

Estudio experimental de la estabilidad axial-lateral de un aislador elastomérico con condición de apoyo flexuralmente flexible

E. Pedreros Aguilar¹, N. Maureira Carsalade² y F. Sanhueza Espinoza³

RESUMEN

Es sabido que los aisladores elastoméricos tienen comportamiento axial-lateral acoplado. La carga axial genera inestabilidad lateral, así como el desplazamiento lateral reduce la rigidez axial. Existen modelos analíticos que predicen este comportamiento, avalado por resultados experimentales y numéricos. En todos los casos se asume que el aislador está impedido de rotar en ambos extremos, debido a la elevada rigidez flexural de la sub y superestructura. Sin embargo, esta hipótesis no es representativa de estructuras flexibles como marcos aislados sísmicamente.

En esta investigación se diseñó una metodología y se construyó un mecanismo que permite ensayar aisladores elastoméricos de pequeñas dimensiones, reproduciendo una condición de empotramiento flexible. Esto último con el objetivo de contar con información experimental del comportamiento axial-lateral acoplado de un espécimen de aislador cilíndrico con goma de bajo amortiguamiento. Esta información es requerida para la validación posterior de un modelo no lineal analítico de caracterización mecánica de aisladores elastoméricos que se encuentra en desarrollo.

El espécimen analizado fue sometido a secuencias de desplazamiento lateral cuasi-estáticas en presencia carga axial debido a pesos conocidos. Se consideraron cuatro niveles de carga axial y cuatro diferentes condiciones de empotramiento desde rotulado hasta virtualmente empotrado en la base. En total se realizaron 16 ensayos al mismo espécimen de aislador determinándose desplazamiento lateral, giro, carga axial y corte.

A excepción del caso con base rotulada que resultó anómalo, los ensayos mostraron la pérdida de rigidez lateral debido al incremento de la carga axial. Se observó reducción de rigidez lateral debido a la pérdida de rigidez flexural del apoyo basal. Por último, se evidenció pérdida de rigidez lateral tangente con el incremento del desplazamiento lateral.

Se observaron algunas falencias en la metodología de análisis que permitieron proponer mejoras a los procedimientos para obtención de datos más robustos en una segunda etapa experimental.

PALABRAS CLAVES: Aislador elastomérico; acoplamiento axial-lateral; apoyo flexible; inestabilidad lateral.

ABSTRACT

It is known that elastomeric isolators have coupled axial-lateral behavior. The axial load generates lateral instability as well as the lateral displacement reduces the axial stiffness. There are analytical models that predict this behavior, endorsed by experimental and numerical results. In all cases it is assumed that the isolator is restrained to rotate at both ends, due to the high flexural stiffness of the substructure and superstructure. However, this hypothesis is not representative of flexible structures as seismically isolated frames.

In this research, a methodology was designed and a mechanism was built in order to allows the testing of elastomeric isolators of small dimensions, with a flexible bending support. The latter with the objective of having experimental information of the coupled axial-lateral behavior of a specimen of cylindrical low

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, epedreros@ing.ucsc.cl

² Profesor Auxiliar, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, nmaureira@ucsc.cl

³ Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, franksanhueza@ucsc.cl

damping rubber isolator. This information is required for subsequent validation of a nonlinear analytical model of mechanical characterization of elastomeric isolators that is being developed.

The analyzed specimen was subjected to quasi-static lateral displacement sequences in the presence of axial load due to known weights. Four levels of axial load and four different support conditions –from articulated to virtually restrained to rotate– were considered. In total, 16 tests were performed on the same isolator specimen, determining lateral displacement, rotation, axial load and shear force.

With the exception of the case with articulated support, the tests showed a loss of lateral stiffness due to the increase of the axial load. A reduction of lateral stiffness was observed due to the loss of flexural rigidity of the basal support. Finally, there was a loss of lateral stiffness with the increase in lateral displacement.

There were some shortcomings in the analysis methodology that allowed to propose improvements to the procedures to obtain more robust data in a second experimental stage.

1. INTRODUCCION

El inicio de la ingeniería sísmica se remonta a inicios del siglo XX debido a la necesidad de proveer a las estructuras una respuesta más eficaz frente a eventos sísmicos con la finalidad de reducir daños a los elementos estructurales. La ingeniería sísmica actual ofrece tecnologías de protección sísmica para todo tipo de estructuras, las cuales se podrían agrupar en tres tipos: disipación de energía, amortiguamiento por masa sintonizada (AMS) y aislamiento sísmico. Esta última tecnología es la más efectiva puesto que permite alcanzar reducciones de la respuesta estructural frente a un sismo de hasta aproximadamente un 90% (www.sirve.cl).

El objetivo del aislamiento sísmico es deflectar la mayor parte de la energía impuesta por el sismo, reduciendo o eliminando el daño en la superestructura. Esto se logra mediante los siguientes mecanismos:

1. Aumento del periodo fundamental de la estructura y desacoplamiento del movimiento de la interface de aislamiento respecto de la superestructura.
2. Adicionando amortiguamiento en el nivel de aislamiento, controlando y reduciendo los desplazamientos relativos tanto de dicho nivel como de la superestructura.

La tecnología de aislamiento sísmico, tiene sus limitaciones en la aplicación práctica. Esto se debe entre otras cosas a las solicitaciones que demandan a los dispositivos de aislamiento, los cuales en la mayoría de los casos son aisladores elastoméricos. Estos consisten de varias láminas de goma y acero unidas de forma alternada a través de un proceso de vulcanización, para producir un aislador verticalmente rígido, pero horizontalmente flexible. Esta flexibilidad alarga el periodo fundamental del edificio aislado y reduce las fuerzas sísmicas en la superestructura, lo cual está acompañado de una gran demanda de desplazamiento lateral en la interface de aislamiento. La gran demanda de desplazamiento lateral en el sistema de aislamiento puede conducir a una reducción significativa en su carga crítica axial o carga de inestabilidad lateral (Buckle and Kelly 1986; Koh and Kelly 1986; Buckle and Liu 1994; Nagarajaiah and Ferrell 1999). Además, es sabido que los aisladores elastoméricos tienen comportamiento acoplado axial-lateral. Esto significa que la presencia de carga axial genera inestabilidad lateral, así como el desplazamiento lateral reduce la rigidez vertical (Kelly, 2003; Ryan et al, 2005; Maureira et al, 2016). Adicionalmente el aislador elastomérico tiene escasa resistencia a tracción en comparación con su resistencia a compresión, lo cual hace que su implementación se limite a diseños en los cuales dicha carga no se prevee que ocurra (Chen, 2014; Kelly 2003; Kelly and Takhirov 2007).

Existen numerosos modelos analíticos que predicen el comportamiento axial-lateral acoplado, así como la inestabilidad y pérdida de rigidez de los aisladores elastoméricos. Estos modelos han sido validados por resultados experimentales y de modelos numéricos de elementos finitos (Crisfield 1990; Faroughi 2015; Maureira et al, 2016). Algunos de ellos han sido incorporados en softwares de diseño de ingeniería. Sin embargo, todos estos modelos consideran como hipótesis fundamental que el dispositivo de aislamiento está restringido de rotar respecto del eje de flexión en ambos extremos. Esta hipótesis se basa en que la rigidez flexural de la subestructura y superestructura es mucho mayor que la correspondiente del aislador (Maureira et al, 2016). Esta premisa es válida en estructuras con muros de corte rígidos, pero pierde fidelidad cuando la estructura es más flexible como es el caso de pórticos de acero.

Actualmente se encuentra en desarrollo por parte de uno de los autores de esta investigación, un modelo analítico que caracteriza el comportamiento mecánico acoplado de aisladores elastoméricos considerando la flexibilidad de sus apoyos. El modelo considera la no-linealidad geométrica con interacción de cargas axial-lateral-flexural, incluida la no linealidad del elastómero. Para la validación del mencionado modelo se requieren resultados de modelos numéricos de elementos finitos además de información experimental.

Todo lo anterior motivó el desarrollo de esta tesis, en la cual se diseñó y construyó el equipamiento específico para realizar ensayos mecánicos a aisladores elastoméricos considerando diferentes grados de empotramiento y se realizaron ensayos experimentales para la validación del modelo mencionado. El estudio experimental realizado en la presente investigación contempla ensayos sobre un espécimen de aislador elastomérico con la finalidad de investigar la interacción de cargas axial-lateral-flexural y su efecto en la estabilidad del aislador, considerando distintos grados de empotramiento en un extremo del aislador.

Para la fabricación del prototipo se utilizó un polímero híper-elástico capaz de soportar una deformación normal de hasta un 230%, de acuerdo a los resultados de una muestra ensayada. Sobre la base de las propiedades mecánicas así determinadas, se determinaron las dimensiones del espécimen cumpliendo con las condiciones de carga y deformación que el equipo de ensayos disponible puede aplicar.

Para otorgar distintos niveles de empotramiento al espécimen, se diseñó y construyó un soporte rotulado donde se fija la base del aislador. En este soporte se puede controlar la capacidad de empotramiento proporcionada por medio de la instalación de resortes pretensados ubicados a igual distancia del pivote del apoyo. Al acercar los resortes al pivote la condición de empotramiento se acerca a una rótula, en tanto al alejarlos dicha condición se acerca a un empotramiento perfecto. Cuatro condiciones de empotramiento fueron consideradas en los análisis experimentales, correspondientes a rotulada (sin resortes) y con resortes a 15cm, 35cm y 55cm del pivote del apoyo basal del aislador.

La condición de apoyo con resortes a 55cm del pivote fue considerada como empotramiento virtualmente perfecto de referencia (100% empotrado), respecto de la cual se determinó el grado de empotramiento de las demás condiciones de apoyo basal. En cuanto a los niveles de empotramiento considerandos, estos fueron cuatro (0%, 7%, 40% y 100%), y para cada uno de ellos se estudió el comportamiento del aislador para 4 niveles de carga axial, siendo en total 16 los ensayos realizados.

Se aplicaron cuatro diferentes niveles de carga axial por medio de pesos conocidos instalados sobre la losa de carga. Para cada condición de empotramiento en la base y cada carga axial aplicada se sometió al espécimen a un ciclo de carga y descarga en corte imponiendo desplazamientos muy lentos escalonados de 5 mm cada uno.

Se utilizaron dos celdas de carga anulares modelo 41 de la marca Honeywell para medir la carga axial, una celda de carga tipo S modelo 125s de la marca Honeywell para medir la fuerza de corte en la base del espécimen. Además, se utilizó un sensor de desplazamiento laser modelo OWLF 4100 FS S1 de la marca Welotec para medir indirectamente la deformación angular alcanzada bajo las distintas solicitaciones impuestas. El desplazamiento lateral fue medido al aplicar el desplazamiento lateral en forma escalonada con pausas cada 5mm que corresponde al paso del husillo de bolas usado en la mesa vibradora.

El comportamiento global del sistema de aislación producto de la variación de los niveles de empotramiento, carga axial y deformación lateral fue registrado con la instrumentación digital antes mencionada, la cual fue procesada usando el software MATLAB. Se aplicaron filtros de frecuencia para eliminar información espuria para luego construir gráficas que muestran la interacción ocurrida entre carga axial y de corte para distintas condiciones de restricción flexural o de empotramiento de la base. Con los resultados procesados y graficados se pudo concluir respecto del comportamiento mecánico del espécimen, en el cual se registró pérdida de rigidez lateral del dispositivo producto del aumento de la carga axial, así como también debido a la pérdida de rigidez flexural del apoyo basal.

2. METODOLOGIA

2.1. Caracterización mecánica del elastómero

Para la determinación de las dimensiones del espécimen de aislador a ensayar fue necesario identificar las propiedades mecánicas del polímero utilizado para su confección. A través de un ensayo a tracción hasta la rotura de una muestra de elastómero (Figura 1) fue posible determinar la curva tensión-deformación de la goma (Figura 2). De esta curva fue posible identificar el módulo de elasticidad, el cual corresponde a la pendiente de la recta proyectada cuando la muestra alcanza una deformación del 150%.



Figura 1: Muestra de elastómero ensayado.

Se realizó un único ensayo donde se determinó que el módulo de elasticidad secante del elastómero al 150% de deformación unitaria es de $E \approx 20.3 \text{ kg/cm}^2$. Debido a las características del elastómero, el cual se considera como un material virtualmente incompresible con un elevado módulo de compresibilidad o de Bulk entre 15.000 y 20.000 kg/cm^2 , se puede asumir que su módulo de Poisson es $\nu \approx 0.5$ (Kelly, 2003). Debido a lo anterior, utilizando las relaciones constitutivas de materiales sólidos elásticos se puede determinar el módulo de corte del elastómero dado por.

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

De donde se obtiene el módulo de corte como $G \approx 6.77 \text{ kg/cm}^2$, valor utilizado posteriormente en la determinación de las dimensiones del aislador.

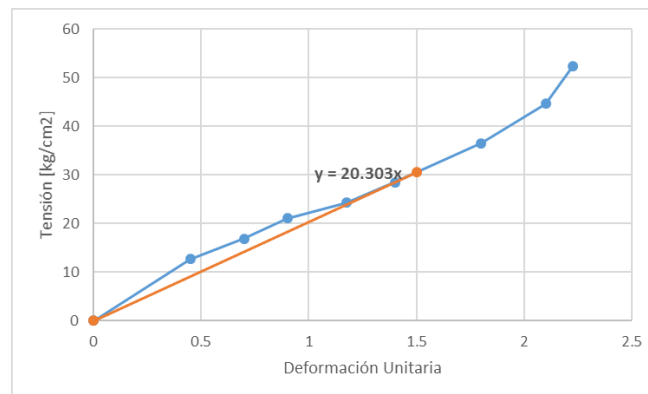


Figura 2: Curva Tensión-Deformación de elastómero utilizado para la confección del espécimen de aislador

Adicionalmente se pudo constatar que el elastómero utilizado es altamente elástico con muy baja capacidad de amortiguamiento, lo cual quedó evidenciado por la linealidad de la curva tensión-deformación.

2.2. Propiedades mecánicas de resortes de empotramiento basal

Con la finalidad de modificar el grado de empotramiento basal proporcionado por el marco de carga al espécimen de aislador ensayado, se incluyeron resortes en posiciones móviles que modifican la rigidez flexural de la viga de base (Figura 5, lado izquierdo). Dicho grado de empotramiento se incrementa al aumentar la

distancia de los resortes al pivote de la viga de base y al aumentar la cantidad y rigidez de los propios resortes. Las distancias corresponden a parámetros geométricos fácilmente medibles, asumiéndose valores 0, 15cm, 35cm y 55cm. Se utilizaron dos resortes a cada lado del pivote de la viga de base ubicados simétricamente. Por lo tanto, el único parámetro faltante para la determinación de la rigidez flexural del apoyo basal del aislador es la rigidez axial de los resortes utilizados.

Se utilizaron resortes que trabajan únicamente en tracción, por lo tanto, sólo fue necesario realizar ensayos de tracción a éstos para determinar su rigidez axial. De los resultados del ensayo se determinó la curva carga-elongación (Figura 3) la cual mostró que es requerido aproximadamente 9.2kg para que el resorte comience a elongarse, teniendo éste una rigidez de 28.9kg/cm.

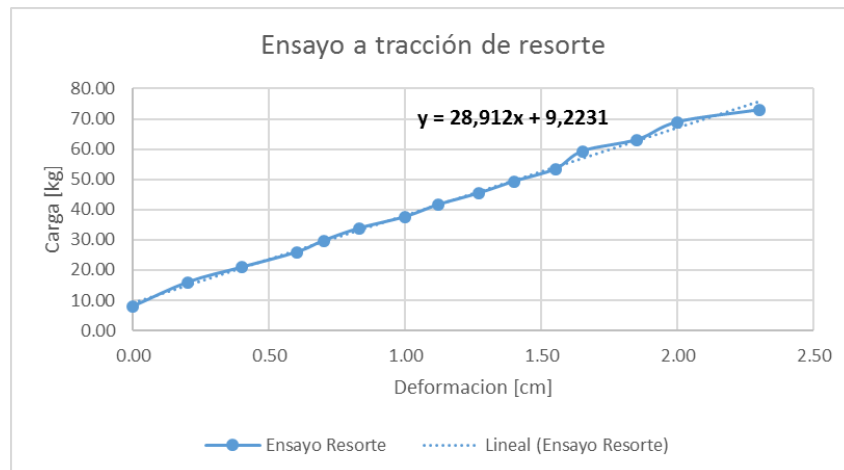


Figura 3: Curva Carga-Elongación de resorte usado para rigidizar apoyo basal.

2.3. Construcción de espécimen de aislador

Conocidas las propiedades elásticas del elastómero se realizó un diseño geométrico del mismo. En este diseño el grosor de las láminas de goma del aislador estaba preestablecido en 5mm, el cual corresponde al espesor de la hoja de goma de silicona usada. Para generar el confinamiento lateral de las láminas de elastómero se usaron láminas de aluminio cortadas desde huinchas de dicho material de ancho 84mm y grosor 1mm. Las dimensiones de las huinchas disponibles condicionó las láminas de aluminio a discos de 84mm de diámetro y 1mm de grosor. Las láminas de elastómero y aluminio fueron adheridas entre sí, en primera instancia, utilizando pegamento epóxico de dos fases de calidad industrial. Sin embargo, durante el primer estudio experimental se observó lo frágil de este adhesivo dado que las láminas de aluminio y goma se despegaron debido a que el epóxico utilizado no soportó ningún grado de deformación en la interacción aluminio-goma. Para el segundo estudio experimental se utilizó silicona industrial, dicho pegamento incrementa el grosor del paquete compuesto por aluminio y goma.

Teniendo en cuenta lo antes mencionado, el diseño del espécimen de aislador se limita a la determinación de la cantidad de láminas adheridas, esto es, su altura. La altura del aislador determina su estabilidad lateral ante cargas axiales, así como su rigidez lateral y axial. En aisladores donde el factor de forma, S , (Tabla 1) es inferior o aproximadamente igual a 10, el elastómero puede considerarse como material incompresible para efectos de la determinación de rigideces y estabilidad del aislador (Kelly, 1997). Se utilizaron en el diseño las ecuaciones descritas por dicho autor para aisladores elastoméricos considerando goma incompresible. Las propiedades mecánicas requeridas para el diseño son: módulo de elasticidad equivalente en compresión, E_c y módulo flexural efectivo, EI_{eff} , dados por Ecs. (2) y (3) respectivamente

$$E_c = 6GS^2 \quad (2)$$

$$EI_{eff} = \frac{1}{3}E_c I \frac{H}{H_r} \quad (3)$$

Donde la altura de goma H_r se determina en función del grosor de láminas de goma, t_r y cantidad de láminas N_r como:

$$H_r = N_r t_r \quad (4)$$

Considerado que el aislador comienza y termina con una lámina de goma, entonces éste contiene $N_r - 1$ láminas de aluminio las cuales incluido el de adhesivo tienen un grosor t_a . Con lo anterior, la altura total H del aislador está dado por:

$$H = N_r t_r + (N_r - 1) t_a \quad (5)$$

Considerando ecuaciones (2) a la (5) y tabla 1, la variable de diseño del aislador es el número de láminas de goma N_r , la cual queda condicionada por la carga axial, desplazamiento lateral y condición de estabilidad esperada para el aislador. La carga axial que puede ser aplicada al espécimen de aislador se encuentra entre 400 y 900 kg, siendo la primera el peso de la losa de carga y la segunda corresponde a la losa con la totalidad de pesos adicionales disponibles. En cuanto al desplazamiento lateral se buscó alcanzar un nivel de deformación de corte por desplazamiento lateral entre un 50% y 100%, esto es, igual desplazamiento lateral que la altura de goma total del espécimen.

Considerando lo anterior, se definen dos condiciones limitantes: estabilidad y deformación lateral, ambas condiciones relacionan la carga axial máxima que puede soportar el aislador con la cantidad de láminas de goma del mismo. Para lograr analizar el comportamiento mecánico del aislador hasta un punto cercano a la inestabilidad lateral se debe aplicar una carga axial máxima cercana al menor valor calculado de entre las condiciones límite definidas previamente. En consecuencia, la carga axial crítica determinada por las dos condiciones limitantes debe ser menor a la carga axial posible de aplicar por el equipo disponible.

En base a lo mencionado y a través de un proceso de iteración se definieron las características geométricas del espécimen de aislador, de acuerdo a lo indicado en Tabla 1.

Tabla 1: Ecuaciones mecánicas y dimensiones geométricas de espécimen de aislador

Parámetro Geométrico	Relación	Valor
Espesor lamina de goma (t_r)	-	5 [mm]
Altura láminas de goma (H_r)	-	8 [cm]
Radio de espécimen (R)	-	4,2 [cm]
Factor de forma (S)	$S = \frac{R}{2t_r}$	4,2
Inercia (I)	$I = \frac{\pi R^4}{4}$	244 [cm ⁴]
Cantidad láminas de goma (N_r)	$N_r = \frac{H_r}{t_r}$	16
Cantidad láminas de aluminio (N_a)	$N_a = N_r - 1$	15
Espesor láminas de aluminio (t_a)	-	1 [mm]
Cantidad capas de pegamento epóxico (N_e)	-	32
Espesor capa silicona industrial (t_e)	-	1 [mm]
Altura total espécimen (H)	$H = t_r N_r + t_a N_a + t_e N_e$	12,7 [cm]
Área transversal (A)	$A = \pi R^2$	55,4 [cm ²]

La condición de estabilidad queda definida por la carga crítica de pandeo (Ec. 6). Esta ecuación es una aproximación determinada del análisis de estabilidad del aislador de múltiples laminas (Kelly, 1997).

$$P_{cr} \approx \pm \sqrt{P_s P_E} \quad (6)$$

Donde:

$$P_s = \frac{GA}{H_r}; \quad P_E = \left(\frac{\pi^2}{H_r^2}\right) \frac{1}{3} E_c I \frac{H}{H_r} \quad (7)$$

En cuanto a la condición de deformación, se define por la carga axial pura que produce el máximo esfuerzo de corte que soporta una lámina de goma adherida a una lámina de aluminio (Ec. 8). Esta ecuación se obtuvo del análisis planteado por James M. Kelly en el texto Earthquake-Resistant Design with Rubber (p141-143).

$$P_a = 2\pi R t_r G S \Delta \gamma_{max} \quad (8)$$

Donde $\Delta \gamma_{max}$ es la deformación angular máxima

Finalmente, la carga axial admisible del espécimen. corresponde a la menor carga axial calculada para las condiciones de estabilidad (ver Tabla 2).

Tabla 2: Carga axial calculadas por condición de estabilidad y deformación.

Nombre	Nomenclatura	Magnitud (kg)
Carga crítica de Pandeo	P_{cr}	708
Carga axial pura	P_a	834

En base a las dimensiones determinadas se procedió a la construcción del espécimen de 16 láminas de goma y 15 láminas de aluminio las que fueron unidas usando silicona industrial (Figura 3).



Figura 4: Especimen de aislador

2.4. Diseño y construcción del marco de carga

Para poder realizar los ensayos experimentales que reprodujeran el comportamiento axial-lateral-flexural acoplado de los aisladores elastoméricos, fue necesario diseñar y construir un mecanismo que pudiera ser adaptado a la mesa vibradora y losa de carga disponibles. Se cuenta previamente con una plataforma de 1mx1m de superficie capaz de asumir desplazamientos en un rango de cm. Además, se cuenta con una losa de carga de 400kg que desliza verticalmente por rieles instalados en 4 columnas adosadas a la base de la plataforma antes mencionada. Se dispone también de aproximadamente 500kg en pesos de 42kg cada uno que pueden ser dispuestos sobre la losa de carga para aumentar su capacidad de carga axial. El mecanismo requerido o marco de carga, debía ser capaz de vincular al espécimen de aislador en forma rígida a la losa de carga y mediante un apoyo rotulado a la base deslizante. El marco de carga debía permitir modificar la rigidez de la unión basal del aislador desde la condición rotulada hasta una cercana al empotramiento perfecto. Para lo anterior se diseñó y construyó un mecanismo metálico con elementos muy rígidos similar a un balancín (Figura 4).

El marco de carga antes mencionado debe ser suficientemente resistente y rígido como para permitir la transferencia de las cargas al espécimen de aislador, sin sufrir deformaciones significativas, permitiendo que

éstas se concentren en el aislador. Además, debe facilitar la instalación de instrumentos de medición de carga y desplazamientos para la caracterización del comportamiento mecánico del aislador en ensayo cuasi-estático. La carga axial fue registrada por dos celdas de carga anulares de la marca Honeywell, modelo 41, instaladas en los puntos de apoyo del marco de carga con la mesa vibradora. El giro del apoyo basal fue medido en forma indirecta por medio de un sensor de desplazamiento laser marca Welotec, modelo OWLF 4100 FS S1, instalado en la mesa vibradora y que mide el desplazamiento vertical de un punto de la viga rotulada del apoyo basal. La fuerza de corte fue medida con una celda de carga tipo S marca Honeywell, modelo 125s, instalada rígidamente a la base vibradora y conectada al eje de la rótula del apoyo basal. Esta celda no solo permite medir el corte, sino que asegura que la parte del marco de carga que se encuentra por debajo de la rótula basal se mantenga vertical, logrando que las celdas de carga anulares midan siempre carga axial sin componente de corte. El desplazamiento lateral fue registrado en forma análoga por medio gradual de giros al husillo de bolas que permite el desplazamiento de la mesa a razón de 5mm por giro.

El espécimen de aislador se vincula con el soporte rotulado a través de una placa de 15 mm de espesor, ésta se encuentra soldada a un pasador de 20mm de diámetro el que se a su vez encuentra apoyado sobre un cojinete con rodamiento a cada extremo permitiendo el giro. La placa también se encuentra soldada a un perfil tubular 50x50x2 que trabaja como viga rígida, el cual tiene la función de otorgar distintos grados de empotramiento al sistema rotulado (0% a 100%) mediante resortes que se pueden ubicar a distinta distancia del eje de giro del aislador. A mayor sea la distancia a la cual se ubican los resortes del eje de giro del aislador mayor será el momento resistente que se genera (Figura 5) y, por lo tanto, mayor el grado de empotramiento basal. Además, la viga rígida de apoyo basal posee la función de permitir medir la deformación angular del aislador en la unión rotulada mediante un sensor laser ubicado en la base.



Figura 5: Soporte rotulado en dirección de análisis o marco de carga.

El aislador transmite la carga axial hacia los cojinetes que sostienen el eje del apoyo rotulado de la viga rígida bajo la base del aislador y estos a su vez la transmiten hacia la base donde se encuentran dos celdas de carga anulares, las cuales pueden medir hasta 2000lb en compresión o tracción. Estas celdas de carga son las encargadas de medir la carga axial que se le aplica al espécimen, a la cual debe restársele la carga de pretensado producida por los resortes que definen el empotramiento del sistema. Dichas celdas poseen la característica de encontrarse rotuladas en la dirección de análisis con la finalidad de que no interfieran en la medición del esfuerzo cortante (Figura 6).

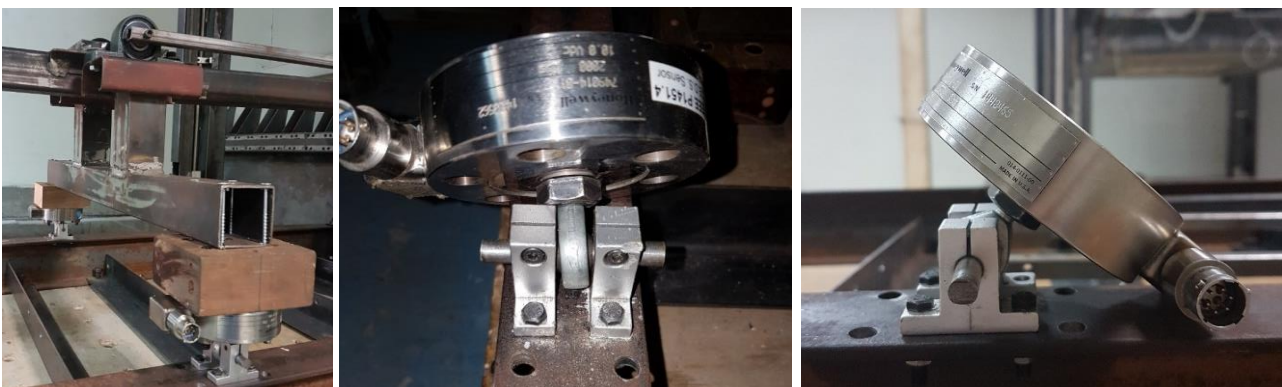


Figura 6: Mecanismo de unión rotulado unido a celda de carga que permite medir sólo carga axial.

El esfuerzo de corte aplicado al espécimen es transferido a través de dos perfiles tubulares de 15x15x2. Estos se unen en un extremo al eje de giro del aislador que se apoya en dos cojinetes y en el otro extremo a un perfil tubular 30x30x2, que se conecta a una celda de carga honeywell modelo S125 con la capacidad de medir hasta 500 kg en compresión o tracción, la cual se encuentra fija a la mesa vibradora (Figura 7).

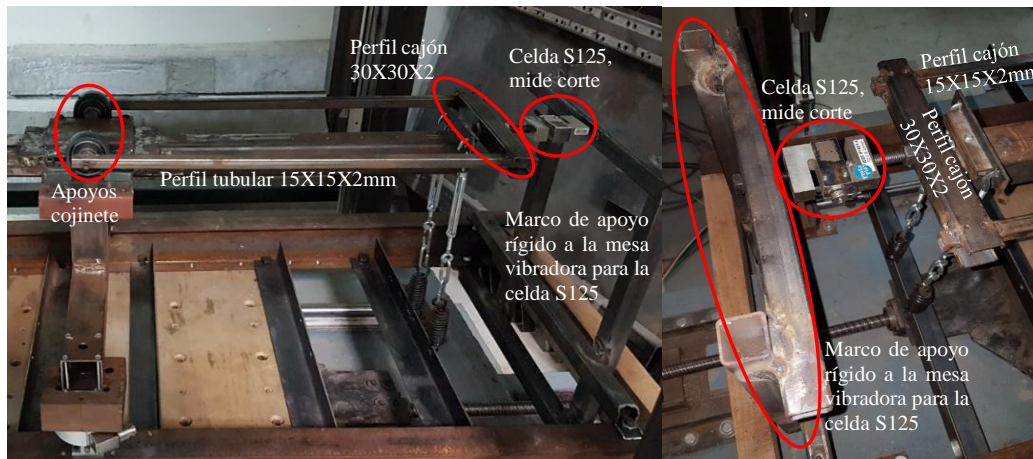


Figura 7: Mecanismo de unión que permite medir carga de corte.

Al ser un ensayo cuasi estático la deformación horizontal que es impuesta por los giros que del husillo de la mesa vibradora debe ser, debe ser aplicados muy lentamente (Figura 8).



Figura 8: Husillo de mesa vibradora que permite el desplazamiento horizontal a razón de 5mm/vuelta.

El soporte superior del espécimen de aislador, que otorga la característica de empotramiento, se conforma por una placa de 15 mm de espesor soldada a un perfil tubular 50x50x2 que a su vez se encuentra anclado a la losa de hormigón (Ver Figura 9).



Figura 9: Soporte superior que caracteriza unión empotrada entre aislador y losa de carga.

Para proporcionar rigidez flexural variable al apoyo basal del aislador, se dispusieron dos pares de resortes en forma simétrica respecto del plano vertical que pasa por el pivote de la viga basal. Se utilizaron resortes de



tracción con uniones que únicamente pueden transmitir dicha carga, pero se desconectan cuando la carga es de compresión. Debido a lo anterior, fue requerido que los resortes de empotramiento basal nunca fuesen sometidos a compresión, ya que perderían por completo su rigidez dadas las condiciones de conexión de los mismos al marco de carga.

Para lograr lo anterior se aplicaron tensiones iniciales a dichos resortes por medio de tensores, procurando que la pre-tensión fuese mayor que el máximo decremento de carga esperada en cada resorte. Para calcular la magnitud de la carga de pre-tensión que debía ser aplicada a los resortes, fue necesario determinar la máxima pérdida de elongación a la cual podrían estar sometidos éstos en las condiciones más extremas de los ensayos. Esta condición corresponde a aquella en la cual la viga de base alcanza su máximo giro, el cual está dado por la ubicación de los resortes que conduce al menor empotramiento. Aun cuando dicha configuración de resortes de empotramiento no conduce a un apoyo rotulado, se asumió conservadoramente que así es, para poder determinar el giro correspondiente. Dicho giro junto con la posición del resorte a 15cm del pivote de la viga de base permitió determinar la elongación requerida para los resortes de empotramiento. Esta elongación requerida es menor en la medida de que los resortes se alejan del pivote de la viga de base y, por lo tanto, el apoyo se torna más rígido flexuralmente. La elongación aplicada a los resortes para cada condición de empotramiento; 40, 70 y 100%, fue de 0.78 cm, 0.60 cm y 0.54 cm respectivamente.

Para determinar el giro relativo máximo del espécimen estudiado en condición empotrado-rotulado se determinó el giro relativo de cada lámina de goma en dicha condición. Dichos giros fueron determinados asumiendo desplazamiento lateral del aislador igual a la altura de goma y carga axial nula. En dicha condición la fuerza de corte aplicada se puede estimar conservadoramente como $V=(GA/H_r) \cdot u$, donde G es el módulo de corte de la goma, A es el área de la sección transversal del aislador, H_r es la altura de goma del mismo y u el desplazamiento lateral impuesto. Considerando lo anterior, la distribución del momento flector interno es lineal, siendo nulo en la base y máximo en la cúspide. Se determinó el momento flector interno en el plano medio de cada lámina de goma y utilizando la Ec. 9 (Kelly, 1997; Maureira et al, 2016) se determinó el giro relativo de cada lámina de goma.

$$\Delta\alpha = \frac{t_r}{EI_{eff}} M_n \quad (9)$$

Luego, el giro relativo máximo del aislador corresponde a la suma de los giros relativos de cada lámina de goma, como se muestra en Tabla 3.

Tabla 3: Deformación angular relativa máxima esperada del espécimen en condición rotulada.

Deformación angular				
N° Lamina	Hi [cm]	M [kg cm]	ángulo [rad]	ángulo [°]
Sup.	9.5	4600	-	-
16	9.25	4479	0.0323	1.9
15	8.65	4188	0.0302	1.7
14	8.05	3898	0.0281	1.6
13	7.45	3607	0.0260	1.5
12	6.85	3317	0.0239	1.4
11	6.25	3026	0.0218	1.3
10	5.65	2736	0.0197	1.1
9	5.05	2445	0.0176	1.0
8	4.45	2155	0.0156	0.9
7	3.85	1864	0.0135	0.8
6	3.25	1574	0.0114	0.7
5	2.65	1283	0.0093	0.5
4	2.05	993	0.0072	0.4
3	1.45	702	0.0051	0.3
2	0.85	412	0.0030	0.2
1	0.25	121	0.0009	0.1
Base	0	0	0	0
Giro aislador [°]				15.2

Para determinar el grado de empotramiento basal proporcionado por los resortes, se consideró que éste es del 0% cuando no se instalan resortes y tiende al 100% cuando los resortes se instalan en la posición más alejada posible del pivote. Para determinar el grado de empotramiento relativo correspondiente a cada posición del resorte $d=\alpha L$ con $0 \leq \alpha \leq 1$, se determinó la rigidez flexural del apoyo inferior del marco de carga a partir de un análisis estático de la situación deformada del aislador la cual se presenta en Figura 10.

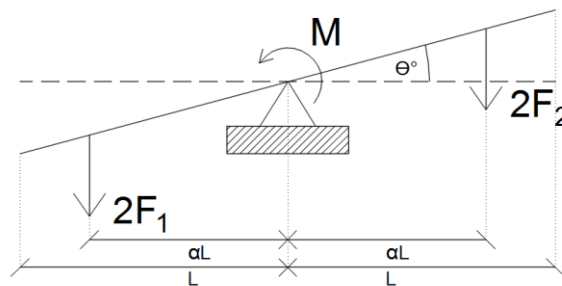


Figura 10: DCL soporte rotulado o apoyo basal del aislador.

En el DCL de figura 10, las fuerzas, momento y rigidez están dadas por las ecuaciones (10) a la (13).

$$F_0 = (K_r \cdot \theta_{m\acute{a}x}) / (\alpha L) \tag{10}$$

$$F_{1,2} = F_0 \mp \alpha L \cdot \theta \cdot 2K_r \quad (11)$$

$$M = 2F_0 \cdot 2\alpha L = K_\theta \cdot \theta \quad (12)$$

$$K_\theta = 4K_r \alpha^2 L^2 \quad (13)$$

En los ensayos experimentales se consideraron cuatro condiciones de empotramiento, condición sin resortes de empotramiento y cuando estos se ubican a distancias al pivote $d=\alpha L$ de 15cm, 35cm y 55cm. Lo anterior corresponde a grados de empotramiento relativo de 0%, 7%, 40%, 100% respectivamente desde 0%, el cual corresponde a la condición rotulada (sin resortes) y 100% la que corresponde a la ubicación de resortes lo más alejada posible del pivote.

La relación de empotramiento se determinó a partir de la rigidez flexural que aportan los resortes ubicados en el soporte inferior del espécimen. La rigidez flexural del sistema es directamente proporcional al cuadrado de la distancia horizontal a la que se ubican los resortes respecto al punto pivote (Figura 11). Esto se debe a que para un mismo giro θ , a mayor distancia $d=\alpha L$, mayor el estiramiento o acortamiento de los resortes y, a mayor giro θ con igual distancia $d=\alpha L$, mayor es dicho estiramiento o acortamiento, razón por la cual la distancia d tiene influencia cuadrática en la rigidez K_θ .

En la siguiente Tabla 4 se presentan los cálculos de rigidez flexural de la base para distintas distancias $d=\alpha L$ de los resortes al pivote en cada condición de empotramiento considerada en los análisis. Dicha relación también se muestra en forma gráfica en Figura 11.

Tabla 4: Distancia de ubicación de los resortes desde punto pivote y su rigidez flexural correspondiente.

Longitud αL [cm]	Rigidez flex. Max K_θ [kg/cm]
0	0
15	26021
35	141669
55	349835

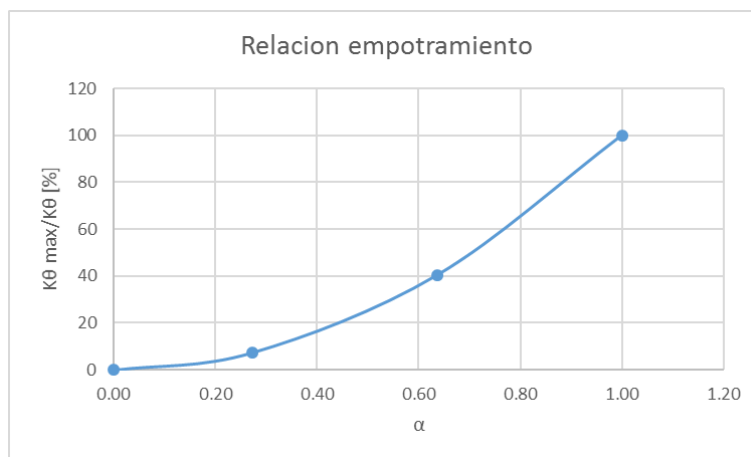


Figura 11: Relación de grados de empotramiento considerados.

El porcentaje de empotramiento se obtuvo de forma relativa a partir de una relación entre la rigidez flexural máxima y la rigidez flexural aportada por la condición que se desea analizar. Se consideró como rigidez flexural máxima a aquella proporcionada por la condición donde los resortes se encuentran más alejados del eje de giro del sistema, esto es, $d=L=55\text{cm}$.

Cuatro estados de carga axial fueron considerados para cada una de las cuatro condiciones de empotramiento. El primer estado de carga axial corresponde a la carga proporcionada solo por la losa de hormigón que posee la mesa vibradora, la cual es de aproximadamente 400kg. El segundo, tercer y cuarto estado de carga axial

correspondió a la adición consecutiva de 3, 6 y 8 bloques de hormigón de peso aproximado 42 kg cada uno. (Figura 12).



Figura 12: Losa de mesa vibradora y bloques de hormigón que proporcionan la carga axial.

En cuanto a las deformaciones laterales impuestas, si bien se esperaba alcanzar un desplazamiento lateral cercano a la altura de goma del aislador, esta fue definida durante la ejecución de cada ensayo. Se observó el comportamiento que el espécimen mostraba en los registros de carga axial y corte evitando llegar a la condición de inestabilidad en la cual la rigidez lateral tiende a cero. No se aplicó la misma deformación lateral máxima a todos los ensayos realizados, esto con el objeto de no inducir el fallo del espécimen prematuramente. Esto para poder realizar la mayor cantidad de ensayos sin perjudicar el comportamiento del espécimen como consecuencia de una sobre exigencia de las capacidades mecánicas que posee.

3. PROCESAMIENTO DE DATOS, RESULTADOS Y FUENTES DE ERROR

Los datos adquiridos por medio del sistema digital normalmente están contaminados por vibraciones ambientales y señales electromagnéticas presentes debido a la red eléctrica, entre otros factores. Para poder utilizar los resultados de mediciones experimentales fue necesario aplicar filtros de frecuencia, particularmente a los datos de las celdas de carga las cuales suelen tener contaminación de magnitud comparable al dato de interés medido. Estos filtros de frecuencia se aplican luego de transformar las señales medidas al dominio de frecuencia utilizando la transformada discreta de Fourier de MATLAB. En el dominio de frecuencia se puede discriminar el aporte de cada rango de frecuencias a la señal en cuestión, pudiendo eliminar los contenidos de frecuencia que son ajenos a los esperados en los ensayos. Particularmente en los ensayos realizados, debido a que se trata de cargas y desplazamientos aplicados muy lentamente (cuasi-estáticos), las frecuencias propias de los datos medidos son comúnmente bajas. De esta forma, todo contenido de frecuencia alto corresponde señal espuria que es ajena a lo medido, pudiendo corresponder a vibraciones ambientales, ruido instrumental o ruido electromagnético. Una vez filtrada la señal medida se retorna al dominio del tiempo usando la transformada inversa discreta de Fourier, obteniendo datos más puros y representativos de lo medido.

Los ensayos se realizaron con una duración considerablemente larga de varios minutos cada uno, con mediciones virtualmente continuas de giro basal, carga axial y fuerza de corte. Sin embargo, el desplazamiento lateral se aplicó de forma escalonada mediante giros sucesivos al husillo de bolas que mueve la mesa vibradora. Por lo anterior, en el procesamiento de los datos para graficar, cada punto queda definido por cada condición de desplazamiento impuesto escalonado a paso de 5mm cada uno. De este modo, la cantidad de puntos de cada gráfico mostrado en Figura 14 se reduce significativamente respecto de la cantidad de datos disponibles. No obstante lo anterior implica una gran cantidad de tiempo empleado en el procesamiento de datos.

Durante la ejecución de los ensayos es posible observar el comportamiento axial-lateral acoplado del sistema de aislación sísmica ensayado, considerando cuatro grados de empotramiento. Se aprecia claramente como el grado de empotramiento afecta en la deformación flexural que adquiere cada sistema a medida que se le aplica un desplazamiento lateral (Figura 13). Dicha deformación influye en el acoplamiento axial lateral del aislador ya que al cambiar la condición de empotramiento basal se altera la distribución de momento interno con lo que cambia la inclinación del plano medio de cada lámina de goma la cual es causante del comportamiento

acoplado (Maureira et al, 2016). Debido a lo anterior, se puede decir que el aislador elastomérico tiene un comportamiento axial-lateral-flexural acoplado, aludiendo a que la interacción entre carga axial y desplazamiento lateral se ve influenciada por el grado de empotramiento flexural.

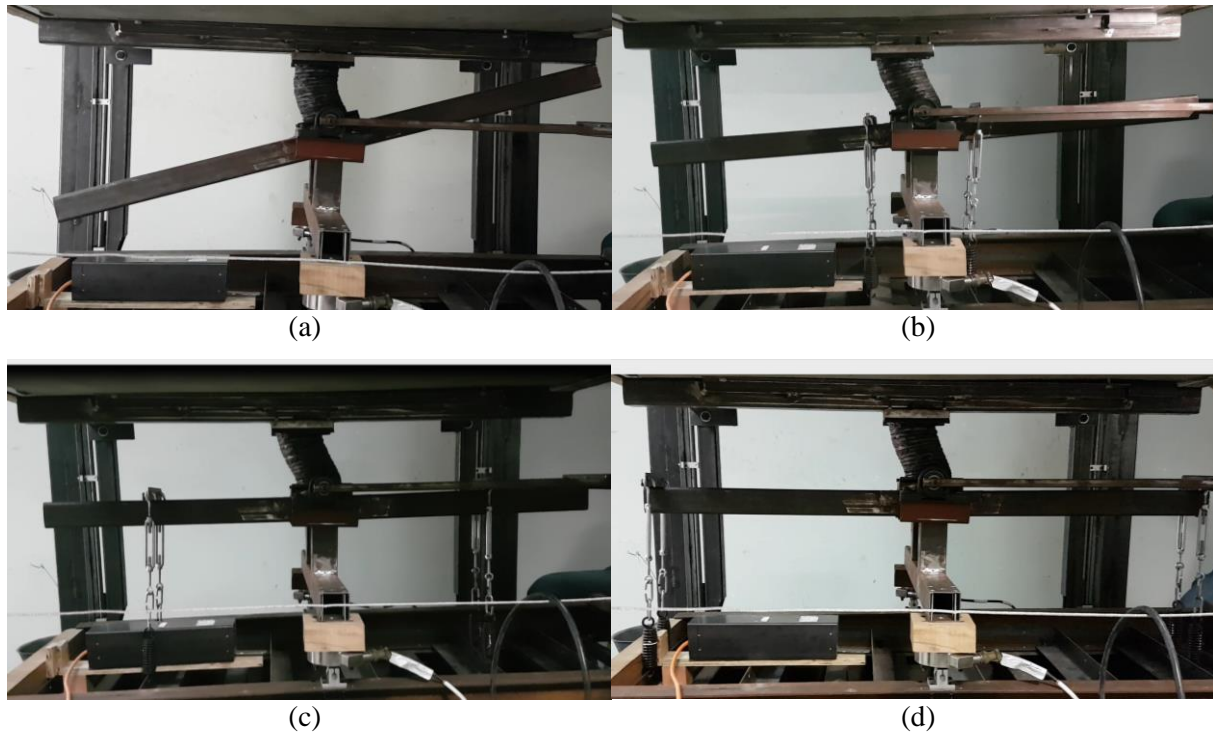


Figura 13: Deformación angular máxima para distintas condiciones de empotramiento. (a)Empotramiento 0%. (b)Empotramiento 7%. (c)Empotramiento 40%. (d)Empotramiento 100%.

Se puede observar que en ausencia de empotramiento de la base el giro relativo alcanzado es significativamente grande (13.8° ó 0.24 rad) para un nivel de desplazamiento lateral de 2 cm, que es bastante menor a la altura de goma del aislador. Además, el máximo grado de empotramiento basal proporcionado sí conduce a condición en la cual el giro relativo de los extremos del aislador tiende a cero (Figura 13(d)). Lo anterior permite inferir que las condiciones de apoyo analizadas son suficientes como para caracterizar el efecto del grado de empotramiento del aislador en su respuesta mecánica, al considerar un amplio rango de condiciones que van desde rotulado hasta virtualmente empotrado.

La limitante durante la ejecución del ensayo en condición de rótula perfecta en la base fue el encuentro entre el soporte inferior rotulado con el soporte superior empotrado, como se observa en la Figura 13(a). En las demás condiciones de empotramiento no se registraron limitantes de contorno en la ejecución de los ensayos.

En la Figura 14 se observan los resultados que relacionan la carga de corte con el desplazamiento lateral impuesto, para diferentes cargas axiales aplicadas y distintos grados de empotramiento basal.

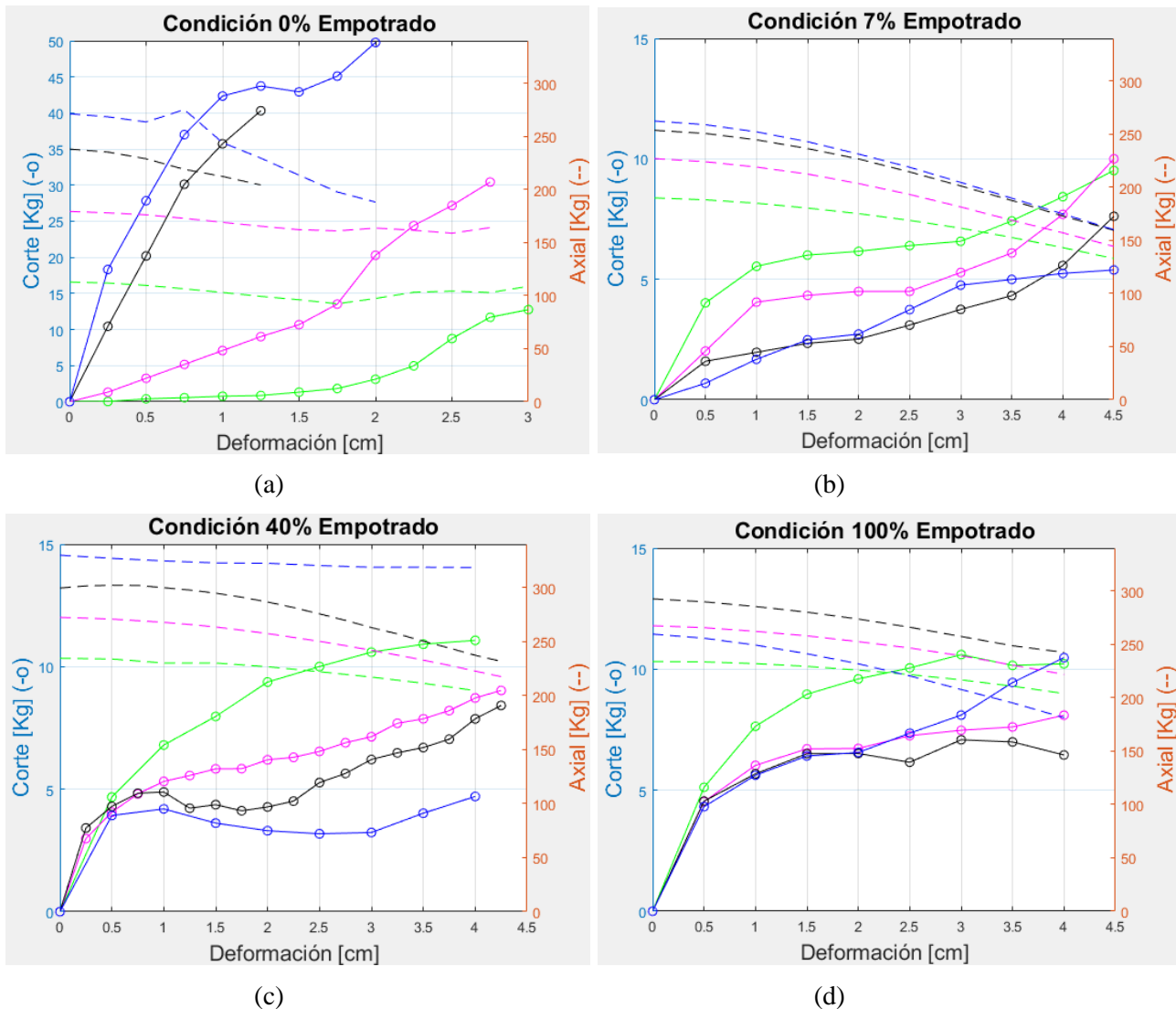


Figura 14: Curvas de fuerza de Corte versus Desplazamiento y carga Axial para diferentes condiciones de apoyo. (a) Empotramiento 0%. (b) Empotramiento 7%. (c) Empotramiento 40%. (d) Empotramiento 100%.

Si bien la carga axial corresponde al efecto de pesos constantes aplicados en cada curva de las gráficas 14(a) a la 14(d), esta carga no se mantuvo constante en los ensayos. Esto no corresponde al resultado esperado, pero se asume correcto ya que fue medida en forma directa. Se infiere que dicha carga no se mantuvo constante debido a que al someterse al aislador a desplazamiento lateral este también sufre desplazamiento vertical. Lo anterior hace que la fuerza axial aplicada por la losa de carga al aislador se vea alterada por el roce debido al deslizamiento de esta última tanto en los rieles como en las poleas y cables que la sostienen, particularmente si éstos se traban (Figura 16). Esto último haría que la carga axial efectivamente transmitida se reduzca conforme se incrementa el desplazamiento lateral impuesto.

A partir de los resultados mostrados en Figura 14 se observa que la fuerza de corte medida se incrementa a medida que aumenta el desplazamiento lateral impuesto. Sin embargo, la tasa de incremento de dicha fuerza de corte en proporción al incremento del desplazamiento lateral decrece conforme aumenta el desplazamiento lateral. Esto es consistente con lo obtenido en otros ensayos experimentales y modelos matemáticos particularmente para el caso empotrado (Chang 2002; He 2012). En todos los casos se observa que la tasa de incremento de la fuerza de corte con el incremento del desplazamiento lateral (rigidez lateral tangente) se reduce con el incremento de la carga axial aplicada en todos los casos de empotramiento basal. Esto demuestra el efecto de reducción de la rigidez lateral por presencia de carga axial o comportamiento axial-lateral acoplado. Este efecto acoplado se observa en todas las condiciones de apoyo basal, sin embargo, la rigidez lateral se ve reducida debido a la pérdida de rigidez flexural del apoyo basal del aislador. La reducción de la

rigidez lateral del aislador es significativa al comparar los resultados con base empotrada y base con 7% de empotramiento, especialmente en los casos con carga axial alta, llegándose a reducciones de aproximadamente 50% o más.

Las mediciones de fuerza cortante mostradas en Figura 14 no son consistentes con las predicciones teóricas. Las fuerzas de corte alcanzadas en los ensayos con empotramiento basal no nulo son muy inferiores a las predicciones, siendo un orden de magnitud menor. Situación anómala se observa al comparar los resultados de Figura 14(a) con Figuras 14(b) a la 14(d). Se observa en Figura 14(a) rigideces laterales bastante mayores a las observadas en las demás figuras. Esto hace pensar que la inclusión de los resortes de empotramiento tendría algo que ver con la inconsistencia de los resultados.

Además, en la Figura 14(a) se aprecia incremento de la rigidez lateral con el aumento de la carga axial, lo cual es opuesto a lo predicho por modelos numéricos y otros resultados experimentales. Debido a que únicamente los resultados mostrados figura 14(a) presentan esta anomalía, se puede inferir que la falta de resortes de empotramiento basal podría tener alguna relación con dicha anomalía.

El adhesivo utilizado para la unión entre láminas de goma y aluminio fue silicona industrial. La flexibilidad que proporcionó al espécimen esta silicona pudo no haber sido despreciable. Esto sumado al incremento en altura que proporcionó al espécimen pudo haber producido una disminución significativa en la rigidez lateral del aislador. Además, se observó el desprendimiento de la goma a nivel basal del espécimen dado que no resistió el momento flector generado durante la condición de empotramiento de un 100% (Figura 15). Esto pudo incidir en el registro de las últimas cargas de corte medidas, conduciendo a menores cargas de corte.



Figura 15: Desprendimiento de aislador a soporte inferior para la condición de empotramiento de 100%.

Posterior al ensayo y dada la inconsistencia de los resultados obtenidos con los resultados esperados se procedió a revisar el mecanismo de carga que forma parte de la mesa vibradora. Se observó que uno de los cables principales que sostienen la losa de carga que transmite la carga axial hacia el espécimen de aislador se encontraba fuera de su polea (Figura 16). Esto pudo haber producido una fuerza de roce considerable la cual se opone al desplazamiento de la losa de carga. Lo anterior pudo tener por consecuencia una disminución en la carga axial efectivamente aplicado al aislador cuando éste sufre deformación vertical debido al desplazamiento lateral impuesto.

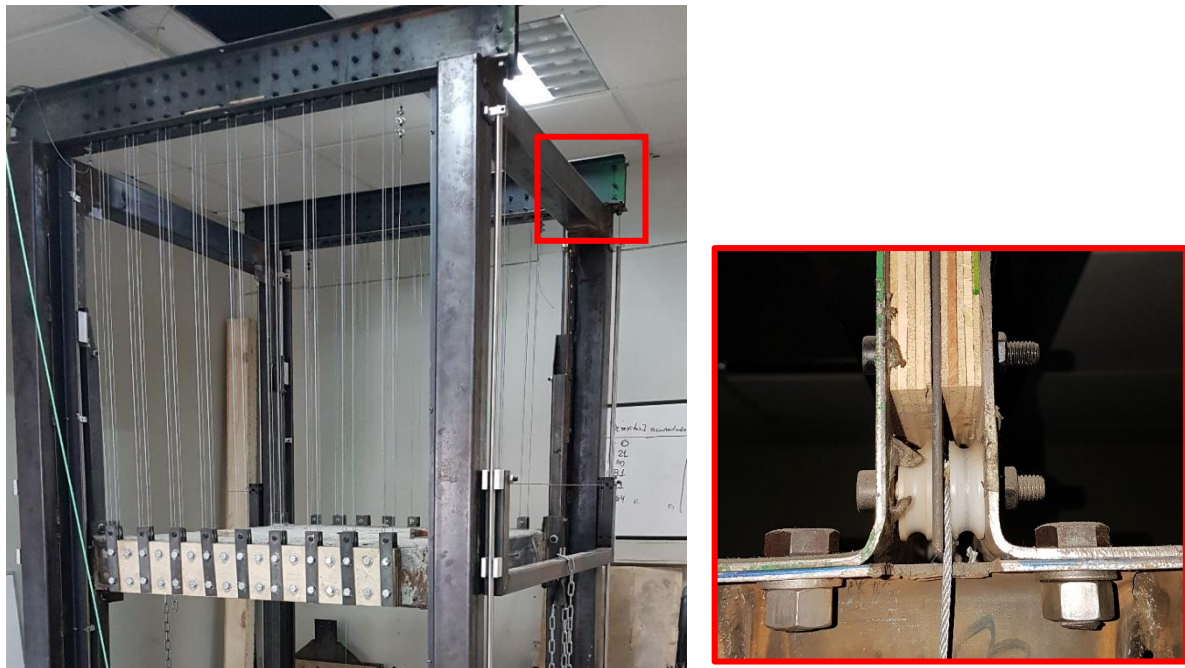


Figura 16: Cable que sostiene carga axial apretado entre las poleas.

Como consecuencia de haber realizado los ensayos de forma continua entre uno y otro se identificaron algunos inconvenientes. Uno de ellos es el esfuerzo de corte residual producto de comportamiento plástico de la goma, ya que al recuperar la condición de desplazamiento lateral nulo no necesariamente la fuerza de corte vuelve a ser nula. Lo anterior se evidenció ya que en dos oportunidades fue necesario desplazar la mesa vibradora una distancia mayor a la distancia de deformación aplicada para que el espécimen volviese a su condición no deformada y sin carga residual para realizar el siguiente ensayo. Para evitar los problemas antes mencionados se recomienda descargar el espécimen entre ensayos devolviéndolo a su equilibrio y condición inicial para de esta forma asegurar la estabilidad del espécimen previo al ensayo.

4. CONCLUSIONES

De los resultados de los análisis experimentales realizados, a excepción de los ensayos con apoyo basal rotulado, se pudo constatar que el incremento de carga axial conduce a reducción en la rigidez lateral. Igual tendencia se observó en la rigidez lateral al aumentar el desplazamiento lateral y reducir el grado de empotramiento de la base. Todo lo anterior permite concluir que la condición de acoplamiento de cargas axial y lateral se presenta tanto cuando el aislador está empotrado en ambos extremos como cuando uno de dichos extremos es flexuralmente flexible.

Se detectaron inconsistencias en los resultados de ensayos del espécimen con condición de apoyo basal rotulado. En este caso el incremento de carga axial condujo a incrementos en la rigidez lateral del aislador, lo cual es contrario a lo predicho por el modelo numérico que se encuentra en desarrollo por uno de los autores de esta investigación. Debido a que la única diferencia en montaje y ejecución entre éste ensayo y aquellos con algún grado de empotramiento basal es la presencia de resortes de empotramiento, se infiere que éstos tendrían efecto en la inconsistencia de las mediciones. Las razones del porqué de lo anterior no son claras y sólo se puede inferir respecto de esto. Una posible razón es que, al no estar vinculada a la viga de apoyo basal del aislador a la mesa vibradora mediante los resortes de empotramiento, la condición de estabilidad del sistema de soporte de dicha viga resulta ser inestable. Es razonable pensar que el incremento de la carga axial condujera a inestabilidad lateral de dicho mecanismo de apoyo (Figura 17), el cual sería equilibrado con un incremento de la carga lateral registrada como corte en el aislador por la celda de carga modelo 125s.

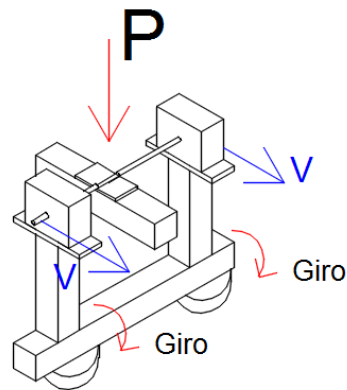


Figura 17: Inestabilidad lateral producto de la carga axial P, lo que genera cargas de corte V.

En las Figuras 14(b) a la 14(d), sí se observó consistencia en la reducción de la rigidez lateral debido al incremento de carga axial, aumento del desplazamiento lateral y reducción de la rigidez flexural de la base. Sin embargo, las magnitudes de fuerza de corte medidas son un orden de magnitud menor al predicho por las ecuaciones teóricas, esto pudo ser causado por una desalineación vertical en los puntos de unión de los resortes. Se sugiere una posible solución para el problema anterior verificar que los resortes se encuentren alineados verticalmente, es decir, la distancia horizontal desde el punto de pivote al extremo de unión en la viga rotulada y la distancia horizontal proyectada desde el punto de pivote a la unión con la mesa vibradora sea la misma, dado que a causa de una desalineación vertical en los resortes se genera un incremento en la componente horizontal de la fuerza de tensión en los mismos, lo que contrarresta las cargas de corte medidas por la celda de carga (Honeywell modelo 125s). En la Figura 18 se presenta un DCL del cual se realiza un análisis lineal de la condición deformada con una desalineación en los resortes:

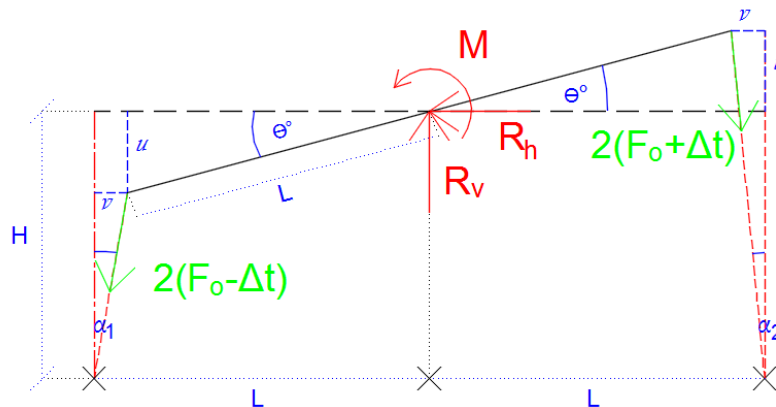


Figura 18: DCL soporte rotulado con desalineación vertical en los resortes.

En el DCL de figura 18, los desplazamientos, momento y fuerzas están dadas por las ecuaciones (14) a la (19).

$$u = L \cdot \theta \quad (14)$$

$$v = \frac{1}{2} L \cdot \theta^2 \quad (15)$$

$$\Delta t = K_r \cdot L \cdot \theta \quad (16)$$

$$M = 2\Delta t \cdot (L - v) = 2K_r \cdot L \cdot \theta \cdot L \cdot \left(1 - \frac{1}{2}\theta^2\right) \quad (17)$$

$$R_v \approx 2F_o \quad (18)$$



$$R_h = 2(F_0 + \Delta t) \sin \alpha_2 - 2(F_0 - \Delta t) \sin \alpha_1 \approx \frac{2F_0 \cdot L \cdot \theta^2}{H - L \cdot \theta} \quad (19)$$

En el análisis lineal del sistema con una desalineación vertical en los resortes, se observa que la componente horizontal para la condición límite (R_h) podría no ser despreciable respecto de las cargas de corte actuantes y registradas por la celda de carga Honeywell modelo 125s, cabe mencionar que se entiende como condición límite aquella en que debido a la deformación angular las tensiones en los resortes son mínimas y máximas según la ubicación de cada uno, es decir, para el caso de la Figura 18 la condición límite se alcanza cuando la tensión del resorte de la izquierda producto de la deformación angular se aproxima a cero ($F_0 - \Delta t \approx 0$) y la tensión de los resortes de la derecha producto de la deformación angular se incrementa al doble de la tensión de pretensado ($F_0 + \Delta t = 2F_0$).

Durante este experimento la instalación de los resortes se realizó sin tener estabilidad vertical en el sistema (aportado por el mecanismo que mide cargas de corte), en consecuencia, al montar el sistema los resortes pudieron haber quedado desalineados verticalmente produciendo la reducción en los esfuerzos de corte para los ensayos que los que se consideraron algún grado de empotramiento. Por lo tanto, con la finalidad de asegurar la correcta disposición de los resortes se sugiere estabilizar verticalmente el sistema para ubicar e instalar de forma correcta los resortes que otorgan distintos grados de empotramiento.

Los resultados obtenidos del análisis experimental realizado son insuficientes en cantidad y en calidad, por lo que no permitirían la validación del modelo numérico en desarrollo el cual incluye la flexibilidad flexural de apoyos del aislador. Sin embargo, del análisis de los resultados han surgido varias recomendaciones y sugerencias de modificación del marco de carga y protocolos experimentales tendientes a mejorar la calidad de los resultados. Se recomienda repetir los ensayos experimentales considerando las mejoras propuestas en esta tesis, considerando varios especímenes de aislador con diferentes alturas y grosores de goma y no tan sólo uno.

5. SIMBOLOGIA

- E : Módulo de elasticidad secante del elastómero.
- G : Módulo de corte del elastómero.
- ν : Módulo de Poisson.
- E_c : Módulo de compresión del elastómero.
- EI_{eff} : Módulo flexural efectivo.
- t_r : Espesor de lámina del elastómero.
- H_r : Altura total de las láminas de elastómero.
- R : Radio del espécimen de aislador.
- S : Factor de forma del espécimen.
- I : Inercia del espécimen.
- N_r : Cantidad de láminas de elastómero.
- N_a : Cantidad de láminas de aluminio.
- t_a : Espesor de cada lamina de aluminio.
- N_e : Cantidad de capas de pegamento epóxico.
- t_e : Espesor de cada capa de pegamento epóxico.
- H : Altura total del espécimen.
- A : Área transversal del espécimen.
- P_E : Carga de pandeo de Euler.



- P_{cr} : Carga crítica de pandeo.
- P_a : Carga axial pura.
- $\Delta\gamma_{max}$: Deformación angular máxima de la lámina de elastómero.
- $\Delta\alpha$: Giro relativo de cada lamina de elastómero para la condición rotulada.
- L : Distancia máxima entre la ubicación de los resortes y el punto pivote.
- F_0 : Fuerza de pretensado de los resortes.
- $F_{1,2}$: Fuerza producida por la deformación de los resortes.
- M : Momento producido en el soporte inferior del aislador a causa del giro por la condición deformada.
- K_r : Rigidez de cada resorte.
- K_θ : Rigidez flexural.

6. REFERENCIAS

- Buckle, I., Nagarajaiah, S., & Ferrell, K.** (2002). Stability of elastomeric isolation bearings: Experimental study. *Journal of Structural Engineering*, 128(1), 3-11. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:1(3).
- Chang, C. H.** (2002). Modeling of laminated rubber bearings using an analytical stiffness matrix. *International journal of solids and structures*, 39(24), 6055-6078. doi:10.1016/S0020-7683(02)00471-7.
- Chen, S. C., Tian, X. K., Yan, W. M., & Kim, K. S.** (2014). Modeling and analysis of laminated rubber bearings under axial tensile loading. *Materials and structures*, 47(6), 987-997. doi:10.1617/s11527-013-0108-3.
- Chimamphant, S., & Kasai, K.** (2016). Comparative response and performance of base-isolated and fixed-base structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 45(1), 5-27. doi:10.1002/eqe.2612.
- Crisfield, M. A.** (1990). A consistent co-rotational formulation for non-linear, three-dimensional, beam-elements. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 81(2), 131-150. doi:10.1016/0045-7825(90)90106-V.
- Faroughi, S.** (2015). Dynamic Nonlinear Co-rotational Formulation for Two-dimensional Continua. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 12(3), 477-491. doi:10.1590/1679-78251185.
- Forcellini, D., & Kelly, J. M.** (2013). Analysis of the large deformation stability of elastomeric bearings. *Journal of Engineering Mechanics*, 140(6), 04014036. doi:10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000729.
- He, W. F., Liu, W. G., Yang, Q. R., & Feng, D. M.** (2012). Nonlinear rotation and shear stiffness theory and experiment research on rubber isolators. *Journal of Engineering Mechanics*, 138(5), 441-449. doi:10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000350.
- Hwang, J. S., Wu, J. D., Pan, T. C., & Yang, G.** (2002). A mathematical hysteretic model for elastomeric isolation bearings. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 31(4), 771-789.
- Kelly, J. M.** (1997). *Earthquake-resistant design with rubber* (Second ed.). London: Springer. doi:10.1007/978-1-4471-0971-6.
- Kelly, J. M.** (2003). Tension buckling in multilayer elastomeric bearings. *Journal of Engineering Mechanics*, 129(12), 1363-1368. doi:10.1061/(ASCE)0733-9399(2003)129:12(1363).
- Kelly, J. M. and Takhirov, S. M.** (2007). Tension buckling in multilayer elastomeric isolation bearings. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2(8), 1591-1605. doi:10.2140/jomms.2007.2.1591.
- Koh, C. G., & Kelly, J. M.** (1988). A simple mechanical model for elastomeric bearings used in base isolation. *International journal of mechanical sciences*, 30(12), 933-943.



Maureira, N., de la Llera, J., Oyarzo, C., & Miranda, S. (2017). A nonlinear model for multilayered rubber isolators based on a co-rotational formulation. *Engineering Structures*, 131, 1-13. doi:10.1016/j.engstruct.2016.09.055.

Nagarajaiah, S. and Ferrell, K. (1999). Stability of Elastomeric Seismic Isolation Bearings. *Journal of Structural Engineering*, 125(9), 946-954.

Ryan, K. L., Kelly, J. M., & Chopra, A. K. (2005). Nonlinear model for lead-rubber bearings including axial-load effects. *Journal of engineering mechanics*, 131(12), 1270-1278. doi:10.1061/(ASCE)0733-9399(2005)131:12(1270).

Yamamoto, S., Kikuchi, M., Ueda, M., & Aiken, I. D. (2009). A mechanical model for elastomeric seismic isolation bearings including the influence of axial load. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 38(2), 157-180. doi:10.1002/eqe.847.