

ARTÍCULOS

Influencia del coeficiente friccional en las fuerzas de corte de un aislador TPFB mediante FEM

Influence of friction coefficient on the Shear Forces of a TPFB Using FEM

Henry Anderson Ramos Rodríguez¹, Steeven Sebastián Lamiña Mera², Carlos Antonio Suárez Cárdenas³, Jaela Belén Vaca Castro⁴



 haramos@uce.edu.ec

¹ Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Quito, Ecuador.

 sslamina@uce.edu.ec

² Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Quito, Ecuador.

 casuarezc@uce.edu.ec

³ Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Quito, Ecuador.

 jbvacac@uce.edu.ec

⁴ Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Quito, Ecuador.

FIGEMPA: Investigación y Desarrollo

Universidad Central del Ecuador, Ecuador

ISSN-e: 2602-8484

Periodicidad: Semestral

Modalidad: Continua

vol. 20, núm. 2, 2025

revista.figempa@uce.edu.ec

Recepción: 02 abril 2025

Aprobación: 21 noviembre 2025

DOI: <https://doi.org/10.29166/revfig.v20i2.8088>

Autor de correspondencia:

haramos@uce.edu.ec

 Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0)

Cómo citar:

Ramos-Rodríguez, H. A., Lamiña-Mera, S. S., Suárez-Cárdenas, C. A. & Vaca Castro, J. B. (2025). Influencia del coeficiente friccional en las fuerzas de corte de un aislador TPFB mediante FEM. FIGEMPA: Investigación y Desarrollo, 20(2), e8088. <https://doi.org/10.29166/revfig.v20i2.8088>

RESUMEN

Para reducir los impactos negativos de los sismos se integran sistemas mecánicos a las estructuras, como los aisladores de fricción y sistemas de péndulo friccional (FPS). Los mismos absorben parte de la energía de las edificaciones cuando están sometidas a una acción sísmica, disminuyendo de esta manera las respuestas estructurales. En estos sistemas el coeficiente de fricción influye en las fuerzas de corte y desplazamientos, mientras mayores sean estas fuerzas menores serán los desplazamientos y las fuerzas de restitución. El comportamiento mecánico del FPS se puede simular mediante el método de elementos finitos (FEM), la curva de histéresis es completa y constante, validando la precisión del modelo teórico y de los resultados que se obtienen en un análisis de este tipo. Por este motivo la presente investigación se centra en desarrollar un modelo de elementos finitos de un aislador de triple péndulo, a fin de analizar la influencia del coeficiente de fricción en la fuerza de corte y verificar la viabilidad de esta técnica en el análisis de sistemas de aislación. Para lo cual, se realizó un análisis dinámico no lineal del aislador bajo compresión variando los coeficientes de fricción mediante el uso de un software de modelación de elementos finitos. Al realizar la comparación de las histéresis se pudo verificar que para un coeficiente de fricción del 6 y 7% las fuerzas de corte aumentan, pero disminuyen los desplazamientos máximos. Mientras que para un coeficiente de fricción del 5% se observa que los desplazamientos y fuerzas de corte son menores respecto a los otros dos modelos. Además, se puede concluir que el uso de modelos FEM en los sistemas de aislación son seguros y convenientes realizarlos, ya que, estos resultados fueron validados con investigaciones en donde se han utilizado modelos experimentales y modelos numéricos mediante softwares de análisis estructural.

Palabras claves: aislamiento de base, coeficiente de fricción, curva de histéresis, análisis de elementos finitos (FEM)

ABSTRACT

Mechanical systems like friction isolators and friction pendulum systems (FPS) are integrated into structures to mitigate the adverse impacts of earthquakes. These systems absorb a portion of the energy exerted on buildings during seismic activity, thereby reducing structural responses. In such systems, the coefficient of friction influences shear forces and displacements; as shear forces increase, displacements and restoring forces decrease. The mechanical behavior of FPS can be simulated using the finite element method (FEM), where the hysteresis curve remains complete and consistent, affirming the accuracy of the theoretical model and the results derived from such analyses. This study aims to develop a finite element model of a triple pendulum isolator to examine how the friction coefficient affects shear forces and to assess the viability of this technique for isolation system analysis. For this purpose, a nonlinear dynamic analysis of the isolator under compression was performed, varying the friction coefficients using finite element modeling software. Upon comparing the hysteresis, it was observed that for friction coefficients of 6% and 7%, the shear forces increased, but the maximum displacements decreased. For a friction coefficient of 5%, it was noted that the displacements and shear forces were lower compared to the other two models. Furthermore, it can be concluded that applying FEM models in isolation systems is safe and practical, as these results were

validated through investigations using experimental and numerical models via structural analysis software.

Keywords: Base isolation; friction coefficient; hysteresis loop; finite element method (FEM)

INTRODUCCIÓN

Ecuador está situado en una zona que presenta un continuo movimiento tectónico particular (Moncayo Theurer *et al.*, 2017, pp. 55–64), debido a que parte del territorio pertenece a la microplaca conocida como “Bloque Andino”, que forma parte de la placa sudamericana. Esta microplaca interactúa con las placas de Nazca, Cocos y Caribe (Cunalata y Caiza, 2022, pp. 55–64), provocando una gran actividad sísmica, incluyendo eventos tales como el de 1906, que alcanzó una magnitud de 8,8 Mw, colocándolo dentro de los sismos más grandes de la historia (Quinde Martínez y Reinoso Angulo, 2016, pp. 1–26). El movimiento del “Bloque Andino”, se da en un rango de 50-60 mm/año, mientras que, para la placa continental, el movimiento es de 2 y 5 mm/año (Sanchez, 2023) , generando una constante amenaza sísmica pudiéndose presentar pérdidas humanas, económicas y materiales, por esta razón se debe implementar medidas para reducir estos efectos en las edificaciones del país.

A partir de los avances tecnológicos, se han planteado diferentes soluciones para aumentar la seguridad de las construcciones y reducir el impacto de los sismos, como el uso del aislamiento de base, disipadores de energía llamados amortiguadores, sistema viscoelásticos, sistemas electro inductivos, amortiguación por fricción, materiales con memoria de forma, polímeros reforzados con fibra, entre otros (Koleci, Osmani y Ziza, 2024, pp. 290–300).

Un sistema que ha ganado popularidad en la actualidad es el de aislación sísmica, cuya técnica se basada en desacoplar la respuesta sísmica de la estructura mediante el uso de aisladores de base entre la super estructura y la cimentación (Guerrero Bobadilla *et al.*, 2022, pp. 1–21). Al aislar una edificación se obtiene un control en las respuestas estructurales, además de una reducción en las aceleraciones y las fuerzas transmitidas a la misma (Calvi y Calvi, 2018, pp. 14–30). El uso de estos sistemas requiere de un meticuloso diseño y selección del dispositivo que depende de la rigidez lateral y vertical, la relación calidad – precio, la durabilidad, nivel de riesgo sísmico en la zona y la capacidad de desplazamiento prevista (Leblouba, 2022; Sheikh, Van Engelen y Ruparathna, 2022, pp. 1542–1555). Debido a esto, los sistemas de aislación que son efectivos ante cierto sismo pueden ser poco efectivos frente a la actuación de otros con diferentes características (Li *et al.*, 2013).

Los aisladores sísmicos pueden pertenecer a dos grupos: aislador de tipo elastomérico y aislador de tipo friccional (Villavicencio Cedeño, 2016). Los aisladores elastoméricos son cilindros cortos con capas de materiales flexibles como pueden ser gomas de alta resistencia, alternadas con láminas o capas de acero (Genatios y Lafuente, 2016). Estos dispositivos sísmicos permiten gran deformación lateral, además de tener gran capacidad resistente ante cargas verticales debido a sus capas de acero que restringen las deformaciones de las capas de goma. De igual manera pueden generar alto amortiguamiento si en su interior se colocan núcleos de plomo. El amortiguamiento que se logra con la inclusión del núcleo de plomo es mayor al 20% (Aguiar *et al.*, 2014, pp. 35–89). Las capas de acero y goma determinan la rigidez del dispositivo, mientras que el diámetro del núcleo de plomo determina el amortiguamiento.

El segundo tipo de aislador son los fricionales los cuales están compuestos por planchas de acero inoxidable que cuentan con superficies curvas lo que brinda un comportamiento similar al péndulo (Ruiz Castro, 2017). Estos dispositivos sísmicos funcionan por deslizamiento produciendo una fuerza horizontal que provoca que la estructura se levante por la geometría del aislador, y tienda a restituir su posición original con su propio peso (Petti *et al.*, 2013, pp. 86–93). El amortiguamiento es proporcionado por la fuerza dinámica de fricción, que se ajusta a medida que varían las propiedades del material compuesto de baja fricción, generando valores de amortiguamiento que varían entre 10% y 30% del amortiguamiento crítico (Genatios y Lafuente, 2016).

Existen tres tipos de aisladores sísmicos fricionales: aislador de péndulo simple, doble y triple. En comparación con el aislador de fricción con una única superficie cóncava, las superficies dobles y triples logran el mismo movimiento horizontal con un tamaño de aislador reducido, esto se debe a que el movimiento horizontal del aislador aporta un número mayor de superficies cóncavas superiores e inferiores (Gonzales Osorio y Tovar García, 2019).

Estos sistemas de aislación tienen una superficie deslizante plana o cóncava con una curva uniforme de acero inoxidable pulido y un deslizador articulado revestido con material compuesto de alta capacidad de soporte basado en politetrafluoroetileno (PTFE), que tiene un bajo coeficiente de fricción de aproximadamente 0,007 (Gupta, 2013, pp. 3–47), prácticamente sin comportamiento de adherencia – deslizamiento (Braga *et al.*, 2022, pp. 1968–1980). Este coeficiente depende de la velocidad de deslizamiento y la presión, en donde el coeficiente de fricción disminuye al aumentar la presión (Li, Cao y Pan, 2024).

El coeficiente de fricción influye en las fuerzas de corte y desplazamientos, mientras mayor sean estas fuerzas, mayor serán las fuerzas horizontales lo que conduce a menores desplazamientos y por consecuencia a menores fuerzas de restitución (Rincon, 2021). En los sistemas de péndulo de fricción, la fuerza de fricción dinámica absorbe la energía de movimiento (Chimbo Shiguango, 2021), es aquí donde se genera un esfuerzo cortante en el punto de contacto, lo que produce el desgaste de los materiales provocando que los esfuerzos de contacto y a su vez la energía que se disipa disminuyan (Martínez Pérez, 2022), este efecto se puede contrarrestar colocando materiales resistentes al desgaste o disminuyendo la fricción de los materiales (Tamae, Ueda y Tozaki, 2024).

Un mecanismo de aislamiento tiene una activación más lenta, mientras mayor sea su coeficiente de fricción, es decir, al aumentar el coeficiente de fricción el desplazamiento disminuye debido al incremento de la amortiguación del sistema (Hacheem and AL-Shimmari, 2010, pp. 5315–5336). Al incrementar esta propiedad, el sistema de aislación mejora el rendimiento sísmico de la estructura y disminuye el daño en elementos estructurales y no estructurales garantizando seguridad en los edificios y reduciendo las pérdidas de capital debido al tiempo de inactividad y gastos de rehabilitación (Imran, Siringoringo y Michael, 2021, pp. 462–478). Este comportamiento se puede simular mediante un análisis con elementos finitos (FEM), ya que de esta manera se puede reproducir un correcto comportamiento mecánico de los sistemas con aisladores de fricción y de péndulo friccional (FPS). La curva de histéresis es completa y constante, esto valida la precisión del modelo teórico y de los resultados que se obtienen en un análisis de este tipo (Duan, 2022).

Para ratificar el comportamiento del péndulo a través de análisis FEM se debe realizar un análisis estático y dinámico. El análisis estático se usa para validar el comportamiento pendular y friccional del cojinete friccional estudiado (Auad y Almazán, 2023, pp. 1474–1481). El análisis dinámico se usa para validar el movimiento tridimensional del deslizador interno y el comportamiento de impacto lateral interno del aislador (Auad y Almazán, 2021). Por otra parte, el análisis estático no lineal se usa para estudiar el comportamiento del aislador bajo compresión (Thomas y Mathai, 2016, pp. 19–23). Esta validación se la realiza para verificar la precisión del modelo, comprender los fenómenos del sistema y representarlos de manera adecuada en la realización de estudios (Vargas et al., 2020, pp. 50–59; Zamyatina et al., 2022, pp. 237–244).

Establecer un modelo mediante análisis FEM real depende de algunos factores: comprensión del problema físico, conocimiento cualitativo de la respuesta estructural que se debe predecir y comprensión de los procedimientos de elementos finitos para el análisis (Thomas and Mathai, 2016, pp. 19–23). Este método consiste en dividir un objeto en regiones espaciales, es decir, en elementos finitos, para luego aplicar ecuaciones diferenciales a cada elemento (Forsberg, 2021, pp. 163–210).

El análisis FEM se usa por ser una herramienta computacional que ayuda a optimizar procesos mediante la identificación de características de los especímenes (González Sosa et al., 2023), también se obtienen parámetros viables y un diseño óptimo del aislador, debido a que se puede modelar el efecto mecánico de este (González Sosa y Ávila Soler, 2024). Además, al aplicar esta metodología se minimizan los errores e incertidumbres del sistema como los del solucionador, aproximaciones en las propiedades de los materiales del modelo, refinamiento de la malla, elección del tipo de modelo (Srinivas, 2020).

Diversos autores han demostrado que los resultados obtenidos en modelos realizados utilizando el método de elementos finitos son similares a los obtenidos de forma experimental (Lu et al., 2018, pp. 477–487), concluyeron que los resultados del análisis FEM y las pruebas coinciden razonablemente bien entre sí, a pesar de existir imperfección en la instalación. Mientras que (Zhai et al., 2020) obtienen que los modelos de elementos finitos establecidos pueden predecir efectivamente el comportamiento de flexión-tracción y el modo de falla del modelo físico. Considerando los buenos resultados que se obtienen en las simulaciones mediante el uso de esta técnica, además de la amenaza sísmica presente en el país y al creciente uso de dispositivos de aislación sísmica en las edificaciones, se decidió realizar la siguiente investigación cuyo objetivo es desarrollar un modelo mediante el uso de elementos finitos de un aislador de triple péndulo para analizar la influencia del coeficiente de fricción en la fuerza de corte. Además, de verificar la viabilidad de esta técnica en el análisis de sistemas de aislación.

MATERIALES Y MÉTODOS

En la Figura 1, a) ilustra cojinetes de aislamiento sísmico péndulo de triple Fricción; en b) se muestran los sistemas de protección sísmica medidas del aislador FTP8833/12-12/8-6; y en c) se observa el modelo en elementos finitos del sistema de aislación (Sarkisian et al., 2013).

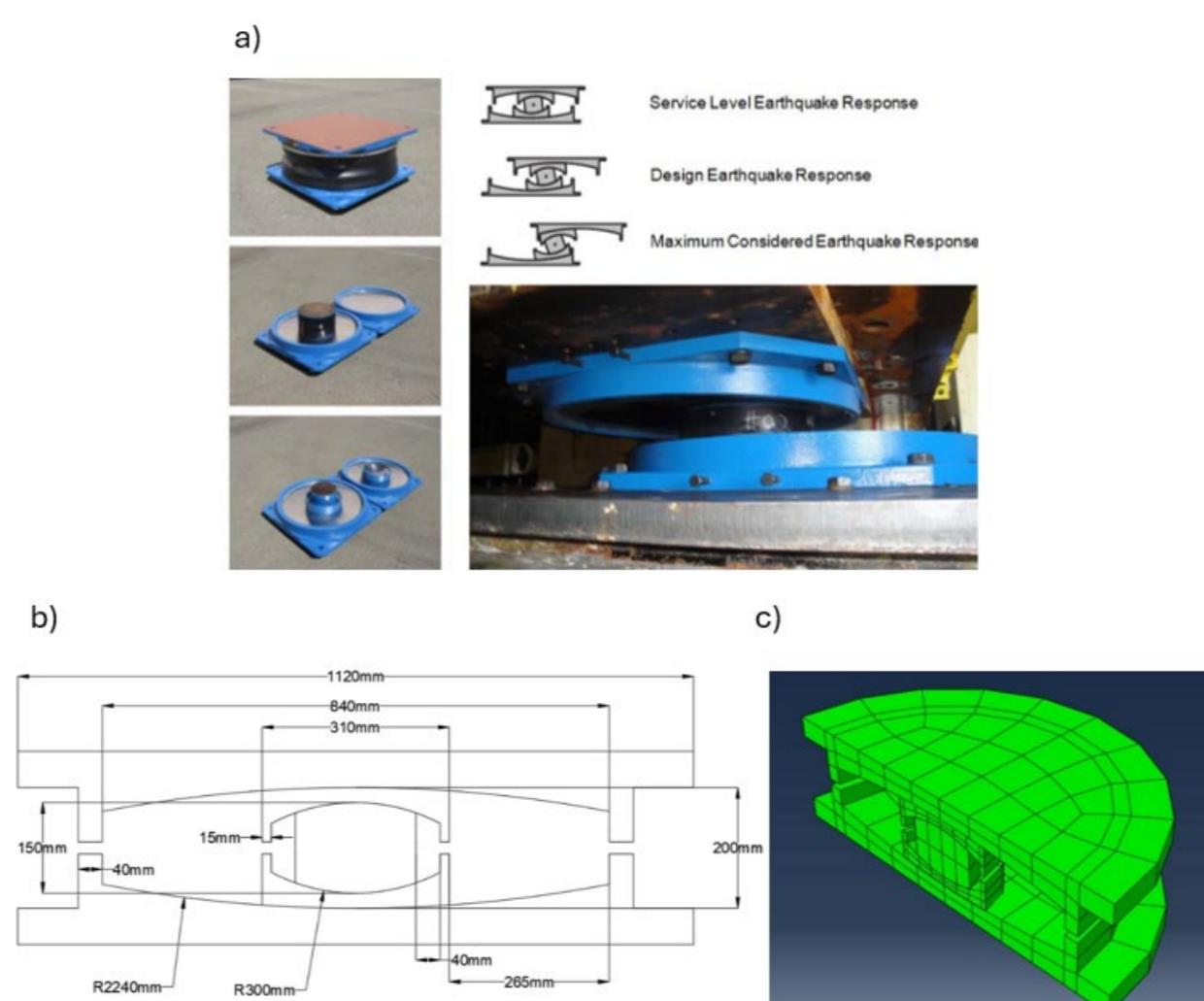


FIGURA 1
Aislador FPS

La presente investigación toma como base la geometría del aislador friccional de triple péndulo modelo FTP8833/12-12/8-6 propuesto por (Constantinou et al., 2016), dado la pertinencia en el campo de la aislación sísmica regional. El proceso implica el modelado del sistema de aislación en un software de elementos finitos, la definición de la geometría final (Tabla 1), la selección de materiales de los platos y del slider, incluido la variación del coeficiente de fricción en el slider.

TABLA 1
Propiedades Geométricas del aislador FPT8833/12-12/8-6

Descripción	Valor en mm
Radio de curvatura de las placas 1 y 4	2240
Diámetro de las placas 1 y 4	840
Diámetro de aislador interior	310
Radio de aislador interior	300
Diámetro de deslizador rígido	200
Altura de aislador interior	150
Espesor de topes exteriores	40
Espesor de topes interiores	15
Espesor de aislador interior en el centro	40
Espesor de aislador exterior en el centro	60
Capacidad de desplazamiento $d_1=d_4$	265
Capacidad de desplazamiento $d_2=d_3$	40
Altura del aislador	320

Posteriormente se han definido las superficies de contacto, se coloca el coeficiente de fricción y se asignan las cargas verticales y horizontales, la carga vertical simula el peso de la columna y la horizontal que representa el sismo. En este sistema la respuesta analítica está dada bajo el mismo desplazamiento con diferentes valores de fricción (0,05; 0,06; 0,07) correspondientes a la fricción entre el acero y el teflón, además, la presión ejercida por el edificio al péndulo, y el radio de curvatura son constantes.

Para la elaboración del modelo computacional en elementos finitos se utilizó como material principal el acero, el cual tiene un módulo de elasticidad de 200000 MPa y una relación de Poisson de 0,3. El comportamiento plástico del material viene definido por los componentes descritos en la Tabla 2.

TABLA 2
Propiedades inelásticas del acero

Esfuerzo (MPa)	Deformación
483,042	0
555,95	0,00269586
661,40	0,00712157
689,40	0,01485563
707,50	0,13372444
833,20	0,17565556

Una vez modelado el núcleo, plato interior y plato exterior, se asignó el material para poder ensamblar el aislador sísmico. Considerando las condiciones del programa de elementos finitos se procedió a la creación del mallado del modelo el cual cuenta con 943 nodos y 512 elementos. El tipo de elemento finito que se genera es hexaédrico de tipo C3D8R, el cual es un elemento 3D posee 8 nodos y es una unidad de entidad integral reducida de primer orden que puede evitar el autobloqueo del volumen en problemas elasto-plásticos (Chang et al., 2022).

La Figura 2 muestra el modelo que se sometió a la aceleración unidireccional correspondiente al sismo NORTHRIDGE NWH090 de 1994 de la estación Newhall – Fire Station y a una carga vertical asignada de 0,5 T. El sismo de Northridge se originó por la ruptura de una falla ciega inversa a una profundidad aproximada de 17,5 km y una magnitud de 6,7 Mw (United States Geological Survey, 2013). Se seleccionó este sismo debido a que la ciudad de Quito se encuentra asentada sobre varias fallas ciegas que están en constante actividad por lo cual presenta características similares al sismo seleccionado (Aguiar y Chunga, 2013).

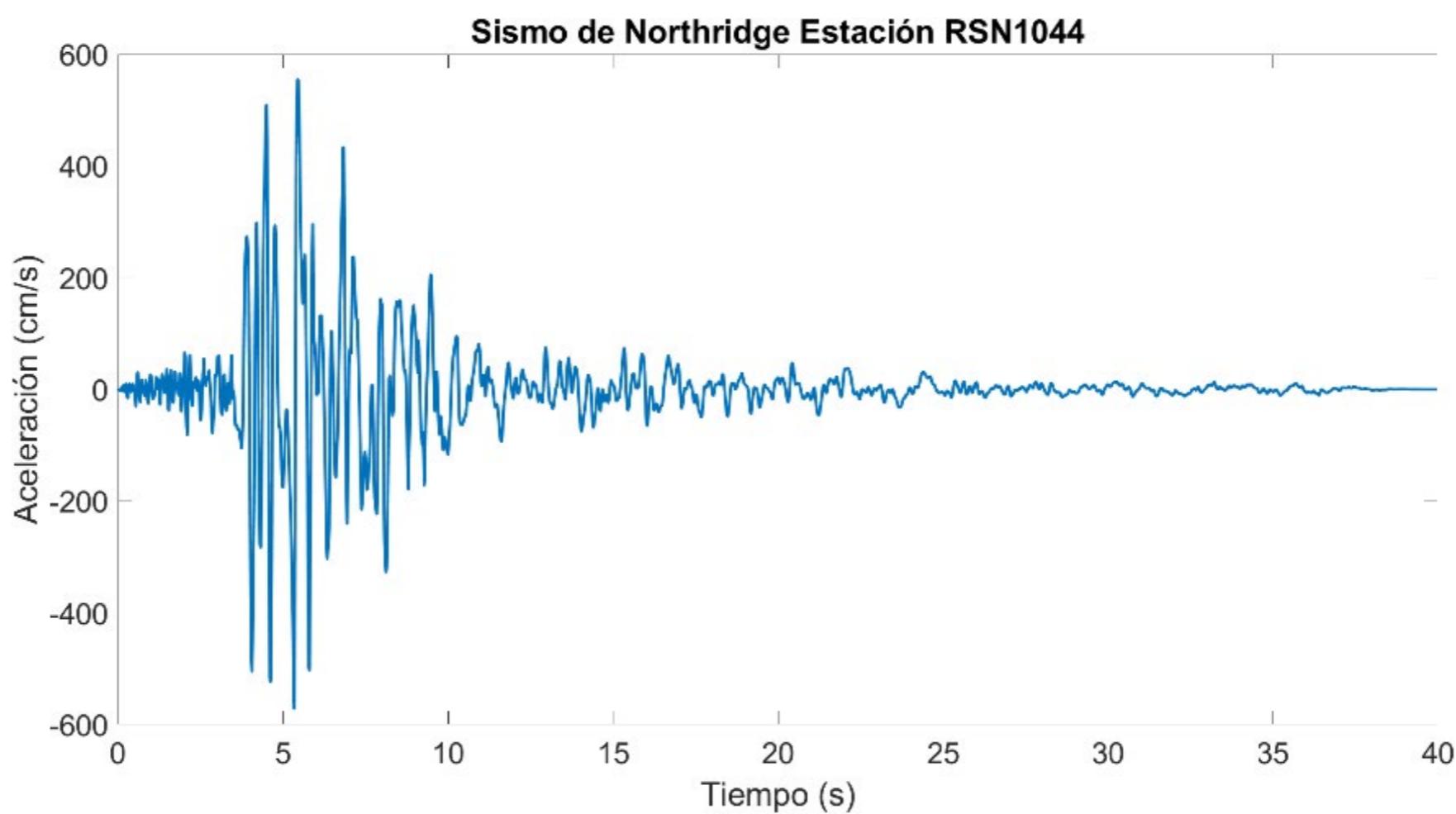


FIGURA 2
Sismo de Northridge estación RSN1044-NWH090

En el análisis paso a paso en el tiempo del modelo realizado, se usó el sismo de Northridge a manera de amplitud, debido a que el software de elementos finitos permite el ingreso de carga, desplazamiento u otras variables que varían en el tiempo a lo largo de un paso. Los valores se ingresaron a través de una tabla de datos, las unidades usadas para el tiempo son segundos y para la aceleración es m/s^2 .

Como se muestra en la Figura 3, el uso del método de elementos finitos (FEM) permite obtener diversos resultados del sistema, tales como: a) fuerzas de corte (N); b) esfuerzos de Von Mises (N); y c) desplazamientos (mm).

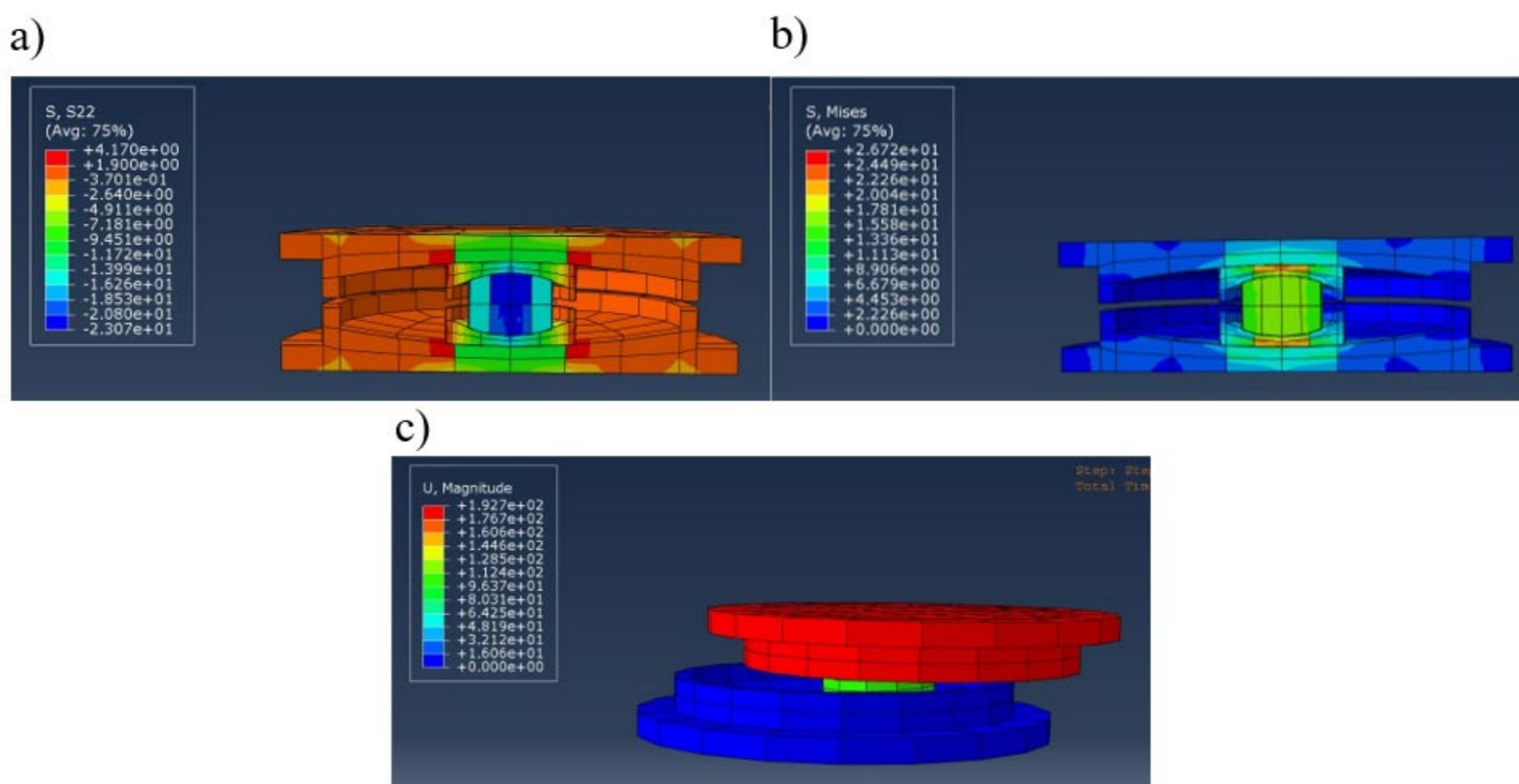


FIGURA 3
Resultados del modelo FEM

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la histéresis del sistema con un coeficiente de fricción del 5% la máxima fuerza de corte que alcanza el sistema es de 54.403,4 N con un desplazamiento de 255 mm (ver Figura 4a), mientras que para un coeficiente fricción del 6% el sistema logra alcanzar una fuerza de 66.295,9 N para un desplazamiento máximo de 313,227 mm (ver Figura 4b), finalmente para un coeficiente de fricción del 7% se alcanza una fuerza de 69.721,2 N y un desplazamiento de 298,602 mm (ver Figura 4c).

En los gráficos de las histéresis (ver Figura 4d) se puede observar que para una fricción del 6% y 7% mientras más grande es el coeficiente de fricción, aumentan las fuerzas de corte, pero disminuyen los desplazamientos máximos, validando así las hipótesis planteadas en el estudio de (Rincon, 2021), mientras que para una fricción del 5% se observa que los desplazamientos y fuerzas cortantes son menores respecto a los otros dos modelos.

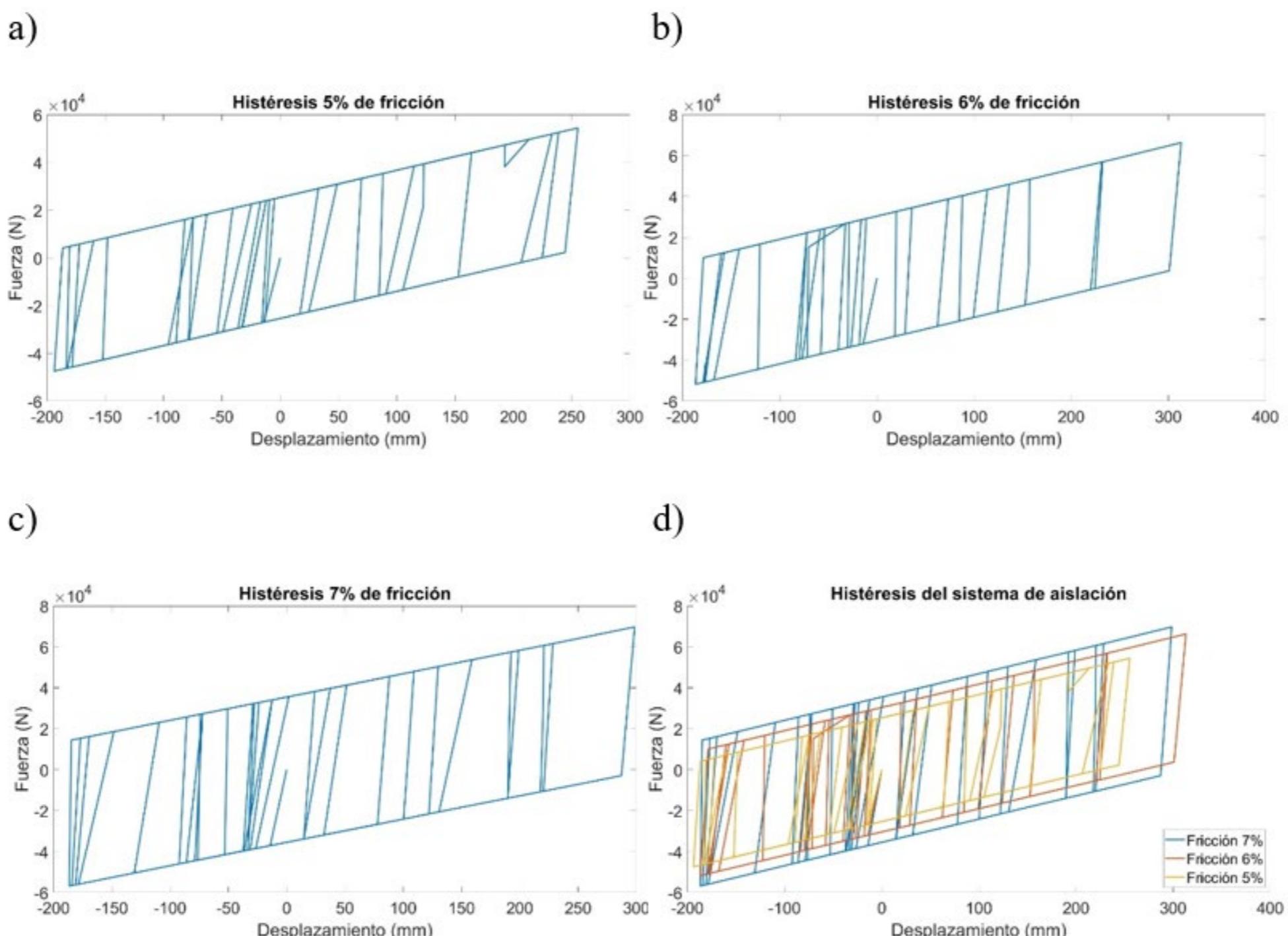


FIGURA 4
Histéresis del sistema de aislación con distintos valores de coeficiente de fricción

Al igual que en (Hacheem mAL-Shimmari, 2010, pp. 5315–5336) el aumento en las fuerzas de corte se debe al retraso que presenta el sistema para entrar en funcionamiento, ya que, para que empiecen a moverse los sliders se requiere una mayor fuerza para vencer el coeficiente de fricción estático presente entre los materiales en contacto.

Al realizar el análisis para las fuerzas cortantes máximas se puede verificar la relación con el coeficiente de fricción, en donde las estas fuerzas aumentan al incrementar este coeficiente, es así como al relacionar los coeficientes de fricción del 6 y 7% con el del 5% las fuerzas incrementan en un 21,85% y 28,15% respectivamente. Además, se observa que la relación en su incremento no es directamente proporcional, ya que, mientras existe un incremento significativo frente al 5% de fricción, entre el 6% y 7% la variación en las fuerzas es del 5,16%. (Figura 5)

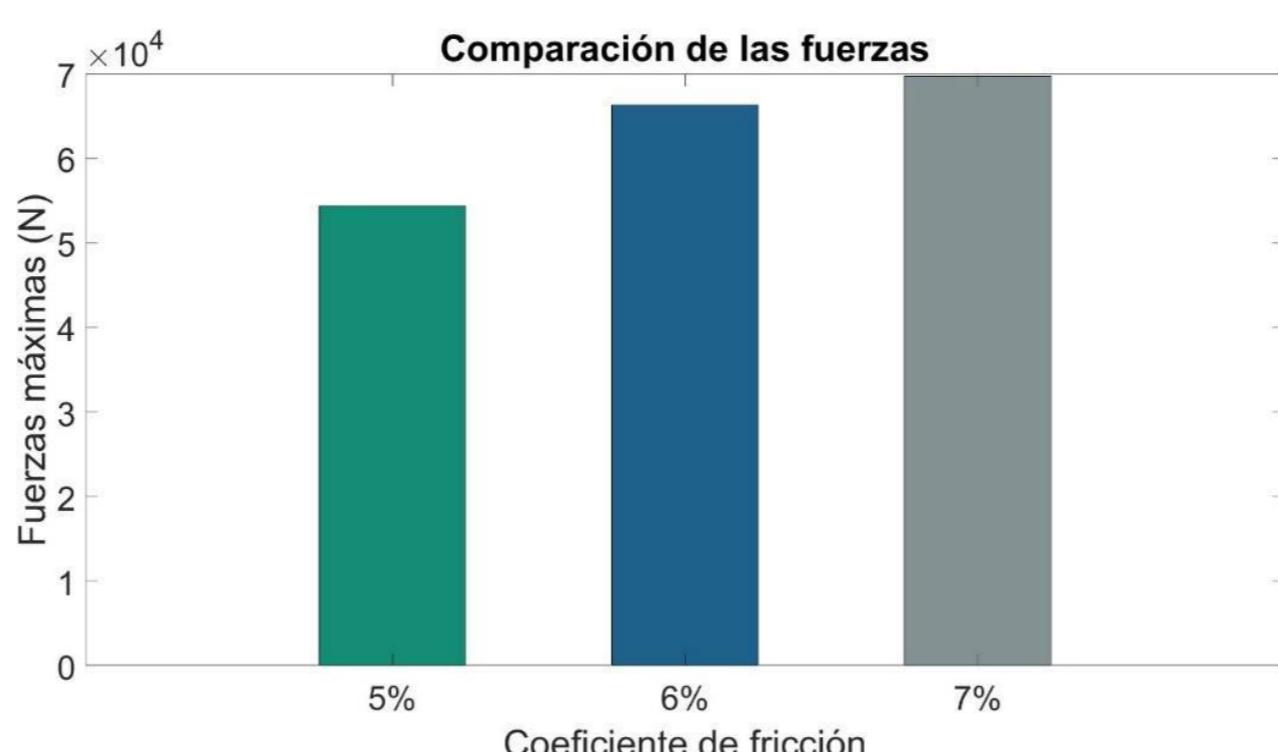


FIGURA 5
Fuerzas cortantes máximas para los distintos coeficientes de fricción

Según lo mostrado en la Figura 6, para el caso de los desplazamientos máximos se puede observar que para un coeficiente de fricción del 5% es menor en un 18,58% respecto al mayor valor obtenido, dado por el coeficiente de fricción del 6%, mientras que, al comparar el máximo valor con el coeficiente de fricción del 7% se produce una disminución en el desplazamiento del 4,9% debido al retraso que tiene el sistema para empezar a oscilar frente a vibraciones externas. No se puede afirmar que a mayor coeficiente de fricción el sistema de aislación sea mejor o presente una mayor disipación de energía, ya que, esto depende de otras características como la disipación de energía o el amortiguamiento del sistema, cuyos parámetros no se abordaron en la presente investigación.

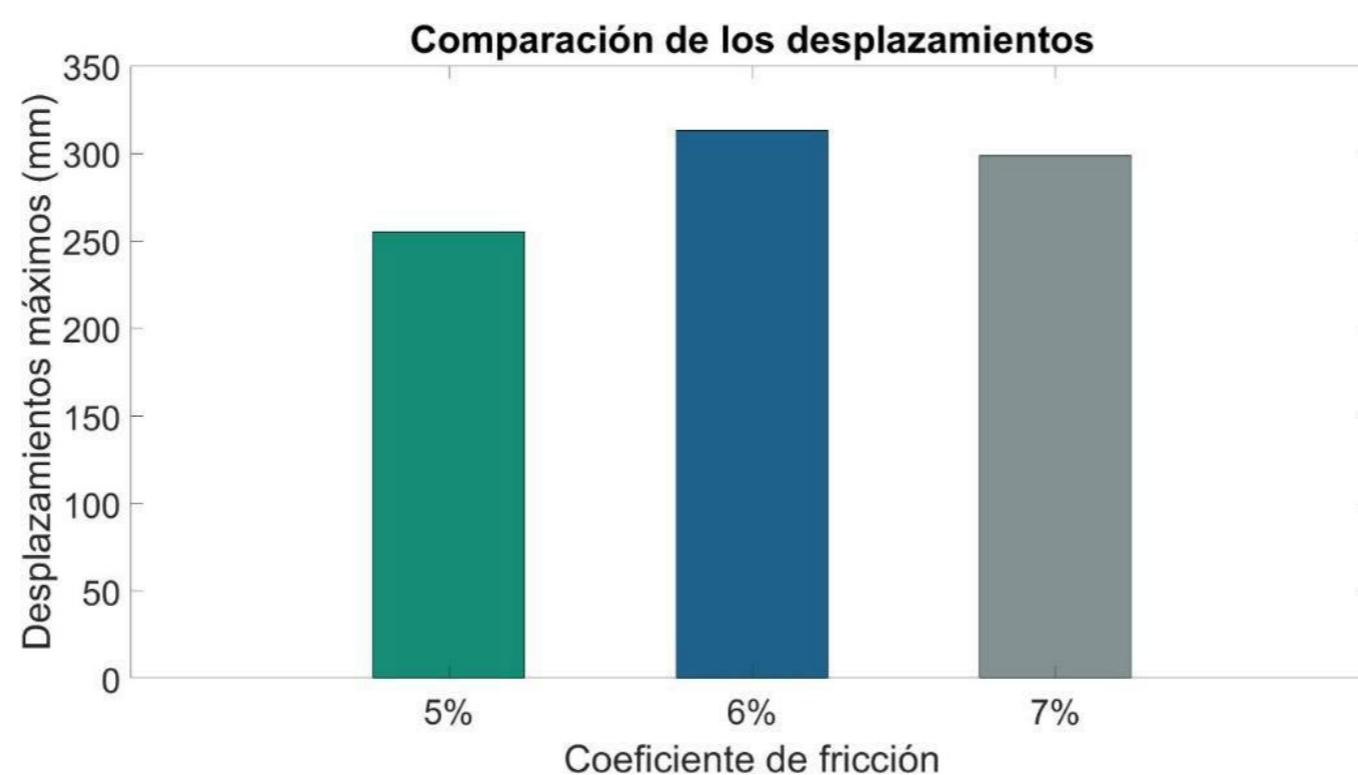


FIGURA 6
Desplazamientos máximos para los distintos coeficientes de fricción

Esta investigación permite mostrar la viabilidad y confiabilidad del uso de modelos FEM en la obtención de las curvas histeréticas en aisladores de péndulo friccional. Los resultados obtenidos son compatibles con los alcanzados por (Osgooei et al., 2015, pp. 293–303) reafirmando la validez de los modelos FEM en la simulación de aisladores sísmicos y extendiendo a otro tipo de aisladores como los de péndulo friccional. Sin embargo, se debe resaltar que los resultados con un coeficiente de fricción al 5% difieren con los obtenidos experimentalmente por (Rincon, 2021) donde se muestra que, con un coeficiente de fricción menor existe un mayor desplazamiento. La diferencia en este resultado plantea la posibilidad que en el modelo FEM se deba considerar ciertos efectos propios de la fricción como pérdidas por calor. Esta investigación permite establecer que los modelos FEM son válidos para la obtención de las propiedades de aisladores de péndulo friccional.

CONCLUSIONES

La elección del tipo de material friccional en el aislador sísmico tiene un impacto significativo en el desplazamiento y la fuerza cortante del sistema, por lo tanto, un coeficiente de fricción mayor incrementa la fuerza de corte y reduce el desplazamiento, lo que requiere un análisis cuidadoso para optimizar el diseño de los aisladores. Sin embargo, este aumento no siempre resulta beneficioso, ya que las fuerzas cortantes aumentan y transmiten fuerzas mayores a la superestructura, afectando su desempeño. Por lo tanto, es fundamental encontrar un adecuado equilibrio del coeficiente de fricción que permita maximizar la reducción de las solicitudes sísmicas sin comprometer la seguridad ni la eficiencia estructural.

Para los coeficientes de fricción de 5%, 6% y 7%, los resultados obtenidos evidencian un efecto directo y variaciones significativas en las fuerzas cortantes (de 54.403, N, 66.295,9 N y 69.721,2 N) y desplazamientos del sistema (de 255 mm, 313,227 mm y 298,602 mm) resaltando que pequeñas modificaciones en el coeficiente de fricción pueden alterar significativamente el comportamiento dinámico del sistema de aislación, por lo que la selección del material friccional debe ser cuidadosamente evaluada en el diseño de aisladores sísmicos para lograr el objetivo de protección de la estructura.

El uso de modelos FEM para determinar propiedades y características de los sistemas de aislación resulta conveniente, ya que, como se observó en la investigación se obtienen resultados acordes a investigaciones realizadas utilizando modelos experimentales, modelos numéricos y modelos FEM de aisladores elastoméricos, siendo útil para el diseño de nuevos aisladores sin la necesidad de realizar un número significativo de ensayos experimentales.

Contribuciones de los autores

Henry Anderson Ramos Rodríguez: conceptualización, investigación, metodología, análisis formal, supervisión, validación, redacción – revisión y edición.

Steeven Sebastián Lamiña Mera: conceptualización, investigación, metodología, análisis formal, redacción-borrador original.

Carlos Antonio Suárez Cárdenas: investigación, curación de datos, software, análisis formal, redacción – borrador original.

Jaela Belén Vaca Castro: conceptualización, investigación, metodología, análisis formal, redacción – borrador original.

Cesión de derechos y declaración de conflicto de intereses

La revista FIGEMPA: Investigación y Desarrollo conserva los derechos patrimoniales (copyright) de la obra publicada, al mismo tiempo que promueve y permite su reutilización. La obra se publica en edición electrónica bajo la licencia Creative Commons CC-BY 4.0, que permite a los usuarios compartir, copiar y redistribuir el contenido, siempre que se dé el debido reconocimiento a los autores. (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es_ES).

Los autores declaran haber respetado los principios éticos de investigación y estar libre de cualquier conflicto de intereses.

REFERENCIAS

- Aguiar, R. y Chunga, K. (2013) "Microzonificación sísmica del centro norte de Quito", Segunda Jornada de Investigación científica desde las Aulas. Quito, mayo 2013. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/287196109_Microzonacion_sismica_del_Centro_Norte_de_Quito_Segunda_Jornada_de_Investigacion_cientifica_desde_las_Aulas_2013
- Aguiar, R. et al. (2014) "Análisis sísmico de una estructura con aisladores FPS de primera y segunda generación y elastoméricos con núcleo de plomo", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 19(1), pp. 35– 89. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/277813054_ANALISIS_SISMICO_DE_UNA_ESTRUCTURA_CON_AISLADORES_FPS_DE_PRIMERA_Y_SEGUNDA_GENERACION_Y_ELASTOMERICOS_CON_NUCLEO_DE_PLOMO
- Auad, G. y Almazán, J.L. (2021) "Lateral Impact Resilient double concave Friction Pendulum (LIR-DCFP) bearing: Formulation, parametric study of the slider and three-dimensional numerical example", *Engineering Structures*, 233. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.111892
- Auad, G. y Almazán, J. L. (2023) "A physical model for dynamic analysis of structures equipped with variable curvature frictional isolators", *Procedia Structural Integrity*, 44, pp. 1474–1481. DOI: 10.1016/j.prostr.2023.01.189
- Braga, F. et al. (2022) "Numerical modelling of sliding isolators incorporating self-heating effects", *Structures*, 46, pp. 1968–1980. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.11.040
- Calvi, P. M. y Calvi, G. M. (2018) "Historical development of friction-based seismic isolation systems", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 106, pp. 14–30. DOI: 10.1016/j.soildyn.2017.12.003
- Chang, S. et al. (2022) "Theory and implementation of sub-model method in finite element analysis", *Heliyon*, 8(11). DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e11427
- Chimbo Shiguango, N. G. (2021) Análisis sísmico comparativo de un edificio de mediana altura, con base fija empotrada y con aisladores de triple péndulo de fricción. Tesis de grado. Universidad Estatal del Sur de Manabí. Disponible en: <http://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/2951> [Consultado 31-01-2025]
- Constantinou, M. et al. (2016) "Desempeño de aislador FPT8833/12-12/8-5 en el análisis sísmico del centro de investigaciones y de post grado de la UFA-ESPE", *Revista Internacional De Ingeniería De Estructuras*, 21(1). DOI: 10.24133/riie.v21i1.573
- Cunalata, F. y Caiza, P. (2022) "Estado del Arte de Estudios de Vulnerabilidad Sísmica en Ecuador", *Revista Politécnica*, 50(1), pp. 55–64. DOI: 10.33333/rp.vol50n1.06
- Duan, C. (2022) "Experimental and Numerical Analysis of a High-Rise Structure with a Dual FPS Isolation System", *Advances in Civil Engineering*, 2022. DOI: 10.1155/2022/1567182
- Forsberg, C.H. (2021) "Numerical methods (steady and unsteady)". En: Forsberg, C.H. ed. *Heat Transfer Principles and Applications*. Londres: Academic Press. pp. 163–210. DOI: 10.1016/B978-0-12-802296-2.00005-6
- Genatios, C. y Lafuente, M. (2016) *Introducción al Uso de Aisladores y Disipadores en Estructuras*. Serie GeóPolis. Caracas: CAF. Disponible en: <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/1213> [Consultado 02-02-2025]
- Guerrero Bobadilla, H. et al. (2022) "Comportamiento sísmico de edificios con aisladores de péndulo de fricción en la zona del lago de la Ciudad de México", *Ingeniería sísmica*, 107, pp. 1–21. DOI: 10.18867/ris.107.584
- Gupta, B. S. (2013) "Manufacture, types and properties of biotextiles for medical applications". En: King, M. W., Gupta, B. S. y Guidoin, R. eds. *Biotextiles as Medical Implants*. Cambridge: Woodhead Publishing. pp. 3–47. DOI: 10.1533/9780857095602.1.3
- Gonzales Osorio, H. D. y Tovar García, R. D. (2019) *Evaluación de la estructura aislada y no aislada en el proyecto Aulario PUCP y protocolo constructivo del sistema de aislación tesis*. Tesis de grado. Universidad Ricardo Palma. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14138/2393> [Consultado 02-02-2025]
- González Sosa, J. V., Zavala Osorio, Y., Hernández Rodríguez, J. A., Ávila Soler, E. (2023) "Evaluación con análisis de elemento finito en aplicaciones de ingeniería", *Pistas educativas*, 45(145), pp. 509–525. Disponible en: <https://pistaseducativas.celaya.tecnm.mx/index.php/pistas/article/view/3173>
- González Sosa, J. V. y Ávila-Soler, E. (2024) "Control del mallado con FEM para caracterizar una junta mecánica en aplicaciones de investigación y prototipaje", *Revista de ciencias tecnológicas*, 7(1). DOI: 10.37636/recit.v7n1e302
- Hacheem, Z. A. y AL-Shimmari, I. K. (2010) "Finite element analysis of a friction pendulum bearing base isolation system for earthquake loads", *Journal of Engineering*, 16(03), pp. 5315–5336. DOI: 10.31026/j.eng.2010.03.03
- Imran, I., Siringoringo, D. M. y Michael, J. (2021) "Seismic performance of reinforced concrete buildings with double concave friction pendulum base isolation system: case study of design by Indonesian code", *Structures*, 34, pp. 462–478. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.07.084

Koleci, X., Osman, R. y Ziza, R. (2024) "A Review of Advanced Seismic Isolation Methods for Earthquake Resistant Structures: Role of Shear Walls in Construction", *International Journal of Engineering Inventions*, 13(5), pp. 290–300. Disponible en: <https://ijejournal.com/papers/Vol13-Issue5/1305290300.pdf>

Leblouba, M. (2022) "Selection of seismic isolation system parameters for the near-optimal design of structures", *Scientific Reports*, 12. DOI: 10.1038/s41598-022-19114-7

Li, X., Cao, Y. y Pan, P. (2024) "Experimental investigation of tribological performance of PTFE-derived solid lubricants in sliding building bearings", *Construction and Building Materials*, 436. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136924

Li, Y. et al. (2013) "Development and characterization of a magnetorheological elastomer based adaptive seismic isolator", *Smart Materials and Structures*, 22(3). DOI: 10.1088/0964-1726/22/3/035005

Lu, J. et al. (2018) "Experimental study on the hysteretic behavior of steel plate shear wall with unequal length slits", *Journal of Constructional Steel Research*, 147, pp. 477–487. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.05.002

Martínez Pérez, F. (2022) "Ingeniería de Superficies. Aplicación en el desgaste", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 31(4). Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2071-00542022000400010&lng=pt&nrm=iso&tlang=es

Moncayo Theurer, M., Velasco, G., Mora, Carlos, Montenegro, M., Cordova, J. (2017) "Terremotos mayores a 6.5 en escala Richter ocurridos en Ecuador desde 1900 hasta 1970", *Revista Académica de la FI-UADY*, 21(2), pp. 55–64. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/467/46753192005/html/> [Consultado 04-02-2025]

Osgooei, P. M. et al. (2015) "Experimental and finite element study on the lateral response of modified rectangular fiber-reinforced elastomeric isolators (MR-FREIs)", *Engineering Structures*, 85, pp. 293–303. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.11.037

Petti, L. et al. (2013) "Modelling and Analysis of Base Isolated Structures with Friction Pendulum System Considering near Fault Events", *Open Journal of Civil Engineering*, 3(2), pp. 86–93. DOI: 10.4236/ojce.2013.32009

Quinde Martínez, P. D. y Reinoso Angulo, E. (2016) "Estudio de peligro sísmico de Ecuador y propuesta de espectros de diseño para la Ciudad de Cuenca", *Revista Ingeniería Sísmica*, (94), pp. 1–26. DOI: 10.18867/ris.94.274

Rincon, A. (2021) *Pre-design of Friction Pendulum Bearings as a Seismic Isolation System for Buildings*. Tesis de maestría. Técnico Lisboa. Disponible en: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563345090420507/Versao%2520Final-%2520Msc.%2520Dissertation.%2520S.D.%2520FPS-IST197431%2520Adhony%2520Rodrigues.pdf&ved=2ahUKEwj1uOeA_LWRAXXKs4QIHQB2AQmuEjegQISRAB&usg=AOvVaw23CXJGRIVn1LwNGt7RVBD

Ruiz Castro, P. W. (2017) Análisis y diseño de edificios con aisladores sísmicos de péndulo friccional doble y triple. Tesis de grado. Pontificia Universidad Católica de Perú. Disponible en: <https://tesis.pucp.edu.pe/items/1f507536-e01d-44e7-a665-3a9e9d598702>

Sanchez, J. (2023) Análisis del comportamiento sísmico de edificios de altura rigidizados con sistema de muros de pantalla. Tesis de máster. Universitat Politècnica de Catalunya. Disponible en: https://apren.upc.edu/en/materials/2117_384751

Sarkisian, M., Long E., Shook, D., Diaz, A. (2013) "A New Paradigm for Residential Construction in Regions of High Seismicity". *1st Residential Building Design & Construction Conference*. Pensilvania, 20- 21 febrero 2013, pp. 56- 57. Disponible en: <https://www.phrc.psu.edu/assets/docs/Publications/2013RBDCCPapers/Sarkisian-2013-RBDCC.pdf>

Sheikh, H., Van Engelen, N. C. y Ruparathna, R. (2022) "A review of base isolation systems with adaptive characteristics", *Structures*, 38, pp. 1542–1555. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.02.067

Srinivas, K. (2020) *Verifications and Validations in Finite Element Analysis (FEA)*. DOI: 10.13140/RG.2.2.18000.52488

Tamae, H., Ueda, N. y Tozaki, Y. (2024) "A study of measurement of raceway direct measurement of rolling bearings", *Frontiers in Mechanical Engineering*, 10. DOI: 10.3389/fmech.2024.1462450

Thomas, T. y Mathai, D. A. (2016) "Study of base isolation using friction pendulum bearing system", *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 1(2), pp. 19–23. Disponible en: <https://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/ICETEM/Vol.%201%20Issue%202/17-19-23.pdf>

United States Geological Survey (2013) *Studying the Setting and Consequences of the Earthquake*. Disponible en: <https://pubs.usgs.gov/of/1996/ofr-96-0263/mainshk.htm> [Consultado 04-02-2025]

Vargas, W. y Verdugo, P. (2020) "Validación e Identificación de Modelos de Centrales de Generación Empleando Registros de Perturbaciones de Unidades de Medición Fasorial, Aplicación Práctica Central Paute - Molino", *Revista Técnica energía*, 16(2), pp. 50–59. Disponible en: <https://revistaenergia.cenace.gob.ec/index.php/cenace/article/view/352>

Villavicencio Cedeño, E. G. (2016) Análisis sísmico estructural comparativo para edificios con aisladores de base tipo elastoméricos y fraccionantes, para los diferentes tipos de suelos del Ecuador. Tesis de maestría. Escuela Politécnica Nacional. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/15639> [Consultado 02-02-2025]

Zamyatina, E., Churin, D., Lanin, V., Lyadova, L. y Matta, N. (2022). "Simulation Model Validation based on Ontological Engineering Methods". *Proceedings of the 14th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management*. Malta: SciTePress, pp. 237-244. DOI: 10.5220/0011589000003335

Zhai, Z. et al. (2020) "Experimental and numerical study of S-shaped steel plate damper for seismic resilient application", *Engineering Structures*, 221. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111006