

Edgar Serna M. (ed.)

Ingeniería y Desarrollo en la Nueva Era

Editorial
Instituto Antioqueño de Investigación
© 2022



Edgar Serna M. (ed.)

Ingeniería y Desarrollo en la Nueva Era

Edición 1

ISBN: 978-628-95135-5-4

Ingeniería y desarrollo en la nueva era / editor, Edgar Serna M. – Primera edición -- Medellín: Instituto Antioqueño de Investigación, 2022.

1. recurso en línea: archivo de texto: PDF – (Ingeniería y ciencia)

Incluye referencias bibliográficas al final de cada capítulo.

ISBN 978-628-95135-5-4

1. Ingeniería - Innovaciones tecnológicas - Investigaciones 2. Investigación industrial I. Serna M., Edgar, ed. II. Serie Ingeniería y Ciencia.

CDD: 620 ed. 23

CO-BoBN- a1098657

Investigación Científica

ISBN: 978-628-95135-5-4

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7381846>

Hecho el depósito legal digital

Ingeniería y Desarrollo en la Nueva Era

Serie: Ingeniería y Ciencia

Editorial Instituto Antioqueño de Investigación

Edición 1: noviembre 2022

Publicación electrónica gratuita

©2022 Instituto Antioqueño de Investigación IAI™. Salvo que se indique lo contrario, el contenido de esta publicación está autorizado bajo Creative Commons Licence CC BY-NC-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)



Editorial Instituto Antioqueño de Investigación es Marca Registrada del *Instituto Antioqueño de Investigación*. El resto de marcas mencionadas en el texto pertenecen a sus respectivos propietarios.

La información, hallazgos, puntos de vista y opiniones contenidos en esta publicación son responsabilidad de los autores y no reflejan necesariamente los puntos de vista del Instituto Antioqueño de Investigación IAI; no se garantiza la exactitud de la información proporcionada en este texto.

Ni el autor, ni la Editorial, ni el IAI serán responsables de los daños causados, o presuntamente causados, directa o indirectamente por el contenido en este libro.

Maquetación: Instituto Antioqueño de Investigación

Diseño, edición y publicación: Editorial Instituto Antioqueño de Investigación

Financiador de la publicación: Instituto Antioqueño de Investigación

Instituto Antioqueño de Investigación IAI

<http://fundacioniai.org>

contacto@fundacioniai.org

Editorial Instituto Antioqueño de Investigación

<http://fundacioniai.org/index.php/editorial.html>

editorial@fundacioniai.org

Medellín, Antioquia



Simulaciones Híbridas en Tiempo-Real SHTR aplicadas en la evaluación del desempeño dinámico de muros delgados de concreto reforzado afectados en una edificación aislada

Bryan Castillo Torres¹
Sharick Melisa Vides Quintero²
Andry Fernanda Hoyos Triviño³
Peter Thomson⁴
Johannio Marulanda Casas⁵
Universidad del Valle
Colombia

El Sistema Industrializado SI en Latinoamérica, en especial en Colombia, ha aumentado su implementación debido a sus ventajas técnicas y de minimización de costos económicos directos. Esta tecnología constructiva consiste en edificaciones de muros delgados de concreto reforzado MDCR con una cuantía importante de muros por metro cuadrado. Sin embargo, diferentes investigaciones han reportado susceptibilidad cuando es sometido a cargas sísmicas, dado que su desempeño estructural presenta baja ductilidad, inestabilidad fuera del plano y presencia de fallas frágiles, entre otros aspectos. Por ello se ha planteado la necesidad de la implementación de técnicas de control estructural con el fin de disminuir la vulnerabilidad sísmica en este tipo de sistema constructivo, donde la técnica de aislamiento en la base se presenta como una alternativa confiable, accesible y aplicable para la disminución de la vulnerabilidad de estas estructuras ante un evento sísmico. La pérdida de capacidad de desempeño de algunos elementos estructurales, al ser sometidos a sismos, es uno de los enfoques de estudio característicos de la ingeniería estructural para determinar integralmente la capacidad de resistencia de la estructura ante replicas sísmicas o eventuales rehabilitaciones. Convencionalmente para analizar edificaciones aisladas se emplea software de elementos finitos que constituye modelos numéricos simplificados, aplicando teorías limitadas sobre el comportamiento de los elementos estructurales, que difieren de su comportamiento real. Con el fin de considerar una dinámica completa de los MDCR afectados, se implementó una técnica experimental conocida como Simulación Híbrida en Tiempo-Real SHTR. Esta metodología de trabajo divide dinámicamente la edificación de MDCR en un componente numérico, correspondiente a un modelo de la estructura aislada sin los muros afectados, y en un componente experimental, en el que se emplea una probeta a escala real de un MDCR afectado cíclicamente. Se utilizó como sistema de transferencia el Marco de Pruebas y Homologaciones MaP-H de la Universidad del Valle. Se obtuvo una evaluación fiable y precisa de la SHTR con valores de amplitud generalizada A_0 cercanos a 1,0, errores menores al 1,8% y *delay* en el tiempo menores a 8,0 ms, para los dos eventos sísmicos evaluados, el Centro y Kobe, con aceleraciones de $6,80 \text{ m/s}^2$ (0,70 g) y $9,81 \text{ m/s}^2$ (1,00 g) en ambos casos. Lo anterior permitió determinar el comportamiento histerético del MDCR en condiciones operativas de la edificación aislada.

¹ Especialista en Estructuras.

Contacto: bryan.castillo@correounivalle.edu.co

² Especialista en Estructuras.

Contacto: sharick.vides@correounivalle.edu.co

³ Ingeniera Civil.

Contacto: andry.hoyos@correounivalle.edu.co

⁴ Doctor en Ingeniería.

Contacto: peter.thomson@correounivalle.edu.co

⁵ Doctor en Ingeniería.

Contacto: johannio.marulanda@correounivalle.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la ingeniería estructural se ha volcado a la gestión de una infraestructura civil resilientes con el objetivo de garantizar la seguridad de sus ocupantes y un desempeño estructural óptimo [1]. Lo anterior se fundamenta aún más si tenemos en cuenta que según el reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10 las condiciones geológicas y sismológicas del país implican que el 87% de la población se encuentra en zonas de riesgo sísmico considerable [2]. Este nuevo enfoque integral procura sistemas estructuras capaces de recuperarse, de forma eficiente, luego de estar expuestas a cargas dinámicas fuertes, como en el caso de un evento sísmico o secundarios a estos.

La ingeniería estructural latinoamericana se ha encaminado a involucrar las ventajas técnicas y económicas en los desarrollos constructivos debido al creciente requerimiento de vivienda en las grandes urbes en expansión, las cuales han impulsado al sector de la construcción [3]. Con estas directrices, la implementación del Sistema Industrializado SI, que consiste en edificaciones de muros delgados de concreto reforzado MDCR con altos rendimientos en su ejecución debido a su proceso constructivo óptimo, que involucran formaletas metálicas modulares y reducción en la mano de obra respecto a sistemas constructivos tradicionales [4]; ha generado una acogida importante en la Industria de la construcción colombiana.

Las edificaciones con este sistema se caracterizan por presentar muros de bajo espesor entre 80 a 150 *mm*, con refuerzo electrosoldado en el alma, dispuesto generalmente en una sola capa y con cuantías de refuerzo típicas de 0.25%, correspondientes a las mínimas exigidas en la NSR-10 [1, 5]; además, se utilizan concretos de alta fluidez y se mezclan con aditivos acelerantes para obtener la resistencia de diseño a edades tempranas, lo que permite a menudo fundiciones monolíticas entre muros y losas de un piso completo en un solo día [6, 7].

Los MDCR en ocasiones requieren de elementos de borde conformados de refuerzo longitudinal con acero convencional dúctil confinado por ganchos o estribos cerrados y conservando el espesor del alma. Las losas de entrepiso son placas macizas de concreto reforzado, con espesores característicos de 100 a 200 *mm*, y con malla electrosoldada que conforma su refuerzo. Esta tecnología se ha posicionado como el segundo sistema estructural más empleado en Colombia (34.5%) para la construcción de vivienda en las principales ciudades del país y se ha constituido como una alternativa eficiente para abordar el déficit habitacional regional [8].

Sin embargo, luego de los sismos de Chile (2010) y Nueva Zelanda (2011), diferentes investigaciones han reportado, incluso para espesores de muro mayores, que el desempeño estructural de estos muros puede ser limitado al presentar baja ductilidad, baja capacidad de disipación de energía, inestabilidad fuera del plano, presencia de fallas frágiles, entre otros aspectos [9-12]. Adicionalmente, a nivel local las edificaciones de MDCR presentan altas relaciones de esbeltez y refuerzos en una sola capa, incrementando su susceptibilidad a inestabilidades fuera del plano [5, 13]. También, se presentan configuraciones de acero inadecuadas y utilización de materiales de baja ductilidad, aumentando las condiciones de inestabilidad fuera del plano [10, 14]; A lo anterior se suma, el inadecuado confinamiento en zonas extremas para resistir las altas demandas a flexo-compresión; generando dificultades constructivas y limitaciones en la capacidad de deformaciones internas en los MDCR [15].

Debido a las limitaciones del comportamiento dinámico de edificaciones con SI y a las condiciones de riesgo sísmico presentes en Colombia se genera la necesidad de implementar mecanismos de control que reduzcan la vulnerabilidad sísmica de este tipo de estructuras. Debido a lo anterior, se han realizado múltiples estudios y aplicaciones que han comprobado la efectividad de los sistemas de control para reducir esta problemática [16].

Sin embargo, son pocas las investigaciones que se centran en determinar el comportamiento dinámico de MDCR afectados ante posibles eventos sísmicos en edificaciones aisladas. Convencionalmente, para el análisis de estructuras aislada se utilizan modelos numéricos con histéresis simplificadas para una condición de deformación específica en los aisladores y condiciones de linealidad en los elementos

estructurales. Con el fin de considerar la dinámica práctica de los MDCR afectados, se implementa una técnica experimental conocida como: Simulación Híbrida en Tiempo-Real SHTR [17]. Esta metodología permite, mediante sub estructuración dinámica, dividir el sistema estructural en un componente numérico y uno experimental; correspondiente a un modelo de la estructura aislada sin los muros afectados; y a una probeta a escala real de un MDCR afectado. La interacción entre ambas subestructuras se realiza en cada paso de tiempo permitiendo la interacción constante entre el componente experimental en la subestructura numérica [18].

2. MÉTODO

2.1 Simulación Híbrida en Tiempo-Real SHTR

Una novedosa e innovadora técnica de evaluación del comportamiento dinámico de sistemas estructurales se ha destacado en las últimas dos décadas, denominada en la literatura como Simulaciones Híbridas SH [17, 19-21]. Esta metodología de pruebas consiste en acoplar las pruebas experimentales con los análisis numéricos. Las SH consisten en subestructura dinámicamente el sistema a evaluar en un componente experimental, que generalmente expone un comportamiento altamente no-lineal, y un componente numérico, que presenta un comportamiento predecible o con un interés bajo por evaluar.

Ambas subestructuras son entrelazadas de forma continua mediante la implementación de sistemas de transferencias, con la función de reproducir las condiciones de borde en la interfaz entre el componente numérico y el experimental, y sensores que proveen los medios para la interacción entre ambas subestructuras, formando un bucle para resolver la respuesta dinámica del sistema en cada paso de tiempo [22-24], como se esquematiza en la sub estructuración de una edificación ante un evento sísmico (Figura 1).

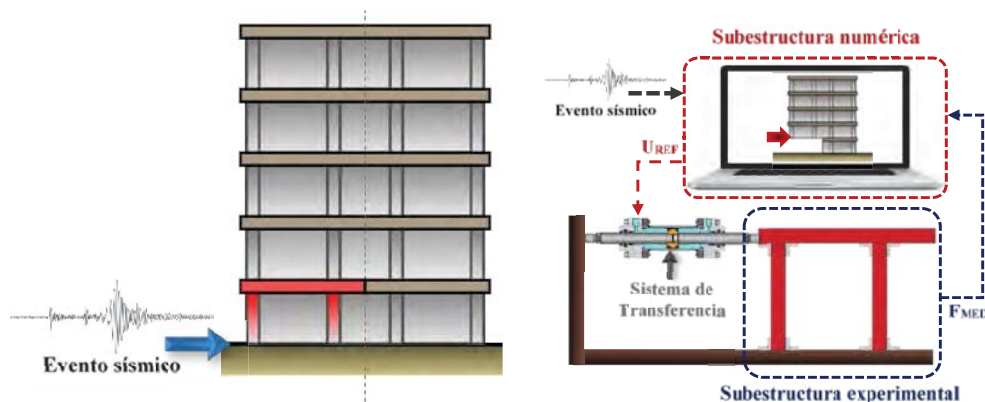


Figura 1. Esquema de Simulación Híbrida: a) Edificación con carga sísmica; b) Subestructuración dinámica de un pórtico de una edificación ante un evento sísmico

Las SH tienen el potencial, dada su versatilidad, de simular la respuesta dinámica de especímenes a gran escala lo que las hace una técnica robusta de evaluación de sistemas estructurales civiles en general [25, 26]. La ventaja de esta técnica radica en su optimización de recursos, concentrándolos en el componente crítico a evaluar del sistema generando menores costos, altos rendimientos en tiempo y mayor desempeño frente a las limitaciones de capacidad de la experimentación tradicional a gran escala (STT, ensayos cuasi-estáticos, etc.). Además, las SH han mostrado un desempeño óptimo en la fiabilidad y precisión en las respuestas dinámicas simuladas del sistema estructural completo.

Las SH que modelan analíticamente los efectos inerciales, empleando representaciones numéricas del sistema, son conocidas comúnmente como ensayos Pseudo-dinámicos PSD [27-29]. Los ensayos PSD evalúan la componente de rigidez del elemento experimental para la calibración o validación de modelos numéricos como histéresis. Cuando se introduce el concepto de sub estructuración se genera como resultado los ensayos Pseudo-Dynamic Hybrid Simulation PSDHS, donde la subestructura experimental contiene la rigidez y amortiguamiento, y la parte numérica lo restante [25]. El desempeño de esta técnica es válido para una gran variedad de estructuras construidas en materiales convencionales como acero,

concreto o madera, siempre que los cambios de carga permanezcan en un nivel producido por los eventos sísmicos. Lo anterior es una de las razones por la cual esta metodología tiene gran acogida [21, 30]. Sin embargo, en los últimos años se han desarrollado una gran variedad de dispositivos de control con el fin de disminuir la vulnerabilidad de las estructuras y mitigación de la respuesta dinámica ante cargas dinámicas, en los cuales su desempeño depende directamente de la velocidad [31]. Infortunadamente, las pruebas PSD convencionales o las PSDHS no son aplicables para simular la respuesta sísmica de estructuras con tales tecnologías debido a que las cargas generalmente son aplicadas en escalas de tiempo muy amplias. Por lo tanto, los efectos dinámicos dependientes de los cambios de tiempo en las tecnologías emergentes son eliminados [25, 32-34].

Ante las limitaciones presentadas por las pruebas PSD o PSDHS, una serie de investigaciones recientes, plantean la utilización de pruebas de SHTR. Las cuales, conservan el concepto de sub estructuración dinámica como en las SH (Subestructura numérica y experimental) pero con una interacción constante en la interfaz entre los dos subsistemas debido a su ejecución en Tiempo-Real [20, 30]. Las SHTR se destacan por su capacidad de inducir las velocidades correspondientes de la interfaz a los dispositivos o elementos evaluados experimentalmente, lo que permite realizar investigaciones de ingeniería sísmica para la evaluación de respuestas de elementos localizados y evaluar el desempeño del sistema global [25, 35].

Basados en la técnica de SHTR se evaluó dinámicamente la edificación de MDCR aislada con un porcentaje de sus muros afectados cíclicamente. Se realizó una retroalimentación constante a una frecuencia de 1024 Hz, utilizando el Marco de Pruebas y Homologaciones de la Universidad del Valle, con un seguimiento con control robusto, como sistema de transferencia; garantizando una interacción estable entre las subestructuras experimentales (MDCR afectado) y numéricas (Estructura aislada restante). Este planteamiento permitió determinar la resistencia residual experimental aportada por los muros afectados cíclicamente y su condición de degradación durante dos eventos sísmicos; además, se evaluó numéricamente la respuesta de la estructura MDCR aislada bajo estas condiciones sísmicas [36].

2.2 Estructura de referencia

La estructura de referencia corresponde a una edificación de baja altura típica en Colombia, construida en la ciudad de Santiago de Cali, diseñada con el SI de MDCR, y a la cual, para disminuir la vulnerabilidad sísmica del sistema en esta investigación se le implementó un sistema de aislamiento sísmico de acuerdo con el procedimiento estipulado en el FEMA 450 [37] y las recomendaciones realizadas por [38]. Esta edificación está compuesta de MDCR, losas de entrepiso con espesor de 80-100 mm; se disponen concreto de peso normal con resistencias de 21 MPa y una densidad volumétrica de muros en planta promedio de 2.0% y 2.5% para las direcciones longitudinales y transversales. La edificación consta de seis losas con alturas entre piso de 2,5 m y dimensiones en planta de 16.5 m y 13.7 m en las direcciones X y Y, respectivamente, Figura 3. Con el fin de alcanzar una distribución de carga uniforme en la base se dispuso una losa maciza de 100 mm de espesor, vigas de 400x500 mm y 400x400 mm las cuales cimentan los muros y transmiten la carga a los 12 aisladores elastómericos, como se muestra en la Figura 3b.

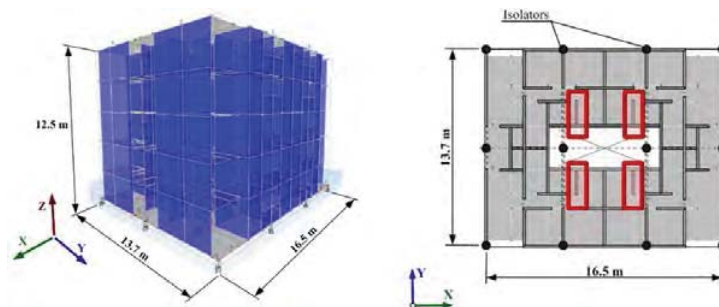


Figura 2. Estructura de referencia: a) Isometría estructural; b) Planta estructural

La evaluación del comportamiento dinámico se realizó en el software ETABS19 utilizando elementos tipo *Shell-membrane* para losas, *Shell-Thin* para muros y *Frame* para las vigas, y con la suposición de diafragma rígido en las losas. En la condición de base fija se consideró un porcentaje de amortiguamiento estructural

$\zeta = 5\%$ y las frecuencias en las direcciones X y Y, en los dos primeros modos, fueron de 4,46 y 4,77 Hz, respectivamente. Mientras que, para la condición aislada se alcanzó el periodo objetivo de 1.90 s, desarrollando un comportamiento de cuerpo rígido en la superestructura soportada sobre el sistema de aislamiento. Teniendo en cuenta que para la estructura aislada se supuso el porcentaje de amortiguamiento estructural $\zeta = 0\%$, utilizando únicamente el amortiguamiento suministrado por el comportamiento histerético de los aisladores.

El sistema de aislamiento se diseñó a partir de las normas y recomendaciones anteriormente mencionadas. Utilizando el espectro de diseño de la micro zona No.1 de la ciudad de Santiago de Cali [39] con una Pseudoaceleración máxima de 0,75 g, un periodo objetivo de 1.90 s y una deformación de diseño del 100%. Se contemplaron 62 capas de caucho y 61 capas de fibra con espesores de $t_r = 5,5 \text{ mm}$ y $t_f = 1.0 \text{ mm}$, respectivamente, alcanzando una altura total de $H = 400 \text{ mm}$ y un diámetro 910 mm. Estos aisladores diseñados se implementaron en el software ETABS19 considerando un comportamiento no-lineal para los grados de libertad longitudinales X y Y [40], con un modelo de histéresis bilineal.

2.3 Subestructura Numérica SN

Con el objetivo de proponer un modelo analítico más versátil para conformar la SN se implementó un modelo de un pórtico a cortante en espacio de estados ajustado con las respuestas simuladas de la edificación aislada en ETABS19, analizando el eje Y de esta estructura. Incluyendo, además, un modelo tipo *Bouc-Wen extendido* para representar el comportamiento histerético altamente no-lineal del sistema aislado, como se utilizó en [36] para este tipo de aislamiento. El modelo estructural propuesto se conforma como un pórtico a cortante de 6-GDL traslacionales ajustados para un análisis de excitación en la base sinusoidal con amplitud constante para frecuencias entre 0.1-20 Hz. El modelo planteado y la distribución de masa utilizada se muestra en la Figura 3a y 3b, respectivamente; además, los valores de estas propiedades son registrados en la Tabla 1.

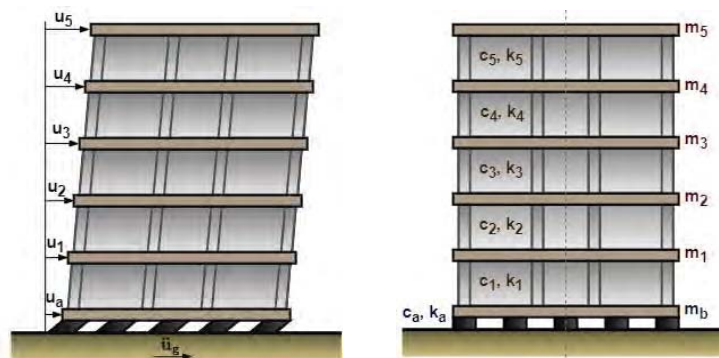


Figura 3. Modelo numérico de la edificación aislada: a) GDL del Modelo; b) Masas y rigideces por piso

Tabla 1. Valores de propiedades físicas de la edificación aislada.

Nivel de Piso	Masa M_i (Ton)	Rigidez K_i (KN/m)	Amortiguamiento C_i (KN*s/m)
Base Aislada	171,91	BW*	BW*
No. 1	159,83	3091,80*1e3**	3549,80*1e3
No. 2	159,88	1787,00*1e3	2186,70*1e3
No. 3	159,88	1197,72*1e3	1571,00*1e3
No. 4	159,88	845,42*1e3	1202,90*1e3
No. 5	138,83	470,45*1e3	769,02*1e3

*BW → Propiedad variable en modelo Bouc-Wen.

**No tiene en cuenta la rigidez de MDCR afectados, Figura 2b

La ecuación de movimiento que simula el comportamiento dinámico de la estructura se presenta en la ecuación (1), donde: M_r , C_r y K_r son las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez representativas del modelo simplificado de 6-GDL; y X , $\dot{X}$ y $\ddot{X}$ corresponden a los estados de desplazamiento, velocidad y aceleración relativos. Aplicando sub estructuración dinámica [28, 29] se extrajo la acción del sistema aislado, del modelo numérico de la edificación aislada, para ser incluido como una fuerza entrante mediante el

modelo numérico de *Bouc-Wen extendido*; adicionalmente, se realiza esta misma metodología para extraer las propiedades de los MDCR afectados del modelo numérico de la edificación aislada e incluirlo como una fuerza entrante en este sistema. Lo anterior permite una retroalimentación del modelo numérico de la edificación aislada con la fuerza medida experimentalmente de los MDCR afectados $\Gamma_{MDCR} F_{MDCR}$ y del modelo del sistema de aislamiento $\Gamma_{Ais} F_{Ais}$, como se plantea en la ecuación (2).

$$M_r \{\ddot{x}\} + C_r \{\dot{x}\} + K_r \{x\} = -M_r \Gamma_g a_g \quad (1)$$

$$M_n \{\ddot{x}\} + C_n \{\dot{x}\} + K_n \{x\} = -M_r \Gamma_g a_g - \Gamma_{Ais} F_{Ais} - \Gamma_{MDCR} F_{MDCR} \quad (2)$$

Las fuerzas restauradoras del sistema, producto de la fuerza experimental registrada de los MDCR afectados, está determinada por el termino $\Gamma_{MDCR} F_{MDCR}$, donde el vector de influencia $\Gamma_{MDCR} = [1 \ -1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ indica los GDL donde es aplicada. De igual forma, a_g representa la aceleración del suelo y el vector $\Gamma_g = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$ especifica la incidencia del sismo en los GDL. Finalmente, el término $\Gamma_{Ais} F_{Ais}$ indica la fuerza del modelo numérico de aislamiento y $\Gamma_{Ais} = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ el GDL de incidencia. Con lo anterior, se plantea el espacio de estados, como se muestra en las ecuaciones 3 y 4, para tres entradas en el sistema y 6-GDL de salida.

$$\begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \end{Bmatrix}_{[12 \times 1]} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M_n^{-1} K_n & -M_n^{-1} C_n \end{bmatrix}_{[12 \times 12]} \begin{Bmatrix} x \\ \dot{x} \end{Bmatrix}_{[12 \times 1]} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -\Gamma_g & -M_n^{-1} \Gamma_{MDCR} & -M_n^{-1} \Gamma_{Ais} \end{bmatrix}_{[12 \times 18]} \begin{Bmatrix} a_g \\ F_{MDCR} \\ F_{Ais} \end{Bmatrix}_{[18 \times 1]} \quad (3)$$

$$\{U\}_{[6 \times 1]} = [0 \ I]_{[6 \times 12]} \begin{Bmatrix} x \\ \dot{x} \end{Bmatrix}_{[12 \times 1]} + [0 \ 0 \ 0]_{[6 \times 18]} \begin{Bmatrix} a_g \\ F_{MDCR} \\ F_{Ais} \end{Bmatrix}_{[18 \times 1]} \quad (4)$$

El modelo numérico del sistema aislado, como se mencionó anteriormente, se optimizó y ajustó a partir de un modelo histerético tipo *Bouc-Wen* extendido con señales experimentales de la caracterización dinámica de un par de aisladores elastómericos no-conectados a escala en el Marco de pruebas de Aisladores a escala de la Universidad del valle. Las probetas de aisladores y sus dimensiones, junto con el protocolo de ensayo al que fueron sometidos y el Marco de pruebas donde se realizaron las pruebas de caracterización son mostrados en la Figura 4.

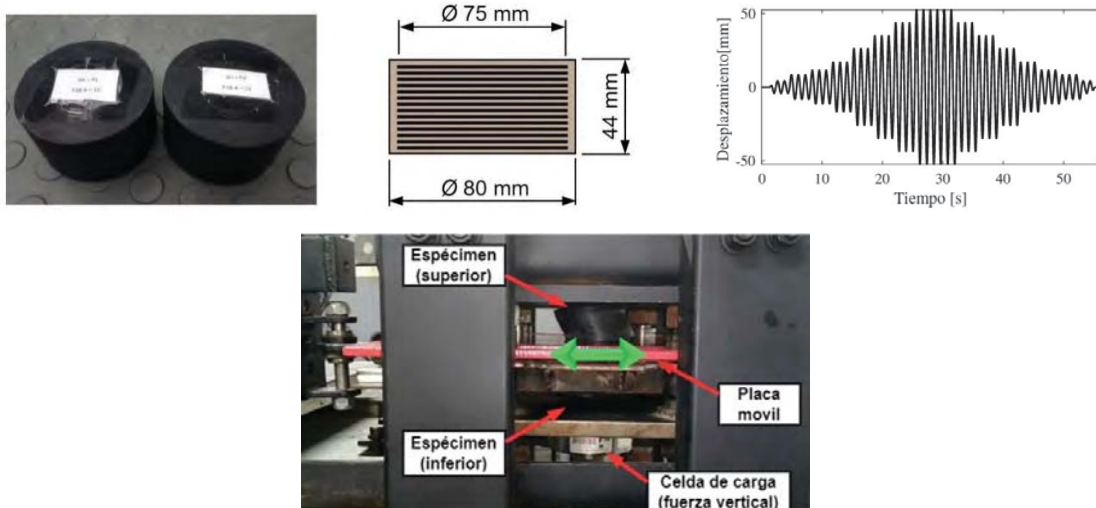


Figura 4. Caracterización de probetas experimentales: a) Probetas de aisladores elastómericos no conectados; b) Protocolo de ensayo; c) Marco de Pruebas de Aisladores a escala

La caracterización de las probetas se realizó mediante la ejecución del protocolo de desplazamiento a cortante (Figura 4b) ejercido por el simulador sísmico unidireccional acoplado al marco de ensayo de aisladores a escala (Figura 4c). De forma simultánea, se ejercía una carga de compresión constante de 19 KN y se registraba la carga a cortante mediante una celda de carga con capacidad de 1,5 ton. Los resultados de las histéresis y los módulos de cortante mostrada por los especímenes se presentan en la Figura 5.

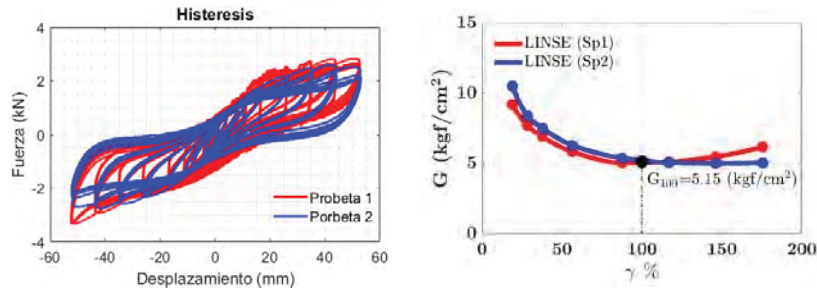


Figura 5. Propiedades mecánicas de los especímenes: a) Histéresis de las probetas de aisladores; b) Módulo a cortante registrado en las probetas

El modelo de *Bouc-Wen extendido* ajustado se formula según las ecuaciones (5) y (6), y sus propiedades son mostradas en la Tabla 2. Igualmente, en la Figura 6 se muestra la bucla típica de este modelo junto con la comparativa del su desempeño de rigidez horizontal, respecto a los resultados de las probetas de aisladores.

$$f_r = s_1 u_a + s_3 u_a^3 + s_5 u_a^5 \quad (5)$$

$$f_d = A \dot{u}_a - \beta \dot{u}_a |z|^n - \gamma |\dot{u}_a| z |z|^{n-1} \quad (6)$$

Tabla 2. Constante del modelo Bouc-Wen aumentado para el sistema de aislamiento

b (kN/m)	Ca (kN*s/m)	S ₁ (kN/m)	S ₃ (kN *m ⁻³)	S ₅ (kN *m ⁻³)	A	Y	β	γ	η
457,00	0,936	99,84	-4,211*1e4	9,567*1e6	1,00	0,375	613,40	488,30	1,00

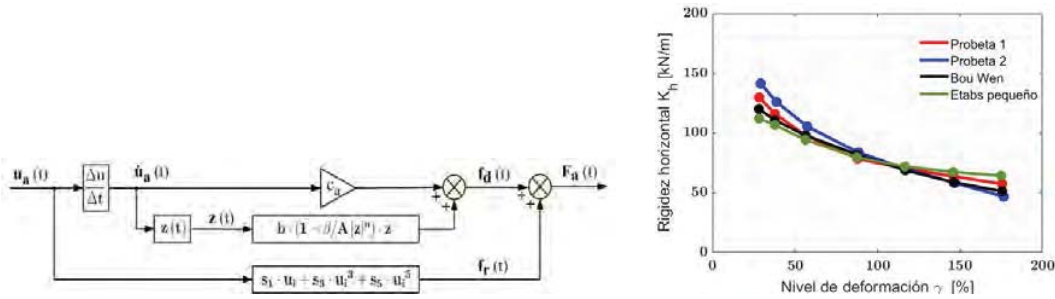


Figura 6. Modelo Bouc-Wen extendido: a) Bucla modelo; b) Rigidez horizontal vs Deformación

2.4 Subestructura Experimental SE

Para la subestructura experimental se implementó un MDCR afectado por un ensayo cíclico realizado por el Grupo de Investigación G7 de la Universidad del Valle, con el fin de simular el comportamiento dinámico real de estos frente a un evento sísmico y, paralelamente, su influencia en la respuesta dinámica de la edificación aislada. Como datos generales de esta probeta se especifica una resistencia del concreto $f'_c = 24.5 \text{ MPa}$, una carga vertical sostenida de 274.58 kN y una relación Momento-Cortante $M/V * L_w = 3.905$, dado por la configuración del Sistema de Transferencia ST empleado.

En la Figura 7, se describe la configuración y la geometría de la probeta de MDCR conformada por una viga superior de $30 \times 32 \text{ cm}^2$, con recubrimiento de 2.5 cm , estribos rectangulares con barras No. 4 cada 23.0 cm y cuatro barras No. 4 para el acero longitudinal; una reducción entre la viga superior y el alma en una longitud de desarrollo de 10.0 cm ; una viga de soporte inferior de $40 \times 54 \text{ cm}^2$, con recubrimiento de $3.0\text{-}4.0 \text{ cm}$, estribos rectangulares con barras No. 3 cada 15.0 cm y una combinación de 4 barras No. 4 y 4 barras No. 5 para el acero longitudinal; se configura estribos de anclaje para la interfaz entre la viga de soporte y el alma con estribos en "L" con barras No. 4; el alma se especifica con espesor de 10.0 cm con malla electrosoldada MES $\varnothing 7 \text{ mm}$ cada 15.0 cm , como acero de refuerzo. Adicionalmente, se configuraron elementos de borde como se evidencia en la Figura. 7c; el elemento de borde derecho continua con el espesor de alma y un ancho de 20.0 cm , con estribos tipo gancho de barras No. 2 cada 15.0 cm y tres barras No. 4 como acero longitudinal, paralelo al alma; y finalmente, para el elemento de borde izquierdo, se

configura una aleta adicional de 10x35 cm², con estribos tipo gancho de barras No. 2 cada 15,0 cm y tres barras No. 4 como acero longitudinal, perpendicular al alma.

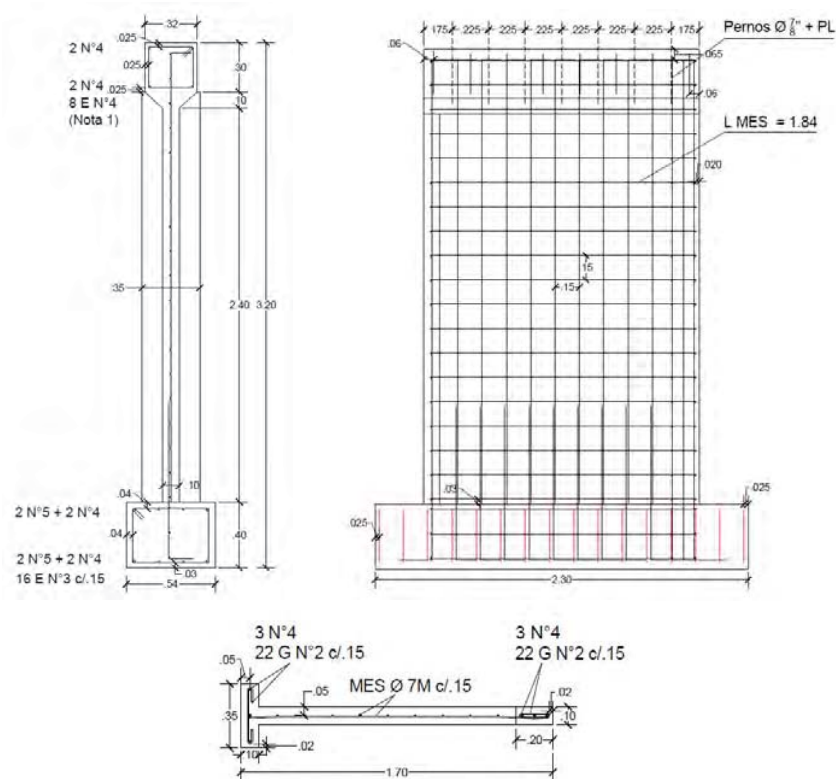


Figura 7. Especificaciones Probeta de MDCR: a) Vista lateral; b) Vista frontal; c) Vista en planta

El estado final de daño registrado del MDCR luego del ensayo cíclico, evidenció una concentración del daño en la zona inferior del muro. Con grietas de gran tamaño en la interfaz del cemento-muro que generó movimientos de cuerpo rígido desde una deriva de 0.6%. Adicionalmente, ocurrió fractura de todos los alambres que componen la malla electrosoldada del alma; pandeo del refuerzo en los extremos del muro, tanto para la aleta como en el extremo libre; y aplastamiento del concreto en los extremos. El desempeño del MDCR alcanzó en ambas direcciones una deriva ultima de 1,40%, definida cuando la resistencia lateral disminuye en 20%. Estos daños estructurales debido al ensayo cíclico se visualizan, mediante material fotográfico del Grupo de Investigación G7, en la Figura 8.

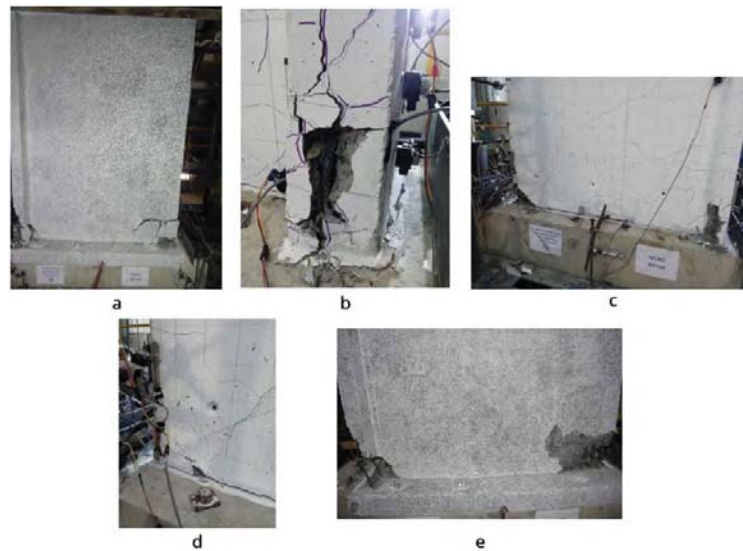


Figura 8. Estado de daño final del MDCR: a) Cara sur; b) Detalle de aleta; c) Cara norte; d) Detalle extremo libre; e) Daño final

A partir de los ensayos de caracterización iniciales de la probeta, con desplazamientos que garanticen un agrietamiento despreciable en el muro se determinó la rigidez inicial del muro. De igual forma, una vez terminada la prueba cíclica y llegado al daño registrado, se realizó un nuevo ensayo de caracterización al muro afectado a partir de desplazamientos sinusoidales de 2,0 mm, registrando su rigidez con daño y obteniendo el ciclo histerético mostrado en Figura 9. Las propiedades iniciales y finales del muro son registradas en la Tabla 3.

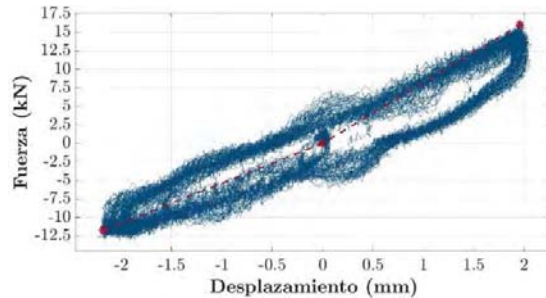


Figura 9. Histéresis MDCR afectado

Tabla 3. Propiedades iniciales y finales del MDCR

Dirección	Deriva Inicial (%)	Rigidez inicial (kN/m)	Rigidez última (kN/m)	Deriva última (%)
Positiva	0,21	56,98*1e3	8,17*1e3	1,4
Negativa	-0,22	48,55*1e3	6,57*1e3	-1,4

2.5 Sistema de Transferencia ST

En las SHTR, los ST tienen la tarea de transmitir físicamente, en la interfaz entre las subestructuras, la respuesta del componente numérico sobre el experimental y, mediante el sistema de adquisición, adquirir su respuesta para retroalimentar nuevamente a la subestructura numérica, esto en cada paso de tiempo Δt . La respuesta de la edificación de MDCR aislada se determinó mediante la técnica de SHTR, empleando como subestructura experimental un MDCR afectado cíclicamente y el resto la estructura aislada como componente numérico. Para ello, se utilizó como sistema de transferencia a cortante el Marco de Pruebas y Homologaciones MP-H de la Universidad del Valle, el cual es mostrado en la Figura 10b, para la ejercer la fuerza lateral sobre el muro; y el sistema de carga constante vertical, para la aplicación de la carga de compresión de 274.58 kN; además, como Sistema de Adquisición SA se dispone una celda de carga con capacidad para 10,0 kLb.

El Sistema de Transferencia Horizontal STH posee una capacidad hidráulica de 42,0 gpm a una presión constante de 3000 psi. El STH se encuentra compuesto por un cilindro hidráulico con recorrido de 30,0 cm, Ø3,5 in de diámetro de vástago y Ø8,0 in de diámetro interno; y una servoválvula MOOG D662-4770, lo que permitió el desarrollo de controlador robusto tipo H_∞ de seguimiento por desplazamiento para la planta identificada en la ecuación (7) mediante la implementación del controlador definido en la ecuación (8), implementando además, un Filtro de Kalman con el fin de reducir el ruido registrado por el LVDT y contribuir con la estabilización de la SHTR, como se muestra en la Figura 10a. Este controlador fue diseñado bajo los lineamientos de implementación de la función *hinfstruc* de Matlab [41].

Como se expone en la Figura 10b, este sistema se encuentra adosado en la parte superior del MP-H para garantizar la relación momento-cortante de diseño del muro. El Sistema de Transferencia Vertical STV se opera a partir de la unidad de potencia portátil con capacidad de 1,5 gpm y una presión de trabajo de 3000 psi. El STV se compone de dos cilindros hidráulicos con un recorrido de 10.0 cm, Ø5,0 in de diámetro de vástago y Ø10,0 in de diámetro interno. Este sistema es controlado mediante variación de presión en la unidad de potencia portátil.

$$G_{planta} = \frac{1.727s + 2.848}{s^2 + 1.572s - 0.1272} \quad (7)$$

$$C_{control} = \frac{-6.46 \cdot 10^{10} s^4 - 1.33 \cdot 10^{12} s^3 - 3.93 \cdot 10^{12} s^2 - 3.25 \cdot 10^{12} s - 1.70 \cdot 10^{11}}{s^5 - 1.84 \cdot 10^8 s^4 - 3.08 \cdot 10^8 s^3 + 4.90 \cdot 10^8 s^2 + 8.21 \cdot 10^8 s + 3.86 \cdot 10^6} \quad (9)$$

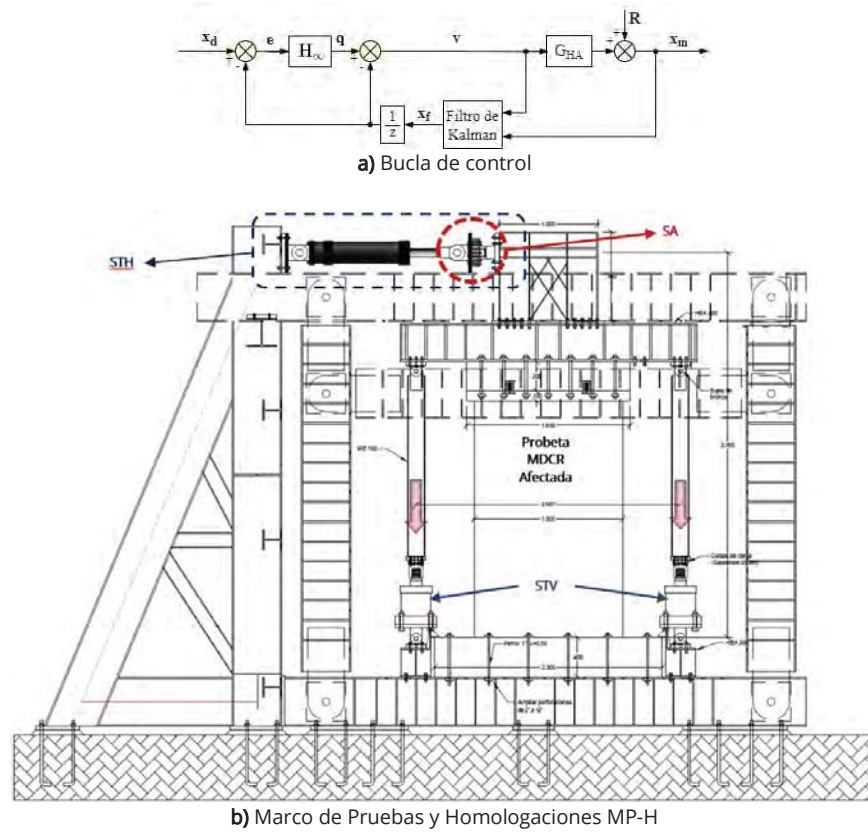


Figura 10. Montaje experimental

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para determinar el desempeño sísmico de la edificación de MDCR aislada, se realizaron dos SHTR bajo diferentes excitaciones sísmicas, correspondientes a los sismos de El Centro (USA 1940), Kobe (Japón 1995); con amplitudes máximas de 6.80 m/s^2 ($0.70 g$) y 9.81 m/s^2 ($1.00 g$), mostrados en la Figura 11.

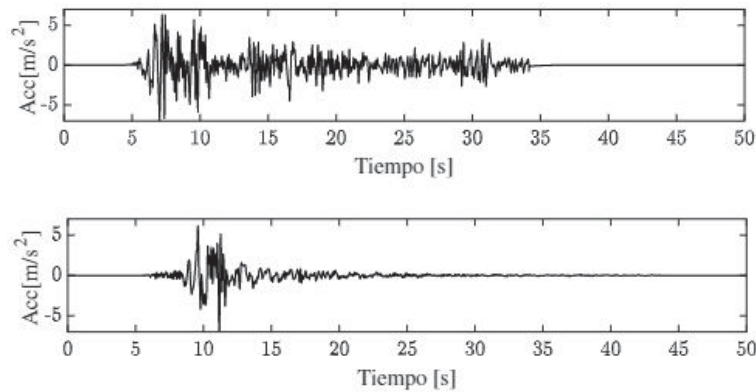


Figura 11. Excitaciones sísmicas: a) El Centro; b) Kobe

Para el desarrollo de la SHTR de la edificación de MDCR aislada con un porcentaje de muros afectados se interconectaron la subestructura numérica, la subestructura experimental y los sistemas de transferencia, como se encuentra esquematizado en la Figura 12. En la esquematización la SN es excitada dinámicamente por una entrada de sismo en la base $\ddot{a}_g$ dando como resultado la respuesta en desplazamiento $U_{a,d}$, esta señal corresponde a la referencia del STH quien la reproduce en un desplazamiento $U_{a,m}$ sobre la SE conformada por el MDCR afectado.

Paralelamente, el STV ejerce una carga axial constante de 274,58 kN con el fin de simular las condiciones de interfaz de la probeta en la edificación. La respuesta de la SE se adquiere como una fuerza medida F_m por

una celda de carga horizontal de 10.000 Lb y procesada por la cantidad de MDCR afectados en el primer nivel de la estructura, correspondiente al 12,76% en esta investigación, obteniendo así la fuerza de retroalimentación F_{feed} de la SN y completar el lazo dinámico. Lo anterior se realiza en cada paso de tiempo Δt a una frecuencia de muestreo de 1024 Hz.

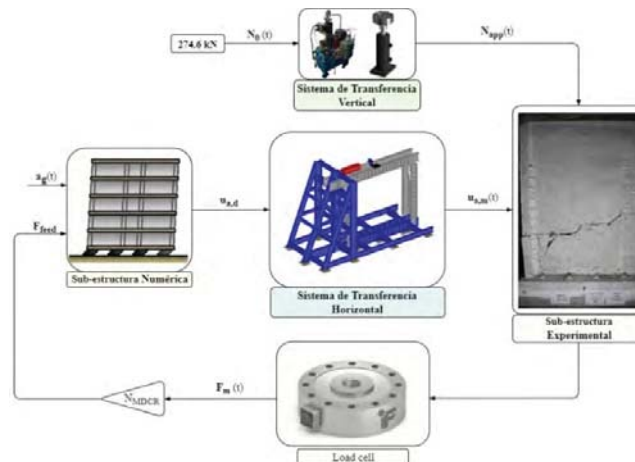


Figura 12. Esquema de SHTR para edificación aislada con MDCR afectados

La técnica de SHTR permitió determinar el comportamiento de la edificación aislada durante los dos eventos sísmicos planteado. Logrando desarrollar la histéresis del MDCR afectado para ambos sismos a dos magnitudes diferentes, 0,7 y 1,0 g, como se muestra en la Figura 13-14.

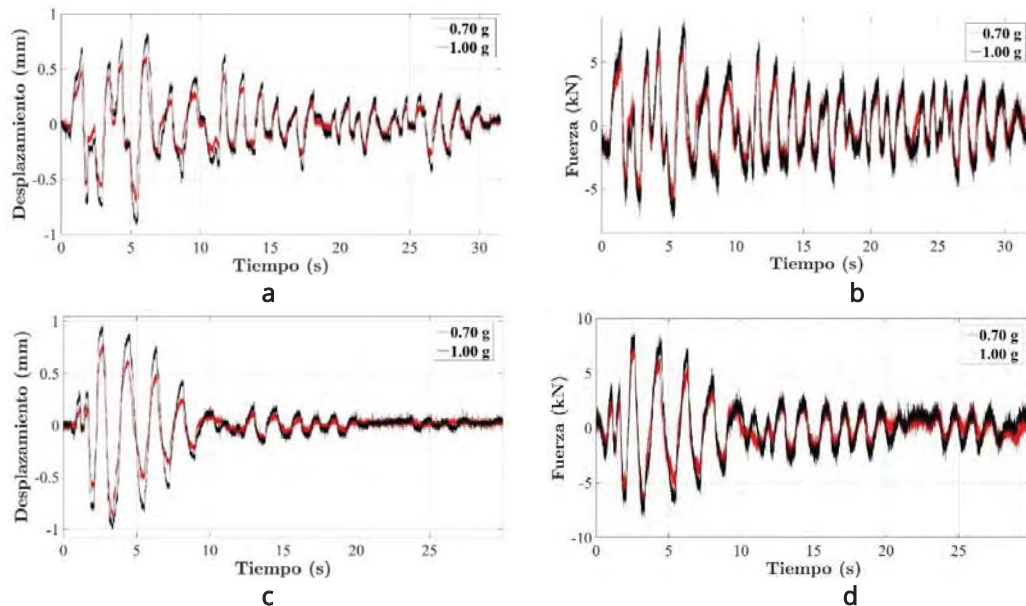


Figura 13. Respuestas en desplazamiento y fuerza vs Tiempo de la probeta de MDCR afectada: a) Desplazamiento vs Tiempo MDCR - afectado sismo El Centro; b) Fuerza vs Tiempo MDCR - afectado sismo El Centro; c) Desplazamiento vs Tiempo MDCR - afectado sismo Kobe; d) Fuerza vs Tiempo MDCR - afectado sismo Kobe

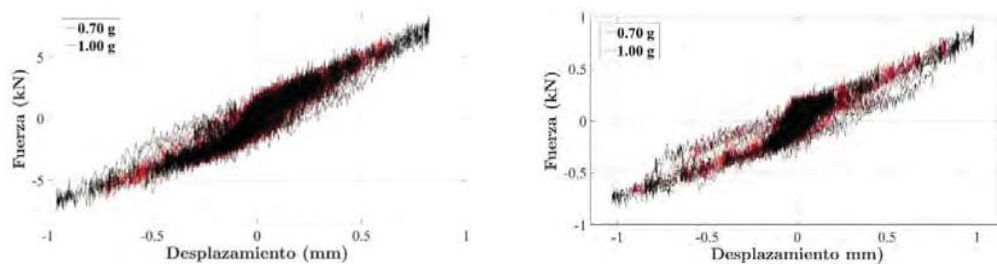


Figura 14. Histéresis de probeta de MDCR afectado: a) Sismo de El Centro; b) Sismo de Kobe

En la literatura se han propuesto algunos índices para determinar la precisión de las SHTR. El primer valor es el índice de evaluación de frecuencia (FEI) [42] el cual compara la transformada rápida de Fourier (FFT) de la señal deseada (Y_c) con la de la señal medida (Y_m) en el actuador. Adicionalmente, la evaluación del seguimiento del sistema de transferencia, determina la frecuencia de mayor participación durante la SHTR (f^{eq}), la cual es obtenida mediante la serie de ecuaciones (9) a (15). Otro parámetro importante es la amplitud generalizada A_0 , el cual permite calcular la correspondencia de amplitud entre la señal de referencia y la medida, y se define como el valor absoluto de FEI. Finalmente, el retraso en tiempo o delay (δ) se estima como el valor opuesto del argumento FEI sobre la frecuencia angular equivalente.

$$e_{DM} = \frac{|\max(|U_{a,d}(t)|) - \max(|U_{a,m}(t)|)|}{\max(|U_{a,d}(t)|)} \quad (9)$$

$$e_{MD} = \frac{\max(|U_{a,d}(t) - U_{a,m}(t)|)}{\max(|U_{a,d}(t)|)} \quad (10)$$

$$FEI = \sum_{j=1}^N \left\{ \frac{y_m(j)}{y_c(j)} \cdot \frac{\|y_c(j)\|^l}{\sum_{i=1}^N \|y_c(i)\|^l} \right\} \quad (11)$$

$$f^{eq} = \frac{\sum_{j=1}^N \{\|y_c(j)\|^l \cdot f_j\}}{\sum_{j=1}^N \|y_c(j)\|^l} \quad (12)$$

$$A_0 = \|FEI\| \quad (13)$$

$$\phi = \arctan[Im(FEI)/Re(FEI)] \quad (14)$$

$$\delta = -\frac{\phi}{2\pi f^{eq}} \quad (15)$$

Los índices de la evaluación fueron obtenidos para los dos sismos en magnitudes de 0,7 y 1,0 g , como se presenta en la Tabla 4. Para todos los casos se observa alto nivel de seguimiento de la respuesta, con valores de amplitud generalizada A_0 cercanos a 1,0, errores menores al 1,8% y *delay* en el tiempo menores a 8,0 ms , lo que permite concluir que el Marco de Pruebas y Homologaciones MPa-H como sistema de transferencia horizontal tiene alto rendimiento y permite realizar las SHTR con nivel destacados de precisión.

Tabla 4. Índices de evaluación de las SHTR

Sismo	FEI	F_{eq} (Hz)	A_0	e_{DM} (%)	e_{MD} (%)	δ (ms)
El Centro 0,7 g	1,006-0.00i	249,704	1,006	0,379	1,710	< 7,00
El Centro 1,0 g	1,006-0.00i	249,738	1,006	0,151	1,530	< 5,00
Kobe 0,7 g	1,005-0.00i	249,447	1,005	0,252	1,153	< 8,00
Kobe 1,0 g	1,004-0.00i	249,620	1,004	0,213	1,161	< 6,00

Por otro lado, el modelo de Bouc-Wen aumentado utilizado para representar numéricamente el comportamiento histerético y considerablemente no-lineal del sistema de aislamiento de la estructura de MDCR presentó un comportamiento esperado alcanzando altos niveles de deformación frente al sismo e induciendo una capacidad de disipación de energía a la estructura y así proteger el vulnerable sistema de MDCR del SI ante eventos sísmicos. En la Figura 15-16 se presenta el comportamiento desarrollado por el sistema de aislamiento propuesto, para uno de los doce aisladores.

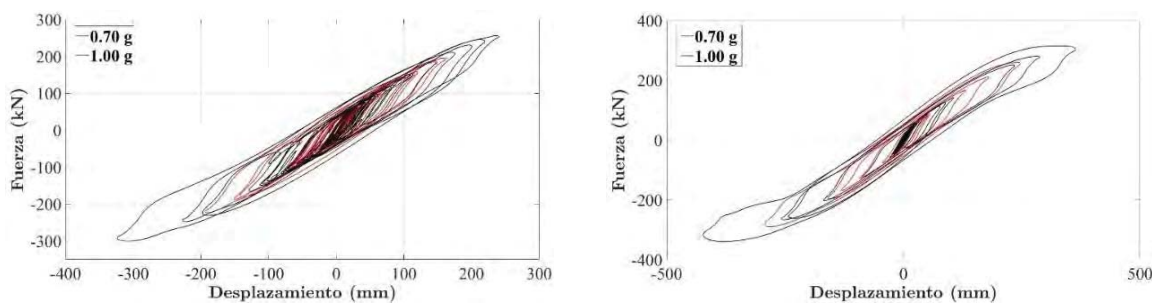


Figura 15. Histéresis de modelo Bouc-Wen aumentado del sistema de aislamiento en la base: a) Sismo de El Centro; b) Sismo de Kobe

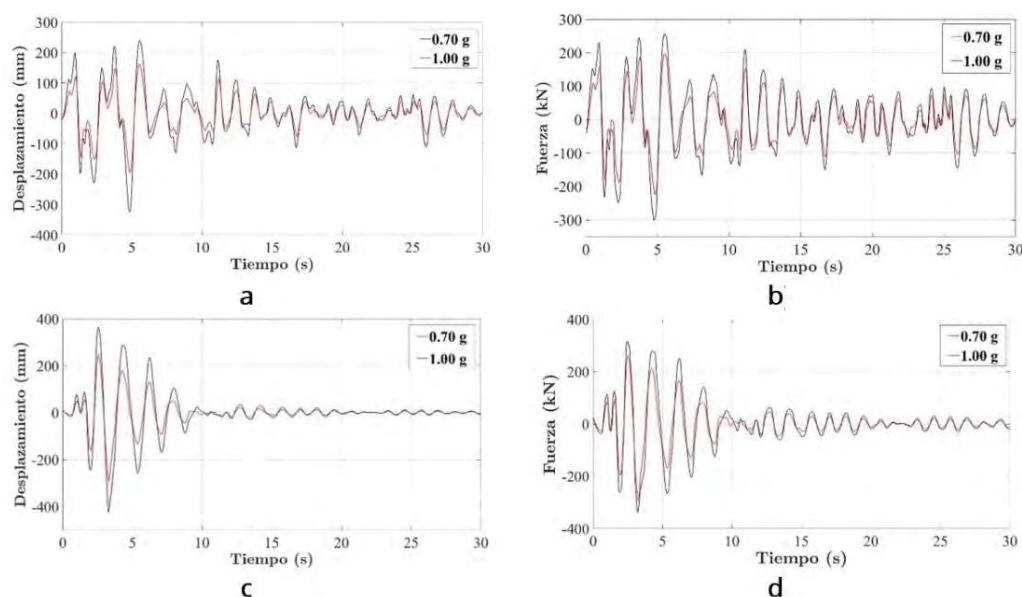


Figura 6. Respuestas en desplazamiento y fuerza vs Tiempo del modelo Bouc-Wen extendido del sistema de aislamiento en la base: a) Desplazamiento vs Tiempo BW Aislamiento - sismo El Centro; b) Fuerza vs Tiempo BW Aislamiento - sismo El Centro; c) Desplazamiento vs Tiempo BW Aislamiento - sismo Kobe; d) Fuerza vs Tiempo BW Aislamiento - sismo Kobe

4. CONCLUSIONES

Se planteó y desarrolló una sub estructuración dinámica de una edificación aislada con MDCR en tres subcomponentes principales.

El primer subcomponente lo constituyó el sistema de aislamiento en la base, el cual se diseñó como doce aisladores elastómericos no conectados representados por un modelo numérico ajustado de Bouc-Wen aumentado con las constantes expuestas en la Tabla 2; el segundo subcomponente corresponde a la probeta experimental de MDCR afectado con anterioridad en un test cíclico y con las propiedades presentadas en la Tabla 3.

El último subcomponente fue el restante de la edificación aislada de MDCR representada por un pórtico a cortante de 6-GDL. La sub estructuración se realizó según la descomposición dinámica, permitiendo una retroalimentación constante en cada paso de tiempo (1024 Hz) de las tres subestructuras.

Implementado como sistema de transferencia en la SHTR demostró un desempeño fiable y preciso en la reproducción de la interfaz entre la subestructura numérica y experimental, alcanzando en la evaluación de las SHTR valores de amplitud generalizada (A_0) cercanos a 1.0, errores menores al 1.8% y delay en el tiempo menores a 8.0 ms.

Se realizaron pruebas de SHTR de la edificación de MDCR aislada bajo dos eventos sísmicos: El Centro y Kobe, con aceleraciones de 6.80 m/s^2 (0,70 g) y 9.81 m/s^2 (1,00 g) para ambos casos. En las cuales se obtuvo las curvas de histéresis del sistema de aislamiento en el base representado por el modelo Bouc-Wen aumentado, evidenciando un desempeño viscoelástico típico de esta tecnología contribuyendo con el aumento de la capacidad de disipación de la estructura y disminuyendo la vulnerabilidad del SI de MDCR. La probeta de MDCR afectado presentó en su comportamiento histerético con una esperada baja capacidad de disipación de energía.

Sin embargo, se demostró que al considerar el 12,76% de los muros de la base como afectados, en la dirección de análisis, el sistema de aislamiento tiene la capacidad de disminuir la vulnerabilidad de la edificación manteniendo el SI en un estado de deformación casi lineal. Lo anterior permite contemplar al aislamiento en la base como una técnica de control estructural con la capacidad de proteger la integridad estructural ante posibles replicas sísmicas para su posterior intervención y recuperación.

Agradecimientos

Esta investigación hace parte del proyecto de Investigación *Simulaciones híbridas en tiempo real: una alternativa confiable, rápida y económica para la evaluación de estructuras resilientes*, en el marco del programa *Tecnologías emergentes para la mitigación de riesgo sísmico de infraestructura civil*, CT 80740-463-2020. Los autores desean expresar sus agradecimientos a la Universidad del Valle y al Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación (Minciencias), entidad que financia el programa.

REFERENCIAS

- [1] Dyke S. et al. (2010). Vision 2020: An open space technology workshop on the future of earthquake engineering: A report on the NSF-Funded Workshop. Held January 25-26.
- [2] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2017). Reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- [3] Ortega R. et al. (2021). Evaluation and fitting of a numerical model for reinforced concrete thin walls through experimental results of monotonic and cyclic loading tests. *Latin American Journal of Solids and Structures* 18.
- [4] Construdata. (2013). Los materiales de construcción. Recuperado: http://www.construdata.com/Bc/Otros/Archivos/como_se_construye_en_colombia.asp
- [5] Sánchez J. y Arteta C. (2017). Caracterización estadística de edificios de muros delgados en concreto reforzado para zonas de amenaza sísmica alta. En VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica.
- [6] Gil D. y Cano L. (2018). Reporte Burkenroad: Cementos Argos S.A. Disertación Doctoral. Universidad EAFIT.
- [7] Caraballo R. et al. (2021). Desempeño sísmico de muros delgados y esbeltos de concreto reforzado representativos de la construcción industrializada. *Hormigón y Acero*.
- [8] Camacol. (2019). Colombia construcción en cifras. Recuperado: <https://camacol.co/informacion-economica/construccion-en-cifras>.
- [9] Abdullah S. y Wallace J. (2018). Drift capacity prediction of RC structural walls with special boundary elements. En 11th National Conference in Earthquake Engineering.
- [10] Almeida J. et al. (2017). Tests on thin reinforced concrete walls subjected to in-plane and out-of-plane cyclic loading. *Earthquake Spectra* 33(1), 323-345.
- [11] Alarcon C. et al. (2014). Effect of axial loads in the seismic behavior of reinforced concrete walls with unconfined wall boundaries. *Engineering Structures* 73, 13-23.
- [12] Wallace J. et al. (2012). Damage and implications for seismic design of RC structural wall buildings. *Earthquake Spectra* 28(1), 281-299.
- [13] Almeida J. et al. (2016). Tests on thin reinforced concrete walls subjected to in-plane and out-of-plane cyclic loading. *Earthquake Spectra* 33(1), 323-345.
- [14] Parra P. y Moehle J. (2017). Stability of slender wall boundaries subjected to earthquake loading. *ACI Structural Journal* 114(6), 1627-1636.
- [15] Carrillo J. et al. (2019). Tensile mechanical properties of the electro-welded wire meshes available in Bogotá, Colombia. *Construction and Building Materials* 195, 352-362.
- [16] Dey R. y Saha P. (2019). Seismic response control of smart base-isolated benchmark building using hybrid control strategy (viscous fluid damper with MR damper). *Recent Advances in Structural Engineering* 2, 365-374.
- [17] Nakata N. et al. (2014). Hybrid simulation primer and dictionary. Apress.
- [18] Najafi A. y Spencer B. (2021). Validation of model-based real-time hybrid simulation for a lightly-damped and highly-nonlinear structural system. *Journal of Applied and Computational Mechanics* 7, 1252-1265.
- [19] Takanashi K. y Nakashima M. (1987). Japanese activities on on-line testing. *Journal of Engineering Mechanics* 113(7), 1014-1032.
- [20] Darby A. et al. (1999). Real-time substructure tests using hydraulic actuator. *Journal of Engineering Mechanics* 125(10), 1133-1139.
- [21] Nakashima M. et al. (1992). Development of real-time pseudo dynamic testing. *Earthquake engineering & structural dynamics* 21(1), 79-92.
- [22] Maghareh A. et al. (2020). A Reflective Framework for Performance Management (REFORM) of Real-Time Hybrid Simulation. *Frontiers in built environment* 6, 568742.
- [23] Fermandois G. y Spencer B. (2017). Model-based framework for multi-axial real-time hybrid simulation testing. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration* 16(4), 671-691.
- [24] Ning X. et al. (2019). Robust actuator dynamics compensation method for real-time hybrid simulation. *Mechanical Systems and Signal Processing* 131, 49-70.
- [25] Shao X. y Griffith C. (2013). An overview of hybrid simulation implementations in NEES projects. *Engineering Structures* 56, 1439-1451.
- [26] Eem S. et al. (2013). Seismic performance evaluation of an MR elastomer-based smart base isolation system using real-time hybrid simulation. *Smart Materials and Structures* 22(5), 055003.

- [27] Nakashima M. et al. (1992). Development of real-time pseudo dynamic testing. *Earthquake engineering & structural dynamics* 21(1), 79-92.
- [28] Takanashi K. et al. (1975). Nonlinear earthquake response analysis of structures by a computer-actuator on-line system. *Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center* 8, 1-17.
- [29] Mahin S. et al. (1989). Pseudodynamic test method—Current status and future directions. *Journal of Structural Engineering* 115(8), 2113-2128.
- [30] Silva C. et al. (2020). Benchmark control problem for real-time hybrid simulation. *Mechanical Systems and Signal Processing* 135, 106381.
- [31] Strano S. y Terzo M. (2016). Implementation and validation of a hybrid testing procedure for base-isolated structures. En *World Congress on Engineering*.
- [32] Shao X. et al. (2011). Real-time hybrid simulation using shake tables and dynamic actuators. *Journal of Structural Engineering* 137(7), 748-760.
- [33] Tidwell T. et al. (2009, March). Towards configurable real-time hybrid structural testing: a cyber-physical system approach. En *IEEE International Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing*.
- [34] Christenson R. et al. (2008). Large-scale experimental verification of semiactive control through real-time hybrid simulation. *Journal of Structural Engineering* 134(4), 522-534.
- [35] Gomez D. et al. (2015). Enabling role of hybrid simulation across NEES in advancing earthquake engineering. *Smart Structures and Systems* 15(3), 913-929.
- [36] Riascos C. et al. (2022). Real-time hybrid simulations including rocking effects: The case of a frame-structure with unbounded elastomeric isolators. *Structural Control and Health Monitoring* e2984.
- [37] Safety I. (2003). Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures. FEMA 450.
- [38] Losanno D. et al. (2019). Experimental assessment and analytical modeling of novel fiber-reinforced isolators in unbounded configuration. *Composite Structures* 212, 66-82.
- [39] Símica E. D. M. (2017). Informe 1-7 Elementos Sismológicos para la Caracterización de la Actividad Cortical en el Occidente Colombiano. Símica.
- [40] CSI C. (2015). Analysis reference manual for sap2000, etabs, safe and csibridge. *Computers and Structures*.
- [41] Riascos C. et al. (2019). Performance evaluation of a non-linear tuned mass damper through real-time hybrid simulation. *Inge CUC* 15(2), 11-22.
- [42] Christenson R. et al. (2014). Hybrid simulation: A discussion of current assessment measures. Tech. Rep. Cmmi.

Ingeniería y Desarrollo en la Nueva Era

Edición 1

En este libro se describe cómo lograr una ingeniería para el desarrollo y la supervivencia de la humanidad en la Nueva Era, siguiendo caminos naturales o artificiales verdaderamente sostenibles. Los autores utilizan métodos desarrollados en varias áreas con fines de sostenibilidad, desarrollo y adaptación, tales como modelos matemáticos, selección de materiales y energía renovable; además, prueban los principios de la ingeniería en diversos trabajos prácticos y casos de estudio que el lector encontrará de fácil replicación y aprovechamiento en otras áreas, tanto ingenieriles como científicas.

