

DISEÑO PRELIMINAR DE AISLADOR SÍSMICO FRICCIONAL DE IMPACTO CON UN NÚCLEO DE GOMA

Kevynn Cenas¹; Miguel Tornello²; Gustavo Gioacchini²

¹Aspirante al Doctorado en Ingeniería. Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, Sismología e Ingeniería Sísmica (CeReDeTeC). Facultad Regional Mendoza. UTN / kevynn.cenas@docentes.frm.utn.edu.ar

²Docentes Investigadores. Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, Sismología e Ingeniería Sísmica (CeReDeTeC). Facultad Regional Mendoza. UTN / miguel.tornello@docentes.frm.utn.edu.ar; ggioacchini@frm.utn.edu.ar

Resumen: En la República Argentina más de las dos terceras partes de su territorio se encuentran en riesgo sísmico y con diminuta protección sísmica. Estudios realizados sobre sismicidades locales y regionales han demostrado el elevado peligro sísmico de importantes provincias del oeste argentino, un ejemplo son Mendoza y San Juan. La región conocida como el Gran Mendoza con un poco más de dos millones de habitantes, presenta una importante historia sísmica. En los últimos 200 años han ocurrido no menos de 15 terremotos que ocasionaron distintos niveles de daños en las construcciones y en algunos casos se ha tenido que lamentar la pérdida de vidas humanas. El antecedente histórico más conocido lo constituye el terremoto de 1861, que provocó la destrucción total de la ciudad y ocasionó la muerte del 60 % de las personas que habitaban la ciudad. El avance tecnológico de los últimos años ha permitido contar con nuevos desarrollos e innovaciones tecnológicas que tiendan a reducir y controlar el efecto de los terremotos destructivos sobre las construcciones emplazadas en regiones de alto riesgo sísmico. El trabajo consiste en el diseño preliminar de un dispositivo friccional de aislamiento sísmico para equipos esenciales y contenidos. Se desarrolla el marco teórico y la capacidad de soportar eventos sísmicos. El trabajo se completa con, i) información sobre la respuesta del equipo diseñado localmente frente a sismos sensibles ocurridos en la región registrados por el instrumental sísmico del CeReDeTeC, ii) características generales del dispositivo de aislamiento sísmico en relación a su mecanismo particular de disipación de energía.

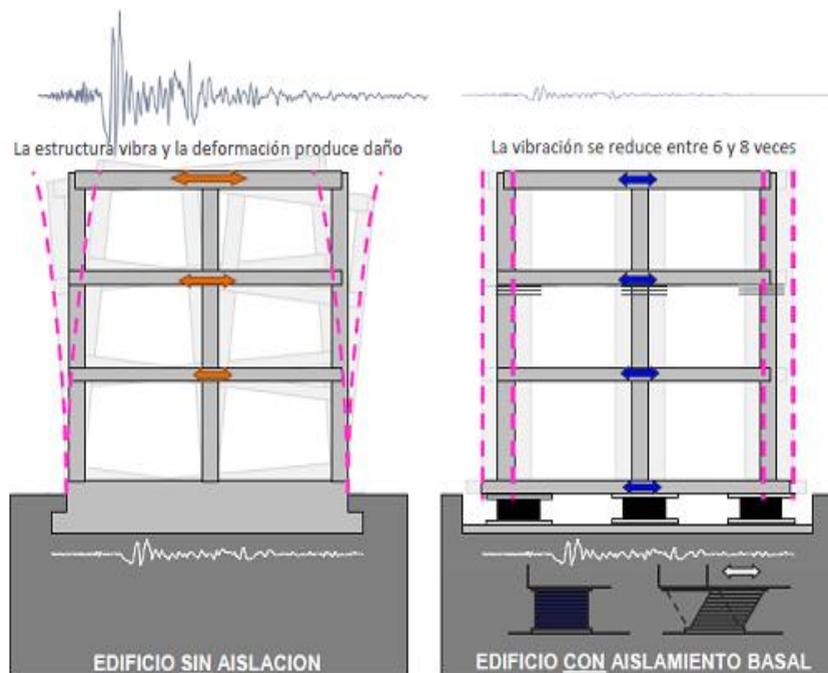
Palabras claves: protección sísmica - aislamiento sísmico – dispositivo friccional.

INTRODUCCIÓN

La ingeniería sísmica ha focalizado su esfuerzo a lo largo de los años en el diseño de sistemas estructurales resistentes a terremotos. Sin embargo, no se ha prestado la misma atención en garantizar un comportamiento sísmico adecuado de los componentes no estructurales, equipos, y contenidos. Las técnicas convencionales de protección sísmica en edificaciones apuntan a garantizar la seguridad de sus ocupantes, evitando la pérdida de vidas humanas, ya que según la Organización de la Naciones Unidas (ONU), los terremotos son responsables del 60% de las muertes provocadas por desastres naturales (Organización de la Naciones Unidas, 2010). Para ello, buscan impedir el colapso de una estructura durante un evento sísmico, permitiendo la disipación de energía mediante la aceptación de un nivel de daño controlado. Este grado de desempeño ocasiona grandes pérdidas económicas, asociadas a la operatividad posterior del edificio y al daño de sus componentes estructurales y no estructurales. Existen 3 técnicas de protección sísmica muy conocidas a nivel global: aislamiento sísmico, disipadores sísmicos y masa sintonizada. En el presente trabajo de investigación, hablaremos sobre la estrategia del aislamiento sísmico, que consiste en desacoplar la estructura del suelo de fundación con el objeto de que el movimiento del terreno durante un sismo no sea transmitido a la superestructura y que ella permanezca esencialmente detenida en un marco de referencia inercial (Figura 1). Se aclara que, un desacople perfecto entre suelo y estructura es impracticable actualmente, pero cualquier sistema de aislamiento busca concentrar en él la deformación impuesta por el suelo, filtrando el movimiento que se transmite hacia la superestructura.

Figura 1

Respuesta entre un edificio tradicional y un edificio aislado en su base (Gioacchini, 2017)



El aislamiento sísmico global de un edificio, si bien resulta ser una técnica de protección sísmica muy eficiente, representa un costo de inversión adicional que impacta en las decisiones desde el punto de vista económico situación que desalienta su uso y, en algunos casos especiales, no garantiza una protección eficiente de los equipos especiales que alberga la construcción. La implementación de dispositivos de aislamiento sísmico permite reducir la demanda sísmica sobre las estructuras y asegurar su capacidad de resistencia frente a terremotos destructivos. Por lo tanto, dichas estructuras muestran un comportamiento elástico ante la ocurrencia de importantes terremotos, situación que garantiza la estabilidad de la estructura aislada, la supervivencia de sus ocupantes y contenidos.

Los beneficios del aislamiento sísmico han quedado demostrados a nivel mundial en diversas oportunidades. En tal sentido se puede citar el caso del edificio aislado de la residencia de estudiantes de la Facultad Regional Mendoza de la UTN (Tornello et al., 2010). En Sudamérica, Chile es el país que más utiliza dispositivos de aislamiento sísmico. Las aplicaciones más relevantes son: un edificio de cuatro niveles para viviendas económicas, conformado por dos departamentos de 50 m² cada uno, aislado con dispositivos elastoméricos a base de láminas de caucho reforzado con acero; un puente de 383 metros de longitud (Marga-Marga), con un único tablero continuo apoyado en 36 aisladores elastoméricos reforzados con láminas de acero; un tramo elevado de 5 a 8 metros de la línea 5 del metro de Santiago, un edificio destinado al Hospital Militar, que consta de una superficie de 50 000 m², posee cuatro niveles por encima del sistema de aislamiento y se utilizaron 164 aisladores elastoméricos reforzados con placas de aceros con diámetros de 70 y 90 cm, siendo esta la estructura aislada de mayores dimensiones en América Latina. Entre las obras de infraestructura puede citarse el puente Amolanas de 268 metros de longitud. En los estribos y pilas existen dos apoyos de neopreno en una caja fija de acero con lámina de teflón, a excepción de la pila más alta donde sólo hay apoyo de neopreno. En ambos estribos hay dos amortiguadores viscoelásticos de Taylor Devices Inc. de 300 toneladas (Gioacchini, 2017).

DESARROLLO

Diseño de aisladores del tipo friccionales

El principio de los aisladores friccionales se basa en la ley de fricción de Coulomb dada por la Ecuación 1:

$$F_f = \mu N_n \quad (1)$$

Dónde:

N_n = Fuerza normal en la interface de aislación

$\mu = \tan(\phi)$, coeficiente de fricción

ϕ = Ángulo de roce medido entre la normal a la superficie y la dirección de la reacción sobre el cono de fricción

La disipación de energía se realiza a través del amortiguamiento de Coulomb o de fricción en seco, la cual es proporcional al coeficiente cinético de fricción, a la carga normal y a la amplitud del movimiento. El coeficiente de fricción es función de la naturaleza de la superficie de deslizamiento, velocidad relativa y de la presión de contacto, la cual puede variar con el tiempo. Investigaciones realizadas sobre dicho coeficiente de fricción concluyeron que la variación del coeficiente puede modelarse de acuerdo a la Ecuación 2:

$$\mu(t) = \mu_{\text{máx}} - (\mu_{\text{máx}} - \mu_{\text{mín}}) \exp(-b_f |\dot{x}_b|) \quad (2)$$

Dónde:

$\mu_{\text{máx}}$ = coeficiente de fricción a velocidades altas

$\mu_{\text{mín}}$ = coeficiente de fricción a velocidades cercanas a cero

b_f = parámetro que controla la variación del coeficiente de fricción en función de la velocidad

\dot{x}_b = Velocidad de deslizamiento

El periodo asociado a la rigidez lateral u horizontal del aislador friccional ($K=W/r$), recta que pasa por el origen viene dado por la Ecuación 3:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{K}{m}}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{W}{r m}}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{m g}{r m}}} = 2\pi \sqrt{\frac{r}{g}} \quad (3)$$

Dónde:

T = período del aislador friccional

K = rigidez lateral y horizontal del aislador friccional

m = masa del aislador friccional

W = peso del dispositivo sísmico en la dirección de estudio

r = radio de curvatura del plato deslizador

g = aceleración de la gravedad

La expresión anterior indica que el periodo no depende de la masa, por lo tanto, el péndulo friccional permite darle a la estructura aislada un periodo que está en función de las características geométricas del dispositivo, que es este caso, el período del aislador friccional está en función de su radio de curvatura del plato deslizador.

Diseño de aislador friccional de impacto con un núcleo de goma en su interior

En el presente trabajo, se centra en el diseño de un aislador sísmico friccional con un núcleo de goma en su interior, en donde la goma le otorga al dispositivo mayor capacidad de disipación sísmica, frente a los terremotos destructivos. Además, el aislador friccional va a ser colocado en la parte inferior de los equipos esenciales de quirófanos, como, por ejemplo, una cama de cirugía (Figura 2).

El prediseño del dispositivo, comienza asumiendo el período del aislador friccional ($T=2s$) y la carga máxima axial que va a soportar ($N_{m\acute{a}x}=2Tn$), y partiendo de la Ecuación 3, por medio de despejes y ordenamiento, llegamos a la Ecuación 4 para obtener el radio de curvatura:

$$r = \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 g \quad (4)$$

Obtenemos un radio de curvatura de $r=101,45$ cm, y en base a la Ecuación 5 de la Norma Chilena 2745-03 que contempla el diseño de estos dispositivos, nos permite determinar los máximos desplazamiento frente a un evento telúrico, lo cual es importante, porque los Reglamentos de Protección Sísmica, recomiendan que el diámetro del dispositivo friccional, tiene que ser como mínimo el doble del desplazamiento máximo ($d=2D_m$):

$$D_{m[mm]} = \frac{C_d M_m}{B_d} = \frac{300 z M_m}{B_d} \quad (5)$$

Dónde:

Cd = Coeficiente de tipo de suelo

Bd = Coeficiente de amortiguamiento efectivo, se obtiene de la Tabla C-2 NCh2745-03

Z = Coeficiente de zona, se obtiene de la Tabla 5 NCh2745-03

Mm = Parámetro de mayoración, se obtiene de la Tabla 3 NCh2745-03

Figura 2

Cama de Cirugía que se colocará arriba del aislador sísmico (Hospital Central, Mendoza, 2024)



Ahora, se definen los materiales que van a componer el aislador friccional. El plato superior e inferior son de acero, el deslizador superior e inferior son de teflón con $\mu=0,08$ y $\sigma_t=4,6$ kN/cm², y el núcleo interior es de goma de caucho con $\sigma_c=5$ Mpa; respetando y verificando los reglamentos: NCh2745-03, ASCE/SEI 7-10 y FEMA, obtenemos el diseño preliminar del aislador friccional de impacto con un núcleo de goma en su interior, como se muestra en la Figura 3 y 4:

Figura 3

Diseño preliminar de Aislador friccional de impacto con un núcleo de goma en su interior (Cenas, 2023)

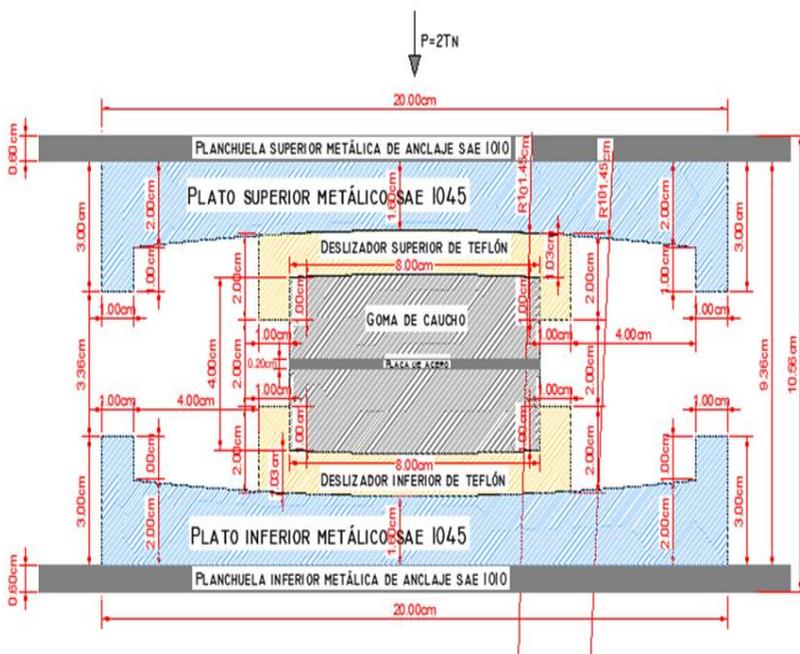
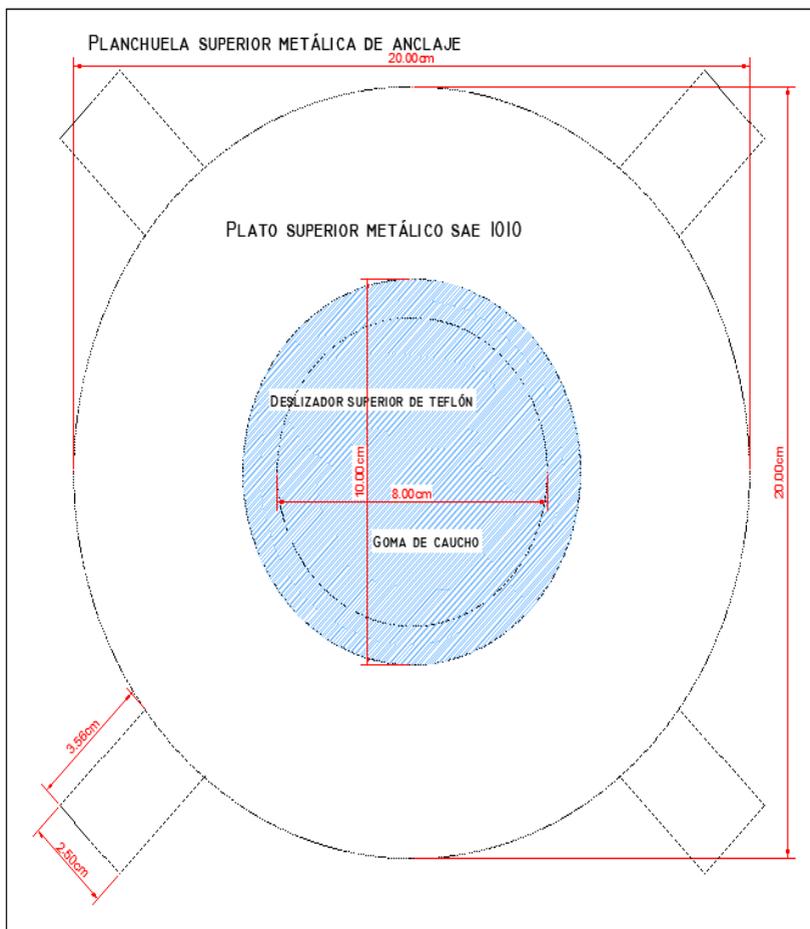


Figura 4

Vista superior del Aislador friccional de impacto con un núcleo de goma en su interior (Cenas, 2023)



RESULTADOS

Avanzando con el prediseño del dispositivo, y verificando los reglamentos sismorresistentes y de protección sísmica ut supra, llegamos a las tablas resumen con los parámetros geométricos y mecánicos, de la parte elastomérica (goma) y de la parte friccional (platos de acero y deslizador), donde se puede visualizar que las demandas sísmicas disminuyen (Tornello et al., 2022) con el aislamiento sísmico de base (Tornello et al., 2023).

Tabla 1

Cálculo de parámetros geométricos y mecánicos del aislador – Parte elastomérica (Cenas, 2023)

DISEÑO DE AISLADOR SÍSMICO - PARTE ELASTOMÉRICA		
Descripción	Valor	Unidad
Período asumido (T_i)	2,00	s
Altura total (H)	4,00	cm
Diámetro (d)	8,00	cm
Tipo	H5	adim.
Espesor goma (tr)	1,9	cm
Espesor placa de acero (ts)	0,2	cm
Esfuerzo de compresión (σ_{adm})	5,00	Mpa
Módulo de elasticidad longitudinal (E)	5,90	Mpa
Módulo de elasticidad transversal (G)	0,64	Mpa
Área	50,27	cm ²
Esfuerzo normal (N)	19,62	kN
Esfuerzo de compresión (σ_c)	3,90	Mpa
Rigidez mínima lateral ($K_{min.Lat}$)	19,74	kN/m
Rigidez horizontal (K_h)	84,66	kN/m
Verificación de Esfuerzos: $\sigma_c < \sigma_{adm}$	Si Verifica	adim.

Tabla 2

Cálculo de parámetros geométricos y mecánicos del aislador – Parte friccional (Cenas, 2023)

DISEÑO DE AISLADOR SÍSMICO FRICCIONAL		
Descripción	Valor	Unidad
Período asumido (T_i)	2,02	s
Radio de curvatura (r)	1,01	m
Tension admisible del Teflon del deslizador (σ_{adm})	2,44	kN/cm ²
Coefficiente de fricción (μ) del Teflón	0,08	adim.
Esfuerzo normal para posición extrema (N)	19,62	kN
Diámetro requerido del deslizador (d_1) para la posición	3,20	cm
Diámetro adoptado del deslizador (d_1) para la posición	10,00	cm
Tension normal del Teflon del deslizador (σ_f)	0,25	kN/cm ²
Área del deslizador d_1 (A_{d1})	78,54	cm ²
Verificación de Esfuerzos: $\sigma_t < \sigma_{adm}$	Si Verifica	adim.
Fuerza máxima ($F_{m\acute{a}x}$) Régimen IV	3,52	kN
Desplazamiento máximo ($\mu_{m\acute{a}x}$)	9,85	cm
Rigidez efectiva del aislador (K_{ef})	17,87	N/mm
Amortiguamiento efectivo (ξ)	22,52%	%
Período del dispositivo (T_{dis})	2,10	s

En próximas investigaciones y en un mayor grado de avance de la Tesis Doctoral, se pretende determinar el amortiguamiento efectivo y la energía máxima de disipación. También, poder fabricarlo con tecnología local, y otorgarle usos aplicativos en equipos esenciales, como los equipos quirúrgicos. A continuación, se muestran las leyes constitutivas teóricas de la goma y de la parte metálica friccional en las Figuras 5 y 6.

Figura 5

Ley constitutiva de aislador elastomérico de goma APA 1-1 ensayado en el CeReDeTeC (marzo de 2024)

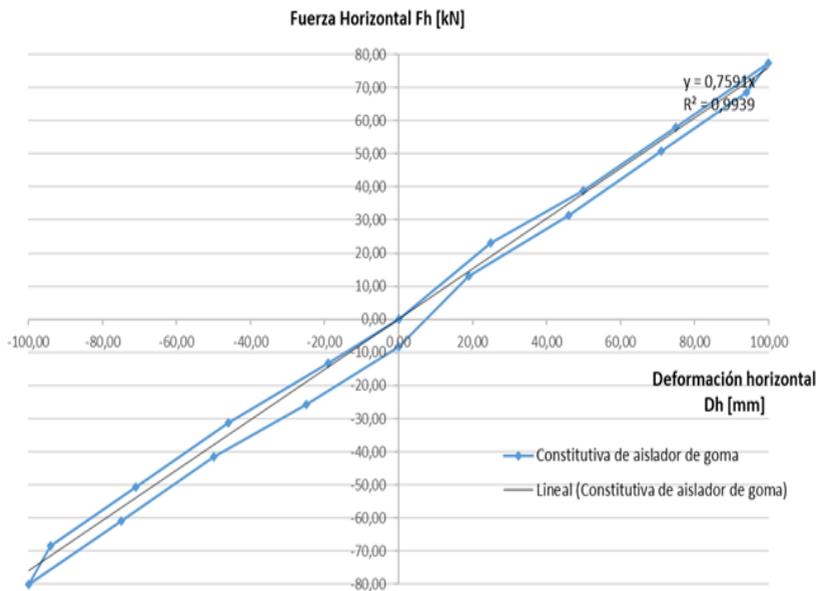
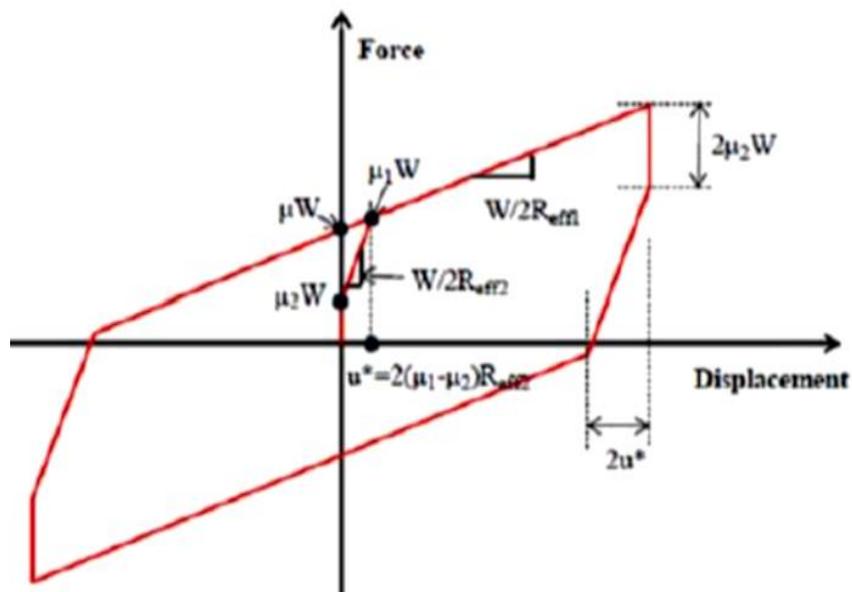


Figura 6

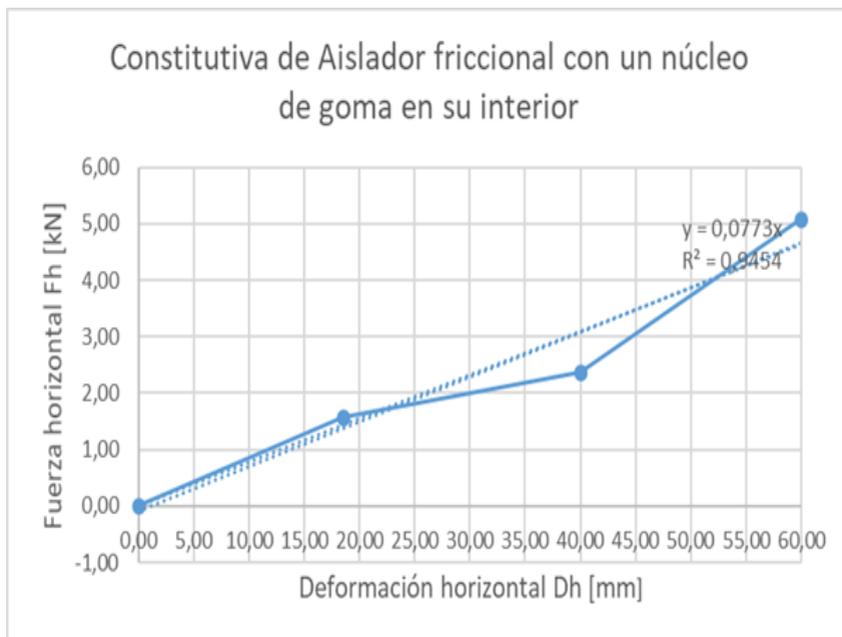
Ley constitutiva de aislador friccional de triple péndulo



En base a la teoría de las figuras 5 y 6, componemos la Ley constitutiva para nuestro dispositivo de aislación sísmica. La figura 7 está descrita por 3 puntos característicos: zona elástica de goma, zona gobernada por el friccional de impacto; y finalmente, por la deformación de la goma en el borde del plato metálico. Y se puede predecir que el impacto interno del dispositivo sísmico, generará mayor disipación de energía sísmica para la superestructura que se conservará en campo elástico (Aquad, Almazán, & Quizanga, 2024).

Figura 7

Constitutiva de Aislador friccional con un núcleo de goma en su interior (Cenas, 2023)



CONCLUSIONES

Se observa que la Ley constitutiva de aislador friccional de impacto con un núcleo de goma en su interior (figura 7), sigue una forma trilineal, lo cual podría tener una importante disipación de energía sísmica. El período del dispositivo sísmico friccional de 2 s, depende del radio de curvatura y no del peso, a lo que le corresponde un radio de curvatura de 101,45 cm.

La aplicación y el uso inmediato para los dispositivos sísmicos son equipos esenciales de salud, monumentos históricos, motocompresores de yacimientos petroleros, centrales hidroeléctricas, servidores de internet, etc. Es factible la fabricación de aisladores sísmicos con

tecnología local. Respetando y verificando los pertinentes reglamentos sismorresistentes y de protección sísmica, como NCh2745-03, ASCE/SEI 7-10 y FEMA.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer a las autoridades de la Universidad y de la Subsecretaría de Postgrado Rectorado – Becas Doctorales para docentes UTN. También, se agradece a todos los docentes investigadores del CeReDeTeC, por los aportes y sugerencias realizadas al texto y al contenido del presente trabajo.

REFERENCIAS

- Auad, G., Almazán, J., & Quizanga D. (2024, octubre 24-26). *Validación estática y dinámica del comportamiento lateral del aislador Lateral Impact Resilient Double Concave Friction Pendulum (LIR-DCFP)* [Conference presentation]. XIII Congreso Chileno de sismología e ingeniería sísmica ACHISINA, Viña del Mar, Región de Valparaíso, Chile. https://www.eabstract.cl/paper/proceedings?event_id=46&page=5
- Cenas, K., Tornello, M., Gioacchini G. (2023). *Técnicas de protección sísmica basada en el aislamiento sísmico de base*. In María Luisina Biondi, Ariela Magali Bueno, María Jimena Lloret & Cecilia J. Soengas (Eds.), Libro de actas XII ENIDI: Décimo Segundo Encuentro de Investigadores y Docentes de Ingeniería. eduTecNe.
- Gioacchini, G. (2017). *Desarrollo de un dispositivo de aislamiento sísmico con bajo nivel de carga axial* [Tesis de Doctorado, Universidad Tecnológica Nacional].
- Organización de las Naciones Unidas (28 de enero de 2010). Más de 3800 desastres naturales en la última década. *Noticias ONU. Mirada global. Historias humanas*. <https://news.un.org/es/story/2010/01/1183891>
- Tornello, M., & Frau, C. (2010). Experiencias sobre aislamiento sísmico en Mendoza, Argentina. Diseño, modelación y construcción. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 15(1), 1-47. <https://ia801202.us.archive.org/9/items/Art01Argentina/Art%2001%20Argentina.pdf>
- Tornello, M., Gioacchini, G., Cenas K., Tillar, A. (2022). *Comparación cualitativa e instrumental de las respuestas del edificio aislado y el de base fija de la Residencia Universitaria de la UTN-FRM*. In Juan Ernesto Calderón, Josefina Huespe & Esteban Anzoise (Eds.), Investigación y Educación en Ciencias de la Ingeniería (Vol. 3, 2da ed.). Universidad Tecnológica Nacional.

* * *