.42	25	452	247	12	5498	1200	154	266	346	1250

LRB-SN	V	F _{zd}	K _e	ξ_e	F ₂	F ₁	d ₁	K _v	D _o	t _e	h	H	Z
	kN	kN	kN/mm	%	KN	KN	mm	kN/mm	mm	mm	mm	mm	mm
	a d ₂ = 83 mm												
LRB-SN 500/100-110	4050	6060	2.32	30	193	109	8	1424	500	100	197	247	550
LRB-SN 550/100-120	6260	9060	2.78	29	232	130	8	1892	550	100	197	247	600
LRB-SN 600/102-120	7250	10830	3.02	27	252	132	8	2091	600	102	190	240	650
LRB-SN 650/114-130	9760	13520	3.35	28	279	155	9	2366	650	114	218	278	700
LRB-SN 700/126-140	10540	14260	3.70	29	308	180	10	2339	700	126	227	287	750
LRB-SN 750/126-140	13950	17170	3.97	27	331	182	10	2890	750	126	227	287	800
LRB-SN 800/136-145	15210	18010	4.23	27	352	197	11	2904	800	136	234	294	850
LRB-SN 850/144-155	17420	20410	4.66	28	389	225	12	3267	850	144	245	305	900
LRB-SN 900/144-160	20360	27260	5.10	27	425	241	12	3509	900	144	254	314	950
LRB-SN 1000/153-170	29090	33970	5.85	27	488	275	12	4489	1000	153	277	357	1050
LRB-SN 1100/170-185	33050	37200	6.65	27	554	327	14	4883	1100	170	294	374	1150
LRB-SN 1200/176-185	36490	40620	7.15	25	596	336	14	5651	1200	176	296	376	1250

Leyenda

V	Carga máxima vertical en combinaciones de carga incluida la acción sísmica con desplazamiento 1.2 d ₂
F _{zd}	Carga máxima vertical en ULS
K _e	Rigidez efectiva horizontal (con desplazamiento 1.2 d ₂)
ξ_e	Coefficiente de amortiguación viscosa equivalente (con desplazamiento 1.2 d ₂)
F ₂	Fuerza horizontal máxima (con desplazamiento 1.2 d ₂)
F ₁	Fluencia por fuerza
d ₁	Fluencia por desplazamiento
K _v	Rigidez vertical
D _o	Diámetro externo del caucho
t _e	Espesor total del caucho
h	Altura excluyendo las planchas de acero externas
H	Altura total incluyendo las planchas de acero externas
Z	Longitud del lado de las planchas de acero externas

Figura 4.3: Catálogo de FIP INDUSTRIALE de las propiedades de un aislador según el desplazamiento. FIP INDUSTRIALE (2016).

4.4 REVISIÓN DE LOS ALCANCES ELABORADOS

En resumen, las tablas 4.4 y 4.5 muestran las dimensiones y resultados obtenidos generados a través de la plantilla de cálculo.

Tabla 4.4: Resumen de las dimensiones del aislador generados a través de la plantilla.

Dimensiones del Aislador

Diámetro total	D =	749.3 mm
Diámetro del plomo	Dp =	114.3 mm
Número de capas de caucho	N =	28
Espesor de la capa de caucho	tc =	8.001 mm
Espesor del acero	ts =	3.038 mm
Espesor de la cubierta lateral	cs =	19.05 mm
Espesor de la placa de montaje sup.	ttp =	25.4 mm
Espesor de la placa de montaje inf.	tbp =	25.4 mm
Espesor interno de la placa	tip =	25.4 mm
Altura total del aislador	Haisl =	407.654 mm

Tabla 4.5: Resumen de las propiedades del aislador obtenidas a través de la plantilla.

Propiedades del Aislador

Desplazamiento de diseño	DM =	143 mm
Desplazamiento máximo de diseño	DTM =	296 mm
Rigidez de fluencia	Kd=	87.86 ton/m
Rigidez elástica	Ke=	878.59 ton/m
Fuerza característica	Qd=	8.30 ton
Fuerza de fluencia	Fy=	9.22 ton
Desplazamiento de fluencia	Δy =	10.49 mm
Rigidez Vertical	Kv=	148939 ton/m
Fuerza de corte en DM	Fmax (DM) =	20.86 ton

Rigidez efectiva en DM
Energía disipada por ciclo

$K_{eff} (DM) = 145.87 \text{ ton/m}$
 $EDC (DM) = 4.40 \text{ ton}\cdot\text{m}$

Coefficiente de Amortiguamiento en Desplazamiento de Diseño

$\beta (DM) = 0.235$

Deformación de corte en el caucho en DM

$\gamma (DM) = 0.64$

Deformación de corte en el caucho en DTM

$\gamma (DTM) = 1.32$

Carga admisible en condición no deformada (con FS de 3)

$P_{adm} = 462 \text{ ton}$

Carga admisible en desplazamiento máximo

$P_{admDTM} = 673 \text{ ton}$

Con estos resultados se obtiene el ciclo de histéresis presentado en la figura 4.4:

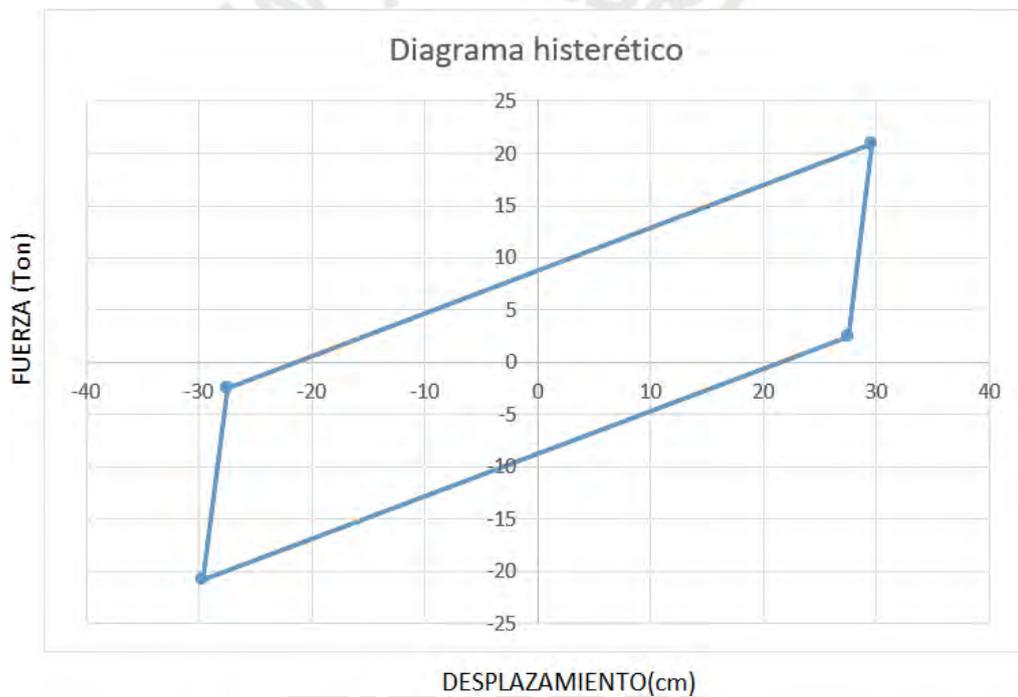
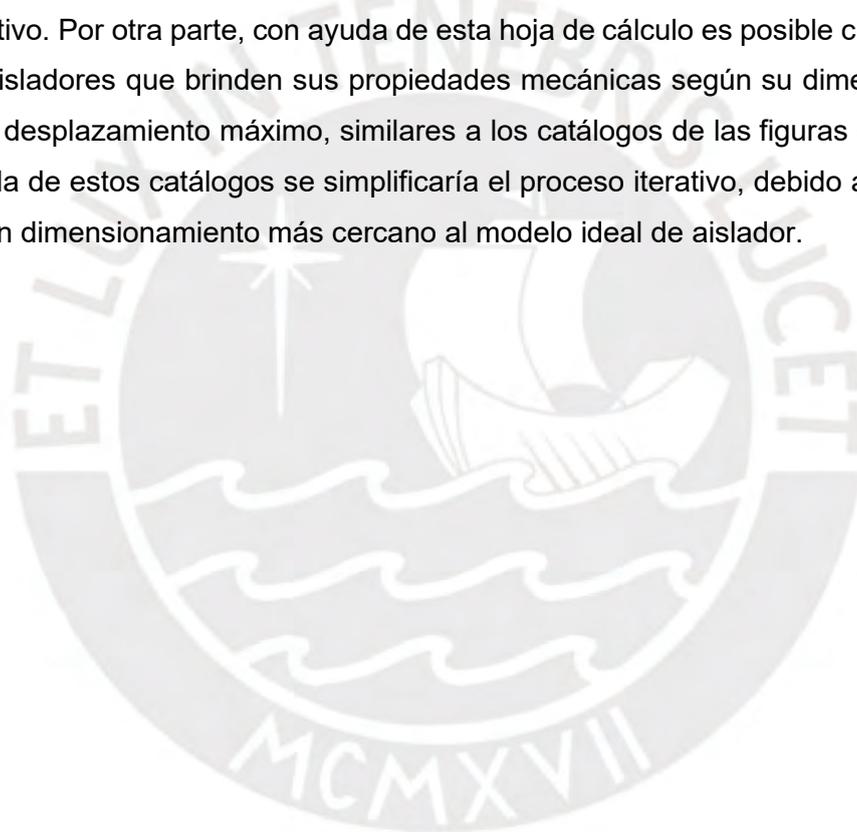


Figura 4.4: Ciclo de histéresis generado a través de los resultados obtenidos de la plantilla.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se verificó que a través de las plantillas de cálculo se puede estudiar, de manera más sencilla, las propiedades mecánicas del aislador LRB sometido a las solicitaciones de carga axial y cortante; así como también, a los desplazamientos de diseño DM y DTM. Se espera que esta plantilla de cálculo pueda ser usada para determinar las propiedades de un aislador LRB y, posteriormente, proceder a realizarse su testeado y fabricación. Esto ayudaría a generar proveedores en el Perú y así no depender de patentes extranjeras.
- Los componentes principales de un aislador LRB están hechos de materiales fáciles de conseguir en nuestro entorno. Un ejemplo de ello es que las pilas recicladas cuentan con la misma pureza de 99.9% de plomo, la misma que lleva el núcleo de plomo del aislador. El Perú también produce caucho según la dureza que se requiera, existen empresas dedicadas a ese rubro. Y por último el acero ASTM A36 o ASTM A1011 son bastante utilizados en nuestro medio lo cual permite su fácil obtención. Todo esto resulta en una alta factibilidad de poder fabricar este tipo de aisladores en el Perú.
- Se verificó que la presencia de un agujero, en este caso debido al núcleo de plomo, ya sea muy pequeño, representa una gran variación para E_c . Para casos con relación de diámetros $a/b > 0.10$, el valor de E_c cae en casi $2/3$. En conclusión, para aisladores elastoméricos con núcleo de plomo se recomienda usar $E_c = 4GS^2$ en lugar de $6GS^2$. Por otro lado, la presencia de este mismo agujero, favorece a la condición de estabilidad del aislador ya que no será necesario reducir el factor de seguridad contra pandeo ante cargas ligeras.
- Debido a la presencia de un agujero para favorecer la estabilidad del aislador ante pandeo, la rigidez horizontal K_H se ve reducida. Por lo que, la presencia del plomo en el agujero compensaría y añadiría aún mayor amortiguamiento, β , al sistema de aislamiento. Una combinación perfecta para resolver los problemas ante cargas ligeras.
- Tres propiedades de un aislador se miden directamente a partir de los datos sacados de la gráfica de histéresis, los cuales son el desplazamiento máximo del aislador (D_{max}), la fuerza máxima requerida para desplazar el aislador (F_{max}) y el área del ciclo de histéresis que proporciona la energía total disipada por ciclo (EDC). La rigidez efectiva del aislador (K_{eff}) es igual a F_{max} / D_{max} .

- Para poder hallar la fuerza característica, Q_d , se han utilizado relaciones empíricas tales como $K_e = 8 * K_d$ para condiciones no sísmicas, y $K_e = 10 * K_d$ para condiciones sísmicas; estos datos son obtenidos de diversos ensayos que aproximan el incremento de la rigidez elástica de 8 a 10 veces la rigidez de fluencia. Esto es debido a las propiedades del plomo que aportan un mayor rango elástico y recuperación gracias a la cristalización de sus componentes, resultando en un ciclo de histéresis.
- Para poder calcular el dimensionamiento ideal del aislador elastomérico LRB que cumpla con lo solicitado por la estructura se requiere de un proceso iterativo de prueba y error. En el capítulo 4.3 se presentan algunos lineamientos que ayudan a pre-dimensionar el aislador y representan un buen punto de partida del proceso iterativo. Por otra parte, con ayuda de esta hoja de cálculo es posible crear catálogos de aisladores que brinden sus propiedades mecánicas según su dimensionamiento o su desplazamiento máximo, similares a los catálogos de las figuras 4.2 y 4.3. Con ayuda de estos catálogos se simplificaría el proceso iterativo, debido a que se parte de un dimensionamiento más cercano al modelo ideal de aislador.



CAPÍTULO 6: BIBLIOGRAFÍA

1. CDV Ingeniería Antisísmica. (2017). Tecnología Antisísmica. 19 Octubre del 2017, de CDV Ingeniería Antisísmica Sitio web: <http://cdvperu.com/aisladores-dis/>
2. Dynamic Isolation Systems. (2007). “*Aislamiento sísmico para Edificaciones y Puentes, la mejor tecnología de protección sísmica del mundo*”. McCarran, Nevada USA.
3. FIP INDUSTRIALE. (2016). “*Aisladores elastoméricos de caucho y de plomo*”. (Catálogo en versión español). Selvazzano ITALY.
4. James M. Kelly & Dimitrios A. Konstantinidis. (2011). *Mechanics of Rubber Bearings for Seismic and Vibration Isolation*. United Kingdom: John Wiley & Sons.
5. Naeim, F., & New York: John Wiley.
6. Trevor E. Kelly, S.E. (2001). *BASE ISOLATION OF STRUCTURES*. Wellington, New Zealand. Holmes Consulting Group.
7. M.C. Constantinou, A.S. Whittaker, Y. Kalpakidis, D.M. Fenz y G.P. Warn. (2007). *Performance of Seismic Isolation Hardware under Service and Seismic Loading*. MCEER. University at Buffalo, The State University of New York.
8. Higashino, M. y Okamoto, S. - CIB - International Council for Research and Innovation in Building and Construction, “*Response Control and Seismic Isolation of Buildings*”, Taylor & Francis, Ed. 1, pp. 1-21, 2006
9. Hernández Morales, H. “*Análisis estructural de un edificio aislado sísmicamente y diseño de su sistema de aislamiento*”. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería, Curso: Estructuras Especiales.
10. Korswagen, Paul; Arias Julio y Huaranga Pamela (2012). *Análisis y diseño de estructuras con aisladores sísmicos en el Perú* (tesis de grado). Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) (http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/1631/KORSWAGEN_ARIAS_HUARINGA_AISLADORES_SISMICOS_PERU.pdf?sequence=1) (Consulta: 25 septiembre 2017).
11. Mendo R., Arnold. (2015). *Bases para la implementación de la norma peruana de análisis y diseño de edificios con aislamiento sísmica* (Tesis de grado). Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP).
12. Leyton B., Michael. (2017). *Implementación de aisladores sísmicos en un*

edificio de viviendas en Lima, Perú (Tesis de grado). Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP).

13. ASCE / SEI 7-16 - American Society of Civil Engineers. (2016) "*Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*", pp. 165-177
14. AASHTO. (2007). *LRFD for Highway Bridge Superstructures, Reference Manual*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
15. AASHTO. (2007). *LRFD Bridge Design Specifications*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
16. NCh2745. (2013). Versión final Comité. *Análisis y diseño de edificios con aislamiento sísmico*. División de Normas del Instituto Nacional de Normalización.
17. Carlos Méndez Galindo. (2013). *Beneficios y Ventajas de los Sistemas de Protección Sísmica*. Congreso estructuras – XII Seminario de ingeniería estructural y sísmica. San José, Costa Rica.
18. R. Ivan Skinner, Trevor E. Kelly & Bill W. H. Robinson. (1993). *Seismic Isolation for Designers and Structural Engineers*.
19. Freddy Duran C. (2017). *DISEÑO SÍSMICO DE PUENTES CON AISLADORES Y CON DISIPADORES DE ENERGÍA*. Lima: Colegio de Ingenieros del Perú – Consejo Nacional. EQELS.
20. DYNAMIC ISOLATION SYSTEMS. (2013). *SEISMIC ISOLATION BEARING DESIGN SUBMITAL*. Presentación de diseño de los aisladores sísmicos para el proyecto de la Universidad UTEC.
21. DYNAMIC ISOLATION SYSTEMS. (2013). *PRODUCTION ISOLATOR TEST REPORT*. Presentación de diseño de los aisladores sísmicos para el proyecto de la Universidad UTEC.
22. DYNAMIC ISOLATION SYSTEMS. (2013). *DIS SEISMIC ISOLATOR MANUFACTURING SPECIFICATION FOR BUILDING BEARINGS*.