

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL EFECTO DE LA FLEXIBILIDAD DE APOYO EN EL COMPORTAMIENTO AXIAL-LATERAL DE UN AISLADOR ELASTOMÉRICO.

F. Ibacache Rivas¹, N. Maureira Carsalade² y F. Sanhueza Espinoza³

RESUMEN

Los aisladores elastoméricos están contruidos con láminas de caucho natural y placas de acero unidos por vulcanización y adherencia química. Esto le otorga al espécimen la capacidad de alcanzar grandes desplazamientos horizontales con baja rigidez lateral y una elevada rigidez vertical. Los desplazamientos laterales generan rotación de las láminas de goma respecto de un eje perpendicular al plano de las cargas. Esto hace que tanto la carga axial como la de corte tengan proyecciones tanto en el plano como perpendicular al plano medio de la lámina de elastómero. Lo anterior genera interacción entre carga axial y desplazamiento lateral, llamado comportamiento axial-lateral-acoplado. La aplicación de carga axial sobre el aislador reduce la rigidez lateral de éste pudiendo llegar a la inestabilidad o pandeo. De igual manera, el desplazamiento horizontal se genera reducción de la rigidez vertical del espécimen.

Existen diversos modelos analíticos que pueden predecir el comportamiento axial-lateral acoplado de un aislador elastomérico. En todos los modelos simplificados se considera como hipótesis que el aislador se encuentra restringido de rotar en ambos extremos ya que la rigidez flexural de la sub-estructura y de la super-estructura se consideran mucho mayores que la del aislador. Sin embargo, el comportamiento del aislador no está bien caracterizado cuando la rigidez flexural de la super-estructura en el punto de conexión con el aislador es del mismo orden que la del mismo dispositivo.

Esta tesis busca caracterizar el efecto de la flexibilidad del apoyo del aislador con la superestructura en el comportamiento axial-lateral acoplado. Para lo anterior se construyó un aislador a escala reducida y se construyó un mecanismo para instalarlo en mesa vibradora y someterlo a carga axial y desplazamiento lateral. El mecanismo de montaje se diseñó para permitir modificar su rigidez flexural desde virtualmente empotrado hasta rotulado. El aislador se sometió a cuatro cargas axiales diferentes en combinación con cuatro condiciones de rigidez de apoyo, aplicando en cada caso un ciclo de desplazamiento lento desde cero a máximo y de regreso a cero.

De los resultados de los ensayos se pudo verificar que la rigidez lateral se ve reducida por el incremento de la carga axial, llegándose incluso a condición de inestabilidad con rigidez lateral negativa. El cambio en las condiciones de apoyo tuvo significativo efecto en el comportamiento axial-lateral acoplado. Al reducir la rigidez del apoyo se acentuó el efecto de la carga axial en la reducción de la rigidez del aislador, llegándose a la inestabilidad para cargas axiales menores cuando el apoyo fue más flexible. La rigidez del apoyo del aislador es un factor de gran relevancia en la estabilidad de estos dispositivos y debe tenerse en cuenta sobre todo cuando la super-estructura es flexuralmente flexible en los puntos de soporte sobre los aisladores.

PALABRAS CLAVES: Acoplamiento axial-lateral; carga crítica de pandeo; inestabilidad lateral.

ABSTRACT

The elastomeric isolators are made with natural rubber sheets and steel plates joined by vulcanization and chemical adhesion. This gives the specimen the ability to achieve large horizontal displacements with low lateral stiffness and high vertical rigidity. The lateral displacements generate rotation of the rubber sheets with respect to an axis perpendicular to the plane of the loads. This means that both, the axial and the shear loading, have non zero projections on the mean plane of the elastomer sheet and perpendicularly to this plane. The above generates

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

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

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

interaction between axial load and lateral displacement, called axial-lateral-coupled behavior. The application of axial load on the isolator reduces its lateral stiffness, being able to achieve the instability or buckling. In the same way, the horizontal displacement generates reduction of the vertical stiffness of the specimen.

There are several analytical models that can predict the coupled axial-lateral behavior of an elastomeric isolator. In all the current simplified models it is considered as hypothesis that the isolator is restricted from rotating at both ends since the flexural rigidity of the sub-structure and the super-structure are considered much higher than that of the isolator. However, the behavior of the isolator is not well characterized when the flexural stiffness of the super-structure at the point of connection with the isolator is of the same order as that of the device.

This thesis seeks to characterize the effect of the flexibility of the support of the isolator with the superstructure in the coupled axial-lateral behavior. For this, a scaled elastomeric isolator was built and a mechanism was used to install it on a shaking table and subject it to axial load and lateral displacement. The assembly mechanism was designed to allow modifying its flexural rigidity from virtually restricted to jointed. The isolator was subjected to four different axial loads in combination with four conditions of support stiffness, applying in each case a cycle of slow displacement from zero to maximum and back to zero.

From the results it was possible to verify that the lateral stiffness is reduced by the increase of the axial load, reaching the instability and even a negative lateral stiffness. The change in support stiffness had a significant effect on the coupled axial-lateral behavior, reaching the instability for smaller axial loads when the support was more flexible. By reducing the stiffness of the support, the effect of the axial load on the reduction of the lateral stiffness of the isolator was accentuated. The stiffness of the support of the isolator is a factor of great relevance in the stability of these devices and must be taken into account especially when the super-structure is flexurally flexible at the points of support on the isolators.

KEY WORDS: Axial-lateral coupling; critical buckling loading; lateral instability.

1. INTRODUCCION

Chile como bien se sabe es un país sísmico y, por ende, todas las estructuras deben ser diseñadas para resistir este tipo de solicitaciones. Uno de los principales objetivos de la ingeniería sísmica es proporcionar protección a las personas y para esto se hace necesario mejorar el comportamiento sísmico de las estructuras para así reducir el riesgo de colapso. En el caso de las estructuras vital importancia nace la necesidad de asegurar su funcionamiento frente a alguna eventualidad de estas características. No obstante, crear diseños resistentes a todo tipo de sismos puede elevar los costos de la construcción de éstos.

Para poder realizar diseños, con el fin de evitar daños estructurales conviene considerar un sistema de protección sísmica que cambie las características dinámicas de la estructura. Dentro de ellos se pueden encontrar: disipadores de energía, amortiguamiento por masa sintonizada y aisladores sísmicos, estos últimos son los más eficientes ya que reducen en casi 90% los efectos provocados por un sismo (www.sirve.cl).

El objetivo fundamental del aislamiento sísmico es minimizar la energía que transmite un sismo a una estructura. Esto se logra al alargar el periodo fundamental de la estructura y desacoplando los movimientos de la estructura con respecto del sismo. Además, este método de aislamiento proporciona amortiguamiento, llevando un control y reducción de los desplazamientos relativos de la base del aislador como de la estructura. (Buckle and Kelly 1986)

Los aisladores más utilizados son los de elastómero, que están constituidas por láminas de caucho natural posicionadas de forma alternada con placas de acero, este conjunto de acero y goma son vulcanizados para así formar un solo elemento. Con la unión de estos dos materiales se obtiene un espécimen que es capaz de alcanzar grandes desplazamientos horizontales y proporcionar una elevada rigidez vertical. El diseño de los aisladores va determinado de acuerdo al tipo de estructura, demanda de desplazamientos horizontales, rigidez vertical requerida, capacidad de soporte y el grado de amortiguamiento solicitado (www.sismica.cl).

Los aisladores elastoméricos de múltiples capas tienen comportamiento acoplado entre carga axial y lateral. Esto significa que la presencia de carga axial reduce la rigidez lateral del dispositivo, así como el incremento en el desplazamiento lateral impuesto reduce la rigidez vertical. En la actualidad existen diversos modelos analíticos que pueden predecir este comportamiento acoplado y la carga de inestabilidad o de pandeo del aislador. Los modelos más sencillos y fáciles de implementar consideran como hipótesis que los extremos del aislador están restringidos de rotar ya que la rigidez flexural de la súper-estructura se considera extremadamente elevada. Sin embargo, se hace necesario definir el comportamiento para una estructura que sea flexible en sus puntos de apoyo con los aisladores. Es por esta condición que se hace necesario conocer cómo cual es el efecto de la rigidez de los apoyos de la estructura con los aisladores, en la rigidez lateral del dispositivo y en el efecto que la carga axial tiene en ello.

Actualmente, uno de los autores de esta investigación trabaja en el desarrollo de un método no lineal que permita describir el comportamiento axial-lateral acoplado de aisladores elastoméricos con apoyos flexibles. Esta tesis busca proporcionar la información experimental que permita posteriormente validar el nuevo modelo no lineal antes mencionado.

2. METODOLOGIA

Se construyó un espécimen de aislador elastomérico utilizando silicona para sellado de ventanas y láminas de zinc-aluminio para reemplazar las láminas de acero. Se realizaron ensayos de tracción a probetas de control compuestas del mismo elastómero utilizado en el aislador (Figura 1). Se adaptó un mecanismo de soporte para permitir la instalación del aislador en él sobre la mesa vibradora y bajo la losa de carga. La mesa vibradora permitió aplicar el desplazamiento lateral, mientras que la losa de carga se usó para aplicar la carga axial y restringir el giro en el extremo del aislador. En la base del aislador, el mecanismo se diseñó con un par de resortes en ambos costados, los que al cambiar su distancia respecto del pivote de la base del aislador permitían modificar la rigidez del apoyo.

2.1. Caracterización mecánica del elastómero

El material utilizado fue un tipo de silicona para ventana marca topex 1100 de color negro. Para la obtención de sus propiedades mecánicas, se procedió a realizar un ensayo de tracción hasta la rotura. De esta forma fue posible obtener la curva tensión-deformación de la silicona y así identificar el módulo de elasticidad de éste en la Figura 1 se puede observar la probeta ensayada.



Figura 1: Muestra de elastómero ensayado.

Mediante el ensayo de tracción a la rotura, se determinó que la silicona alcanzó un estado de 150% de deformación unitaria a la rotura y posee un módulo de elasticidad de $E \approx 5.18 \text{ kg/cm}^2$ según la Figura 3. Además, el material posee un módulo de compresión o de bulk entre 15.000 y 20.000 kg/cm^2 (Kelly, 2003), de esta forma se ubica como un material altamente incompresible, por lo que su módulo de Poisson es $\nu \approx 0.5$. Dado lo anterior es posible aplicar la relación constitutiva de los materiales.

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



Figura 2 Alargamiento de la goma en más de un 150%

De Ec. (1) se obtiene el módulo de corte secante al 150% de deformación unitaria como $G \approx 1.692 \text{ kg/cm}^2$, valor utilizado posteriormente en la determinación de las dimensiones del aislador.

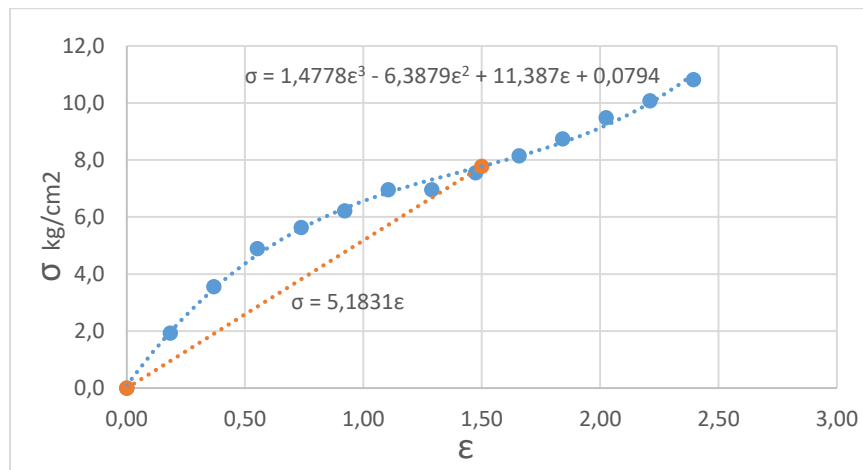


Figura 3: Curva Tensión-Deformación de elastómero utilizado para la confección del espécimen de aislador

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. Esto debido que al retirar la carga gradualmente la curva descrita es la misma que en carga, pero en reversa.



Figura 4: Instrumento para realización del ensayo tracción-rotura

El método para la obtención del módulo de corte fue mediante el ensayo tracción-rotura, para esto fue necesario crear un instrumento constituido por una pesa de carga, un tensor de acero y dos trozos de madera que sostenían la goma de cada uno de sus extremos. El ensayo consistió en dejar fijo cada extremo del instrumento e ir rotando el tensor de acero, que a su vez, estaba en una condición de máximo alargamiento y con la rotación de este, pasaría a una condición de menor alargamiento. Esto provoca que la goma se estire con un control total del desplazamiento y registrando en el mismo instante la fuerza ejercida sobre la goma.

2.2. Sistema de apoyo flexible

Se construyó un mecanismo de apoyo flexible cuya finalidad es sostener al espécimen de aislador en su base. El mecanismo se compone de elementos de acero rígidos, apoyos rotulados y de tipo cojinete, más un sistema de resortes que al cambiar de posición permiten modificar la rigidez del apoyo basal del aislador ensayado. Este

sistema de soporte permite la instalación de celdas de carga en sus puntos de apoyos con la finalidad de registrar la reacción de corte y carga axial del aislador (Figura 14).

Para determinar la rigidez del sistema de apoyo basal del aislador fue necesario determinar las rigideces de los resortes que limitan su giro y cambian el grado de empotramiento del apoyo. Este grado de empotramiento se modifica al cambiar de posición el par de resortes ubicados en cada lado de la viga que pivotea en el centro del mecanismo, sobre la cual se instala el aislador. Al aumentar la distancia del par de resortes respecto del centro de pivoteo aumenta la rigidez y por ende el grado de empotramiento. Dado que las dimensiones de la viga y las distancias de colocación de resortes son fijas (0, 15cm, 35cm y 55cm), para determinar la rigidez del apoyo es necesario conocer la rigidez axial de los resortes utilizados.

Para la determinación de la rigidez axial de los resortes se realizó un ensayo de tracción ya que este tipo de resorte solo trabaja a tracción. De los resultados del ensayo se determinó la curva carga-elongación (Figura 5) la cual mostró que es requerido aproximadamente 9.2 kg para que el resorte comience a alongarse, teniendo este una rigidez de 28.9 kg/cm.

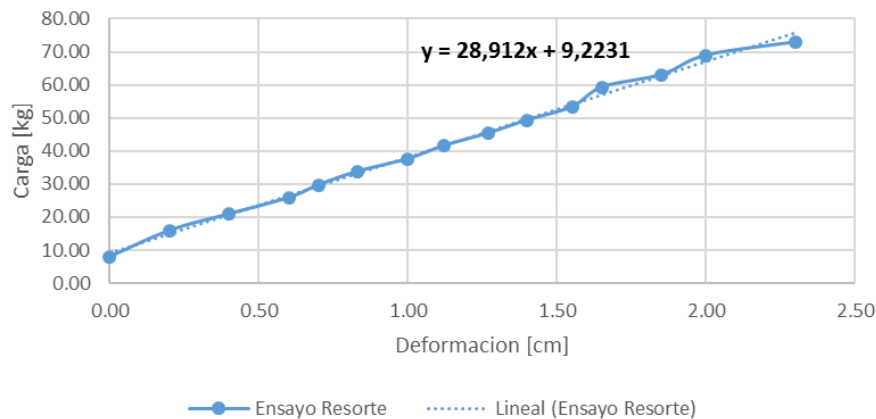


Figura 5: Curva Carga-Elongación de resorte usado para rigidizar apoyo basal.

2.3. Construcción de espécimen de aislador

Los aisladores sísmicos más comúnmente usados son los de múltiples capas de elastómero, compuestos por láminas de caucho natural posicionadas de forma alternada con placas de acero. Este conjunto de acero y goma se une por vulcanización, para así formar un solo elemento. Con la unión de estos dos materiales se obtiene un espécimen que es capaz de alcanzar grandes desplazamientos horizontales y proporcionar una gran rigidez vertical.

Como uno de los objetivos específicos de esta investigación se buscó la forma de construir artesanalmente un dispositivo cilíndrico de múltiples capas de elastómero y metal que se asemejara lo más posible a los aisladores de caucho antes descritos. En lugar de caucho natural se utilizó silicona para sellado de ventanas marca Topex de color negro. En reemplazo de las láminas de acero se utilizaron discos de aleación zinc-aluminio de 0.3mm de espesor. Se construyeron moldes horizontales donde se introdujo la silicona líquida (Figura 6), con el fin de formar tiras de un largo de más o menos 1m, ancho 100mm y un espesor de 5mm. Luego se dejó secar aproximadamente una semana a temperatura ambiente y una vez seco se prosiguió a recortar las tiras (Figura 7) y formar laminas circulares de silicona de diámetro 84mm. Las láminas de zinc-aluminio fueron recortadas de forma circular de diámetro 84mm, luego a estas laminas fueron lijadas con papel abrasivo grano 80 a 100, para darles aspereza superficial y facilitar la adherencia con la silicona. Una vez construidas las láminas de silicona y los discos de zinc-aluminio, estos fueron unidos en forma alternada utilizando una película delgada de silicona líquida. En el proceso de secado fue necesario aplicar una carga vertical en la parte superior para eliminar el aire entre las láminas que fueron adheridas. También fue necesario confinarlas lateralmente para que evitar el hinchamiento de la goma y lograr obtener una forma cilíndrica. La duración del secado fue de alrededor de una semana. Finalmente, como

terminación, se aplicó una capa de silicona en el manto cilíndrico del aislador para formar una sola pieza uniforme donde no quedara expuesta la lámina de metal, tal como se confeccionan los aisladores elastoméricos reales.



Figura 6 Moldes para crear tiras de siliconas



Figura 7 Tiras de silicona

La rigidez y resistencia del aislador estará determinada por la cantidad, diámetro y grosor de las láminas metálicas y de silicona que lo componen. Esto condicionará al aislador, ya que, al aumentar su altura, se reduce su rigidez y aumenta el riesgo de producirse inestabilidad lateral en esté.

Un aislador se puede considerar incompresible cuando el factor de forma S (Tabla 1) es inferior o aproximadamente igual a 10 (Kelly, 1997). En este caso, las ecuaciones que gobiernan el comportamiento mecánico del aislador se simplifican. Considerando lo anterior, las propiedades mecánicas utilizadas para el diseño del aislador son el módulo de elasticidad equivalente E_c y el módulo flexural efectivo EI_{eff} , dados por la ecuación (2) y (3) respectivamente.

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

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

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

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

Tomando en cuenta que en los extremos del aislador terminan en láminas de goma, es posible afirmar que existen $N_r - 1$ láminas de zinc-aluminio con un grosor t_a . Por tanto, la altura total del espécimen es:

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

Dado las ecuaciones (2) a la (5) y la 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 aislador será de 170 kg. Con respecto al desplazamiento lateral, se buscó alcanzar niveles de deformación de corte cercanos a 1, lo cual implica desplazamientos laterales como máximo igual a la altura de elastómero H_r del aislador.

En base a lo anterior y agregando las condiciones de estabilidad lateral y deformación lateral, es posible definir las condiciones límite para el aislador, intentado analizar al espécimen en una condición cercana a la inestabilidad lateral. Estas condiciones relacionan la máxima carga axial que puede soportar el aislador, y la cantidad de láminas que lo componen. De acuerdo a lo anterior se describen la característica geométrica del aislador.

Tabla 1 Ecuaciones mecánicas y dimensiones geométricas de espécimen de aislador

Parámetro Geométrico	Relación	Valor
Espesor lamina de goma (t_r)	-	6.65 [mm]
Altura láminas de goma (H_r)	-	9.31 [cm]
Radio de espécimen (R)	-	4,2 [cm]
Factor de forma (S)	$S = \frac{1}{2}(R/t_r)$	4,2
Inercia (I)	$I = \frac{\pi}{4}R^4$	244
Cantidad láminas de goma (N_r)	$N_r = H_r/t_r$	14
Cantidad láminas de lata (N_a)	$N_a = N_r - 1$	13
Espesor láminas de lata (t_a)	-	0.3 [mm]
Altura total espécimen (H)	$H = t_r N_r + t_a N_a$	9,7 [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:

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

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

Nombre	Nomenclatura	Magnitud (kg)
Carga crítica de Pandeo	P_{cr}	170



Figura 8: Especimen de aislador

Finalmente se determinó que el aislador apropiado posee 14 láminas de elastómero con espesor de aproximadamente 6.65 mm, y 13 láminas de zinc-aluminio de espesor de 0.3mm. El espécimen alcanza una altura total de 9.7 cm y tiene un radio de 4.2cm.

El procedimiento de construcción del espécimen antes mencionado no estuvo exento de problemas y dificultades. Uno de los primeros desafíos que se presentaron fue el cómo crear moldes de forma cilíndricas de espesores regulares que pudieran ser adheridos en forma alternada con láminas de zinc-aluminio. En un principio se resolvió este problema con un molde circular que fue llenado en forma alternada con silicona y láminas de zinc-aluminio intercaladas, adheridas en el proceso de secado de la silicona. El principal problema de este método fue que los espesores de las láminas de silicona fueron muy irregulares, incluso en puntos diferentes de una misma lámina. Además que se formaban burbujas de aire, dificultando la adherencia entre los materiales. Otro problema fue que al ser un molde cerrado, la silicona no lograba secarse completamente debido a la dificultad para evaporar los solventes que la mantenían en estado líquido.

Luego se empleó otro método de colocación de las láminas de zinc-aluminio, el cual consistía en generar pequeños cuadrados de silicona usados como separadores entre las láminas metálicas para separar luego introducir a presión silicona en el espacio resultante, buscando obtener láminas de elastómero de espesor regular. El principal problema que tubo esta forma de construcción fue que no se tenía un control en la forma cilíndrica, obteniéndose especímenes con irregularidades en el contorno cilíndrico, ya que las capas se corrían y provocaba que los separadores de silicona se movieran o escurrieran fuera del aislador. Otro problema fue el secado ya que solo la parte exterior del aislador estaba en contacto con el aire logrando secarse correctamente, pero el centro seguía aún en estando fluido luego de una semana de su confección.

2.4. Protocolo experimental

Se diseñó un protocolo experimental cuyo objetivo es someter al espécimen de aislador a una serie de cargas axiales y desplazamientos laterales considerando diferentes condiciones de rigidez del apoyo en su base. Con esto se buscó caracterizar el comportamiento axial-lateral acoplado del espécimen en rangos de carga y desplazamiento cercanos a la inestabilidad y la rotura. El protocolo consistió en realizar ensayos con condición de apoyo fija y carga axial fija, aplicando un ciclo de desplazamiento lateral de carga y descarga. Luego se incrementó la carga repitiendo el ensayo con la misma condición de apoyo y desplazamiento lateral con un total de cuatro cargas axiales aplicadas. El set de ensayos antes descrito se repitió para las cuatro condiciones de apoyo basal consideradas, las que van desde rotulado hasta virtualmente empotrado.

Se instalaron sensores de desplazamiento y celdas de carga con la finalidad de medir el desplazamiento lateral, giro basal, reacción vertical o carga axial y reacción lateral o fuerza cortante. Se describen a continuación los sensores utilizados en los ensayos.

2.5. Sensores e Instrumentación

Se utilizaron dos celdas de carga anulares marca Honeywell modelo 2KLB, números de serie son 1468562 y 144865 (Figura 9) para medir la reacción vertical en los dos apoyos del mecanismo de sujeción del espécimen de aislador. Estos sensores son posicionados en la parte más baja del marco de carga otorgando a esté una condición de apoyo fijo articulado (Figura 14) midiendo la carga axial que es ejercida al aislador más la rensión de los resortes que otorgan empotramiento al apoyo basal. Estos sensores son capaces de registrar hasta 900 kg en compresión o tracción.

Una celda de carga tipo S marca Honeywell modelo 125 y número de serie 5W31796 (Figura 10), fue utilizado para medir la reacción horizontal o de corte en la base del aislador. Este sensor está posicionado de forma horizontal conectado con el punto de apoyo en la base del aislador (Figura 14) y es capaz de soportar esfuerzo de corte de 500 kg en tracción.

Se usó sensor de giro modelo WDD35D4 número de serie T2325 (Figura 11), es el encargado de medir los giros que se generen en la base del aislador. Está ubicado en el centro del apoyo tipo cojinete en la base de apoyo del aislador, como se puede observar la Figura 14.

Un sensor de desplazamiento LVDT modelo LDI-119-150-A010A número de serie 4817-1203 (Figura 12), fue utilizado para medir los desplazamientos horizontales que se generen en la base del aislador. Este sensor es capaz de medir un desplazamiento máximo de 15 cm. Se instaló en la base de la mesa vibradora registrando el movimiento relativo entre el apoyo basal del aislador y el apoyo en su cúspide.



Figura 9: Sensores anulares



Figura 10: Sensor tipo S



Figura 11: Sensor de giro



Figura 12: Sensor LVDT



Figura 13: Condición de apoyo del sensor anular

2.6. Obtención de datos experimentales

El programa utilizado para obtener los datos de todos los sensores es el LabView. Los sensores traducen los esfuerzos y desplazamientos en voltajes que son registrados en forma sincronizada en intervalos constantes y almacenados mediante un programa creado en esta plataforma. Los datos son guardados en notas digitales y ordenados de forma que el tiempo este en la primera columna, en la segunda los giros, la tercera los desplazamientos horizontales, la cuarta y quinta el esfuerzo axial 1 y 2 respectivamente y sexta los esfuerzos de cortes.

2.7. Instalación, diseño y mejoras del marco de carga

En un trabajo de titulación previo (Pedreros, 2018) se diseñó y construyó un marco de carga en acero específicamente para la realización de ensayos de carga axial y desplazamiento lateral de aisladores elastoméricos pequeños con condición de apoyo flexible. Con base en las conclusiones recomendaciones del trabajo de Pedreros (2018), se realizaron modificaciones al marco de carga con la finalidad de resolver los problemas detectados en la ejecución de los ensayos en aquella ocasión. Teniendo en cuenta lo anterior se hicieron las modificaciones señaladas a continuación.

Se incorporó un sistema de rótulas en los dos apoyos de carga vertical del marco de carga (en sensor axial 1 y 2 de Figura 14). Esto con el fin de que dichos apoyos no aportaran resistencia a cargas laterales y de que de ese modo no influyeran en la medición de la reacción horizontal o de corte.

Se agregó un sistema de sujeción lateral compuesto por dos perfiles metálicos de 15x15x2mm conectado al eje de giro del apoyo basal del aislador, unidos en su otro extremo a un perfil metálico 30x30X2. En dicho perfil se sujetó en serie una celda de carga tipo S, la cual se fijó a la mesa vibradora. De esta manera, toda la estabilidad lateral está proporcionada por dicho dispositivo de modo que el corte es medido íntegramente por la celda tipo S.

Se instaló un brazo de carga rotulado en un extremo y fijo en dicho extremo a un marco de referencia estático. En un punto intermedio de este brazo se sujetó el extremo superior del aislador, aportándole rigidez flexural. En el extremo libre del brazo se instaló una pesa electrónica de capacidad 300 kg sobre la cual se colgó un canastillo para la instalación de pesos conocidos. Debido al apoyo del brazo de carga en dos puntos, la conexión rotulada en un extremo y sobre el aislador en un punto intermedio, los pesos se transmiten como carga axial al aislador (Figura 14). De esta manera, se puede conocer de forma certera la carga axial solicitante en el aislador por medio de la proporción de palancas por medio del equilibrio estático del brazo de carga. Esto permitió corroborar o corregir las mediciones en las celdas de carga anulares que registraron la carga axial, ya que sus mediciones se ven alteradas por la tensión inicial aplicada a los resortes del apoyo flexible en la base del aislador.

La mesa vibradora fue la encargada de proporcionar los desplazamientos horizontales impuestos al aislador en forma cuasi-estática (Figura 15). Estos desplazamientos fueron registrados por un sensor LVDT fijo a la mesa vibradora en un extremo y sujeto a un marco de referencia estático en el otro extremo. El marco de carga posee una viga metálica rígida que sirvió de apoyo basal flexible para el espécimen de aislador. Este se instaló atornillado sobre una placa de acero rígida de 10mmX100mmX15mm soldada sobre la viga metálica antes mencionada. Dos barras de acero de 25mm de diámetro se soldaron alineadas a ambos costados de la placa de apoyo basal del aislador, de modo que el eje de las barras coincidió con la superficie superior de la placa de acero. Dichas barras fueron sujetas al marco de carga por medio de sendos apoyos tipo cojinete montados sobre columnas que descansan verticalmente sobre las celdas de carga anular. En uno de los ejes de 25mm se instaló un sensor de giro para registrar la rotación del apoyo flexible en la base del aislador (Figura 14). Para modificar la rigidez de dicho apoyo se instalaron pares de resortes de rigidez K_r , pre-estirados por medio de tensores de acero a ambos lados del eje de giro soportado por los apoyos cojinetes. La rigidez del apoyo basal, K_θ , se modificó cambiando la distancia horizontal de los dos pares de resortes al eje de giro, d , tal que cuando dicha distancia se reduce la rigidez K_θ disminuye y vice versa, de acuerdo a la ecuación 8 y tal como se muestra en la Figura 16.

$$K_\theta = 4Krd^2$$

(8)

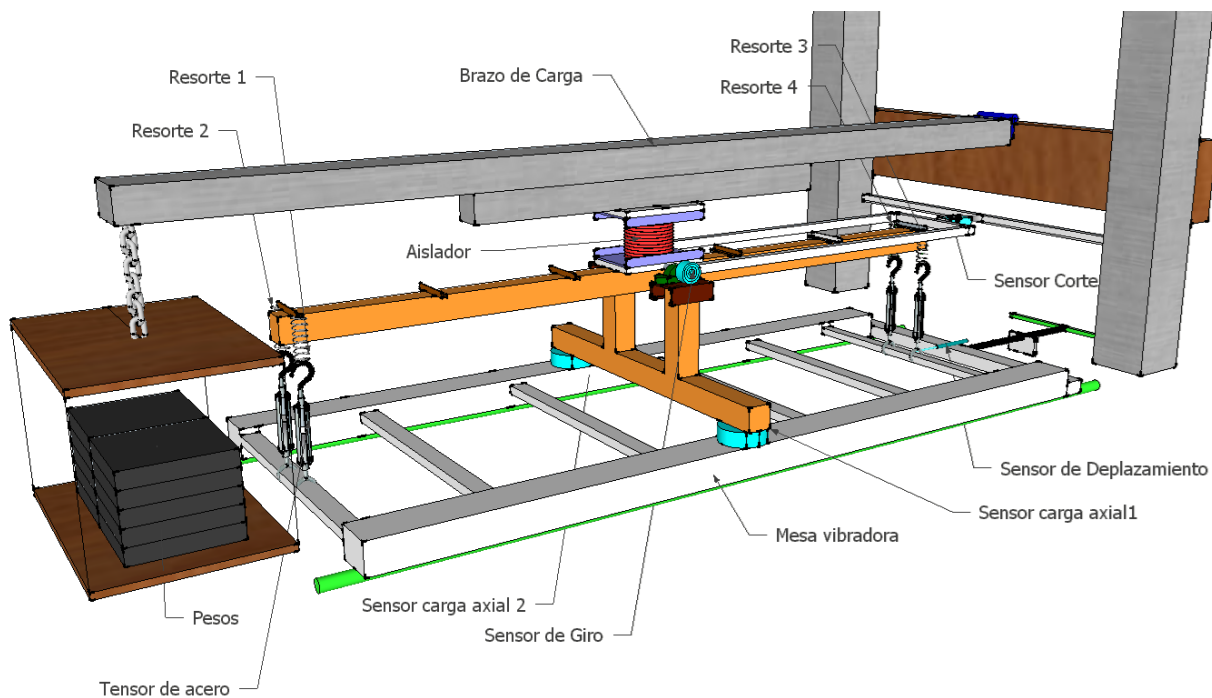


Figura 14: Instrumentación, marco de carga y montaje experimental



Figura 15: Husillo de bola para mover la mesa vibradora

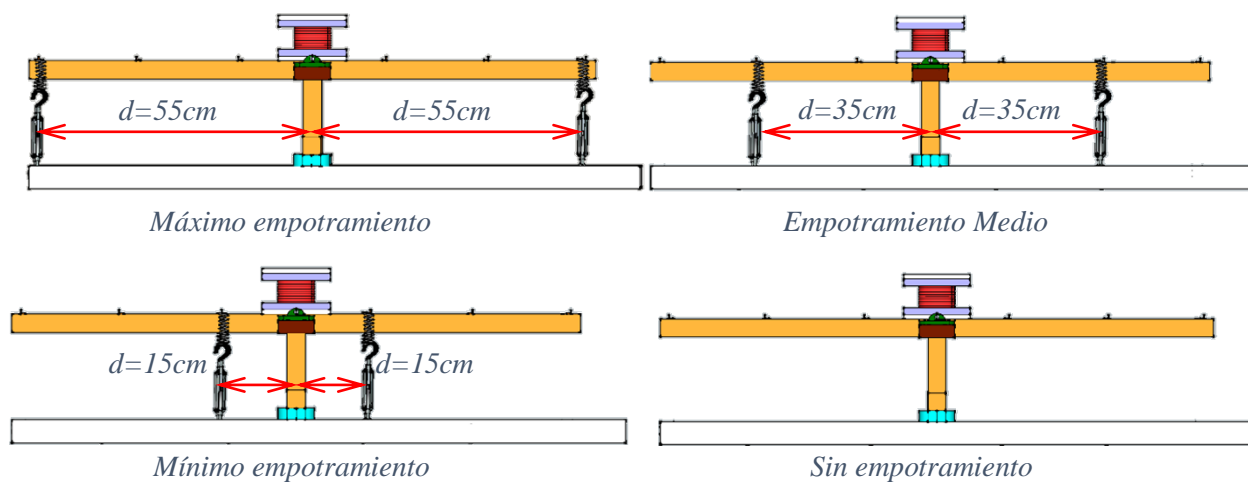


Figura 16: Tipos de apoyos flexibles considerados en la base.

2.8. Ejecución de los ensayos y mediciones

Durante la ejecución de los ensayos los datos fueron tomados de acuerdo a la secuencia de mostrada a continuación. En las secuencias 3 a la 6 se llegó sólo hasta 2cm de desplazamiento lateral con el fin de poder contar con al menos una secuencia de desplazamientos completa para todas las cargas axiales antes de que ocurriera falla por corte. Se logró obtener una segunda secuencia con todas las cargas (secuencias 7 a la 10) y 4 cm de desplazamiento lateral, antes de registrar la falla del aislador. En las secuencias con desplazamiento lateral máximo de 6cm se registró la falla del aislador para la carga axial más alta, con lo que se concluyó.

1. Sin brazo de carga, para determinar carga axial debido a tensión de resortes.
2. Con brazo de carga, para determinar carga axial debido al brazo solo.
3. Con carga axial 104 kg y desplazamiento horizontal máximo de 2 cm.
4. Con carga axial 178 kg y desplazamiento horizontal máximo de 2cm
5. Con carga axial 227 kg y desplazamiento horizontal máximo de 2cm
6. Con carga axial 270 kg y desplazamiento horizontal máximo de 2cm
7. Con carga axial 104 kg y desplazamiento horizontal máximo de 4cm
8. Con carga axial 178 kg y desplazamiento horizontal máximo de 4cm
9. Con carga axial 227 kg y desplazamiento horizontal máximo de 4cm
10. Con carga axial 270 kg y desplazamiento horizontal máximo de 4cm

Esta secuencia de carga y desplazamiento horizontal se repitió para los casos de máximo empotramiento, empotramiento medio, empotramiento mínimo y sin empotramiento. Con todo, se obtuvo una cantidad de 40 datos, 10 para cada condición de empotramiento para el ensayo del aislador. Se procedió a correr el programa de toma de datos en Lab View, luego se cargó con pesos el brazo de carga, posteriormente se registraron los datos de la pesa electrónica. Una vez hecho eso se comenzó a aplicar los desplazamientos laterales con una velocidad lenta y constante a incrementos de 5mm. Se esperó 10 segundos para poder identificar un rango constante en los datos antes de incrementar el desplazamiento lateral en 5mm más hasta alcanzar un desplazamiento lateral máximo de 40 mm, luego de lo cual se detuvo el programa.

3. RESULTADOS

Una vez extraídos los datos del software LabView, se procedido a pasarlo por un filtro de frecuencia de pasa baja, debido que al tratarse de ensayos cuasi-estáticos, las frecuencias bajas son la característica de la respuesta de interés. Toda frecuencia alta es por tanto ajena a la medición, pero está presente en las lecturas de los sensores debido a la contaminación con frecuencias ambientales, vibraciones y señales electromagnéticas presentes en la red eléctrica.

Con los resultados ya filtrados se procedió a graficar curvas de corte versus desplazamiento lateral para diferentes cargas axiales aplicadas y diferentes condiciones de apoyo basal (Figuras 18 a la 21).

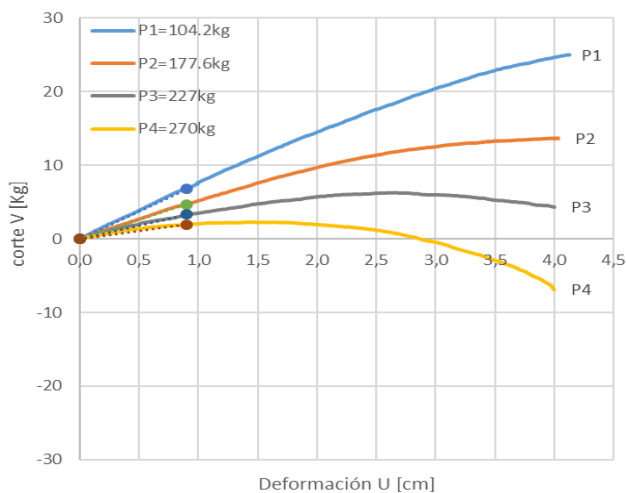


Figura 17: Empotramiento $d=55\text{cm}$

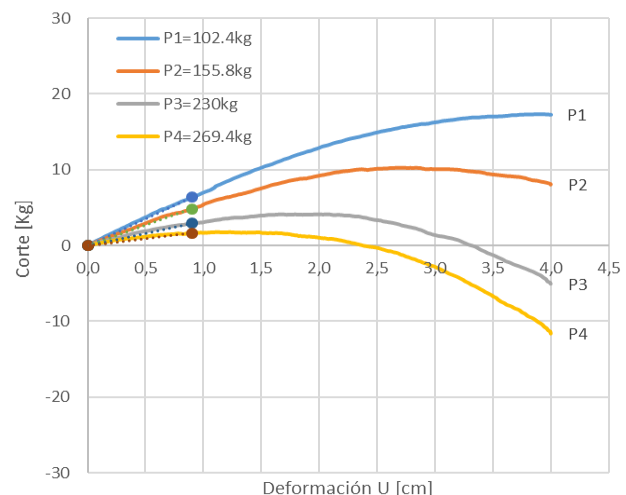


Figura 18: Empotramiento $d=35\text{cm}$

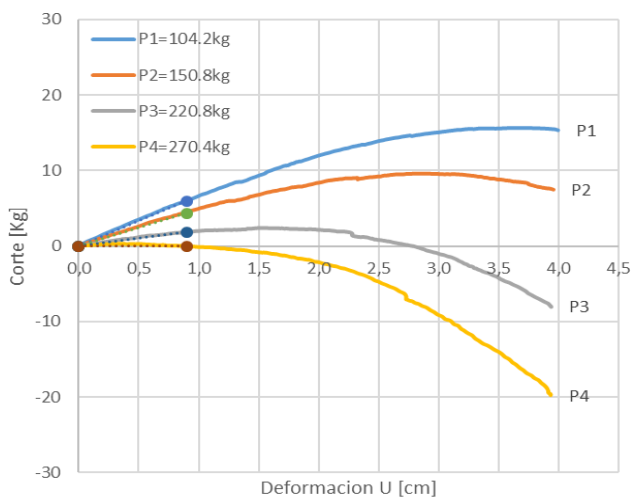


Figura 19: Empotramiento $d=15\text{cm}$

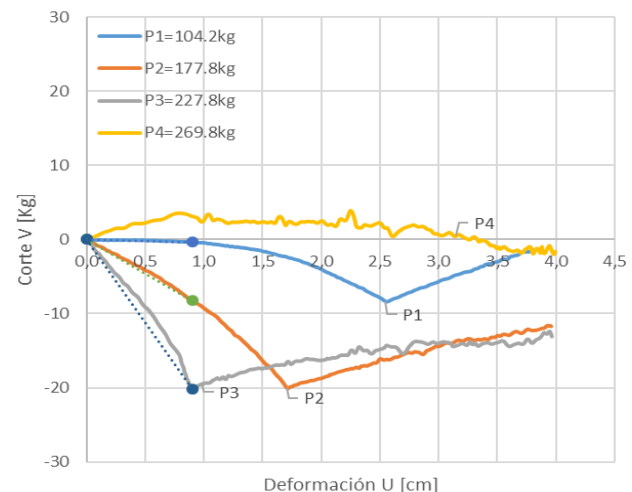


Figura 20: Empotramiento $d=0\text{cm}$

Cada una de las curvas presentes en las figuras 17 a la 22 representan una carga axial diferente, esta forma de mostrar los datos es la mejor, ya que se asemeja muy bien a las predicciones teóricas. Estas predicciones dicen que cuando el aislador está restringido al giro en ambos extremos, posee rigideces lateral más grandes y en la medida que nos acerquemos a lo rotulado, las rigideces disminuyen.

A partir de los resultados antes mostrados se pudo verificar el comportamiento axial-lateral acoplado, ya que el incremento de la carga axial condujo en todos los casos a reducciones de la rigidez lateral del aislador. Adicionalmente se pudo constatar que la flexibilidad del apoyo en la base también afecta la rigidez lateral del aislador, de modo que a menor rigidez del apoyo menor será la rigidez lateral del dispositivo y vice versa. Esto se tradujo en los ensayos que cuando la distancia de los resortes de empotramiento, d , se redujo, la rigidez del aislador también disminuyó, para todas las cargas axiales aplicadas.

Es interesante analizar cómo varía la rigidez del aislador con la carga axial y con la condición de rigidez del apoyo en la base. Esto debido a que la proyección de las curvas de tendencia hacia la condición de rigidez nula define la condición de inestabilidad o carga de pandeo, P_{cr} , (Figura 21). Esta carga de pandeo en teoría se ve afectada por la rigidez del apoyo de la base, de modo que a menor rigidez flexural del apoyo, menor sería la carga de pandeo. Debido a que las relaciones corte-desplazamiento mostradas en las figuras 17 a la 20 no son rectas, la rigidez del aislador no es constante y se ve reducida por el incremento del desplazamiento lateral. Los modelos más simples que describen el comportamiento axial-lateral acoplado de aisladores elastoméricos no describen el cambio de rigidez lateral por incremento del desplazamiento lateral (Koh, 1988). Por lo tanto, para ser consistente con lo anterior, se definió la rigidez lateral asociada a cada una de las curvas como la rigidez secante en la vecindad del origen. Para lo anterior se consideró por conveniencia los puntos $u=0$ y $u=9\text{mm}$, que definen el incremento de desplazamiento $\Delta u=9\text{mm}-0\text{mm}$. Esto debido a que la rigidez secante se asemeje a la rigidez tangente para un Δu pequeño. Sin embargo, este Δu no puede ser muy pequeño, ya que puede acercarse a la indeterminación e inducir errores en el cálculo de la rigidez, $K=\Delta V/\Delta u$, que son ajenos a la calidad de las mediciones.

En la gráfica 20 es posible apreciar que, para cualquier carga axial, los esfuerzos de corte son negativos. Esto se debe a que todas las cargas axiales aplicadas superan la carga de pandeo, por lo que el aislador ha superado la condición de inestabilidad. El dispositivo se mantiene estable y se registran mediciones de corte debido a las características del marco utilizado para el montaje del experimento. El marco impone en la base del aislador una fuerza reactiva de corte en la dirección opuesta al desplazamiento relativo impuesto para mantener al aislador estable, ya que ésta por sí sola no puede alcanzar la estabilidad. Se observa en la Figura 20 que al incrementar la carga axial el aislador se muestra más inestable, siendo necesario un corte negativo más grande para estabilizarlo. Una condición anómala se aprecia en la curva correspondiente a la carga axial más elevada, lo que se explica debido a que el apoyo en la base superó la rotación máxima permitida, generándose trabazón mecánica entre la viga de empotramiento basal y el brazo de carga, generando una estabilización artificialmente del aislador. Por lo tanto, los datos con los que se construyó la curva anómala antes mencionada, no son representativo para el análisis del comportamiento del aislador.

La Figura 21 se obtuvo a partir de las rigideces determinadas para cada una de las cargas axiales asociadas a cada condición de apoyo, muestra el comportamiento del acoplamiento de las cargas y permite extrapolar a la condición de inestabilidad para determinar la carga crítica de pandeo del aislador. Se puede apreciar el comportamiento axial-lateral acoplado, que quiere decir que la carga axial influye en el comportamiento de las cargas y desplazamientos de corte. Es posible apreciar que para carga axial nula se alcanza la mayor rigidez lateral en todas las condiciones de apoyo, la cual es virtualmente la misma rigidez. Esto es consistente con las predicciones teóricas que señalan que la rigidez lateral de un aislador con al menos un apoyo empotrado es independiente del grado de empotramiento del segundo apoyo y está dada por $K=GA/Hr$. Reemplazando el valor del módulo de corte de la goma determinado en el punto 2.1, $G=1.692\text{ kg/cm}^2$, y las dimensiones del aislador mostradas en Tabla 1, se obtiene $K=10.06\text{ kg/cm}$, valor razonablemente cercano a lo obtenido en la Figura 21.

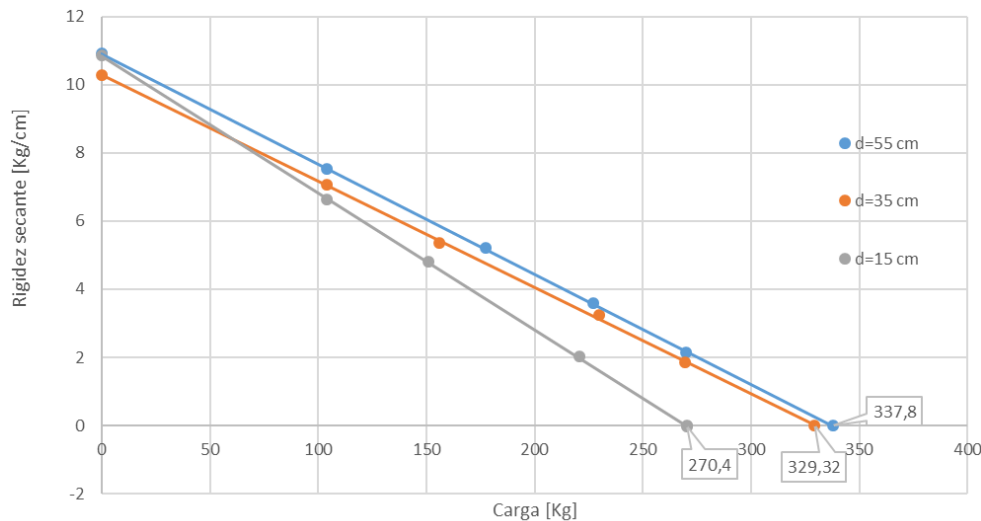


Figura 21 Relación entre rigidez lateral y carga axial, para diferentes condiciones de apoyo del aislador

En la medida de que aumenta la carga axial, la rigidez lateral baja hasta llegar a cero, punto que define la carga crítica de pandeo, P_{cr} . Las cargas de pandeo para las condiciones de apoyo $d=55\text{cm}$ y $d=35\text{cm}$ fueron obtenidas por extrapolación de las curvas. En tanto que la carga de pandeo correspondiente al caso con $d=15\text{cm}$ fue ligeramente superada en el ensayo, por lo que corresponde a una interpolación. Aunque las cargas de pandeo correspondientes a $d=55\text{cm}$ y $d=35\text{cm}$ son bastante parecidas entre sí, son significativamente diferentes con la obtenida para la condición $d=15\text{cm}$. Esto se explica debido a que la rigidez del apoyo en la base es proporcional al cuadrado de la distancia d , según Ecuación (8), de modo que la rigidez del apoyo con $d=35$ es en realidad más de 5 veces mayor a la correspondiente a $d=15\text{cm}$. Entre los apoyos con $d=35\text{cm}$ y $d=55\text{cm}$ también hay variaciones de rigidez de la base significativas, pero se puede inferir que ambos son suficientemente rígidos en relación al aislador ensayado como para considerarse empotramientos virtualmente perfectos. Para el caso de apoyo basal rotulado, esto es $d=0$, no fue posible obtener datos confiables, ya que todas las cargas axiales aplicadas fueron mayores a la carga crítica de pandeo. Debido a lo anterior el comportamiento registrado no permitió obtener información que permita extrapolar hacia la condición de inestabilidad, y determinar así la carga de pandeo, debido a que todos los datos muestran un comportamiento inestable del aislador.

4. CONCLUSIONES

A partir del análisis experimental efectuado al aislador con apoyo basal flexible, es posible decir que se verifica que la rigidez lateral se reduce por presencia de carga axial para todas las condiciones de flexibilidad del apoyo. En algunos casos, aumentar la carga axial se reduce la rigidez lateral hasta el punto de alcanzar una rigidez lateral nula, correspondiendo a la carga crítica de pandeo. En otros casos dicha carga crítica pudo ser determinada por extrapolación del comportamiento de la rigidez lateral con la carga axial. También se observó que la variación de la rigidez lateral y por ende también la carga de pandeo, dependen de la condición de apoyo del aislador. Cuando la condición de apoyo de éste es bi-empotrada se alcanzan las mayores rigideces laterales y mayores cargas de pandeo. Sin embargo, al disminuir la rigidez de uno de los apoyos se reduce la rigidez lateral para una misma carga axial, así como también se reduce la carga crítica de pandeo del aislador. Este comportamiento es consistente con lo que señala la literatura.

Para el caso de la condicione de apoyo basal rotulado no fue posible obtener datos concluyentes para determinar la relación entre corte y desplazamiento lateral en el aislador. Por lo tanto, tampoco se pudo determinar la carga crítica de pando del aislador en dicha condición de apoyos. Esto se debió a que todas las cargas axiales aplicadas fueron superiores a la carga crítica de pandeo haciendo que el aislador estuviera siempre en condición inestable.

Para caracterizar mejor el efecto de la flexibilidad del apoyo basal se recomienda hacer mediciones con grados de empotramiento menores ($d < 15\text{cm}$) y cargas axiales menores para evitar la condición de inestabilidad del aislador.

5. SIMBOLOGÍA

E :	Módulo de elasticidad secante del elastómero.
G :	Módulo de corte del elastómero.
ν :	Módulo de Poisson.
E_c :	Módulo de compresión del elastómero.
$E_{I_{eff}}$:	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 latas.
t_a :	Espesor de cada lamina de lata.
H :	Altura total del espécimen.
A :	Área transversal del espécimen.
P_E :	Carga de pandeo de Euler.
P_{cr} :	Carga critica de pandeo.
Δu :	Distancia máxima de la recta secante.
L :	Distancia máxima entre la ubicación de los resortes y el punto pivote.
M :	Momento en el soporte inferior del aislador a causa del giro por la condición deformada.
K_r :	Rigidez de cada resorte.
K_θ :	Rigidez flexural.
d :	Distancia de colocación de los resortes.

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.