

24. Comportamiento mecánico de polímeros para sistemas de aislamiento sísmico de bajo costo

E. A. Burgos, E. A. Pérez y G. H. Pereira, Departamento de Mecánica Estructural, UCA

Resumen

Los resultados obtenidos del módulo de elasticidad a tensión, módulo de elasticidad a compresión, módulo de rigidez a cortante y amortiguamiento equivalente son presentados para dos tipos de polímeros: compuesto flexible de PVC y hule termoplástico (TPR).

Los valores del módulo de elasticidad a tensión fueron mayores para el PVC. En el módulo de elasticidad a compresión se evaluó la influencia del factor de forma, obteniéndose para ambos materiales un aumento del módulo de elasticidad al incrementar dicho parámetro; con estos resultados se obtuvo un valor aproximado del módulo Bulk para el PVC y TPR. Los valores del módulo de rigidez a cortante fueron mayores para el PVC y los valores de amortiguamiento equivalente fueron muy similares entre ambos materiales.

En general, el PVC posee mejores propiedades que el TPR, además de poseer características similares y un menor costo que el caucho de bajo amortiguamiento utilizado en dispositivos reales.

Palabras claves

Aislamiento sísmico, bajo costo, amortiguamiento, PVC, hule termoplástico, módulo de elasticidad a compresión, módulo de elasticidad a tensión, módulo de rigidez a cortante, polímeros, propiedades mecánicas.

Esta investigación fue posible gracias al apoyo de la empresa Tubos y Perfiles Plásticos S.A. de C.V. (TYP S.A. de C.V.), quien proporcionó los materiales ensayados; del Centro de Tecnología Aplicada Fundación Padre Arrupe, quien proporcionó el equipo necesario para la realización de los ensayos de tensión; y de la Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas", quien proporcionó la asesoría, piezas, moldes y demás equipos necesarios para la culminación del estudio.

E. A. Burgos, Departamento de Mecánica Estructural de la Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas", Antiguo Cuscatlán, El Salvador (e-mail: eburgos@uca.edu.sv).

E. A. Pérez, Ingeniero Civil graduado de la Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas", Antiguo Cuscatlán, El Salvador (e-mail: 00075108@uca.edu.sv).

G. H. Pereira, Ingeniera Civil graduada de la Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas", Antiguo Cuscatlán, El Salvador (e-mail: 00005108@uca.edu.sv).

I. INTRODUCCIÓN

El aislamiento sísmico es una técnica cuyos orígenes se remontan a 1870, año en el que fue registrada la primera aplicación del concepto [12]. En

los últimos 30 años, ha tenido un gran auge gracias al desarrollo exitoso de disipadores mecánicos y materiales elastoméricos con capacidades de disipación de energía muy elevadas [6], de manera que para el año



2012 más de 20,000 estructuras se encontraban aisladas sísmicamente en más de 30 países [5].

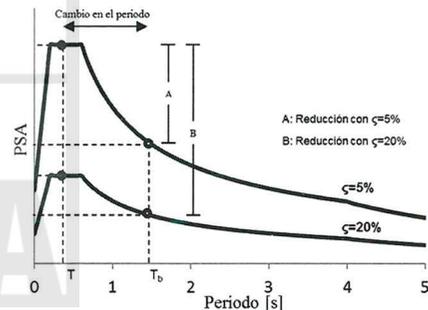
Durante un sismo, las estructuras fijadas en el suelo responden aumentando sus desplazamientos y aceleraciones con la altura, situación que puede provocar el colapso de la estructura, daños en componentes estructurales, daños en componentes no estructurales o, en muchos casos, daños en los equipos o mobiliario que albergan, los cuales suelen poseer un costo más elevado que el edificio mismo. A pesar de utilizar códigos de diseño recientes, los diseños actuales no están exentos de dichos efectos nocivos. Es decir, el emplear un diseño sismorresistente no garantiza la ausencia de daños. Es por ello que el aislamiento sísmico surge como una solución viable para reducir este tipo de respuesta, disminuyendo la probabilidad de daños en las edificaciones y su contenido, especialmente en aquellas con gran importancia social, política, comercial o histórica.

En general, esta tecnología consiste en incrementar el periodo fundamental de las estructuras y ubicarlo fuera del rango de periodos de los sismos con mayor contenido energético. Lo anterior se logra colocando dispositivos flexibles horizontalmente entre las fundaciones y el edificio.

Los aisladores sísmicos, en conjunto, son los encargados de absorber las deformaciones inelásticas y filtrar las aceleraciones de altas frecuencias para que la superestructura aislada se mueva como un cuerpo rígido y se someta a bajas aceleraciones y deformaciones [3]. Por ello, deben reunir las siguientes características independientemente de su tipo: flexibilidad, disipación de energía y alta rigidez ante cargas leves [6]. Además, los dispositivos deben tener la capacidad de proveer una fuerza de restitución al sistema que garantice desplazamientos residuales nulos en el edificio; en caso contrario, se deberá garantizar la estabilidad de la estructura ante desplazamientos permanentes o se deberán incluir sistemas externos de restitución.

El aislamiento sísmico tradicionalmente se ha utilizado para resistir sismos cuya máxima liberación de energía ocurre en el rango de periodos bajos, por lo que el periodo natural aislado debe ser mayor que el periodo de la estructura sin aislar y mayor que el periodo predominante del movimiento del suelo [7]. Con la ayuda de un espectro de diseño, como el mostrado en la Fig. 1., se puede comprobar que, después de la meseta inicial, a mayores periodos corresponden menores aceleraciones. Las deformaciones, por el contrario, se comportan de manera diferente a causa del incremento en el periodo que se busca al aislar una estructura, debido a que ante dichos cambios, éstas tienden a incrementarse. Sin embargo, los desplazamientos no se transmiten a la superestructura ya que se concentran predominantemente en los dispositivos [1]. En ambos casos, los comportamientos son mejorados con mayores niveles de amortiguamiento en los dispositivos, lo cual permite disminuir tanto las aceleraciones como las deformaciones.

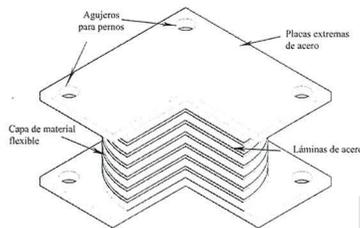
Fig. 1. Modelos de espectros de diseño para diferentes grados de amortiguamiento



En la actualidad existen varios tipos de aisladores sísmicos que toman en cuenta los comportamientos mencionados anteriormente. Entre los más utilizados se encuentran los aisladores laminados simples. Estos aisladores son fabricados intercalando sucesivamente capas de

materiales flexibles, comúnmente caucho, con placas de acero, tal como se muestra en la Fig. 2. De esta manera, el dispositivo puede moverse horizontalmente bajo la acción de los sismos y puede soportar el peso de las edificaciones sin experimentar deformaciones laterales excesivas.

Fig. 2. Esquema de un aislador sísmico laminado simple.



teoría del aislamiento sísmico ha desarrollado expresiones para estimar los parámetros utilizados en el diseño de estos dispositivos, conociendo las propiedades mecánicas y de servicio de los materiales flexibles. De esta manera, los valores de rigidez vertical, rigidez horizontal, periodo aislado, entre otros, pueden ser determinados con los valores del módulo de elasticidad a tensión, compresión y del módulo de rigidez a cortante de los materiales constituyentes.

Sin embargo, se ha demostrado que las características geométricas de las láminas de caucho influyen en sus propiedades mecánicas y, por consiguiente, en el comportamiento de los aisladores. Estudios llevados a cabo por Gent y Lindley [2] en caucho, sugieren que la relación entre el diámetro y el espesor de las capas de material flexible (factor de forma) afecta las propiedades a compresión de los dispositivos, de manera que proponen un nuevo módulo de elasticidad llamado módulo de elasticidad aparente, E_a , el cual se define en función del módulo de elasticidad a tensión, E , y el factor de forma, S , así:

$$E_a = E(1 + 2S^2) \quad (1)$$

Sin embargo, en casos en los que piezas delgadas se sometan a fuerzas de compresión, se puede considerar una contribución del módulo Bulk, el cual es un parámetro que mide la relación entre la presión hidrostática y el volumen deformado de un cuerpo bajo dicha compresión [8]. El módulo Bulk es comúnmente obviado por ser de un orden varias veces superior que el módulo de elasticidad. En vista de esto, Gent y Lindley [2] proponen un módulo de elasticidad aparente modificado E'_a , que toma en cuenta los efectos de la compresibilidad Bulk, E_∞ , y que puede expresarse como:

$$\frac{1}{E'_a} = \frac{1}{E_a} + \frac{1}{E_\infty} \quad (2)$$

Como se puede observar, la teoría del aislamiento sísmico se enfoca principalmente en materiales elastoméricos. Sin embargo, en El Salvador no existen empresas industriales productoras de caucho natural pues únicamente pocos trabajadores artesanales extraen el material directamente del árbol de hule mediante un proceso parecido al utilizado en el bálsamo. Por ello, el material debe ser importado de países como Guatemala, México, Costa Rica, Colombia, Tailandia, entre otros. Además, las dimensiones máximas de los aisladores elastoméricos laminados simples rondan aproximadamente un metro de diámetro y medio metro de altura, por lo que la fabricación de los dispositivos se dificulta debido a que se necesitarían hornos de tamaño similar y moldes especializados de inyección con los que la industria salvadoreña actual no cuenta.



Bajo dicha perspectiva, en nuestro país resulta irrealizable la manufactura de aisladores sísmicos a base de caucho, por lo que surge la necesidad de desarrollar los dispositivos con algún otro material que provea los mismos niveles de efectividad y seguridad ante sismos y que involucre un tratamiento más sencillo. En la investigación realizada se estudiaron dos polímeros como alternativa al caucho, PVC y TPR. En el presente documento se explica la metodología seguida para elaborar los especímenes, el programa experimental utilizado y los resultados obtenidos. Finalmente, al comparar sus características con las del caucho se concluyó si estos materiales podrían o no, ser utilizados en dispositivos de aislamiento sísmico.

II. MATERIALES

Los polímeros utilizados en la investigación fueron proporcionados gracias a la colaboración de la empresa Tubos y Perfiles Plásticos S.A. de C.V. (TYP S.A. de C.V.). Éstos fueron seleccionados en base a su disponibilidad en el mercado. Las características principales de estos materiales se detallan a continuación:

A. *Compuesto flexible de PVC*

Este material es fabricado en el país por TYP S.A. de C.V., bajo la licencia de Imperial Chemical Industries (ICI) y es conocido comercialmente como compuesto de PVC IRVIC del tipo IC/165-020. Se comercializa en forma de pellet o polvo, empacado en bolsas de 25 kg. Puede ser elaborado con diferentes durezas, entre las que se encuentra la Shore A 65, que fue la utilizada en la investigación.

B. *Hule termoplástico estirénico*

Este material es importado de Corea del Sur, es fabricado por LG Chemical y se conoce comercialmente como Luprene LG411S. Se comercializa en forma de pellet, en presentaciones de 20 kg. El material utilizado fue elaborado agregando una parte de aceite parafínico por

cada dos partes de pellet (en peso), con lo que se obtuvo una dureza Shore A 45.

III. ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES

Para ambos materiales se siguió el mismo procedimiento para la elaboración de los especímenes a ensayar, distinguiendo dos etapas principales: la plastificación y el prensado de los materiales.

A. *Plastificación del material*

La plastificación consiste en triturar y fundir la materia prima de los polímeros con el fin de obtener, a partir de éstos, una lámina homogénea y maleable. Para ello se utilizan molinos de rodillos con temperaturas controladas, ya que no se puede sobrepasar la temperatura de plastificación de los materiales para no alterar sus propiedades ni generar su degradación.

Las temperaturas de plastificación utilizadas fueron verificadas para que éstas se encontraran dentro del rango propuesto por la teoría para el tratamiento de cada material. De esta manera, la temperatura de plastificación del PVC fue de 150°C y la del TPR de 155°C. El tiempo de laminado una vez el material había plastificado fue de 5 minutos.

B. *Prensado del material*

Una vez la lámina del material fue obtenida, se empleó una máquina de prensado con un sistema de calentamiento y enfriamiento controlado. El procedimiento seguido consistió en aplicar presión y calor hasta que la lámina del material se fundiera y tomara la forma del espécimen deseado.

En esta etapa, las temperaturas de prensado fueron: para el PVC 160°C y para el TPR 165°C. Una vez se alcanzó la temperatura deseada, el prensado se logró aplicando una fuerza de 1.5 t sobre cada molde durante 4 minutos y medio. Al finalizar, la temperatura se redujo gradualmente hasta 40°C y la fuerza fue retirada para extraer las muestras.

IV. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para determinar el comportamiento mecánico de los polímeros estudiados se realizaron tres tipos de pruebas con cada material. Éstas se enlistan en la Tabla I. En cada ensayo de tensión y compresión fue necesario un espécimen, mientras que para cada ensayo de corte fueron necesarios dos.

Tabla I. Ensayos realizados a los polímeros estudiados

Material	Número de ensayos		
	Tensión	Compresión	Corte
PVC	3	16	3
TPR	3	14	3

El programa experimental se enfocó en determinar, para ambos materiales, el módulo de elasticidad bajo condiciones de tensión y compresión, al 10% de la deformación unitaria, y el módulo de rigidez a cortante, al 100% de la deformación unitaria. Adicionalmente, de los ensayos de compresión se obtuvo una aproximación del módulo Bulk y de los ensayos de corte se obtuvo el amortiguamiento equivalente. El detalle de los ensayos realizados es presentado a continuación:

A. Ensayo de compresión

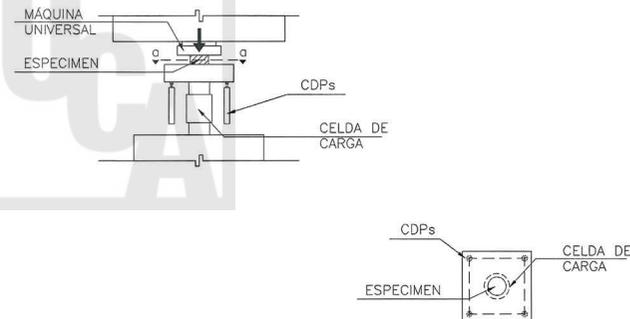
Estos ensayos se llevaron a cabo para determinar el módulo de elasticidad aparente modificado a compresión (al 10% de deformación unitaria), E'_a , de los materiales investigados.

Los ensayos fueron realizados utilizando la norma ASTM D575-91 [10]. En ella se propone ensayar especímenes circulares con dimensiones determinadas; sin embargo, con el propósito de conocer la relación que guarda el factor de forma con este parámetro, las dimensiones de las muestras ensayadas fueron modificadas, manteniendo su geometría circular. De esta manera, se elaboraron especímenes utilizando moldes con diferentes combinaciones de diámetros y espesores.

Los ensayos fueron realizados en una máquina Tinius Olsen, de 100 t de capacidad, aplicando compresión a las muestras entre dos placas gruesas, planas y paralelas de acero. Las muestras fueron fijadas utilizando papel lija grado 400. Debido a que el espesor de los especímenes impedía la colocación de dispositivos de medición de deformaciones, el registro de la deformación se hizo de manera indirecta, utilizando 4 transductores de desplazamiento, de 10 mm de capacidad, y midiendo el acercamiento de una placa rígida hacia la otra (ver Fig. 3). Las medidas de deformación y carga fueron registradas a cada segundo por medio de un data logger; el registro inició antes que la muestra tuviera contacto con el cabezal para controlar, de manera más precisa, el instante en que el espécimen empezara a ser cargado.

Antes de registrar el ciclo de carga que se utilizó para calcular el módulo de elasticidad aparente modificado a compresión, se realizaron dos ciclos de carga y descarga [10], hasta el 10% de la deformación unitaria del espécimen, para acondicionar al material. La velocidad de carga fue de 9.29 mm/min.

Fig. 3. Esquema de ensayo de compresión.



B. Ensayo de tensión

Para determinar el módulo de elasticidad a tensión, o módulo de Young de los materiales estudiados, se realizaron ensayos de tensión empleando la norma ASTM D638-10 [11]. Los ensayos no pudieron ser realizados con probetas del tipo IV, sino que fueron realizados con probetas del tipo II, ya que era el único molde con el que se disponía.

Este parámetro es importante en el diseño de aisladores sísmicos pues éstos pueden experimentar tensión bajo condiciones de flexión.

Los ensayos fueron realizados gracias a la colaboración del laboratorio de suelos y materiales del Centro de Tecnología Aplicada Fundación Padre Arrupe, utilizando una máquina Ibertest de 10 t de capacidad, y estirando las probetas entre dos mordazas aserradas de acero. El equipo no era autocentable, por lo que las muestras fueron fijadas manualmente, de manera que su eje longitudinal coincidiera con el eje de aplicación de carga. La deformación de las probetas fue medida indirectamente mediante el registro de la carrera de la máquina, lo cual fue aceptado ya que las incertezas por acomodamiento o deslizamiento resultan insignificantes ante las grandes deformaciones de estos materiales. En este caso se utilizó el equipo integrado de recolección de datos de la máquina, el cual registró 50 datos por segundo. La velocidad establecida del ensayo fue de 50 mm/min, dándole mayor importancia al tipo de material que al tipo de probeta utilizada.

Las probetas no fallaron a pesar de haber sido llevadas a deformaciones de aproximadamente el 100%, sin embargo, por haber sido un único ciclo de carga y para tener similitud con las condiciones del ensayo de compresión, los datos fueron truncados al 10% de la deformación unitaria.

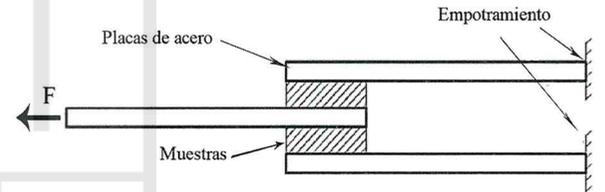
C. Ensayo de corte

Los ensayos de corte se llevaron a cabo basándose en el anexo de la norma ASTM D4014-03 [9] y fueron realizados para determinar el módulo

de rigidez a cortante de los materiales investigados. Este parámetro es el más importante de toda la investigación pues sin él es imposible diseñar los dispositivos de aislamiento sísmico y prever su comportamiento.

En la investigación, a diferencia del arreglo cuádruple propuesto por la normativa, se utilizó una probeta de doble muestra, propuesta por LTV Energy Products Co. [4], la cual puede observarse esquemáticamente en la Fig. 4. Este arreglo fue seleccionado con el propósito de realizar los ensayos aplicando ciclos bidireccionales de carga que asemejaran el comportamiento en servicio de los materiales; sin embargo, debido a que no se pudo garantizar el empotramiento requerido de las placas laterales del arreglo, únicamente se realizaron ensayos unidireccionales.

Fig. 4. Arreglo de doble muestra utilizado en el ensayo de corte.



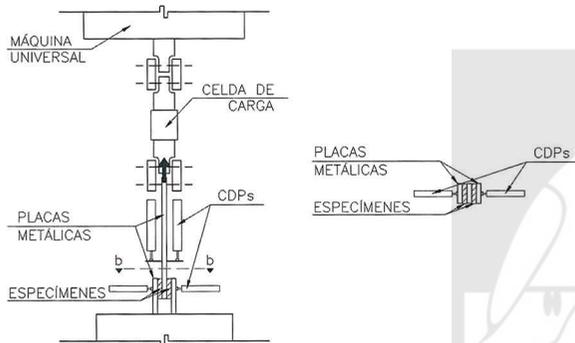
de las muestras utilizadas guardaron una relación de aproximadamente 1:4 con respecto a su lado más corto, para garantizar que la muestra estuviera sometida a corte. Las muestras de PVC y TPR fueron adheridas a las piezas de acero con pegamento Rema Tip Top, el cual brindó la adherencia necesaria para completar las pruebas satisfactoriamente.

Los ensayos fueron realizados utilizando la misma máquina que en los ensayos de compresión, cargando y descargando la placa central de las probetas ensambladas. El registro de las deformaciones se hizo midiendo el desplazamiento de la placa central con 2 transductores de desplazamiento, de 25 mm de capacidad. Además, se agregaron 2 transductores laterales, de 10 mm de capacidad, para verificar la

estabilidad horizontal del arreglo propuesto (ver Fig. 5). Las medidas de deformación y carga fueron tomadas a cada segundo.

Antes de registrar el ciclo de carga que se utilizó para calcular el módulo de rigidez a cortante, se realizaron 5 ciclos de carga y descarga [9], hasta el 100% de la deformación unitaria, para acondicionar al material. La velocidad fue establecida en función del espesor de las muestras, por lo que los ensayos fueron realizados a velocidades que variaron entre 9.30 mm/min y 10.50 mm/min.

Fig. 5. Esquema de ensayo de corte.



V. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS

A. Módulo de elasticidad aparente modificado a compresión (E'_a) y módulo Bulk (E^∞)

Los resultados obtenidos para el módulo de elasticidad aparente modificado a compresión se presentan en la Tabla II.

Para el PVC, los valores del módulo de elasticidad aparente modificado, E'_a , oscilaron entre 7.21 MPa para un factor de forma de 0.48, y 204.33 MPa para un factor de forma de 3.82. Para el TPR, los valores oscilaron

entre 11.65 MPa para un factor de forma de 1.25, y 115.07 MPa para un factor de forma de 7.53. Al comparar ambos materiales se puede observar que, en general, para factores de forma similares, los valores de E'_a obtenidos para el PVC son superiores a los valores obtenidos para el TPR, lo que significa que este último es un material más flexible bajo estas condiciones.

Tabla II. Módulo de elasticidad a compresión en PVC y TPR

PVC				TPR			
ID Molde	ID Muestra	S	E'_a (MPa)	ID Molde	ID Muestra	S	E'_a (MPa)
Molde 3	PVC65-C-M31	0.48	7.21	Molde 2	TPR45-C-M22	1.25	11.65
Molde 3	PVC65-C-M32	0.48	8.09	Molde 2	TPR45-C-M21	1.48	14.29
Molde 2	PVC65-C-M22	1.52	32.73	Molde 1	TPR45-C-M12	1.96	16.25
Molde 2	PVC65-C-M21	1.53	34.98	Molde 1	TPR45-C-M11	2.05	17.27
Molde 2	PVC65-C-M23	1.55	22.72	Molde 6	TPR45-C-M63	3.58	39.25
Molde 1	PVC65-C-M13	1.94	57.65	Molde 6	TPR45-C-M61	3.71	38.26
Molde 1	PVC65-C-M11	2.05	69.20	Molde 6	TPR45-C-M62	3.94	34.37
Molde 1	PVC65-C-M12	2.34	89.16	Molde 4	TPR45-C-M42	5.35	56.55
Molde 4	PVC65-C-M42	5.80	171.32	Molde 4	TPR45-C-M43	5.43	57.30
Molde 6	PVC65-C-M61	3.77	200.13	Molde 5	TPR45-C-M51	4.71	59.66
Molde 5	PVC65-C-M52	5.23	203.27	Molde 4	TPR45-C-M41	5.89	61.11
Molde 6	PVC65-C-M62	3.82	204.33	Molde 5	TPR45-C-M52	4.92	62.49
				Molde 7	TPR45-C-M72	7.53	115.07

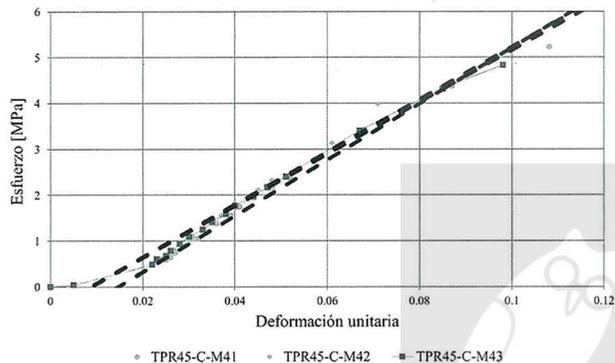
A pesar del escaso número de especímenes ensayados se puede observar un notable aumento en el módulo de elasticidad aparente modificado a compresión a medida se incrementa el factor de forma, lo cual indica una clara influencia de las características geométricas en este parámetro.

En la mayoría de casos, el comportamiento esfuerzo-deformación unitaria de estos materiales no fue lineal, sino que presentó una zona de transición inicial que tendió a estabilizarse a medida se incrementó la carga. Por ello, cuando no fue posible acomodar los datos con regresiones lineales, se utilizó el método de corrección propuesto por la norma, tal como se muestra en la Fig. 6. Además, se observó que en los primeros ciclos de carga de los ensayos se obtuvieron mayores valores de esfuerzo que en los ciclos sucesivos, lo cual comprobó que ambos



materiales son sensibles al acomodamiento y a deformaciones previas. Por otra parte, también se observó que las muestras con menores factores de forma presentaron una curva esfuerzo-deformación unitaria más definida que el resto de especímenes.

Fig. 6. Relaciones esfuerzo-deformación unitaria ajustadas para el 3er ciclo de carga de los especímenes TPR45-C-M41, TPR45-C-M42 y TPR45-C-M43.



Para la determinación del módulo Bulk, E_{∞} , se graficaron los valores mostrados en la Tabla II de E'_a vs. S de cada material. La gráfica resultante para el PVC se presenta en la Fig. 7, y la gráfica resultante para el TPR en la Fig. 8.

Fig. 7. Relación entre el módulo de elasticidad aparente modificado a compresión y el factor de forma para PVC.

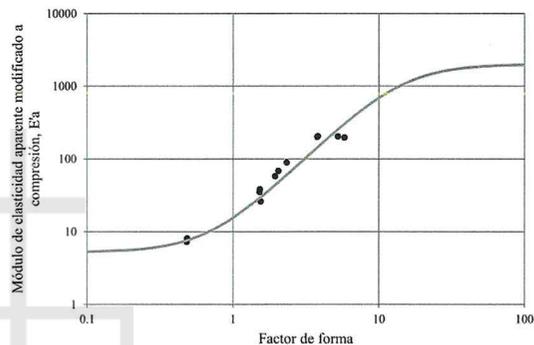
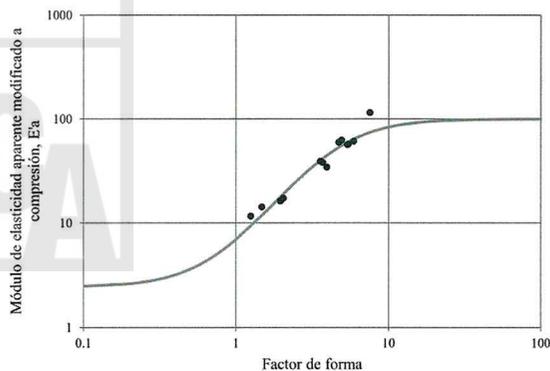


Fig. 8. Relación entre el módulo de elasticidad aparente modificado a compresión y el factor de forma para TPR.



En ambas gráficas, la línea gris representa el comportamiento teórico que debería poseer el módulo de elasticidad aparente modificado, la cual fue obtenida ajustando los valores del módulo de Young y del módulo Bulk en (1) y (2). Para el PVC, los valores elegidos que mejor se ajustaron a la dispersión de los puntos fueron: para el módulo de Young, 5 MPa, y para el módulo Bulk, 2000 MPa. Para el TPR, los valores elegidos fueron de 2.5 MPa, para el módulo de Young, y 100 MPa para el módulo Bulk.

B. Módulo de elasticidad a tensión (E)

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla III. Para el PVC, el valor del módulo de elasticidad a tensión osciló entre 5.73 MPa y 6.13 MPa; para el TPR, el valor osciló entre 2.33 MPa y 2.72 MPa.

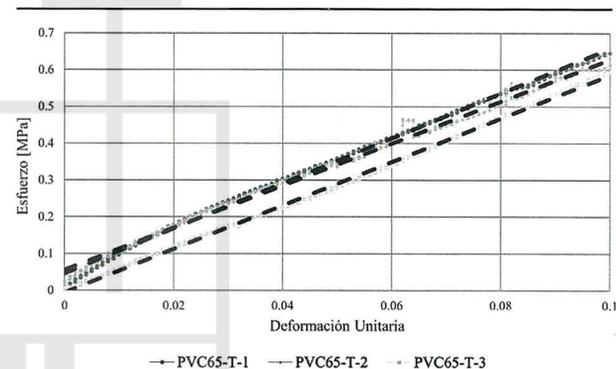
Tabla III. Módulo de elasticidad a tensión en PVC y TPR

PVC		TPR	
ID Muestra	E (MPa)	ID Muestra	E (MPa)
PVC65-T-1	6.13	TPR45-T-1	2.71
PVC65-T-2	5.73	TPR45-T-2	2.33
PVC65-T-3	5.92	TPR45-T-3	2.72

Durante los ensayos, el comportamiento del PVC tendió a guardar una proporción casi constante entre sus esfuerzos y deformaciones; el TPR, por el contrario, presentó una tendencia con una ligera concavidad negativa inicial. En ambos casos los datos fueron ajustados con regresiones lineales, tal como se observa en la Fig. 9. De acuerdo a los resultados se puede observar que, además de presentar un mejor comportamiento, los valores del módulo de elasticidad a tensión del PVC son superiores que los del TPR, lo cual indica que el PVC posee una mayor rigidez a deformaciones de tracción.

Al PVC le corresponde un valor promedio de módulo de elasticidad a tensión de aproximadamente 5.93 MPa, mientras que al TPR, 2.59 MPa en promedio. Como se puede comprobar, estos valores se encuentran muy cercanos a los determinados con los procedimientos de Gent y Lindley [2], de 5 MPa para el PVC y 2.5 MPa para el TPR (Ver sección anterior).

Fig. 9. Relaciones esfuerzo-deformación unitaria corregidas para los especímenes PVC65-T-1, PVC65-T-2 y PVC65-T-3.



C. Módulo de rigidez a cortante (G) y amortiguamiento equivalente (ζ_{eq})

Los resultados de los ensayos de corte se presentan en la Tabla IV. En el ensayo 3 llevado a cabo con PVC, una de las muestras se desprendió de la placa de acero, razón por la cual se descartó el dato. Dichas anomalías pudieron ser originadas por la generación inevitable de óxido en el acero de las probetas o por la variación de la presión ejercida en el pagado de los especímenes a las placas.



De acuerdo a los resultados obtenidos, se determinó que el material que posee una magnitud mayor de este parámetro es el PVC, registrando un módulo de rigidez a cortante promedio de 0.51 MPa, mientras que para el TPR de 0.41 MPa.

Tabla IV. Módulo de rigidez a cortante en PVC y TPR

PVC		TPR	
ID Ensayo	G (MPa)	ID Ensayo	G (MPa)
Ensayo 1	0.42	Ensayo 1	0.41
Ensayo 2	0.59	Ensayo 2	0.38
Ensayo 3	-	Ensayo 3	0.45

Adicionalmente, a partir de las curvas de histéresis obtenidas con los ensayos de corte (Ver Fig. 10.) se pudo obtener un valor aproximado del amortiguamiento viscoso equivalente. Este parámetro fue determinado para cada probeta a partir del sexto ciclo de carga y descarga y representa una variable muy importante relacionada con el comportamiento de los aisladores sísmicos. Chopra [1] define este parámetro mediante la expresión:

$$\zeta_{eq} = \frac{E_D}{4\pi E_{So}} \quad (3)$$

En donde ζ_{eq} es el amortiguamiento viscoso equivalente, E_D la energía disipada durante el ciclo de carga y descarga y E_{So} la energía almacenada durante el ciclo de carga.

El procedimiento utilizado para determinar este parámetro fue gráfico, obteniendo las áreas correspondientes en los sextos ciclos de los ensayos, tanto para energía almacenada como disipada. Por la

naturaleza del ensayo únicamente pudo determinarse este parámetro para condiciones no reversibles, ya que la curva existía únicamente en la región de valores positivos de fuerza y deformación, y sin considerar las deformaciones permanentes experimentadas por las muestras en los ciclos sucesivos de carga. Los resultados obtenidos para este parámetro se presentan en la Tabla V.

Fig. 10. Ciclo de carga y descarga del Ensayo 1 en PVC.

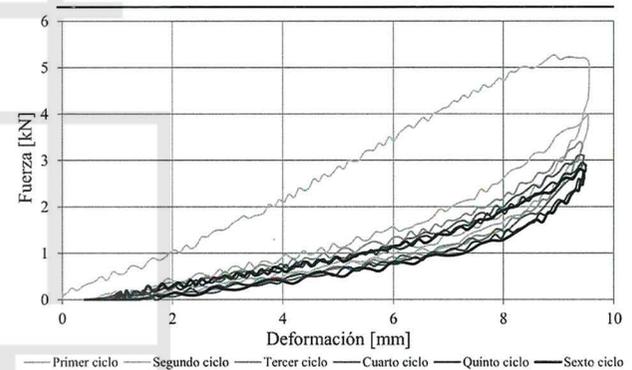


Tabla V. Amortiguamiento equivalente de PVC y TPR

PVC		TPR	
ID Ensayo	ζ_{eq} %	ID Ensayo	ζ_{eq} %
Ensayo 1	1.67	Ensayo 1	1.37
Ensayo 2	1.43	Ensayo 2	4.35
Ensayo 3	-	Ensayo 3	1.31

Se puede observar que el PVC posee un valor promedio de amortiguamiento equivalente de 1.55%; para el TPR, sin contar el valor obtenido en el ensayo 2 por estar fuera de la tendencia, se tiene un

valor promedio de 1.34%. De acuerdo a lo anterior, ambos materiales poseen características similares de disipación de energía, siendo el PVC ligeramente superior al TPR.

VI. COMPARACIÓN DE PVC Y TPR CON CAUCHO

A. Propiedades mecánicas y de disipación de energía

Para saber si los materiales investigados representan una alternativa válida para la sustitución del caucho en dispositivos de aislamiento sísmico, se hace necesaria una comparación entre las propiedades mecánicas y de disipación de energía de estos polímeros con los mismos parámetros utilizados convencionalmente en aisladores sísmicos.

Según Warn y Ryan [12] en aplicaciones sísmicas, típicamente se utiliza caucho natural con un módulo de rigidez a cortante comprendido en un rango de 0.65 MPa a 0.90 MPa. El amortiguamiento equivalente para el caucho natural de bajo amortiguamiento oscila entre el 2% y el 3%, a deformaciones unitarias del 100%, mientras que para el caucho de alto amortiguamiento, oscila entre el 10% y el 20%, a deformaciones unitarias del 100%.

Con los valores del módulo de rigidez a cortante determinados anteriormente para los polímeros ($GPVC=0.51MPa$ y $GTPR=0.41MPa$), se puede comprobar que éstos se encuentran por debajo, en un 21.5% para el PVC y en un 36.9% para el TPR, del límite inferior del rango propuesto para el caucho natural de bajo amortiguamiento.

Debido a que la rigidez horizontal y vertical dependen indirectamente del módulo de rigidez a cortante, se comprobó que dichas propiedades también se encuentran por debajo, en los mismos porcentajes, que el límite inferior del rango de rigidez horizontal calculada para el caucho de bajo amortiguamiento. Esto indica que ambos materiales son horizontal y verticalmente más flexibles que el caucho.

En el cálculo del periodo natural aislado se obtuvo el comportamiento opuesto, es decir, mayores valores de módulo de rigidez a cortante produjeron periodos menores. El periodo del PVC es 12.9% mayor que el periodo superior calculado para el caucho de bajo amortiguamiento; el periodo del TPR, por su parte, es 25.8% mayor. Ambos valores resultan congruentes teniendo en cuenta el grado de flexibilidad de los materiales.

En lo referente a la disipación de energía, los valores obtenidos para el PVC y TPR, mostrados en la Tabla V, se encuentran muy cercanos a los valores establecidos por Warn y Ryan [12] para el caucho natural de bajo amortiguamiento utilizado en aisladores sísmicos.

En base a lo anterior, para determinar si los materiales investigados pueden ser utilizados en aplicaciones de aislamiento sísmico se deben realizar más pruebas a los materiales e impulsar ensayos en dispositivos a escala real. Sin embargo, los resultados obtenidos parecen indicar que el PVC, por presentar valores similares a los del caucho de bajo amortiguamiento y superiores a los del TPR, sería un mejor material para sistemas de aislamiento de bajo amortiguamiento que involucren el uso de dispositivos complementarios de disipación de energía.

B. Costos

Debido a que la factibilidad de la utilización de aisladores sísmicos no se basa únicamente en las propiedades de los materiales, se hace necesario realizar una comparación de los costos, pues en la actualidad, este aspecto es decisivo para evaluar el uso de sistemas de aislamiento sísmico.

En la investigación se compararon los costos que implicaría la elaboración de un dispositivo con los polímeros estudiados y el costo real que implica la fabricación de los dispositivos reales. Sin embargo, debido a que los presupuestos no son de acceso público, se hizo una estimación con la información brindada para los aisladores sísmicos encontrados en El Salvador. De esta forma se estimó que el fabricar aisladores a base de



PVC o TPR, implica ahorros de hasta el 80% en comparación con los dispositivos elastoméricos tradicionales.

VII. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de los ensayos realizados deben considerarse únicamente como una aproximación a los valores del módulo de elasticidad a tensión (E), módulo de elasticidad aparente modificado a compresión (E_a), módulo de rigidez a cortante (G) y amortiguamiento equivalente, debido a que, por la limitada cantidad de datos obtenidos, no se pudo realizar un tratamiento estadístico que los validara y los dotara de mayor veracidad.

En los materiales estudiados, la geometría, influyó directamente en el valor del módulo de elasticidad aparente modificado a compresión, de manera que a mayores factores de forma se obtuvieron mayores valores del módulo de elasticidad aparente modificado a compresión.

Los valores del módulo de rigidez a cortante, y las propiedades asociadas a éste (rigidez horizontal, vertical y periodo aislado), fueron comparados con los valores especificados para el caucho natural de bajo amortiguamiento que se utiliza en aisladores sísmicos, dando como resultado que, con respecto al límite inferior del rango propuesto para el caucho, el módulo de rigidez a cortante, la rigidez horizontal y la rigidez vertical fueran un 21.5% menor en el PVC y un 36.9% menor en el TPR, y con respecto al límite superior del rango propuesto para el caucho, el periodo aislado fuera 12.9% mayor en el PVC y 25.8% mayor en el TPR.

Según Warn y Ryan [12], el caucho utilizado para la elaboración de aisladores sísmicos de bajo amortiguamiento presenta un coeficiente de amortiguamiento equivalente de entre el 2% y 3%, al 100% de la deformación unitaria. A dicha deformación unitaria, el valor de amortiguamiento equivalente obtenido para el PVC fue de 1.55% y para el TPR fue de 1.34%. Ambos resultados se encuentran muy cercanos a los valores utilizados en dispositivos reales, por lo que estos materiales

podrían ser considerados en aplicaciones de aislamiento sísmico cuando sean complementados con otros dispositivos de amortiguamiento.

En base a una comparación de los costos aproximados que implicaría la fabricación de un dispositivo de aislamiento sísmico elaborado con caucho, con los costos de otro elaborado con PVC o TPR, se concluye que, bajo condiciones similares, la alternativa de los polímeros resulta más económica debido a que involucra materiales de menor precio, con maquinaria más accesible y procesos de tratamiento más simples.

Los resultados obtenidos representan únicamente la caracterización de las propiedades mecánicas de los materiales estudiados, por lo que, hasta realizar pruebas con dispositivos a escala real se sabrá si éstos verdaderamente son útiles en sistemas de aislamiento sísmico; sin embargo, entre los polímeros estudiados, el PVC presenta, en general, mejores propiedades que las del TPR y muy parecidas a las del caucho, por lo que teóricamente sería un mejor material para ser utilizado en estos dispositivos, además de poseer mayor trabajabilidad y menor precio. En todo caso se necesita que esta alternativa siga siendo investigada con mayor profundidad.

VIII. REFERENCIAS

- [1] A.K. Chopra, "Earthquake Dynamics of Base-Isolated Buildings" en Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, 3a ed., Estados Unidos: Pearson Prentice Hall, 2007, pp. 103 y 742.
- [2] A. N. Gent y P. B. Lindley, "The Compression of Bonded Rubber Blocks" en Proc. Instn. Mech. Engrs., 1959, pp. 111-115.
- [3] M. Z. Kaab y A. Ounis. (2011, enero). Influence of the Damping of the Seismic Base Isolation System LRB on the Dynamic Response of the Isolated Structures. International Journal of Civil and Structural Engineering. 1(4), pp.817.
- [4] R. F. Kulak, "Technical Specifications for the Successful Fabrication of Laminated Seismic Isolation Bearings," ANL, Argonne, IL, Tech. Rep. ANL/CP-75716, Abr. 1992.

- [5] A. Martelli, M. Forni y P. Clemente. (2012, septiembre). Recent Worldwide Application of Seismic Isolation and Energy Dissipation and Conditions for Their Correct Use. Presentado en 15th World Conference on Earthquake Engineering. Disponible en: http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_0397.pdf
- [6] R. L. Mayes y F. Naeim, "Design of Structures with Seismic Isolation" en *The Seismic Design Handbook*, 2a ed., Estados Unidos: Kluwer Academic Publishers, 2001, pp. 726-729.
http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_0397.pdf
- [7] F. Naeim y J. M. Kelly, "Isolation System Components" en *Design of Seismic Isolated Structures*, 1a ed., Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc., 1999, pp. 3.
- [8] J. G. Sommer, "Testing and Properties" en *Engineered Rubber Products. Introduction to Design, Manufacture and Testing*, 1a ed., Munich: Hanser Publishers, 2009, pp.58.
- [9] Standard Specification for Plain and Steel-Laminated Elastomeric Bearings for Bridges, Especificación ASTM D4014, 2003.
- [10] Standard Test Method for Rubber Properties in Compression, Especificación ASTM D575, 1991 (Reaprovada 2001).
- [11] Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, Especificación ASTM D638, 2010.
- [12] G. P. Warn y K. L. Ryan. (2012, agosto). A Review of Seismic Isolation for Buildings: Historical Development and Research Needs. *Buildings* [En línea]. 2(3), pp. 302-303. Disponible en: <http://www.mdpi.com/2075-5309/2/3/300>.

IX. BIOGRAFÍAS

Erick A. Burgos nació en San Salvador, El Salvador, en 1977. Obtuvo su título de Ingeniero Civil en la Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas", en 2002, y su título de Maestría en Ciencias con especialidad en Ingeniería Sísmica y Estructural en la Universidad Estatal de Nueva York, en Buffalo, Estados Unidos, en 2006. Desde 2002 a la

fecha se desempeña como docente e investigador en la Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas".

Ernesto A. Pérez nació en San Salvador, El Salvador, en 1990. Cursó sus estudios preuniversitarios en el Colegio Externado de San José y su pregrado en Ingeniería Civil en la Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas".

Gizelly H. Pereira nació en San Salvador, El Salvador, en 1989. Cursó sus estudios preuniversitarios en el Liceo Cristiano y su pregrado en Ingeniería Civil en la Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas".

