



ESTADO DEL ARTE SOBRE EL USO DE AISLAMIENTO SÍSMICO A MEDIA
ALTURA - (MSI)

CAMILO ARROYAVE LOPERA

Trabajo de grado - Artículo

Asesor

M.I. Juan Manuel Fuentes García

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS APLICADAS E INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
MEDELLÍN
2026

ESTADO DEL ARTE SOBRE EL USO DE AISLAMIENTO SÍSMICO A MEDIA ALTURA - (MSI)

Juan Manuel Fuentes-García ⁽¹⁾, Camilo Arroyave-Lopera ⁽¹⁾

¹ Universidad EAFIT. Carrera 49 No. 7 Sur - 50, Medellín-Colombia, 50022, jmfuentesg@eafit.edu.co

² SIPSA Ingenieros de Puebla. 4ta Cerrada de Violetas, Col. Bugambilias, Puebla, Puebla, 05906

VI. Métodos y tecnologías innovadoras para reducir el riesgo sísmico

RESUMEN

El aislamiento sísmico ha demostrado ser una estrategia eficaz para reducir significativamente la demanda sísmica en edificaciones, permitiendo preservar tanto la integridad estructural como la funcionalidad post-sismo. Tradicionalmente, esta tecnología se ha implementado a nivel de base; sin embargo, en las últimas dos décadas ha emergido una variante innovadora conocida como aislamiento sísmico a media altura (*mid-story isolation MSI*), cuya aplicación ha cobrado relevancia en estructuras que presentan limitaciones funcionales, arquitectónicas o de rehabilitación que impiden la colocación de aisladores en la base. Este artículo presenta un estado del arte detallado sobre la aplicación del (MSI), abarcando estudios experimentales, analíticos y proyectos construidos a nivel internacional. Para lograr la comprensión de todo esto, se analizan los distintos esquemas tipológicos adoptados, desde el aislamiento en un sólo nivel intermedio hasta configuraciones múltiples o híbridas, y se discuten los principales desafíos asociados, como la identificación precisa de las masas tributarias, la definición adecuada de los niveles de aislamiento, y la interacción dinámica entre la parte superior e inferior de la estructura. El trabajo incluye una discusión crítica sobre la viabilidad y limitaciones actuales del (MSI) en diferentes contextos normativos y sísmicos, destacando el papel clave de esta tecnología en la rehabilitación de estructuras existentes, particularmente en zonas urbanas con restricciones geométricas o de operación. Este trabajo busca contribuir a la difusión y consolidación de una tecnología emergente, con un alto potencial para incrementar la resiliencia estructural en condiciones donde el aislamiento tradicional deja de ser viable.

1. INTRODUCCIÓN

El aislamiento sísmico se ha consolidado en las últimas décadas como una de las estrategias más efectivas para reducir la demanda sísmica en edificaciones y preservar tanto la integridad estructural como la funcionalidad posterior al sismo. Su principio fundamental consiste en desacoplar el movimiento del suelo respecto al de la superestructura, mediante la incorporación de dispositivos capaces de alargar el periodo fundamental del sistema estructural y disipar energía de manera controlada. Este enfoque permite que la estructura principal experimente menores aceleraciones y deformaciones, reduciendo significativamente el daño durante eventos sísmicos severos.

El desarrollo y aplicación del aislamiento sísmico a nivel de base ha sido objeto de intensa investigación y estandarización normativa en diversas regiones del mundo. Normas como la ASCE 7-22 (Estados Unidos), la EN 15129:2018 (Europa), la NTC-Sismo 2023 (México) y la NSR-10 (Colombia), quienes

incorporan procedimientos específicos para el diseño, validación y control de sistemas aislados en la base. Gracias a ello, el aislamiento basal ha dejado de ser una técnica experimental a una solución de ingeniería ampliamente aceptada para hospitales, puentes, museos y edificios estratégicos.

A pesar de los avances alcanzados con el aislamiento en la base, existen condiciones arquitectónicas, funcionales y urbanas que limitan su implementación directa. En entornos con edificaciones con sótanos y niveles subterráneos, la incorporación de aisladores en la cimentación puede resultar técnica o económicamente inviable. En este contexto, ha emergido una configuración alternativa conocida como aislamiento sísmico a media altura (*Mid-Story Seismic Isolation, MSI o Intermediate Isolation System, IIS*), que ubica la capa de aislamiento en un nivel intermedio de la estructura, separando el edificio en dos subsistemas principales: la subestructura, situada por debajo del plano de aislamiento, y la superestructura, ubicada por encima de éste.

Este enfoque innovador permite reducir la transmisión de aceleraciones hacia los niveles superiores, al tiempo que mejora el desempeño sísmico global del edificio. En edificaciones nuevas, el (MSI) ofrece una mayor libertad arquitectónica al no requerir juntas de dilatación en la base, y en estructuras existentes posibilita procesos de rehabilitación sísmica o ampliación vertical sin necesidad de evacuar completamente el inmueble.

El (MSI) representa una evolución conceptual que trasciende la división tradicional entre el aislamiento en base y los Amortiguadores de Masa Sintonizada (TMD). Al aprovechar la propia masa de la superestructura como elemento de control dinámico, el sistema actúa como un Amortiguador de Masa no Sintonizado (UMD), logrando una disipación de energía más eficiente y distribuida; sin embargo, su comportamiento dinámico es considerablemente más complejo, dado que depende de la interacción acoplada entre la subestructura y la superestructura, de la ubicación del plano de aislamiento, y de la relación entre rigideces y masas tributarias.

A pesar del creciente número de estudios experimentales, analíticos y de proyectos construidos, especialmente en Japón, China e Italia, el (MSI) evidencia aún la necesidad de construirse un marco normativo formal que regule su diseño, construcción y validación experimental, especialmente para Colombia. Ninguna de las principales normas internacionales contempla lineamientos específicos para esta configuración, lo cual limita su adopción práctica y la homologación de resultados entre distintas investigaciones.

2. FUNDAMENTOS DEL AISLAMIENTO A MEDIA ALTURA

El MSI o IIS, consiste en ubicar la capa de aislamiento en un nivel intermedio del edificio, en lugar de situarla en la base. Esta disposición divide la estructura en dos subsistemas principales:

- La subestructura, que comprende los niveles inferiores y la cimentación, situada por debajo de la capa de aislamiento.
- La superestructura, que abarca los niveles superiores situados por encima del plano aislado.

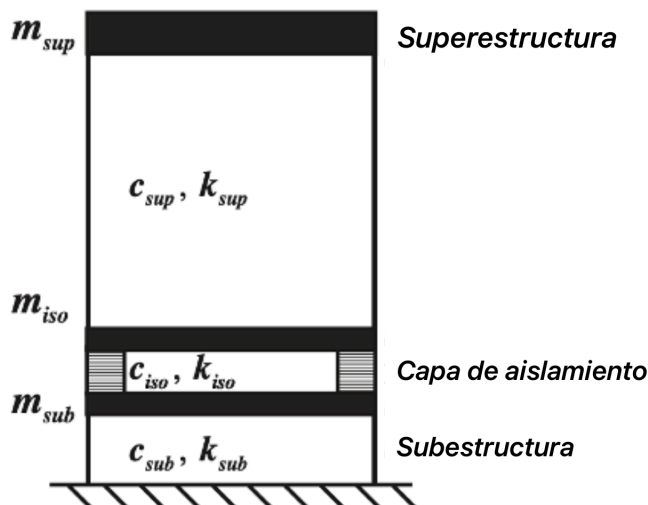
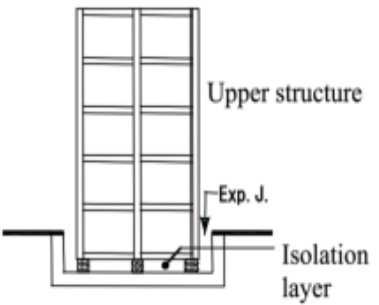
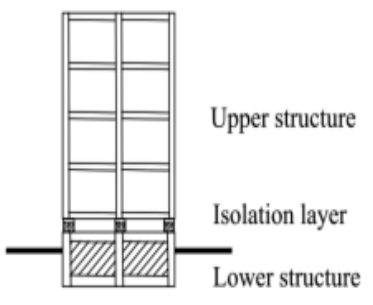
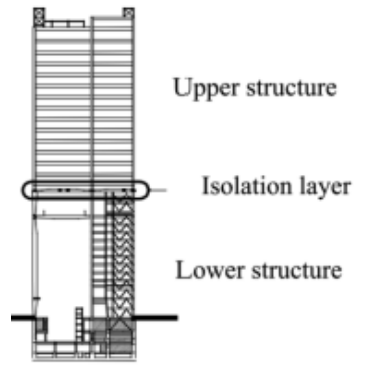


Figura 1. Esquema típico de un sistema de (MSI).
Fuente: (Wang *et al.*, 2013)

Ambas partes poseen propiedades dinámicas distintas, pero se encuentran interconectadas a través de los aisladores, lo que genera un comportamiento acoplado más complejo que el de una estructura con aislamiento basal. La subestructura no sólo debe resistir las fuerzas sísmicas directas provenientes del terreno, sino también las fuerzas inerciales transmitidas por la superestructura a través de los dispositivos de aislamiento, mientras que la parte superior se beneficia de una importante reducción en las aceleraciones y en la demanda sísmica. Desde un punto de vista dinámico, el (MSI) puede interpretarse como una estrategia híbrida entre aislamiento sísmico y amortiguamiento de masa. En este caso, la masa de la superestructura produce un efecto dinámico similar al de un amortiguador de masa; sin embargo, este comportamiento no corresponde a un sistema de masa sintonizada, sino a una interacción dinámica derivada de la distribución de masa y rigidez del edificio. En consecuencia, el diseño óptimo del aislamiento a media altura requiere una evaluación cuidadosa de la posición del plano de aislamiento y de la proporción masa-rigidez entre los dos subsistemas, de modo que se garantice el máximo desacople dinámico junto con una adecuada estabilidad estructural.

Al adoptar un sistema estructural con aislamiento en un nivel intermedio, es importante planificar la estructura teniendo en cuenta tres características principales definidas en la Tabla 1:

Tabla 1. Características de sistemas estructurales con aislamiento

Estructura con aislamiento sísmico en la base de la cimentación	Estructura con aislamiento sísmico a media altura, generalmente adoptada	Estructura con aislamiento sísmico a media altura con efecto de masa amortiguadora no sintonizada
		
Es posible reducir la demanda sísmica en la superestructura, lo que permite una planificación estructural comparativamente más libre. Sin embargo, se requiere una junta de dilatación alrededor del edificio, lo que tiene un impacto significativo en la planificación arquitectónica. Además, resulta difícil utilizar diferentes configuraciones estructurales para satisfacer diversas necesidades de uso, ya que se requiere mantener una forma estructural uniforme.	Las fuerzas sísmicas que actúan sobre la superestructura soportada por la capa de aislamiento son reducidas, y no se condiciona la forma estructural, lo que permite un alto grado de libertad en la planificación arquitectónica y estructural. La subestructura, por su parte, debe garantizar la rigidez y resistencia necesarias como elemento de cimentación, por lo que normalmente se utiliza una estructura de concreto reforzado con muros de corte sísmicos adecuados.	La superestructura presenta una alta resistencia sísmica gracias al aislamiento sísmico, lo que permite un elevado grado de libertad en la planificación arquitectónica y estructural. Además, como resultado del efecto de masa amortiguadora, la respuesta de la subestructura también se reduce, mejorando su desempeño sísmico y permitiendo igualmente una mayor flexibilidad en la planificación arquitectónica y estructural. Es posible adoptar diferentes configuraciones estructurales para la parte superior e inferior de la edificación, lo que facilita ajustar la forma estructural de acuerdo con los requisitos de uso.

Fuente: Y. Tsuneki, S. Torii, K. Murakami, y T. Sueoka. 2009 (p.230)

El comportamiento global del sistema depende fuertemente de la ubicación del plano de aislamiento dentro de la altura total de la edificación. Cuando el aislamiento se coloca en niveles bajos, el sistema se asemeja a una estructura con aislamiento en la base: el periodo fundamental se incrementa y la mayor parte de la deformación se concentra en los dispositivos, lo que genera una efectiva reducción de fuerzas sísmicas, aunque con grandes desplazamientos relativos en la capa aislante. En cambio, cuando se instala en niveles superiores, el sistema se comporta más como un amortiguador de masa sintonizado, controlando las vibraciones sin lograr un desacople completo del suelo.

La respuesta sísmica está además influenciada por la relación entre las masas y rigideces de la subestructura y la superestructura. Si la subestructura es demasiado rígida o la masa superior es desproporcionadamente grande, pueden producirse fenómenos de acoplamiento modal, generando amplificaciones de respuesta no deseadas. En consecuencia, el diseño óptimo del (MSI) requiere una evaluación cuidadosa de la posición del plano de aislamiento y de la proporción masa/rigidez entre los dos subsistemas, de modo que se garantice el máximo desacople con estabilidad estructural adecuada.

El (MSI) ofrece posibles ventajas significativas frente a otras estrategias de control sísmico:

- Reducción de la demanda sísmica en la superestructura y la subestructura, manteniéndolas dentro del rango elástico durante sismos severos.
- Flexibilidad arquitectónica, al permitir combinaciones estructurales distintas entre la parte inferior y la superior (por ejemplo, concreto en la base y acero en los niveles altos).
- Viabilidad en rehabilitación estructural, ya que posibilita incorporar la capa de aislamiento entre estructuras existentes y ampliaciones sin interrumpir el uso del edificio.
- Compatibilidad con estructuras con sótanos o podios, donde el aislamiento en base sería impracticable.
- Disminución de costos de cimentación, debido a la menor transmisión de fuerzas hacia los apoyos inferiores.

3. INICIOS Y EVOLUCIÓN DEL AISLAMIENTO A MEDIA ALTURA

Las investigaciones sobre (MSI) se han desarrollado principalmente en Asia, donde la alta sismicidad y la densidad urbana impulsaron soluciones estructurales alternativas al aislamiento basal. Japón y China han sido los principales centros de innovación, seguidos por experiencias relevantes en Italia, Taiwan y Corea del Sur.

A nivel global, los estudios se agrupan en tres grandes líneas:

- Investigaciones analíticas y numéricas, que buscan modelar el comportamiento acoplado entre subestructura y superestructura.
- Ensayos experimentales, tanto a escala reducida como en prototipos a tamaño real.
- Aplicaciones en edificaciones construidas, orientadas a la validación del desempeño en condiciones reales de operación.

El conjunto de estos trabajos ha permitido demostrar la eficacia del (MSI) para reducir las aceleraciones de piso y las demandas de cortante, aunque también ha revelado vacíos de conocimiento relacionados con la interacción dinámica, la definición de masas tributarias y la ausencia de criterios normativos consolidados.

En Japón, el (MSI) ha desempeñado un papel pionero en la evolución del control sísmico estructural. Su desarrollo comenzó a finales de la década de 1990, impulsado por la necesidad de mitigar la demanda sísmica en edificaciones de gran altura localizadas en zonas densamente urbanizadas, donde el aislamiento en la base resultaba difícil de implementar. Este enfoque permitió reducir las solicitaciones sísmicas sin interrumpir las actividades en los niveles inferiores, comúnmente destinados a estacionamientos o áreas comerciales. Diversos institutos y empresas japonesas lideraron los primeros estudios teóricos y experimentales, demostrando la factibilidad del sistema e iniciando una línea de proyectos que consolidó a Japón como referente mundial en esta tecnología (Murakami *et al.*, 1999, Tsuneki *et al.*, 2009)

El First Hills Idabashi Building (Murakami *et al.*, 1999) fue el primer edificio de gran altura en el mundo en incorporar un sistema (MSI). Con catorce niveles sobre rasante y tres sótanos, el edificio integró una capa de aislamiento ubicada entre la zona de oficinas y los niveles residenciales, conformada por 40 aisladores de caucho natural y 212 amortiguadores de plomo. Los resultados obtenidos durante su instrumentación mostraron que las fuerzas cortantes se redujeron a una quinta parte en la superestructura y a la mitad en la subestructura, manteniéndose ambos componentes dentro del rango elástico bajo movimientos sísmicos severos. Este proyecto validó el principio del aislamiento intermedio como una solución híbrida entre desacople sísmico y control pasivo de vibraciones, marcando un punto de inflexión en la ingeniería estructural japonesa.



Fig 2. Vistas exterior e interior del edificio Idabashi First, First Hills Idabashi.

Fuente: Y. Tsuneki, S. Torii, K. Murakami, y T. Sueoka (2009, p.232)

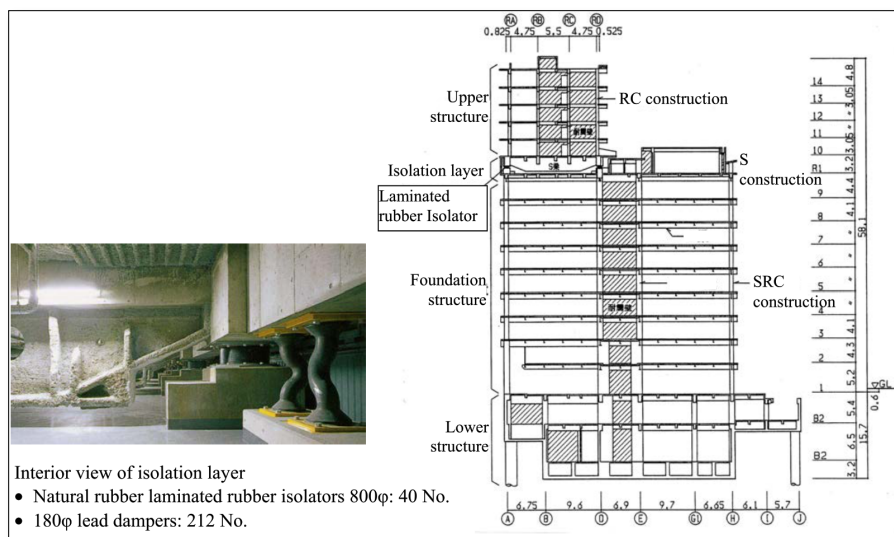


Fig 3. Sección transversal del edificio Iidabashi First, First Hills Iidabashi.
Fuente: Y. Tsuneki, S. Torii, K. Murakami, y T. Sueoka, (2009, p.232)

Posteriormente, el concepto fue adoptado en proyectos de mayor escala, como el Shiodome Sumitomo Building (Tsuneki *et al.*, 2009), en el cual el plano de aislamiento se localizó bajo el piso 12 y estuvo conformado por 41 aisladores elastoméricos y 100 amortiguadores de plomo. Los resultados de instrumentación obtenidos durante sismos ocurridos en 2005 y en 2007 mostraron reducciones cercanas al 50% en la fuerza cortante total y una respuesta estable del plano de aislamiento. En ese mismo año, el Musashino City Disaster Prevention and Safety Center implementó aislamiento intermedio con fines de rehabilitación estructural, instalando la capa de aislamiento entre los pisos quinto y sexto mediante apoyos elastoméricos y deslizantes. Esta solución permitió añadir niveles superiores sin modificar la estructura existente y redujo entre 25% y 50% las fuerzas de corte por piso, marcando un precedente en la aplicación del sistema para edificaciones existentes.

Use: Offices, hotel Height: Height to highest part: 125.90 m, eaves height: 115.90 m No. stories: 3 below ground, 25 above ground, 2 penthouse stories
Structural form: Structural steel, reinforced concrete



Fig 4. Vista exterior del edificio y vista interior del atrio.
Fuente: T. Sueoka, S. Torii, y Y. Tsuneki, (2004)

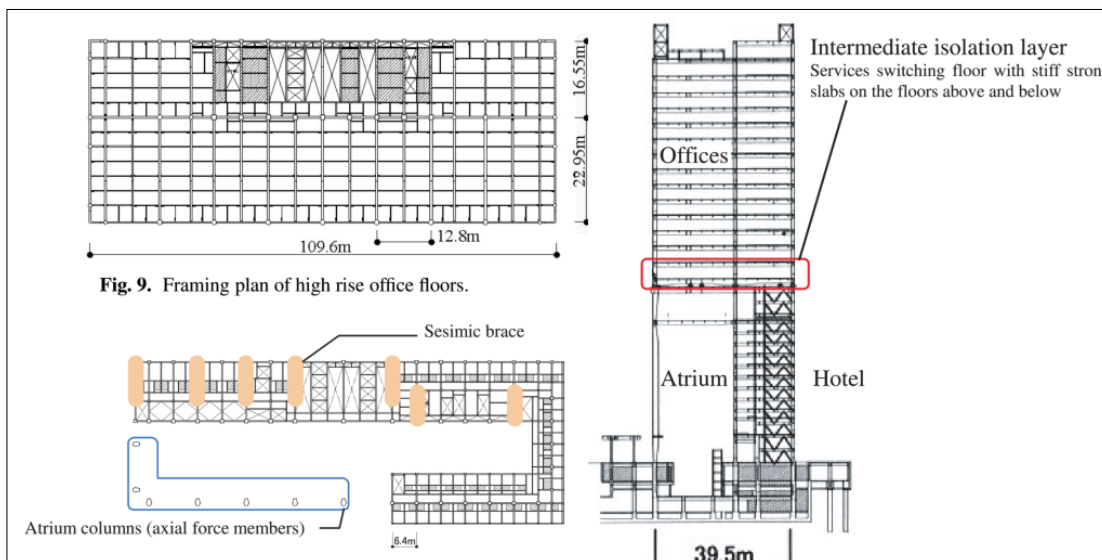


Fig 5. Vista en planta y elevación de la estructura.
Fuente: T. Sueoka, S. Torii, y Y. Tsuneki, (2004)

Para determinar las características de vibración del edificio, se realizó un análisis de respuesta a vibraciones utilizando un modelo dinámico del edificio según se muestra en la siguiente figura:

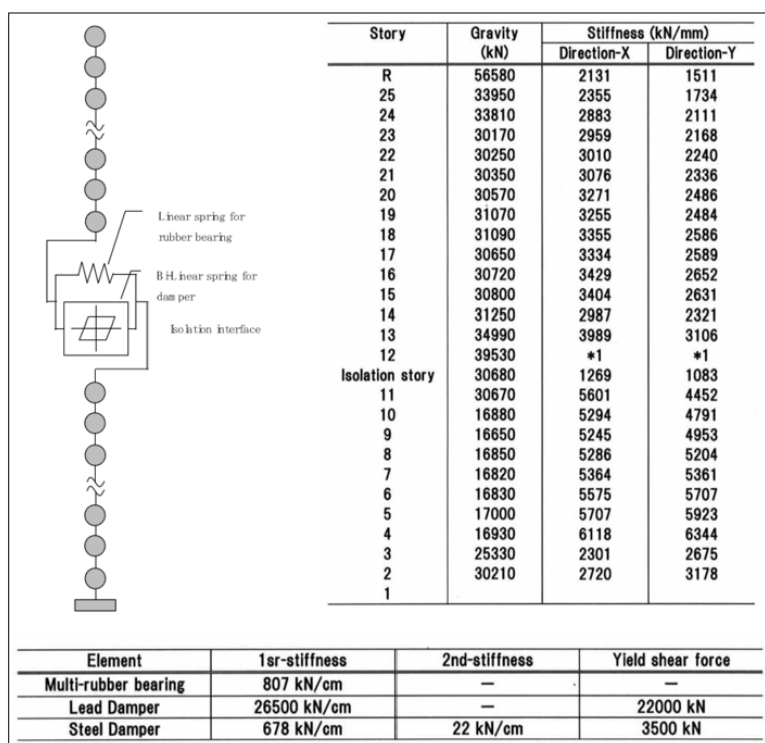


Fig 6. Modelo de análisis dinámico.
Fuente: T. Sueoka, S. Torii, y Y. Tsuneki, (2004)

Los estudios de Shirayama *et al.* (2004), desarrollados en la Universidad de Osaka y el Earthquake Disaster Mitigation Research Center, marcaron un avance fundamental en la comprensión teórica y numérica del aislamiento sísmico intermedio. Mediante modelos de 12 niveles con variaciones de rigidez y diferentes ubicaciones del plano de aislamiento (a 0.25, 0.50 y 0.75 de la altura total), los autores demostraron que la eficiencia sísmica del sistema está directamente asociada a la ductilidad del entrepiso aislado, la cual controla la disipación de energía y la reducción de las fuerzas transmitidas a la superestructura. El estudio confirmó que cuando el aislamiento opera en régimen no-lineal controlado, las fuerzas cortantes y las aceleraciones se reducen hasta en un 50%, consolidando el concepto de doble estructura interconectada dinámicamente.

Por otro lado, Shirayama y sus colaboradores propusieron un método de diseño basado en la ductilidad máxima permisible (μ_j) del entrepiso aislado, con valores entre 10 y 100 según la rigidez del marco estructural. Este parámetro permite establecer una relación directa entre la deformación plástica de los dispositivos y la reducción global de respuesta. Los resultados mostraron que el desempeño óptimo se logra cuando el plano de aislamiento se ubica en torno al 50% de la altura del edificio, donde los efectos de acoplamiento modal son mínimos. En conjunto, sus hallazgos complementaron los de Tsuneki *et al.* (2009), conformando una base teórico-experimental robusta que luego influiría en las Architectural Institute of Japan (AIJ) y Design Recommendations for Seismically Isolated Buildings (2016), donde se incorpora explícitamente la evaluación de ductilidad y energía absorbida como criterios esenciales de diseño por desempeño.

El Sumitomo Fudosan Roppongi Grand Tower, diseñado por Nikken Sekkei Ltd. y ubicado en Tokio, Japón, es uno de los rascacielos más altos del mundo en incorporar un (MSI). Con una altura total de 230 metros, el edificio integra un plano de aislamiento situado entre los pisos 25 y 26, conformado por aisladores de caucho laminado, amortiguadores de acero y dispositivos Fluid Viscous Damper (amortiguadores viscosos de fluido FV), dispuestos de forma simétrica para controlar las deformaciones tanto sísmicas como por viento. Esta configuración permitió desacoplar dinámicamente la superestructura de la subestructura, optimizando la estabilidad y el confort de los ocupantes sin sacrificar eficiencia arquitectónica. En reconocimiento a su innovación y desempeño estructural, el proyecto fue galardonado con el Premio ASSISI 2024 en la categoría Seismic Isolation – Large Project, destacando el liderazgo japonés en el desarrollo de soluciones de aislamiento intermedio aplicadas a edificaciones de gran altura (Koitabashi *et al.*, 2024).

En China, la aplicación del (MSI) surgió en la década de 1990, enfocada inicialmente en edificaciones públicas e institucionales. El Museo de Shantou (1995) constituye el primer ejemplo documentado, con 137 aisladores de caucho con núcleo de plomo colocados bajo las vigas del segundo nivel, alcanzando reducciones de entre 10% y 20% en aceleraciones respecto a un modelo fijo (Zhou *et al.*, 1996). Este proyecto demostró la viabilidad del aislamiento intermedio en edificios existentes o con limitaciones arquitectónicas, lo que dio origen a un creciente interés en su aplicación a estructuras complejas.

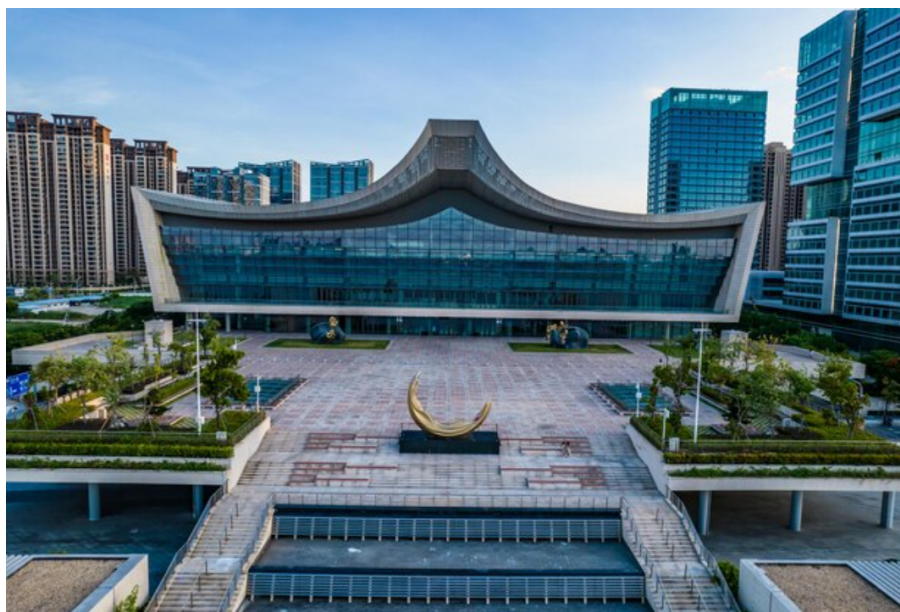


Fig 7. Museo de la ciudad de Shantou, provincia de Guangdong, China.

Fuente: Imagen tomada de Freepik. https://www.freepik.es/fotos-premium/museo-ciudad-shantou-provincia-guangdong-china_33161677.htm

Posteriormente, proyectos como el Tonghui Garden en Pekin (2005) incorporaron plataformas aisladas comunes sobre las que se erigieron varias torres residenciales, permitiendo controlar la interacción dinámica entre torres y mejorar la estabilidad global del conjunto. Investigaciones recientes de Zhang *et al.* (2023) y Wen *et al.* (2024) extendieron estos estudios hacia sistemas multicapa, demostrando que el uso de dos o tres planos de aislamiento distribuidos en la altura optimiza simultáneamente la reducción de derivas, aceleraciones y fuerzas internas. Estos avances colocan a China a la vanguardia en el desarrollo analítico y experimental de estructuras con aislamiento intermedio y multicapa, consolidando una base técnica sólida para futuras aplicaciones normativas y urbanas. Los resultados indican que la configuración de doble aislamiento puede optimizar simultáneamente el control de aceleraciones y desplazamientos, aunque exige una coordinación estructural precisa entre los niveles acoplados. Estos avances han contribuido a posicionar a China como un referente en la investigación numérica y paramétrica del aislamiento a media altura, con modelos tridimensionales no lineales y estudios de sensibilidad sobre las propiedades mecánicas de los dispositivos.

La investigación en China sobre (MSI) se fortaleció con los trabajos teóricos y experimentales del Earthquake Engineering Research & Test Center de la Universidad de Guangzhou, donde Huang *et al.* (2008) desarrollaron uno de los primeros modelos integrales que combinan análisis teórico, ensayos en mesa vibradora y simulaciones numéricas. El estudio confirmó que el aislamiento intermedio modifica significativamente las características dinámicas de la estructura al dividirla en una subestructura y una superestructura acopladas, con respuestas contrastantes sobre y bajo la capa aislada. Los ensayos demostraron que el periodo fundamental del sistema puede duplicarse respecto a una estructura fija, y que el amortiguamiento equivalente aumenta hasta un 15%, dependiendo de la ubicación del plano de aislamiento y de la masa relativa de los dos subsistemas. Huang y sus colaboradores propusieron además una clasificación de comportamiento para los sistemas intermedios, aislamiento total, aislamiento parcial y reducción por cambio de frecuencia, en función de la posición del plano de aislamiento. Sus resultados indican que el mejor desempeño se logra cuando el aislamiento se ubica en torno a la mitad de la altura estructural, lo que permite reducir simultáneamente las fuerzas cortantes en la superestructura y el cortante basal global. Al mismo tiempo, demostraron que un aislamiento excesivamente elevado reduce la eficacia del sistema y puede aumentar la respuesta de la subestructura. Estas conclusiones, verificadas mediante pruebas con modelos metálicos de hasta seis niveles, establecieron una base empírica para la incorporación del aislamiento intermedio en el Código de Diseño Sísmico de China, consolidando el liderazgo del país en el desarrollo analítico y experimental de sistemas multicapa y estructuras de (MSI).

En Taiwán, el desarrollo del (MSI) tomó fuerza tras el sismo de Chi-Chi (1999), cuando instituciones como la National Taiwan University (NTU) y el National Center for Research on Earthquake Engineering (NCREE) impulsaron investigaciones experimentales orientadas a entender la interacción modal entre la subestructura y la superestructura en sistemas intermedios. Chang *et al.* (2010) propusieron un modelo simplificado de tres masas que permite evaluar las condiciones críticas de acoplamiento dinámico, mostrando que la flexibilidad de la subestructura y la posición del plano de aislamiento son factores determinantes en la eficacia del sistema. Los ensayos en mesa vibradora realizados sobre modelos a escala demostraron reducciones significativas en aceleraciones y fuerzas cortantes, aunque también evidenciaron amplificaciones locales cuando la frecuencia de la subestructura se aproxima a la de la superestructura.

En Corea del Sur, el (MSI) ha cobrado relevancia principalmente en el contexto de remodelaciones y ampliaciones verticales de edificaciones existentes. Hur y Park (2022) desarrollaron un estudio detallado sobre edificios residenciales tipo story-added, en los que se añadieron hasta tres niveles sobre estructuras

de 15 pisos mediante un sistema de aislamiento intermedio, ubicado entre la estructura original y los nuevos niveles superiores. Utilizando modelos no lineales y registros sísmicos reales, demostraron que este sistema permite reducir las aceleraciones en los niveles superiores hasta en un 70 % y las fuerzas cortantes en la base en cerca del 30%, mejorando notablemente el desempeño sísmico sin requerir un refuerzo extensivo de la subestructura existente

En Italia, trabajos realizados por Esposito *et al.* (2023) y Faiella (2017) han desarrollado modelos analíticos que describen el comportamiento del (MSI), mediante formulaciones modales equivalentes y el uso del método de asignación de polos para la generación de espectros de diseño específicos. Sus trabajos recientes representan un paso importante hacia la normalización teórica del aislamiento intermedio, al proponer espectros diferenciados para la subestructura y la superestructura, validados mediante análisis historia-tiempo lineales y no lineales.

El trabajo de Esposito *et al.* (2023) representa uno de los aportes más relevantes en la comprensión del (MSI) aplicado a edificaciones existentes, particularmente cuando se proyectan ampliaciones verticales en zonas sísmicas. El estudio introduce el concepto de (MSI) como una evolución del aislamiento de base, desplazando la interfaz de aislamiento hacia niveles superiores y generando una doble función estructural: aislamiento para la superestructura y amortiguamiento por masa para la subestructura. A partir de un modelo tridimensional de un edificio de mampostería no reforzada en Pozzuoli (Italia), los autores desarrollan un procedimiento de diseño que combina análisis espectrales paramétricos y análisis historia-tiempo no lineales, incorporando el comportamiento histerético tanto del edificio existente como del sistema de aisladores de caucho de alto amortiguamiento. Los resultados validan la utilidad de los denominados “*espectros de diseño para aislamiento intermedio*”, que permiten seleccionar configuraciones óptimas de periodo y rigidez para minimizar la demanda sísmica de la estructura inferior. El estudio demuestra que, cuando se logra una adecuada relación entre los periodos de la estructura superior e inferior, el (MSI) puede reducir significativamente las derivas y fuerzas de corte, manteniendo la estabilidad global incluso bajo comportamiento no lineal. En conjunto, el trabajo de Esposito *et al.* (2023) consolida la base teórica para el diseño de ampliaciones verticales aisladas, y propone una metodología que podría extenderse hacia futuras normativas para el diseño de aislamiento sísmico en edificaciones mixtas o rehabilitadas

La experiencia italiana en la rehabilitación sísmica mediante aislamiento ha alcanzado un grado de madurez notable, convirtiéndose en una referencia internacional por su nivel de desarrollo técnico y su aplicación sistemática en edificios existentes. Según Castellano *et al.* (2014), el uso del aislamiento sísmico en Italia se consolidó tras el terremoto de L'Aquila de 2009, cuando se implementó de forma masiva en la recuperación de edificios públicos y privados con daños severos. A diferencia de otras estrategias de refuerzo, el aislamiento permite reducir de forma significativa las aceleraciones en la superestructura sin intervenirla directamente, concentrando los trabajos en uno o dos niveles, comúnmente el sótano o la planta baja. Esto posibilita mantener el edificio en operación durante la rehabilitación y disminuir los costos globales, al limitar las demoliciones y las afectaciones a los elementos no estructurales.

El estudio de Castellano *et al.* (2014) describe con detalle la intervención de edificaciones de concreto reforzado y de mampostería, incluyendo casos donde los aisladores se instalaron en niveles superiores a la cimentación, como sobre columnas o entresijos existentes, utilizando gatos hidráulicos y cortes controlados con hilo diamantado. Estas configuraciones, aunque concebidas para rehabilitación, se

relacionan estrechamente con el concepto de (MSI), al establecer un plano de desacople dentro de la estructura en lugar de situarlo en la base. Este tipo de soluciones ha demostrado ser particularmente útil en edificaciones históricas o con limitaciones arquitectónicas, ofreciendo una alternativa eficaz y menos invasiva que las técnicas convencionales de refuerzo, además de preservar el valor patrimonial y la funcionalidad durante la intervención.

En México, el uso del aislamiento sísmico ha tenido un desarrollo progresivo en las dos últimas décadas, con proyectos pioneros que han demostrado su viabilidad tanto técnica como económica. El primer caso documentado fue el centro comercial denominado *Via Vallejo*, ubicado al norte de la Ciudad de México, donde se implementó un sistema de aislamiento en la base para reducir las aceleraciones transmitidas a la superestructura y garantizar la operación continua del conjunto durante eventos sísmicos severos. Posteriormente, el concepto se extendió a edificaciones de mayor altura, como el complejo *Espacio Condesa*, un edificio de más de 30 niveles apoyado sobre un podio de cuatro niveles, en el cual los aisladores fueron colocados entre el podio y la torre principal para desacoplar ambos cuerpos estructurales y mejorar la respuesta dinámica del conjunto.

Otro ejemplo relevante es el edificio *UMMI Roma*, también en la zona centro de la capital, conformado por seis niveles habitacionales sobre dos niveles comerciales. En este caso, el sistema de aislamiento se ubicó dos niveles por encima de la calle, lo que lo convierte en uno de los primeros proyectos en México que emplea (MSI). Esta configuración permitió conservar los niveles inferiores destinados a uso comercial y estacionamiento, mientras se protegían las áreas residenciales superiores frente a la acción sísmica. En conjunto, estos proyectos reflejan el avance gradual de la ingeniería mexicana hacia soluciones basadas en desempeño y resiliencia, posicionando al país como un referente latinoamericano en la aplicación de tecnologías de aislamiento sísmico en tipologías estructurales diversas.

Desde finales de la década de 1980 se han desarrollado diversas aplicaciones del aislamiento sísmico a nivel intermedio, principalmente en Japón, donde se originó el concepto (MSI). Posteriormente, el sistema fue implementado en China y ha sido objeto de numerosos estudios analíticos y experimentales. La literatura reporta múltiples edificaciones de entre 10 y 20 pisos en las cuales el plano de aislamiento se ubica en un nivel intermedio, permitiendo desacoplar dinámicamente la subestructura y la superestructura. En las siguientes tablas se resumen algunos de los casos representativos reportados en la literatura:

Tabla 1. Casos representativos

Nº	Edificio / Proyecto	País	Año	Características	Fuente
1	Kajima Technical Research Institute Building	Japón	1988	Uno de los primeros edificios con aislamiento en nivel intermedio	Murakami et al., 1993
2	Takenaka Corporation Research Building	Japón	1990	Edificio de investigación con aisladores en nivel medio	Kitamura & Murakami
3	Shimizu Corporation Institute Building	Japón	1992	Sistema MSSI para separar laboratorio y oficinas	AIJ Technical Report
4	Kajima KI Building	Japón	1995	Torre con sistema de aislamiento en piso intermedio	Kawamura et al.
5	Tokyo Polytechnic University Building	Japón	2001	Edificio académico con aisladores en nivel medio	

6	Residential Tower (varios proyectos)	Japón	2000–2010	Aplicaciones en edificios residenciales altos	Kawamura et al., “Seismic Isolation Retrofit in Japan”
7	Mid-Story Isolated Residential Building (Pekin)	China	2007	Torre residencial con aislamiento en piso intermedio	Huang et al.
8	Mid-Story Isolated Building (Shanghai)	China	2012	Edificio residencial con sistema híbrido	Huang et al.
9	Experimental Building – National Center for Research on Earthquake Engineering (NCREE)	Taiwán	2005	Edificio experimental para estudiar MSSI	Chang et al.
10	Mid-Story Isolated Test Structure	Corea del Sur	2010	Edificio experimental para investigación sísmica	Lee et al.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Cantidad aproximada de edificios reales reportados

País	Nº aproximado de edificios construidos
Japón	~30–40
China	~10
Corea del Sur	~3–5
Taiwán	~2–3
Otros países	casos aislados o experimentales

Fuente: elaboración propia.

En la mayoría de los papers se menciona que, Japón concentra la gran mayoría de edificios MSSI. Para Chile y México la situación es diferente a Japón. Hay muchos edificios con aislamiento en la base, pero muy pocos (o prácticamente ninguno documentado) con (MSI). En la literatura técnica casi todos los casos de mid-story isolation (MSSI) siguen concentrados en Japón y algunos en China/Corea.

Tabla 3: Consolidación de edificios

País	Nº edificios con aislamiento a media altura construidos	Observación
Chile	0 documentados	Hay muchos edificios con aislamiento en la base, pero no se reportan aplicaciones reales con aislamiento en nivel intermedio
México	0 documentados	Existen estudios y algunos proyectos con aislamiento en base (FPS, LRB), pero los estudios sobre aislamiento intermedio son principalmente analíticos o experimentales

Fuente: elaboración propia.

Las experiencias acumuladas a nivel internacional permiten identificar tendencias claras y vacíos persistentes en el desarrollo de (MSI). Los resultados experimentales y analíticos obtenidos principalmente en Japón y China confirman su eficacia para reducir aceleraciones y demandas de cortante, validando su potencial como un sistema de control pasivo avanzado. No obstante, persiste una marcada heterogeneidad metodológica entre países en cuanto a criterios de modelación, ejecución de ensayos y procedimientos de evaluación, lo que dificulta la comparación directa de resultados. Además, pese a su validación práctica, ninguna normativa internacional incorpora aún lineamientos específicos para el diseño y revisión de estructuras con aislamiento intermedio. Finalmente, el (MSI) destaca por su potencial

en proyectos de rehabilitación y densificación urbana, al ofrecer una solución adaptable, eficiente y sostenible para edificaciones existentes o con restricciones espaciales, especialmente en contextos urbanos latinoamericanos. En conjunto, estos hallazgos posicionan al (MSI) como una tecnología emergente con sólida evidencia experimental, pero aún pendiente de consolidación teórica y normativa.

4. PANORAMA GENERAL DEL MARCO NORMATIVO RESPECTO AL AISLAMIENTO SÍSMICO

A nivel mundial, la normativa sobre aislamiento sísmico ha evolucionado de forma considerable en las últimas tres décadas, permitiendo su aplicación segura y estandarizada en edificaciones y puentes. Normas como la ASCE 7-22 en Estados Unidos, la EN 15129:2018 en Europa, las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTC-Sismo 2023) en México, la emergente AIS 701 en Colombia, y las disposiciones de la Architectural Institute of Japan (AIJ), así como la Japanese Industrial Standards (JIS) en Japón, establecen los procedimientos de análisis, verificación y ensayo para sistemas de aislamiento en la base. No obstante, en todas ellas, el aislamiento se concibe como una interfaz entre la cimentación y la superestructura, sin prever configuraciones intermedias ni considerar explícitamente los efectos dinámicos asociados a una división en subestructuras acopladas.

En consecuencia, el (MSI) carece de reconocimiento normativo formal, quedando su diseño y verificación sujetos a criterios de ingeniería avanzada o a referencias derivadas del aislamiento basal. Esta ausencia de lineamientos específicos constituye una de las principales barreras para su implementación práctica, pues limita tanto la aprobación de proyectos por las autoridades competentes como la homologación de resultados de investigación y experimentación.

La carencia de un marco normativo específico para el (MSI) tiene implicaciones técnicas, administrativas y científicas. Desde el punto de vista técnico, impide definir de forma uniforme los parámetros de diseño, como la masa tributaria efectiva, los límites de desplazamiento, la rigidez equivalente y los niveles de amortiguamiento esperados. En el ámbito administrativo, dificulta la aprobación de proyectos innovadores, obligando a los diseñadores a justificar sus modelos mediante metodologías *ad hoc* y comparaciones con sistemas basales. Finalmente, en el ámbito científico, la ausencia de normatividad fragmenta los enfoques de modelación y validación experimental, reduciendo la comparabilidad entre estudios de distintos países y ralentizando la transferencia del conocimiento hacia la práctica profesional.

Diversos organismos técnicos han reconocido la necesidad de incorporar criterios para el aislamiento intermedio dentro de los marcos normativos internacionales. En Europa, los avances teóricos y experimentales liderados por Esposito *et al.* (2023) apuntan a una futura inclusión del (MSI) en el Eurocódigo 8, posiblemente bajo el concepto de estructuras compuestas aisladas. En Japón, el Ministerio de Tierra, Infraestructura y Transporte, ha financiado programas de validación en edificios con planos de aislamiento elevados, orientados a establecer parámetros de desempeño y límites de desplazamiento para configuraciones no basales. Por su parte, en China, los trabajos experimentales y analíticos de Huang y. (2008), junto con las investigaciones realizadas en el Earthquake Engineering Research & Test Center de Guangzhou, han motivado la incorporación formal de disposiciones sobre aislamiento sísmico intermedio dentro del Código de Diseño Sísmico de China (GB 50011-2021). Dicho reglamento reconoce por primera vez la posibilidad de ubicar la capa de aislamiento por encima del nivel de cimentación en edificaciones nuevas o rehabilitadas, siempre que se justifique su efectividad mediante análisis dinámicos no lineales y pruebas de desempeño en dispositivos representativos.

A nivel latinoamericano, tanto México como Chile han comenzado a documentar experiencias de aplicación con el objetivo de fundamentar futuras actualizaciones normativas. La evolución natural de estos esfuerzos debería conducir a la creación de “*criterios de diseño por desempeño para aislamiento intermedio*”, que reconozcan explícitamente la interacción dinámica entre subestructuras y el papel de los aisladores en la redistribución de la energía sísmica.

En síntesis, aunque el (MSI) ha demostrado su eficacia y viabilidad técnica, su reconocimiento reglamentario representa aún el principal desafío para su consolidación. La integración de este sistema en los códigos de diseño estructural constituiría un paso decisivo hacia su adopción generalizada y hacia una visión más amplia de la ingeniería sísmica basada en desempeño y resiliencia.

5. CONCLUSIONES

Pudimos encontrar varios puntos de discusión en cuanto al campo de estudio del (MSI), siendo estos clasificados en beneficios y necesidades. Por ejemplo, en cuanto a los beneficios encontramos que:

- El (MSI) representa una evolución conceptual y práctica dentro de las estrategias de control sísmico, al permitir el desacople parcial entre diferentes porciones de una edificación.
- Su fundamento dinámico, basado en la interacción acoplada entre la subestructura y la superestructura, ofrece una forma eficaz de reducir simultáneamente aceleraciones, derivas y fuerzas de corte.
- Las investigaciones internacionales han confirmado su efectividad tanto en edificaciones nuevas como en procesos de rehabilitación estructural, especialmente cuando las condiciones arquitectónicas o geotécnicas imposibilitan el uso del aislamiento basal.

Por otra parte, lo que se corresponde a las necesidades descubiertas en estudios de (MSI), se hayan necesidades de tipo:

- Pese a la creciente evidencia experimental y numérica, el (MSI) aún carece de un marco normativo consolidado.
- La ausencia de lineamientos específicos genera incertidumbre en el diseño y limita su aplicación práctica, al obligar a los ingenieros a extrapolar criterios desarrollados para el aislamiento en base, estas ausencias no sólo obstaculizan la aprobación formal de proyectos, sino que también impiden la homologación de metodologías analíticas y experimentales a nivel internacional.
- La consolidación de normas que reconozcan el aislamiento intermedio es, por tanto, una condición necesaria para su adopción generalizada.

Asimismo, es fundamental reconocer que el comportamiento dinámico de una estructura con (MSI) no depende únicamente de la posición del plano de aislamiento o de los periodos de vibración de la estructura superior e inferior, sino también de la relación de masas entre ambas partes y de la interacción entre las frecuencias predominantes del movimiento sísmico y las del sistema estructural acoplado. Estas variables pueden modificar significativamente la eficiencia del aislamiento y los mecanismos de transferencia de energía, por lo que su estudio detallado resulta esencial para desarrollar modelos de diseño más representativos y espectros de respuesta específicos.

Finalmente, de todo lo anterior podemos concluir, que el futuro del (MSI) dependerá de varias acciones, la primera la integración entre investigación, práctica profesional y regulación. La segunda, la generación de espectros de diseño específicos, validación de modelos no lineales y la documentación de casos construidos, siendo estos pasos esenciales hacia su normalización. Y tercero, la colaboración entre instituciones académicas, organismos normativos y la industria permitirá transformar esta tecnología emergente en una herramienta estándar de diseño sísmico, capaz de incrementar la resiliencia estructural y funcional de las edificaciones en contextos urbanos complejos.

6. REFERENCIAS

K. Murakami, H. Kitamura, H. Ozaki and T. Yamanashi (1999), “Design of a building with seismic isolation system at the mid-story”, *AIJ journal of Technology and Design*, No.7, pp51-56

Tsuneki, Y., Torii, S, Murakami, K. & Sueoka, T. (2009). “Middle-Story Isolated Structural System of High-Rise Building”. *Journal of Disaster Research*, Vol. 4, No. 3, pp229-238.

T. Sueoka, S. Torii, y Y. Tsuneki, «The application of response control design using middle-story isolation system to high-rise building», en Proc. 13th World Conf. Earthquake Eng, ago. 2004. [En línea]. Disponible en: https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/thirteenth_conf_Canada/

Shirayama, A., Yamashita, T., Ito, S., Mukai, Y., Baba, K., & Inoue, Y. (2004). *Design proposal for controlling seismic behaviors of inter-story isolation building structures*. Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering (13WCEE), Vancouver, Canada, Paper No. 1313

Koitabashi, Y., Nakamizo, D., & Nikken Sekkei Ltd. (2024). *Sumitomo Fudosan Roppongi Grand Tower*. Proceedings of the ASSISI Global Design & Innovation Awards, Category Award Winner: Seismic Isolation – Large Project.

Zhou, X., Zhang, W., & Chen, J. (1996). *Practical application of mid-story isolation in the Shantou Museum*. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 16(3), 145–152.

Zhang, H., Wen, X., & Li, C. (2023). *Performance of multi-story isolation systems for high-rise buildings under near-fault excitation*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 167, 107574.

Wen, X., Zhang, H., & Li, C. (2024). *Dynamic behavior of multi-layer isolation systems: Parametric and numerical analyses*. Journal of Structural Control and Health Monitoring, 31(4), e3235.

Wang, S., Hwang, J., Chang, K., Lin, M. & Lee B. (2013). *Analytical and experimental studies on midstory isolated buildings with modal coupling effect*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 42:201-219.

Huang, Y., Qian, J., Wang, Y., & Li, H. (2008). *Theoretical and experimental investigation on mid-story seismic isolation structures*. Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering (14WCEE), Beijing, China, Paper No. 05-01-0357.

Chang, K. C., Hwang, J. S., Wang, S. J., & Lee, B. H. (2010). *Simplified seismic analysis and experimental studies on buildings with mid-story isolation system*. Proceedings of the 9th U.S. National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Toronto, Canada, Paper No. 927.

Hur, M.-W., & Park, T.-W. (2022). *Seismic Performance of Story-Added Type Buildings Remodeled with Story Seismic Isolation Systems*. Buildings, 12(3), 270. <https://doi.org/10.3390/buildings12030270>

Esposito, F., Argenziano, M., Faiella, D., & Mele, E. (2023). *Intermediate Isolation System with Nonlinear Lower Structure and Isolation System*. Applied Sciences, 13(7), 4590

Faiella, D. (2017). *The Intermediate Isolation System for new and existing buildings: seismic behavior and design criteria*. Tesis Doctoral. Università degli Studi di Napoli Federico II

Castellano, M., Infanti, S., & Martelli, A. (2014). Seismic isolation for the protection of existing buildings in Italy: Achievements and perspectives, 14th European Conference on Earthquake Engineering (ECEE), Ohrid, Macedonia.

American Society of Civil Engineers (ASCE). (2022). Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-22). Reston, VA: ASCE.

European Committee for Standardization (CEN). (2018). EN 15129:2018 – Anti-seismic devices. Brussels: CEN.

Architectural Institute of Japan (AIJ). (2016). Design Recommendations for Seismically Isolated Buildings (5th ed.). Tokyo: AIJ.

Gobierno de la Ciudad de México. (2023). Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTC-Sismo 2023). Gaceta Oficial de la Ciudad de México.