

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Aplicación de la Metodología de Espectros de Respuesta No Lineales de Aceleración-Desplazamiento (ADRS) para Diseño por Desempeño de Sistemas de Aislación Sísmica.

PROYECTO DE GRADUACIÓN

Previo la obtención del Título de:

**Máster en Ingeniería Civil Mención en Estructuras Civiles
Sismorresistentes**

Presentado por:

Jorge Andres Reyes Sanchez

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2024

DEDICATORIA

A Dios.

A mis Padres por ser mi principal motivo de inspiración y siempre confiar en mí, les dedico este crecimiento personal y académico. Esto es por ustedes.

A mi hermana, para seguir siendo su ejemplo por seguir en esta vida y que conozca que el camino al éxito es el aprendizaje continuo.

A mi abuelita Luisa que tengo la plena confianza que todo esto es gracias a ella.

A mis abuelitos que desde el cielo me están viendo lograr grandes metas en esta vida y estarían muy orgullosos de mí.

A mi abuelita Olga que siempre me inculca el estudio.

A mi novia Damary, para que vea la meta que he logrado conseguir en esta pasión que es la ingeniería y por su tiempo en mis momentos difíciles.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, a Dios, porque sin la ayuda de él no fuera posible la realización de este proyecto. A mis padres Jorge y Carmen que son lo más importante que tengo en mi vida, por estar conmigo en todo momento y sin el apoyo constante de ellos no hubiera logrado esta meta. A mi hermana Malena que la quiero mucho y ha sido mi compañera a lo largo de este camino del aprendizaje. A mi tutor Rodrigo Retamales por compartir su conocimiento y llevar a explotar mis capacidades, sin duda alguna un gran ejemplo.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Jorge Andres Reyes Sanchez* doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Jorge Andres Reyes
Sanchez

EVALUADORES



Firmado electrónicamente por:
SAMANTHA ELIZABETH
HIDALGO ASTUDILLO

Ing.Samantha Hidalgo. Msc

PROFESOR DE LA MATERIA



Firmado electrónicamente por:
NADIA ROSAURA
QUIJANO ARTEAGA

Ing. Nadia Quijano. Msc

PROFESOR DE LA MATERIA

Ing.Rodrigo Retamales Saavedra. PhD

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El presente trabajo aborda la aplicación de la metodología de Espectros No Lineales de Respuesta Desplazamiento-Aceleración (ADRS) para optimizar la selección de propiedades de aisladores elastoméricos y friccionales. Esta metodología permite una caracterización más precisa del comportamiento de los sistemas de aislación sísmica, superando las limitaciones de los enfoques tradicionales basados en rigidez y amortiguamiento efectivos. El desarrollo del proyecto incluyó la generación de espectros ADRS considerando parámetros clave como el coeficiente de fricción (μ), el radio de curvatura (R), la rigidez post fluencia (kd) y la resistencia característica (Qd). Se emplearon métodos de análisis lineales y no lineales de respuesta en el tiempo, así como espectros de diseño objetivo normativos y registros sísmicos escalados al espectro objetivo en el dominio de la frecuencia. Para ello, se utilizaron métodos numéricos que permitieron ajustar parámetros y garantizar la convergencia de los resultados. Las curvas ADRS obtenidas muestran como varían los resultados de corte basal y desplazamientos, de acuerdo con las propiedades objetivo seleccionadas y con el tipo de análisis utilizado (NLTHA o MSA). Se observa, que no todas las propiedades utilizadas en este estudio cumplen con la capacidad de recentrado establecido en la norma ASCE/SEI 7-22. Estas curvas ADRS muestran una manera de obtener resultados de una manera precisa y ágil.

Palabras clave: Espectros ADRS, Aislación Sísmica, Sistemas Elastoméricos, Sistemas Friccionales.

ABSTRACT

The present work addresses the application of the Nonlinear Displacement-Acceleration Response Spectra (ADRS) methodology to optimize the selection of elastomeric and frictional isolator properties. This methodology allows a more accurate characterization of the behavior of seismic isolation systems, overcoming the limitations of traditional approaches based on effective stiffness and damping. The development of the project included the generation of ARDS spectra considering objective parameters such as friction coefficient (μ), radius of curvature (R), post creep stiffness (kd) and characteristic strength (Qd). Linear and nonlinear time-response analysis methods were employed, as well as normative target design spectra and seismic records scaled to the target spectrum in the frequency domain. Numerical methods were used to adjust parameters and ensure convergence of the results. The ADRS curves obtained show how the basal shear and displacement results vary according to the selected target properties and the type of analysis used (NLTH or MSA). It is observed that not all the properties used in this study comply with the recentering capacity established in the ASCE/SEI 7-22 standard. These ARDS curves show a way to obtain results in an accurate and agile way.

Keywords: ADRS Spectra, Seismic Isolation systems, Elastomeric Systems, Frictional Systems.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	V
SIMBOLOGÍA	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
CAPÍTULO 1	10
1 Introducción	10
1.1 Antecedentes	11
1.2 Problemática a resolver	12
1.3 Justificación	12
1.4 Objetivos	13
1.4.1 Objetivo General	13
1.4.2 Objetivos Específicos	13
CAPÍTULO 2	14
2 Desarrollo del proyecto	14
2.1 Marco conceptual	14
2.1.1 Sistema de aislación sísmica de base	14
2.1.2 Registros sísmicos	16
2.1.3 Espectros de Respuesta y de Diseño	17
2.2 Escalamiento Espectral	18
2.2 Marco metodológico	19
2.3 Selección de registros sísmicos	20

2.3.1	Metodología ADRS	21
2.3.2	Procedimientos para Aplicación de Metodología ADRS	22
2.3.3	Método Numérico de Runge Kutta de 4to Orden.....	25
2.4	Criterios para la evaluación de la capacidad de recentrado para sistemas de aislación sísmica friccionales según estándar ASCE/SEI 7-22.....	27
CAPÍTULO 3		28
3	Resultados y Discusión.....	28
3.1	Espectro Objetivo	28
3.2	Escalamiento de registros en el dominio de la frecuencia.....	29
3.3	Curvas ADRS Aisladores Elastoméricos.....	31
3.3.1	Análisis Modal Espectral	31
3.3.2	Análisis No Lineal Tiempo Historia	32
3.4	Curvas ADRS para Aisladores Friccionales.....	34
3.4.1	Análisis modal Espectral	34
3.4.2	Análisis No Lineal Tiempo Historia	37
CAPÍTULO 4		41
4	Conclusiones Y Recomendaciones.....	41
4.1	Conclusiones.....	41
4.2	Recomendaciones.....	43
BIBLIOGRAFÍA		45
ANEXOS		47
ANEXO A		48

ABREVIATURAS

ADRS Espectros de Respuesta No Lineales de Aceleración-Desplazamiento

SIMBOLOGÍA

Fy	Fuerza de fluencia
uy	Desplazamiento de fluencia
μ	Coefficiente de fricción
R	Radio de curvatura
Qd	Resistencia Característica
Kd	Rigidez Post Fluencia
Td	Periodo Post Fluencia
Ki	Rigidez inicial
Dm	Desplazamiento de diseño
Beff	Amortiguamiento efectivo
Keff	Rigidez efectiva

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Comparación del comportamiento de una estructura sin/con aisladores sísmicos. Fuente: (Cámara Chilena de la Construcción, 2011).....	14
Figura 2.2.Registro sísmico de ejemplo en unidades de gravedad (g).....	17
Figura 2.3.Espectro de respuesta en aceleraciones el registro analizado de ejemplo.	18
Figura 2.4.Histéresis Bi-Lineal de un aislador. Fuente: (Dai Nguyen & Guizani, 2020)	23
Figura 2.5.Modelo de Bouc-Wen. Fuente: (Charalampakis & Koumoussis, 2008).....	25
Figura 2.6.Método de Runge Kutta de cuarto orden. Fuente: (Lucero Rojo, 2015) ...	27
Figura 3.1.Espectro de diseño de aceleraciones y desplazamientos MCEr para un suelo tipo C en San Diego - California.	28
Figura 3.2.Espectro objetivo y espectros de respuesta de aceleración y desplazamiento sin escalar.	29
Figura 3.3.Espectro objetivo y espectros de respuesta escalados en el dominio de la frecuencia.....	30
Figura 3.4. Espectro objetivo y espectros de respuesta de desplazamiento obtenidos del escalamiento en el dominio de la frecuencia.....	30
Figura 3.5.Curva ADRS para aisladores elastoméricos usando el análisis espectral	32
Figura 3.6. Curva ADRS para aisladores Elastoméricos considerando 11 pares de registros sísmicos (NLTHA).....	34
Figura 3.7. Curva ADRS para aisladores friccionales usando propiedades efectivas con desplazamiento de fluencia (u_y) de 0.1 pulgadas.	36
Figura 3.8. Curva ADRS para aisladores friccionales usando propiedades efectivas con desplazamiento de fluencia (u_y) de 0.2 pulgadas.	36
Figura 3.9. Curva ADRS para aisladores para diferentes radios de curvatura (R) y coeficientes de fricción (μ) para una deformación de fluencia (u_y) de 0.1 pulgadas con 11 pares de registros.....	39

Figura 3.10. Curva ADRS para aisladores para diferentes radios de curvatura (R) y coeficientes de fricción (u) para una deformación de fluencia (u_y) de 0.2 pulgadas con 11 pares de registros..... 40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Registros sísmicos considerados para el analisis.	20
Tabla 3.1. Valores promedio de desplazamientos máximos (mm) y Cortes Basales (V/W). Análisis modal espectral. Aisladores Elastoméricos.	32
Tabla 3.2. Valores promedios de desplazamientos máximos (mm) y Cortes Basales (V/W). Considerando 11 pares de registros sísmicos (NLTHA). Aisladores Elastoméricos.....	33
Tabla 3.3. Valores promedios de desplazamientos máximos (mm) y Cortes Basales (V/W). Considerando 11 pares de registros sísmicos (NLTHA). Aisladores friccionales.	35
Tabla 3.4. Variación de los desplazamientos y cortes basales respecto al desplazamiento de fluencia (uy) considerado en el analisis modal espectral.....	37
Tabla 3.5. Valores promedios de desplazamientos máximos (mm) y cortes basales (V/W) para todos los valores de Radio de curvatura (R) y Coeficiente de Fricción (u)	38
Tabla 3.6. Variación de los desplazamientos y cortes basales respecto al desplazamiento de fluencia (uy) considerado.	40

CAPÍTULO 1

1 INTRODUCCIÓN

La amenaza sísmica en diversas regiones del mundo representa un desafío crítico para poder controlar los desplazamientos y aceleraciones de las estructuras. Esto ha llevado al desarrollo de tecnologías innovadoras para proteger las estructuras frente a eventos sísmicos. Dentro de estas innovaciones, los sistemas de aislación sísmica han demostrado ser altamente eficaces para reducir esfuerzos y generar menor daño estructural y no estructural. Lo anterior se logra mediante el incremento del periodo de vibración natural y/o el aumento del amortiguamiento de la estructura. Los sistemas de aislación más comúnmente utilizados corresponden a los péndulos friccionales y a los aisladores elastoméricos con o sin núcleo de plomo. Estos dispositivos son capaces de disipar grandes cantidades de energía mediante sus curvas histéreticas que son predecibles y controlables.

Los métodos de análisis tradicionales suelen modelar el comportamiento histérico de estos dispositivos mediante aproximaciones lineales equivalentes, utilizando rigideces secantes y amortiguamientos viscosos efectivos. Estas simplificaciones, aunque son útiles, no reflejan con exactitud el comportamiento no lineal histérico que poseen los sistemas de aislación, resultando así en diseños que pueden ser en exceso conservadores o insuficientemente optimizados. Con el fin de optimizar el proceso de diseño, se introdujo el concepto de los Espectros No Lineales de Respuesta Desplazamiento-Aceleración (ADRS). Esta metodología permite a los diseñadores definir de manera gráfica la demanda sísmica y el punto de operación efectivo del sistema de aislación, en función del cortante basal y el desplazamiento que tendrá el sistema de aislación. Esta metodología se realiza para diferentes combinaciones de propiedades consideradas de acuerdo con el tipo de aislador, en términos de rigidez post fluencia (k_d) y resistencias características (Q_d). En este trabajo se propone considerar el coeficiente de fricción (μ) y radio de curvatura (R) para el caso de aisladores tipo péndulo de fricción.

1.1 Antecedentes

La necesidad de proteger las estructuras contra los efectos de eventos sísmicos ha impulsado la innovación en el diseño e implementación de tecnologías de aislación sísmica, los cuales han demostrado ser efectivos para reducir el daño estructural al disminuir la transmisión de fuerzas sísmicas a las estructuras. Dispositivos como los aisladores de caucho natural con (o sin) núcleo de plomo (LRB o NRB, por sus siglas en inglés) y los aisladores de péndulos friccionales (FPS, por sus siglas en inglés) son ejemplos comunes de tecnologías de aislación sísmica que han sido ampliamente utilizados en la ingeniería estructural. Estos dispositivos permiten a las estructuras alcanzar períodos de vibración largos, y una mayor capacidad de disipar la energía a través de un comportamiento histerético y con mejor desempeño en comparación de una estructura de base fija. Comúnmente se suele aproximar el comportamiento histerético del sistema con metodologías aproximadas, caracterizadas por una rigidez efectiva (K_{eff}) y un amortiguamiento efectivo (B_{eff}), sin embargo, el comportamiento obtenido no necesariamente representa el comportamiento histerético esperado para el sistema de aislación para la demanda sísmica aplicada. Por lo tanto, una metodología mejorada corresponde al concepto de ADRS, el cual permite obtener el desempeño del sistema de aislación para diferentes propiedades objetivo y una demanda sísmica seleccionada. El empleo inicial del método ADRS realizado por Whittaker y Jones (2014) se centró en analizar el comportamiento de osciladores no lineales de un grado de libertad, que modelaban el funcionamiento de sistemas de aislación sísmica. Estos sistemas fueron evaluados utilizando registros sísmicos capturados durante el terremoto de Canterbury, magnitud M_w 6.3, ocurrido el 22 de febrero de 2011. Posteriormente, la metodología fue aplicada por otros investigadores, como Jones y Aiken (2015), en diferentes ubicaciones de alta amenaza sísmica, incluyendo Wellington (Nueva Zelanda), San Francisco (EE. UU.), Vancouver (Canadá) y dos zonas de riesgo en Turquía. En Chile, esta misma metodología propuesta por Whittaker y Jones (2014) se utilizó para comparar el desempeño de los terremotos de El Maule, con una magnitud M_w 8.8 del 27 de febrero de 2010, de Iquique con magnitud M_w 8.2 del 1 de abril de 2014; y de Illapel, con magnitud M_w 8.3 sucedido el 16 de septiembre de 2016.

En cada uno de estos casos, se usaron pares de registros sísmicos, respectivamente, los cuales fueron escalados mediante un factor de escala constante y ajustados en el dominio de la frecuencia de acuerdo con la norma NCh2745, como parte del trabajo realizado por Jones et al. (2017).

1.2 Problemática a resolver

El presente trabajo busca mejorar los procedimientos ADRS disponibles para la selección de sistemas de aislación sísmica de estructuras. Para ello, se desarrollarán espectros ADRS considerando parámetros específicos para aisladores elastoméricos (Q_d y k_d) y friccionales (μ y R) u otras variables a determinar. Los espectros se desarrollarán a partir de espectros de amenaza o demanda utilizando métodos lineales y no lineales de respuesta en el tiempo. Las demandas sísmicas se encontrarán caracterizadas por espectros de diseño objetivo. También se evaluará resultados de las curvas ADRS considerando límites de recentrados establecidos en la normativa para aisladores elastoméricos y friccionales. Así mismo se efectuará análisis comparativo de los resultados obtenidos mediante los procedimientos genéricos que utilizan la rigidez efectiva (K_{eff}) y el amortiguamiento efectivo (B_{eff}), con los resultados obtenidos mediante la metodología ADRS de este documento. El entregable consistirá en una aplicación que recibirá por entrada un espectro de diseño y entregará las curvas ADRS para la selección del sistema de aislación.

1.3 Justificación

El diseño eficiente de sistemas de aislación sísmica es esencial para alcanzar la seguridad y funcionalidad de las estructuras ubicadas en zonas con alta actividad sísmica. Sin embargo, la selección precisa de estos sistemas sigue siendo un desafío, los modelos que están caracterizados por la rigidez efectiva (K_{eff}) y un amortiguamiento viscoso efectivo (β_{eff}), pueden no captar con exactitud el comportamiento de los aisladores elastoméricos, ni de los aisladores friccionales. Este trabajo busca mejorar los procedimientos ADRS, desarrollando espectros que consideren parámetros específicos de estos dispositivos y otras variables clave, verificando la variación de sus resultados. Los nuevos espectros se generarán a

partir de espectros de diseño, amenaza o demanda sísmica, utilizando tanto métodos lineales como no lineales de análisis de respuesta en el tiempo. Este enfoque proporcionará resultados más realistas y útiles para la selección de sistemas de aislación. Abordar esta problemática es crucial porque un diseño más preciso permite optimizar el desempeño estructural, alcanzando una mayor seguridad y reduciendo los daños durante los sismos. Además, una metodología ajustada a las condiciones específicas de los aisladores ayuda a minimizar incertidumbres y evita tanto el sobredimensionamiento como la subestimación del riesgo en estructuras.

Este estudio promueve la innovación en el diseño de sistemas de aislación sísmica, mejorando la seguridad y la eficiencia de infraestructuras críticas, contribuyendo al objetivo de desarrollo sostenible N° 9 “Industria, Innovación e Infraestructura” al optimizar los recursos en el proceso de construcción, contribuye al desarrollo de infraestructuras más sostenibles y resilientes. Además, también al Objetivo N° 11 “Ciudades y Comunidades Sostenibles” porque aporta a la resiliencia de las infraestructuras en zonas de alta actividad sísmica, reduciendo los riesgos para las comunidades. Al minimizar daños estructurales, se contribuye a la creación de ciudades más seguras y preparadas ante desastres naturales.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Aplicación de la metodología de espectros de respuestas no Lineales de aceleración-desplazamiento (ADRS) para Diseño por Desempeño de Sistemas de Aislación Sísmica.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Analizar las variables que controlan el comportamiento y la respuesta de aisladores sísmicos elastoméricos y friccionales.
- Aplicar la metodología ADRS para generar herramientas gráficas que faciliten la selección de propiedades objetivas de los sistemas de aislación sísmica.
- Desarrollar una herramienta automatizada que permita construir gráficos ADRS usando como entrada distintas amenazas sísmicas, caracterizadas mediante espectros de diseño y con un límite normativo establecido.

CAPÍTULO 2

2 DESARROLLO DEL PROYECTO

2.1 Marco conceptual

2.1.1 Sistema de aislación sísmica de base

La aislación sísmica de base tiene como objetivo desacoplar la estructura de los movimientos del suelo para reducir los efectos que estos provocan. Esto se logra mediante el uso de dispositivos conocidos como aisladores sísmicos, los cuales, debido a su flexibilidad, incrementan el periodo de vibración de la estructura y le permiten deformarse sin comprometer su integridad durante un sismo. De esta manera, los aisladores ayudan a absorber y disipar la energía generada, permitiendo que la estructura conserve su funcionalidad antes, durante y después del evento, y minimizando tanto los daños estructurales como los no estructurales. Por lo general, los sistemas de aislación sísmica se instalan entre la estructura y cimentación, pero también existen sistemas que se encuentran a nivel de pisos superiores.

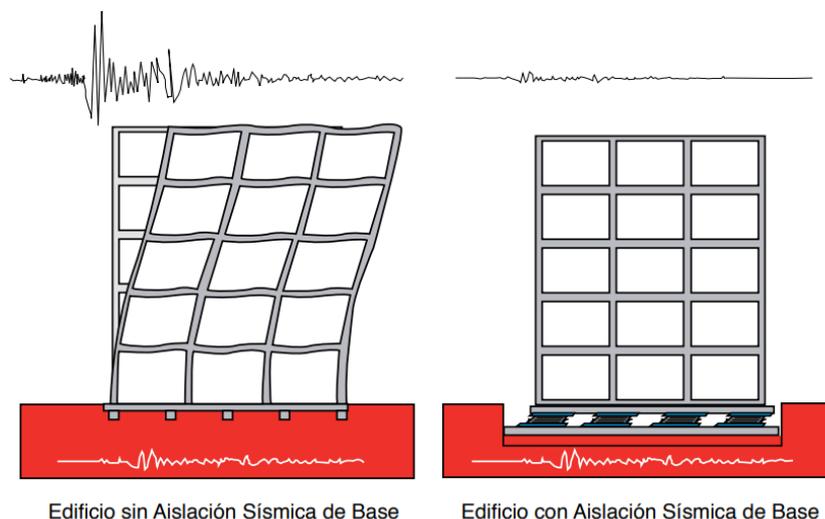


Figura 2.1 Comparación del comportamiento de una estructura sin/con aisladores sísmicos.

Fuente: (Cámara Chilena de la Construcción, 2011)

Los sistemas de aislación sísmica más avanzados y comunes en la actualidad son los aisladores elastoméricos, que pueden incorporar o no un núcleo de plomo, y los aisladores friccionales. A continuación, se presentan las principales características de estos tipos de aisladores.

- **Aisladores elastoméricos:** Los aisladores elastoméricos están compuestos por capas alternadas de elastómero y acero, que se unen mediante vulcanización. Su forma suele ser circular. Esta combinación de materiales proporciona la flexibilidad necesaria para permitir el desplazamiento horizontal durante un sismo. A la vez, las láminas de acero permiten alcanzar una rigidez vertical similar a la de una columna de hormigón armado. El rendimiento de estos aisladores depende, en gran medida, de cuánto se deformen durante el movimiento sísmico, aunque también influyen factores como la temperatura, el envejecimiento, la contaminación, el recorrido y la velocidad del sismo. Dentro de esta categoría se encuentran varios tipos: los aisladores de goma natural (NRB), los de goma con bajo amortiguamiento (LDRB), los de alto amortiguamiento (HDRB) y los de goma con núcleo de plomo (LRB). Estos últimos destacan porque pueden aumentar el amortiguamiento efectivo del sistema entre un 15% y un 30% o más.
- **Aisladores Friccionales:** Los aisladores friccionales tienen un deslizador articulado que desliza sobre una superficie cóncava. A diferencia de los aisladores deslizantes, estos sistemas se destacan por su capacidad de autocentrado, lo que significa que, tras un sismo, la estructura tiende a volver a su posición original. Esto se logra gracias a la forma curva de la superficie y a las fuerzas que genera la gravedad, sin embargo, este sistema de autocentrado debe ser evaluado. Este tipo de aisladores se clasifica de la siguiente manera:

Péndulo de fricción simple

Los aisladores con péndulo de fricción cuentan con un deslizador articulado que descansa sobre una superficie curva de acero inoxidable, esto logra regresar al aislador a la posición original después del movimiento sísmico (Reyes, 2021).

Péndulo de fricción doble

En este tipo de aislador el péndulo se encuentra entre dos curvaturas de acero, lo cual permite tener un mayor rango de desplazamientos cuando ocurra el evento sísmico (Reyes, 2021).

Péndulo de fricción triple

Este tipo de aislador posee un deslizador rígido y cuatro superficies cóncavas de acero inoxidable (Reyes, 2021).

El uso de sistemas de protección sísmica mejora notablemente el desempeño de las estructuras durante un sismo, reduciendo los daños en los elementos estructurales, no estructurales y contenidos del edificio. Esto aumenta las probabilidades de que los espacios protegidos puedan seguir funcionando durante e inmediatamente después de un evento sísmico. Estos sistemas se pueden implementar tanto en edificaciones nuevas como en existentes, especialmente cuando se busca proteger el contenido, asegurar la continuidad operativa o alcanzar un nivel de desempeño superior al exigido por la normativa vigente.

Son especialmente recomendables en infraestructuras críticas o estratégicas, como hospitales, escuelas, centros de datos, salas de control, edificios públicos, industrias, museos, puertos, aeropuertos y puentes, donde la seguridad y el valor del contenido son esenciales. Sin embargo, también se han aplicado con éxito en edificaciones destinadas al uso de oficinas y residencia.

2.1.2 Registros sísmicos

El movimiento del suelo durante un terremoto ocurre en múltiples direcciones, por lo que es necesario describirlo de manera cuantitativa. Esto se logra identificando tres componentes de rotación y tres de traslación. Las componentes de traslación ortogonales son las más utilizadas: dos horizontales (Norte-Sur y Este-Oeste) y una vertical.

El comportamiento del suelo puede medirse con sismógrafos, aunque estos son muy sensibles y registran incluso movimientos leves. Para enfocarse en sismos significativos, se emplean acelerógrafos, que generan un gráfico llamado acelerograma, el cual

muestra cómo varían las aceleraciones en un punto específico. La superficie en la cual se apoyan los acelerógrafos debe de ser lo más rígido posible para que pueda medir bien el movimiento. Comúnmente los registros sísmicos se encuentran en formato de aceleración vs tiempo. La aceleración suele estar dada en g, m/s² o cm/s².

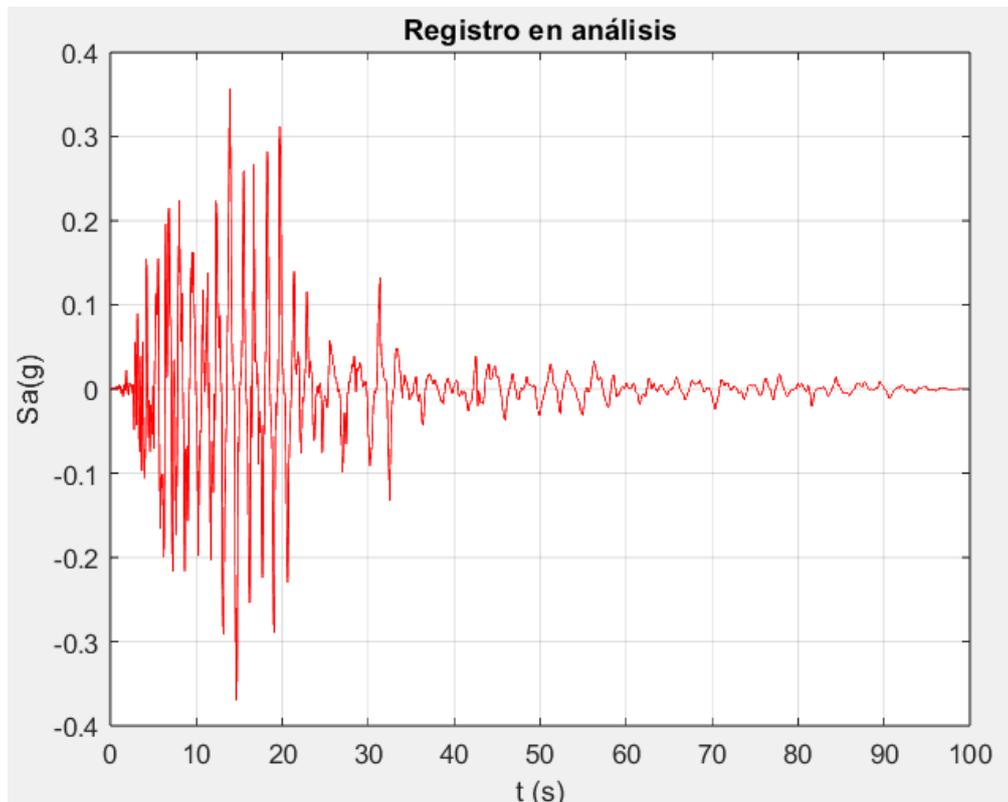


Figura 2.2.Registro sísmico de ejemplo en unidades de gravedad (g).

2.1.3 Espectros de Respuesta y de Diseño

Un espectro de diseño es una herramienta que los ingenieros usan para anticipar cómo una estructura, caracterizada como un oscilador de 1 grado de libertad (GDL), podría responder a un terremoto. Básicamente, es una curva que muestra cómo reaccionaría una estructura con diferentes periodos de vibración ante el movimiento del suelo causado por un sismo por ejemplo el registro mostrado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Cada punto de la curva indica la aceleración, desplazamiento o velocidad máxima que la estructura experimentaría en función de su periodo. En la Figura 2.3.Espectro de respuesta en aceleraciones el registro analizado de ejempl se muestra la respuesta en aceleraciones del registro para varios periodos de una estructura de masa unitaria.

Para hacer esto, se consideran registros sísmicos que miden cómo se mueve el suelo durante un terremoto y se procesan para generar el espectro a cada periodo. Este gráfico permite a los ingenieros obtener las fuerzas a la que una estructura estará sometida durante un terremoto y diseñarla para resistirlas.

En los códigos de construcción, estos espectros de diseño ya están predeterminados según la región sísmica, el tipo de suelo y otros factores, de modo que los ingenieros pueden asegurarse de que las edificaciones cumplan con los requisitos de seguridad.

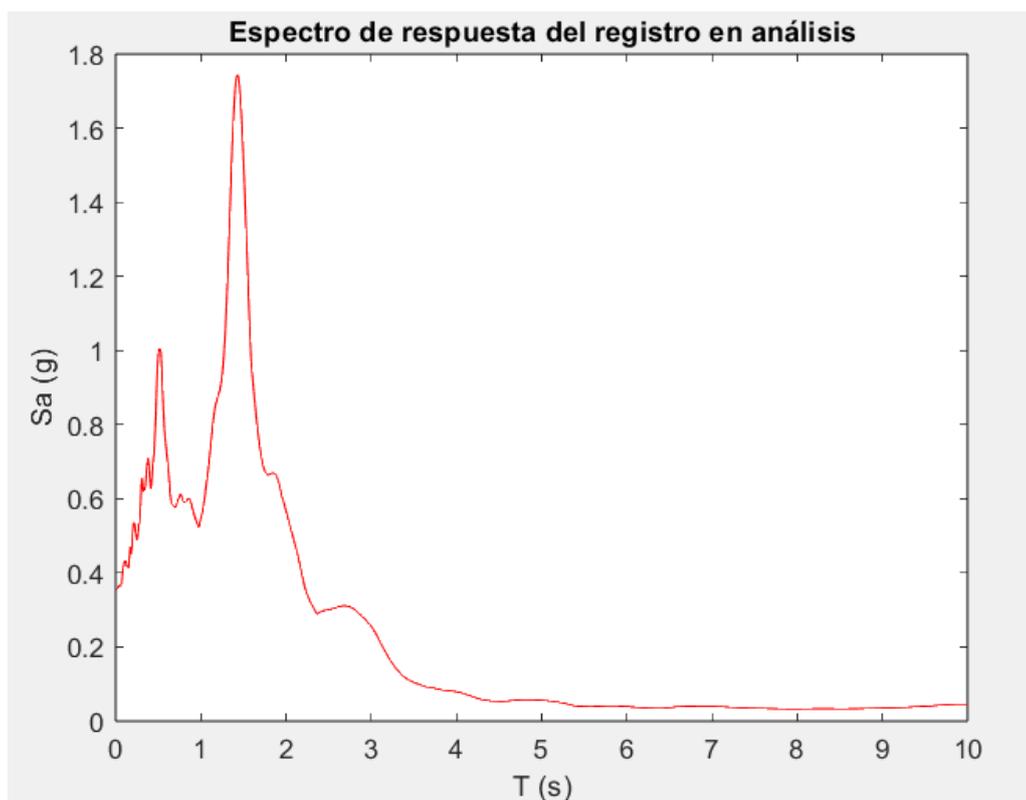


Figura 2.3. Espectro de respuesta en aceleraciones el registro analizado de ejemplo.

2.2 Escalamiento Espectral

El diseño sísmico de estructuras generalmente se basa en espectros de respuesta, ya sea obtenidos de normativas de diseño o de análisis probabilísticos de peligro sísmico que consideran un periodo de retorno específico. Estos análisis probabilísticos permiten calcular la demanda sísmica necesaria para el diseño, teniendo en cuenta las incertidumbres asociadas a la magnitud del sismo y la distancia a la falla (Al Atik & Norman, 2010).

Cuando se trata de sistemas de aislación sísmica de base, los análisis de desempeño mediante simulaciones dinámicas no lineales en el tiempo son herramientas clave. Estas simulaciones permiten al diseñador evaluar de manera más precisa los efectos y beneficios de implementar sistemas de aislación. Para llevar a cabo estos análisis, es necesario utilizar registros sísmicos que estén correctamente escalados a un espectro objetivo, o al menos ajustados a un rango que coincida con el periodo fundamental de la estructura.

Debido a la gran variabilidad inherente entre los registros sísmicos, es común realizar múltiples simulaciones no lineales para obtener una respuesta sísmica representativa de la estructura. No obstante, el número de simulaciones puede reducirse de manera significativa si los registros sísmicos se escalan adecuadamente al espectro objetivo. Esto ayuda a disminuir las diferencias entre el espectro objetivo y los espectros de respuesta de los registros empleados. Existen diferentes metodologías de escalamiento espectral: método del dominio de la frecuencia, y el método del dominio en el tiempo.

2.2 Marco metodológico

2.2.1.1 Escalamiento en el dominio de la frecuencia

Para este estudio se realizará el escalamiento en el dominio de la frecuencia que es un método ampliamente utilizado para el escalamiento espectral, donde el ajuste se centra en el espectro de amplitudes de Fourier, generando acelerogramas a partir de registros sísmicos. Sin embargo, este ajuste puede provocar que las series de tiempo de velocidad y desplazamiento presenten niveles de energía poco realistas (Marshall & Naeim, 1995). Este procedimiento filtra un registro sísmico en el dominio de la frecuencia utilizando la relación entre su espectro y el espectro objetivo. Durante este proceso, se modifica el espectro de amplitudes de Fourier del registro ingresado, mientras que las fases del espectro se mantienen inalteradas. La preservación de estas fases es crucial para los análisis de respuesta no lineal en el tiempo, ya que cualquier modificación significativa podría influir en la sensibilidad de la respuesta no lineal del registro.

Para lograr mantener las fases originales sin cambios significativos, se aplica una función de transferencia que permite ajustar las amplitudes del espectro de Fourier. Este procedimiento se realiza de forma iterativa, repitiéndose varias veces hasta alcanzar un escalamiento compatible con el espectro objetivo dentro de un rango de periodos

definido. Cuantas más iteraciones se realicen, mayor será la precisión en la correspondencia entre el registro ajustado y el espectro objetivo.

2.3 Selección de registros sísmicos

La cantidad adecuada de registros sísmicos a utilizar depende del propósito específico para el que se empleen. Esto puede incluir la evaluación de la respuesta estructural, la necesidad de obtener valores promedio o distribuciones de respuesta, la precisión requerida en los cálculos de la media y la varianza, la estimación de respuestas máximas o la probabilidad de colapso, así como el grado de respuesta inelástica esperado en el sistema, entre otros factores.

En el caso de sitios alejados de una falla, el aspecto más relevante al seleccionar registros sísmicos para ajustarlos a un espectro objetivo es su forma espectral dentro del rango de períodos de interés. Otros factores, como la magnitud del sismo, la distancia a la falla y las condiciones locales del sitio, también requieren ser considerados. El estándar ASCE/SEI 7-22 menciona que se deben seleccionar al menos 11 movimientos sísmicos para cada espectro objetivo, incluyendo pares de componentes horizontales ortogonales y, si se consideran efectos verticales, una componente vertical. Los registros deben provenir de eventos dentro de un régimen tectónico similar, con magnitudes y distancias a la falla consistentes con las que controlan el espectro objetivo, y deben presentar una forma espectral similar (ASCE, 2022). En consecuencia, se seleccionaron 11 pares de registros los cuales corresponden a sismos con magnitudes mayores a 6.5, registrados en estaciones ubicadas a distancias epicentrales menores a 100 km.

Tabla 2.1. Registros sísmicos considerados para el análisis.

Evento	Estación	Fecha	Mw
Ecuador	ACHN	16 de abril de 2016	7.8
Japón	Takatori	17 de enero de 1995	7.3
México / Chiapas	SCT2	7 de septiembre de 2017	8.2
México / Michoacan	SCT1	19 de septiembre de 1985	8.1
	TXCO		
Northridge-01	Pacoima Kagel Canyon	17 de enero de 1994	6.69
Concepción/Maule	Concepción Centro	27 de febrero de 2010	8.8
Northern Calif-03	Ferndale City Hall	21 de diciembre de 1954	6.5
Imperial Valley-02	El Centro Array #9	18 de mayo de 1940	6.95

Loma Prieta	Sunny Valy	17 de octubre de 1989	6.93
	HCHA		

2.3.1 Metodología ADRS

El concepto de Espectros de Respuesta No Lineales de Aceleración y Desplazamiento (ADRS) se utiliza como una metodología de diseño para sistemas de aislación sísmica. Las demandas de diseño se calculan mediante un análisis no lineal de respuesta en el tiempo, utilizando un conjunto de registros sísmicos que se han escalado a un espectro objetivo específico.

Los parámetros que caracterizan los sistemas de aislación sísmica en este estudio abarcan un rango práctico de aplicaciones de manera general. Estos incluyen la resistencia característica (Q_d) y la rigidez post-fluencia (K_d), que se relaciona directamente con el periodo post-fluencia (T_d) para aisladores elastoméricos; y coeficiente de fricción (μ) y radio de curvatura (R) para aisladores friccionales. A diferencia de otros parámetros, como la rigidez efectiva (K_{eff}) y el amortiguamiento viscoso efectivo (β_{eff}), estos no dependen del desplazamiento, lo que los hace más convenientes de utilizar.

Para cada conjunto de propiedades objetivo (Q_d, K_d, μ, R) que son seleccionadas de acuerdo al sistema de aislación, se calculan las respuestas sísmicas. Cada registro sísmico se escala al espectro objetivo, y el gráfico resultante permite a los diseñadores evaluar cómo las variaciones en estas propiedades seleccionadas afectan el diseño óptimo del sistema de aislación. Para sistemas friccionales se considera una deformación de fluencia (u_y) de 0.1 pulgadas correspondiente a deformaciones de fluencia para sistemas americanos y deformación de fluencia (u_y) igual a 0.2 pulgadas que correspondería a sistemas europeos. La metodología ADRS ofrece una forma sencilla de analizar el impacto del sistema de aislación en términos de corte basal (o aceleración) y desplazamiento del sistema.

Además, las demandas de corte basal y los desplazamientos se determinan a partir de un análisis no lineal de respuesta en el tiempo de un modelo histerético de tipo Bouc-Wen. Este modelo representa el comportamiento no lineal del sistema de aislación y se aplica a un oscilador de un grado de libertad (1GDL). Para resolver la ecuación de movimiento no lineal del sistema de 1GDL, se utilizó un software de programación.

2.3.2 Procedimientos para Aplicación de Metodología ADRS

2.3.2.1 Componente Histerética

Esta aproximación utiliza distintos modelos histeréticos para ajustar la respuesta de un sistema de aislación sísmica, realizando análisis no lineales en el tiempo. Se describirá el comportamiento histerético de Bouc-Wen que se adapta a la metodología ADRS planteada en esta investigación para evaluar el desempeño sísmico de estructuras con sistemas de aislación.

Los modelos histeréticos se encargan de describir matemáticamente la relación entre fuerza y desplazamiento durante los ciclos de carga y descarga, que en un sismo ocurren de manera aleatoria. Un aspecto clave al elegir el modelo es su capacidad para representar cómo varía la disipación de energía, lo que diferencia a los modelos degradantes de los no degradantes. Los modelos degradantes, por ejemplo, se suelen emplear para simular el comportamiento de elementos estructurales de concreto reforzado en edificaciones convencionales.

2.3.2.2 Modelamiento Histerético

Durante un evento sísmico, los elementos estructurales pueden entrar en el rango no lineal. La relación entre los desplazamientos y las fuerzas de restauración que se genera en este proceso se conoce como histéresis. La forma de estos ciclos de carga y descarga refleja las propiedades dinámicas no lineales de la estructura. En esta investigación, se analizan dos tipos de modelos histeréticos: el modelo Bi-Lineal y el modelo Bouc-Wen.

2.3.2.2.1 Modelo Histerético Bi-Lineal

El caso más sencillo es el de una histéresis bi-lineal, donde el modelo exhibe un comportamiento elástico lineal hasta que se alcanza la fuerza de fluencia. A partir de ese punto, la curva adopta una nueva pendiente. La muestra un ejemplo del comportamiento de este modelo bi-lineal.

En este modelo histerético, la rigidez inicial (K_u) está relacionada con la respuesta del sistema estructural ante cargas de baja intensidad. Esta rigidez se determina trazando una recta tangente en la parte elástica de la curva. Por otro lado, la rigidez post-fluencia (K_d) se asocia con la respuesta del sistema cuando entra en el rango inelástico. La fuerza de fluencia (F_y) y el desplazamiento de fluencia (D_y) marcan el punto de transición entre ambas rigideces.

El análisis ADRS con propiedades efectivas de acuerdo con el tipo de aislador, esto es un enfoque iterativo que ajusta el espectro de desplazamientos considerando el amortiguamiento efectivo del sistema aislado. Este proceso comienza con un espectro elástico inicial, que se modifica iterativamente en función de las propiedades del aislador, como la rigidez efectiva (k_{eff}) y el amortiguamiento efectivo (ξ_{eff}). El amortiguamiento efectivo, calculado a partir de la energía disipada por el sistema, se utiliza para reducir el espectro mediante un factor de reducción (B_m), obteniendo un espectro modificado que refleja el comportamiento que tendrá el sistema aislado.

En cada iteración, el desplazamiento máximo (D_{max}) se recalcula y se actualizan las propiedades hasta lograr la convergencia. Este enfoque permite evaluar de manera precisa las demandas de desplazamiento y fuerza, incorporando los efectos de disipación de energía del sistema de aislamiento, lo cual es crucial para el diseño y análisis estructural.

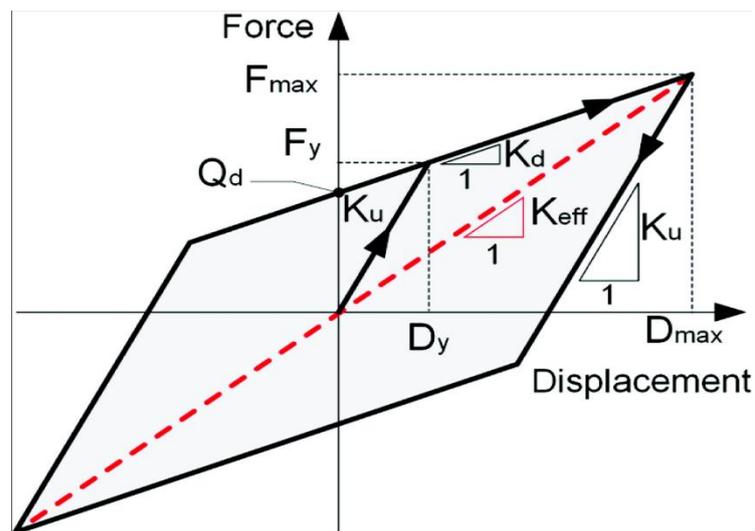


Figura 2.4. Histéresis Bi-Lineal de un aislador. Fuente: (Dai Nguyen & Guizani, 2020)

2.3.2.2.2 Modelo Histerético de Bouc-Wen

El modelo de histéresis Bouc-Wen es uno de los más utilizados en ingeniería por su versatilidad, simplicidad y capacidad para representar de forma suave y continua el comportamiento no lineal de sistemas. Dependiendo de los parámetros empleados, el sistema de vibración puede mostrar respuestas de ablandamiento o endurecimiento. Este modelo es conciso y está gobernado por una única ecuación diferencial, lo que

permite su aplicación en varios fenómenos histeréticos, como el magnetismo, la electricidad, los materiales y la elastoplasticidad de sólidos. Fue inicialmente propuesto por Bouc en 1967, y posteriormente ampliado por Wen, quien desarrolló una variedad de patrones de histéresis. A pesar de su uso extensivo durante décadas, sigue siendo relevante en múltiples áreas de estudio (Li & Meng, 2007).

El comportamiento en ciclos de carga y descarga se basa en la ecuación de Bouc-Wen, descrita por la ecuación diferencial:

$$z'(t) = \frac{1}{u_y} [A - |z(t)|^n (\beta + \text{sgn}(u'(t)z(t))\gamma)] u'(t) \quad (2.1)$$

Aquí, A , γ , β y n son cantidades adimensionales que regulan el comportamiento del modelo, mientras que $\text{sgn}()$ representa la función signo. Cuando el parámetro exponencial n tiene valores pequeños, la transición de la rama elástica a la post-fluencia es suave. Sin embargo, cuando n es elevado, esta transición se vuelve abrupta, pareciéndose más a un modelo bi-lineal. En aisladores elastoméricos la transición es más suave por lo tanto su valor considerado es de 1, mientras que para los aisladores friccionales el valor n seleccionado es de 3. Por otro lado, los parámetros β y γ influyen en el tamaño y la forma del bucle de histéresis. Aunque el parámetro A fue parte de la formulación original del modelo Bouc-Wen, se ha reconocido recientemente que es redundante. Para eliminar esta redundancia, se recomienda fijar el parámetro A en 1. Estudios iniciales sugirieron imponer una cierta restricción, específicamente para $A/(\beta+\gamma) = 1$, logrando así simplificar el modelo y dotarlo de propiedades más definidas. (Charalampakis & Koumoussis, 2008).

La fuerza restauradora puede ser descrita en función del desplazamiento u y de la variable histerética z .

$$F = a * \frac{F_y}{u_y} * u(t) + (1 - a) * F_y * z(t) \quad (2.2)$$

Donde a es la relación entre la rigidez inicial (k_i) y la rigidez post fluencia (k_f) y F_y la fuerza de fluencia. Por lo tanto las pendientes de las rigideces serian:

$$K_i = \frac{F_y}{u_y} \quad (2.3)$$

$$K_f = a \frac{F_y}{u_y} \quad (2.4)$$

Estas rigideces se pueden visualizar como si fueran dos resortes conectados en paralelo.

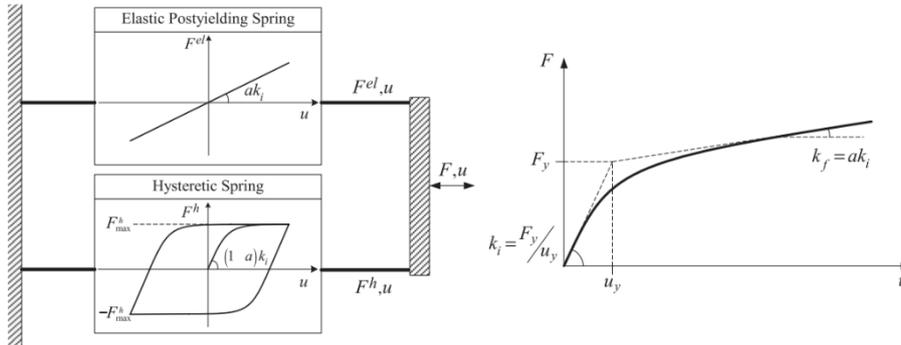


Figura 2.5. Modelo de Bouc-Wen. Fuente: (Charalampakis & Koumousis, 2008)

Finalmente, la ecuación de movimiento para un sistema de un grado de libertad con comportamiento histérico queda escrita de la siguiente manera:

$$mu''(t) + cu'(t) + a \frac{F_y}{u_y} u(t) + (1 - a)F_{yz}(t) = f(t) \quad (2.5)$$

Donde F_y es la fuerza de fluencia y u_y el desplazamiento de fluencia del sistema.

Se deben resolver las ecuaciones 2.1 y 2.5 de manera simultánea por espacio de estados para obtener las fuerzas y desplazamientos en el tiempo del registro sísmico. Para aisladores friccionales se considera desplazamientos de fluencia de 0.1 y 0.2 pulgadas.

2.3.3 Método Numérico de Runge Kutta de 4to Orden

El método de Runge-Kutta de cuarto orden es un procedimiento numérico utilizado para resolver ecuaciones diferenciales ordinarias, especialmente cuando no es posible obtener una solución exacta de forma analítica. Es conocido por su precisión y eficiencia, lo que lo hace ideal para modelos complejos como el Bouc-Wen, donde la no linealidad de las ecuaciones de movimiento complica su resolución.

Este método sirve para aproximar las soluciones de ecuaciones diferenciales evaluando la pendiente de la solución en varios puntos intermedios dentro de un paso. Específicamente, se utiliza para encontrar valores de una función en un intervalo dado, partiendo de una condición inicial.

El procedimiento básico sigue estos pasos:

1. **Paso inicial:** Se parte de una condición conocida, es decir, el valor de la función y su derivada en un punto específico.
2. **Cálculo de pendientes:** A lo largo de un pequeño paso de tiempo, el método calcula cuatro pendientes diferentes (derivadas) evaluadas en puntos intermedios. Estas pendientes se calculan como:

- k_1 , que es la pendiente al inicio del intervalo.

$$k_1 = f(t_n, y_n) \quad (2.6)$$

- k_2 , calculada a partir de una estimación de la pendiente en el punto medio del intervalo.

$$k_2 = f\left(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}k_1\right) \quad (2.7)$$

- k_3 , una segunda pendiente intermedia que también se evalúa en el punto medio, pero utilizando una pendiente mejorada.

$$k_3 = f\left(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}k_2\right) \quad (2.8)$$

- k_4 , la pendiente al final del intervalo.

$$k_4 = f(t_n + h, y_n + hk_3) \quad (2.9)$$

Donde t_n es el instante del tiempo actual, y_n es el valor de la solución en el instante t_n , h es el tamaño del paso, es decir, el intervalo de tiempo que existe entre t_n y t_{n+1}

3. **Promedio ponderado:** Las cuatro pendientes se combinan para dar una aproximación del valor de la función al final del intervalo, utilizando un promedio ponderado que otorga mayor peso a las pendientes intermedias.

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (2.2)$$

4. **Iteración:** Este proceso se repite a lo largo del intervalo deseado, permitiendo una aproximación progresiva de la solución.

En el caso del modelo Bouc-Wen, el método se usa para resolver las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento no lineal de la estructura, calculando los desplazamientos y fuerzas en función del tiempo, lo que permite analizar cómo reacciona el sistema bajo ciertas condiciones y obtener las respuestas.

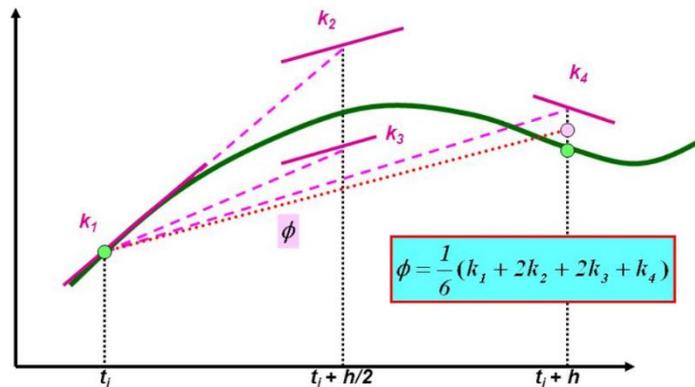


Figura 2.6. Método de Runge Kutta de cuarto orden. Fuente: (Lucero Rojo, 2015)

2.4 Criterios para la evaluación de la capacidad de recentrado para sistemas de aislación sísmica friccionales según estándar ASCE/SEI 7-22

El estándar norteamericano ASCE/SEI 7-22 menciona el siguiente criterio para evaluar la capacidad de recentrado de sistemas de aislación sísmica.

“El sistema de aislación sísmica deberá estar configurado, para producir una fuerza de restauración tal que la fuerza lateral en el desplazamiento máximo correspondiente sea al menos 0,025 W mayor que la fuerza lateral en el 50% del desplazamiento máximo correspondiente” (ASCE, 2022), donde W corresponde el peso que existe sobre el aislador.

CAPÍTULO 3

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Espectro Objetivo

Como punto de partida, se seleccionará un espectro objetivo basado en el estándar ASCE/SEI 7-22, correspondiente a un suelo tipo C ubicado en la ciudad de San Diego en California. El espectro MCEr, asociado a un período de retorno de 2500 años, se calculará multiplicando las ordenadas del espectro de diseño por un factor de 1.5 (ASCE, 2022). Este espectro será el que se va a utilizar para escalar los registros seleccionados.

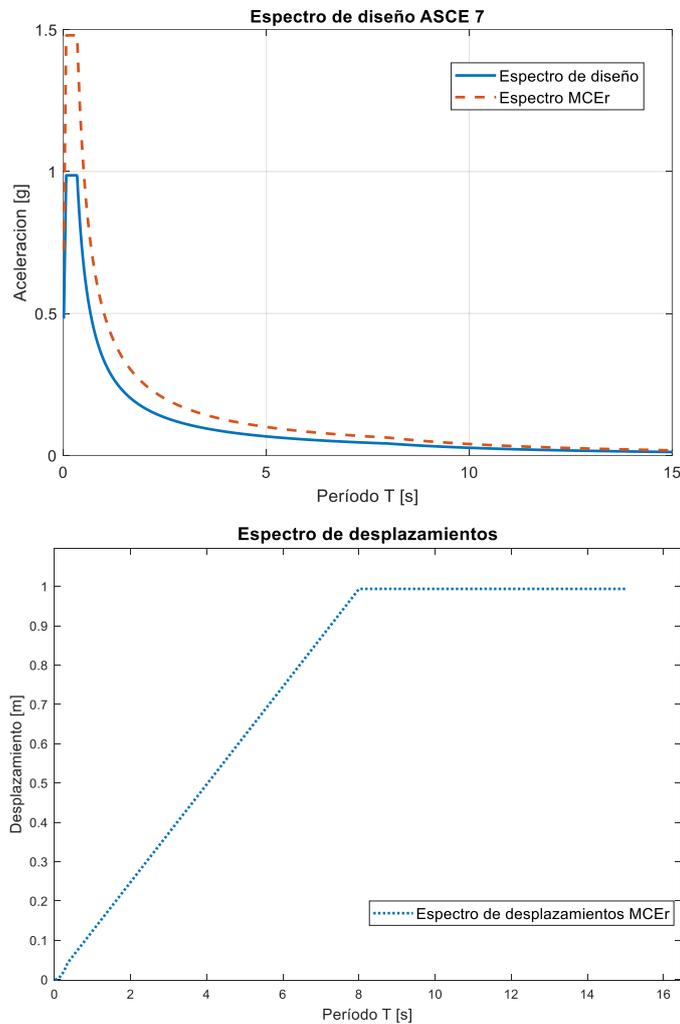


Figura 3.1. Espectro de diseño de aceleraciones y desplazamientos MCEr para un suelo tipo C en San Diego - California.

3.2 Escalamiento de registros en el dominio de la frecuencia

De acuerdo con lo que se menciona en la sección 2.2.1.1 se realiza el escalamiento en el dominio de la frecuencia del grupo de registros seleccionados. Se escala cada par de componentes de manera individual, posteriormente estos registros sísmicos serán utilizados para realizar la metodología ADRS para aisladores de elastoméricos y friccionales con diferentes propiedades características.

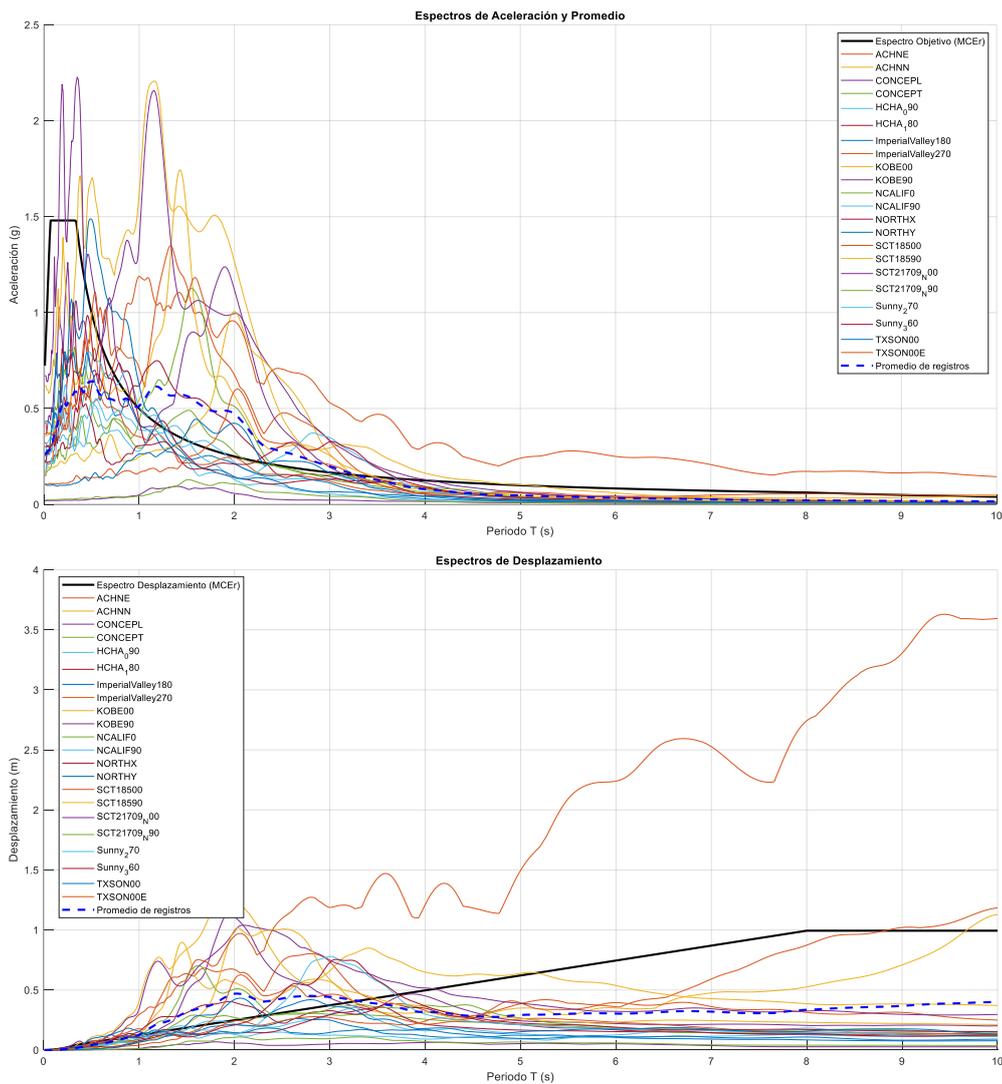


Figura 3.2. Espectro objetivo y espectros de respuesta de aceleración y desplazamiento sin escalar.

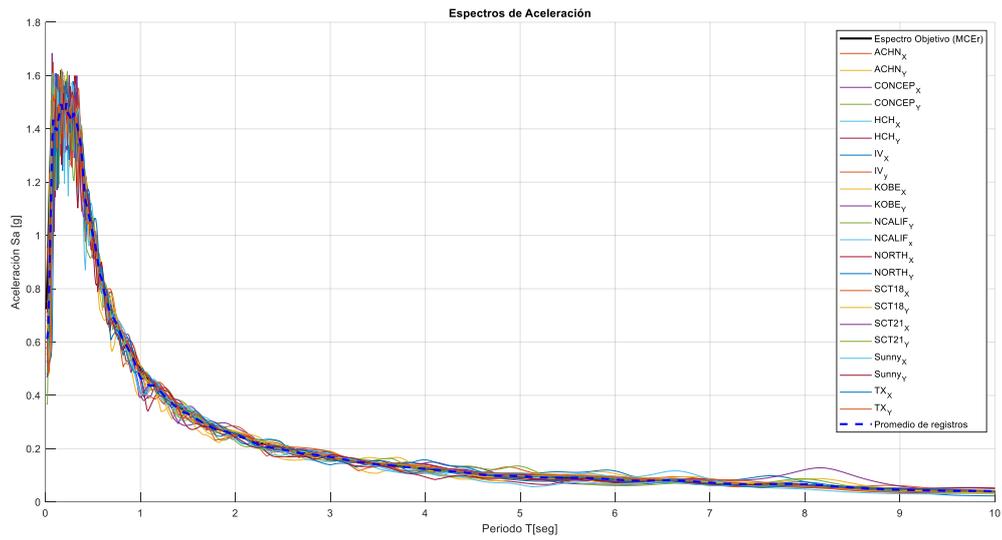


Figura 3.3. Espectro objetivo y espectros de respuesta escalados en el dominio de la frecuencia.

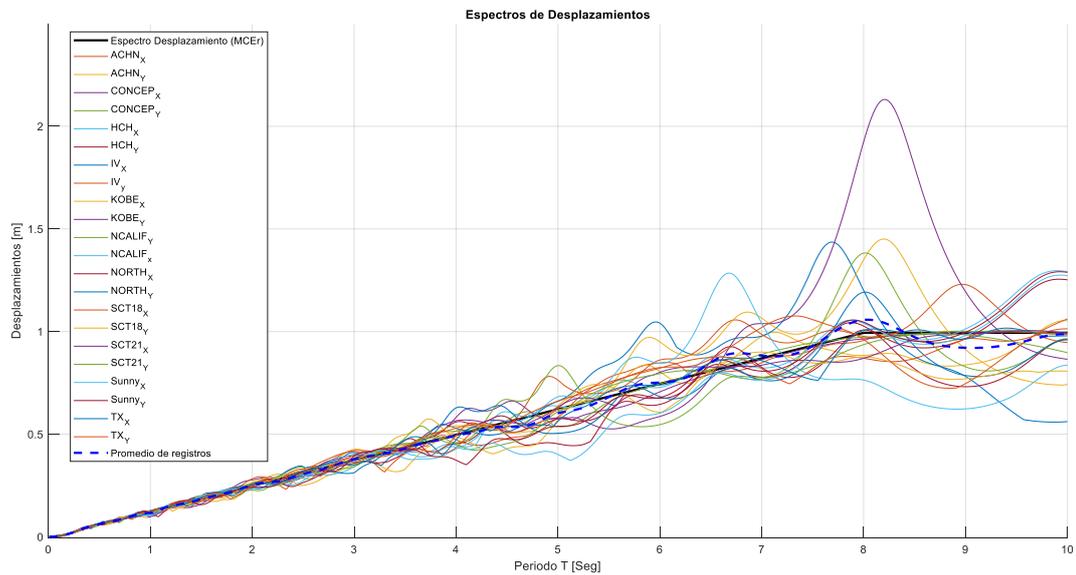


Figura 3.4. Espectro objetivo y espectros de respuesta de desplazamiento obtenidos del escalamiento en el dominio de la frecuencia.

La escalar presenta los espectros de respuesta de los registros sísmicos originales sin escalar junto al espectro objetivo (MCEr). Se puede observar que los registros tienen una distribución amplia y dispersa, con valores que en algunos casos superan significativamente las ordenadas del espectro objetivo y, en otros, quedan por debajo, especialmente en el rango de períodos cortos y medianos. Esto refleja que los registros,

en su estado inicial, no son representativos del espectro objetivo, lo que podría llevar a resultados no consistentes si se utilizan directamente para realizar análisis estructurales. En la Figura 3.3 y Figura 3.4 se presentan los mismos registros, pero después de escalados en el dominio de la frecuencia para ajustarse al espectro objetivo (MCEr). El proceso de escalamiento reduce las diferencias entre los espectros de los registros y el espectro objetivo, logrando una mayor coincidencia en el rango de períodos de interés. Esto permite que los registros sean más representativos de las condiciones sísmicas esperadas según el espectro objetivo, permitiendo un análisis estructural más preciso y consistente con los requerimientos de diseño del sitio. La mejora es especialmente notable en los períodos cortos, donde las ordenadas espectrales de los registros ajustados se alinean mejor con las del espectro objetivo. Los resultados a presentarse por cada modelo corresponden a los registros escalados.

3.3 Curvas ADRS Aisladores Elastoméricos

3.3.1 Análisis Modal Espectral

El análisis modal espectral se realizará con el espectro de desplazamiento de la demanda espectral establecida en la sección 3.1 considerando las propiedades efectivas de cada sistema analizado y el procedimiento del estándar ASCE/SEI 7. La Tabla 3.1 muestra que los valores de desplazamientos se encuentran entre 387 y 147 mm. Estos desplazamientos ocurren para rigideces post fluencia (k_d) de 2 y 10 N/m respectivamente. Los cortes basales se encuentran entre 0.266W y 0.093W que corresponden a rigideces post fluencia (k_d) de 2 y 10 N/m con un Q_d de 2.0%W.

La Figura 3.5 muestra las curvas ADRS y se puede observar que los desplazamientos mas altos corresponden a una fuerza de activacion Q_d de 2.00%W y a medida que se aumenta la fuerza de activación los desplazamientos se van reduciendo. Los cortes basales se van reduciendo a medida que la rigidez post fluencia (k_d) se va incrementando. Dentro de la curva ADRS se puede identificar que hay propiedades que no cumplen con el requisito de restitución que establece la normativa.

**Tabla 3.1. Valores promedio de desplazamientos máximos (mm) y Cortes Basales (V/W).
Análisis modal espectral. Aisladores Elastoméricos.**

		Fuerza Característica (%W)									
		Desplazamiento (mm)					Corte Basal (V/W)				
		2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
K _d (N/m)	2	386.7	304.5	260.7	228.3	203.6	0.099	0.092	0.093	0.097	0.102
	4	321.8	265.3	223.9	197.4	178.3	0.151	0.138	0.131	0.130	0.133
	6	285.2	238.7	207.4	180.6	163.1	0.194	0.176	0.167	0.160	0.160
	8	258.7	221.4	192.7	171.6	152.8	0.231	0.211	0.197	0.190	0.185
	10	241.5	208.1	181.6	162.9	146.7	0.266	0.242	0.225	0.216	0.210

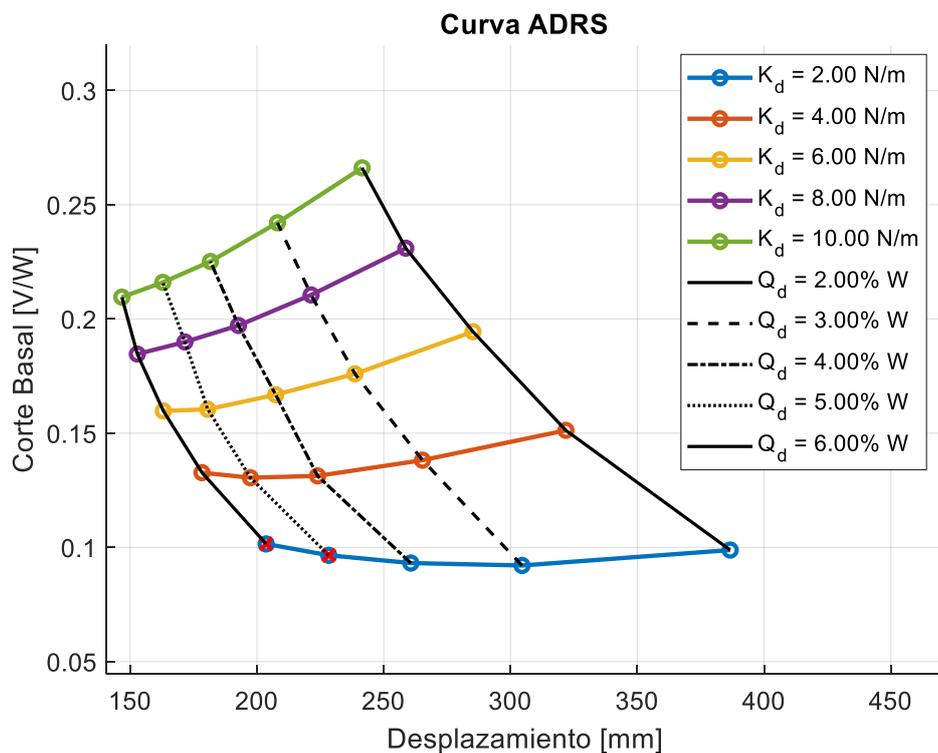


Figura 3.5. Curva ADRS para aisladores elastoméricos usando el análisis espectral

3.3.2 Análisis No Lineal Tiempo Historia

A continuación, se muestran las curvas ADRS para aisladores elastoméricos modelados utilizando el enfoque no lineal histerético de Bouc-Wen. A diferencia del análisis modal espectral, que simplifica el comportamiento del sistema utilizando propiedades efectivas, el modelo de Bouc-Wen captura de manera más precisa la respuesta no lineal del aislador, incluyendo la evolución gradual de la rigidez y la disipación de energía a lo largo del ciclo de carga.

La Tabla 3.2 muestra que los valores máximos de desplazamientos ocurren con una rigidez de K_d de 2.0 N/m y fuerza característica (Q_d) de 2.0%W y el menor desplazamiento sucede con rigidez de K_d de 10 N/m y fuerza característica (Q_d) de 6.0%W dichos desplazamientos son 269 y 100 mm, respectivamente, mientras que el máximo corte basal ocurre con un Q_d de 2.0%W y un k_d de 10 (N/m), el mínimo corte basal es de 0.075W para un Q_d de 2.0%W y un k_d de 2 (N/m).

Tabla 3.2. Valores promedios de desplazamientos máximos (mm) y Cortes Basales (V/W). Considerando 11 pares de registros sísmicos (NLTHA). Aisladores Elastoméricos.

		Fuerza Característica (%W)									
		Desplazamiento (mm)					Corte Basal (V/W)				
		2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
Kd (N/m)	2	268.8	217.4	200.7	191.7	183.5	0.075	0.074	0.081	0.088	0.097
	4	233.8	183.2	161.7	146.6	134.8	0.115	0.104	0.106	0.109	0.114
	6	205.8	167.5	143.1	126.4	117.7	0.146	0.132	0.127	0.127	0.131
	8	198.0	155.5	130.4	115.6	106.0	0.181	0.157	0.146	0.144	0.146
	10	193.8	150.8	124.2	109.1	99.5	0.217	0.184	0.166	0.161	0.161

La Figura 3.6 muestra como varían los desplazamientos y cortes basales en función de los parámetros considerados. Se puede observar que los máximos desplazamientos ocurren para fuerzas características Q_d de 2%W, mientras que los cortes basales se van incrementando a medida que se aumenta la rigidez post fluencia (K_d).

De igual forma dentro de la curva ADRS se muestran puntos marcados con "x" los cuales corresponden a soluciones que no cumplen con la condición de recentrado establecido en la normativa.

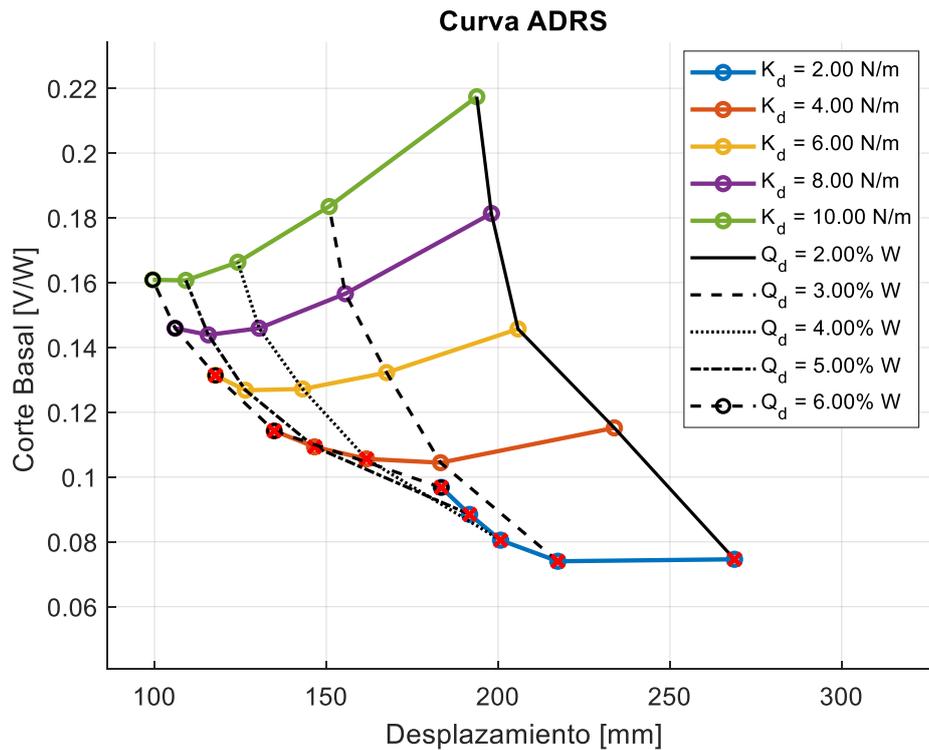


Figura 3.6. Curva ADRS para aisladores Elastoméricos considerando 11 pares de registros sísmicos (NLTHA).

3.4 Curvas ADRS para Aisladores Friccionales

3.4.1 Analisis modal Espectral

De igual manera que los aisladores elastoméricos las curvas generadas mediante el análisis modal espectral se realizará con el espectro de desplazamiento de la demanda espectral establecida.

Se evaluaron las curvas ADRS de sistemas friccionales para un desplazamiento de fluencia (u_y) de 0.1 pulgadas y 0.2 pulgadas. En la Tabla 3.3 muestran los desplazamientos y cortes basales (V/W) para diferentes valores de radio de curvatura y coeficientes de fricción. Se puede observar que utilizar una deformación de fluencia (u_y) de 0.1 pulgadas los desplazamientos varían entre 385 y 105 mm, mientras que los cortes basales se encuentran entre $0.263W$ y $0.097W$. Los máximos valores de desplazamientos corresponden a un radio de curvatura de 5.0 m y un coeficiente de fricción de 0.02, mientras que los mayores cortes basales se encuentran para un radio de curvatura de 1.0 m y un coeficiente de fricción de 0.02.

Al considerar una deformación de fluencia (u_y) de 0.2 pulgadas los desplazamientos varían entre 386 y 106 mm, mientras que los cortes basales se encuentran entre $0.264W$ y $0.097W$. Resultados similares al desplazamiento de fluencia (u_y) de 0.1. Los máximos valores de desplazamientos corresponden a un radio de curvatura de 5.0 m y un coeficiente de fricción de 0.02, mientras que los mayores cortes basales se encuentran para un radio de curvatura de 1.0 m y un coeficiente de fricción de 0.02.

Tabla 3.3. Valores promedios de desplazamientos máximos (mm) y Cortes Basales (V/W). Considerando 11 pares de registros sísmicos (NLTHA). Aisladores friccionales.

		Radio de Curvatura (m)										
		Desplazamiento (mm)					Corte Basal (V/W)					
		1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	
Coeficiente de Fricción μ	Desplazamiento de Fluencia (u_y) de 0.1 pulgadas	0.02	243.3	303.1	336.2	363.0	384.9	0.263	0.172	0.132	0.111	0.097
		0.04	182.6	212.3	227.5	241.1	250.9	0.223	0.146	0.116	0.100	0.090
		0.06	144.9	164.8	174.5	179.8	182.3	0.205	0.142	0.118	0.105	0.096
		0.08	121.5	134.0	137.8	144.1	147.9	0.202	0.147	0.126	0.116	0.110
		0.10	104.8	111.2	118.1	121.9	124.9	0.205	0.156	0.139	0.130	0.125
	Desplazamiento de Fluencia (u_y) de 0.2 pulgadas	0.02	244.4	304.0	337.3	363.9	385.9	0.264	0.172	0.132	0.111	0.097
		0.04	183.5	213.5	229.4	243.1	251.9	0.223	0.147	0.116	0.101	0.090
		0.06	146.2	165.9	175.7	181.0	184.4	0.206	0.143	0.119	0.105	0.097
		0.08	122.5	135.2	139.8	144.7	149.3	0.203	0.148	0.127	0.116	0.110
		0.10	106.0	113.2	118.7	123.2	125.6	0.206	0.157	0.140	0.131	0.125

La Figura 3.7 y la Figura 3.8 muestran las curvas ADRS elaboradas mediante el espectro de desplazamiento del estándar ASCE/SEI 7 establecido en la Figura 3.1. Se observa como varía el desplazamiento y el corte basal de acuerdo con el cambio de radio de curvatura y coeficiente de fricción. Se observa además que los mayores desplazamientos suceden con un coeficiente de fricción (μ) de 0.02 y a medida que se va reduciendo la fricción se va disminuyendo el desplazamiento. Mientras que los mayores cortes basales corresponden a un radio de 1 m y a medida que aumenta el radio de curvatura el corte basal (V/W) tiende a disminuir. Sin embargo, a medida que se van reduciendo los desplazamientos y los cortes basales para las propiedades seleccionadas, el sistema de aislación no cumple con las condiciones de recentrado requerida por ASCE/SEI 7. Las variables seleccionadas que no cumplen con dicha condición se las pueden observar marcadas con "X" dentro de las curvas ADRS.

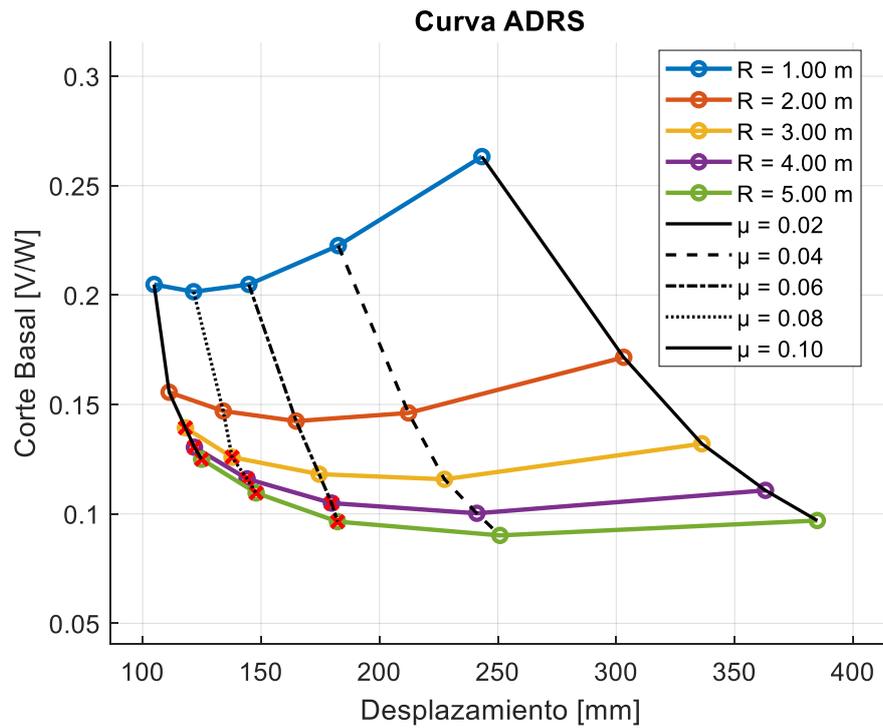


Figura 3.7. Curva ADRS para aisladores friccionales usando propiedades efectivas con desplazamiento de fluencia (u_y) de 0.1 pulgadas.

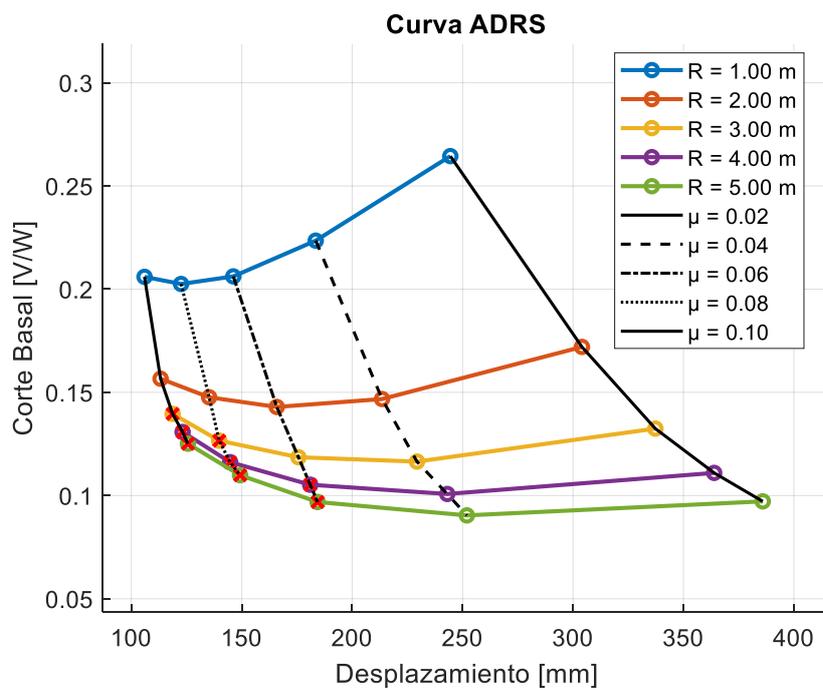


Figura 3.8. Curva ADRS para aisladores friccionales usando propiedades efectivas con desplazamiento de fluencia (u_y) de 0.2 pulgadas.

En la Tabla 3.4 se puede observar la variación de los resultados en función del cambio del desplazamiento de fluencia (u_y). Se puede observar que los cortes basales (V/W) no tienen una variación mayor al 0.6% cuando se modifican los desplazamientos de fluencia (u_y), mientras que en desplazamientos tienen una variación un poco mayor, y superan el 1%, estas variaciones suceden para coeficientes de fricción mayores a 0.04.

Tabla 3.4. Variación de los desplazamientos y cortes basales respecto al desplazamiento de fluencia (u_y) considerado en el análisis modal espectral.

		Radio de Curvatura (m)									
		Desplazamiento (mm)					Corte Basal (V/W)				
		1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
Coeficiente de Fricción μ	0.02	0.5%	0.3%	0.3%	0.2%	0.3%	0.4%	0.3%	0.3%	0.2%	0.2%
	0.04	0.5%	0.6%	0.8%	0.8%	0.4%	0.4%	0.4%	0.5%	0.5%	0.2%
	0.06	0.9%	0.6%	0.7%	0.7%	1.1%	0.6%	0.4%	0.3%	0.3%	0.4%
	0.08	0.8%	0.9%	1.5%	0.4%	0.9%	0.5%	0.4%	0.5%	0.1%	0.2%
	0.10	1.1%	1.8%	0.5%	1.1%	0.5%	0.5%	0.6%	0.2%	0.3%	0.1%

3.4.2 Análisis No Lineal Tiempo Historia

La Figura 3.9 muestra el gráfico ADRS para sistemas de aisladores friccionales, utilizando el modelo no lineal histerético de Bouc-Wen y considerando una deformación de fluencia (u_y) de 0.1. De igual manera la Figura 3.10 muestra la curva ADRS para sistemas friccionales con deformación de fluencia (u_y) igual a 0.2 pulgadas. Este análisis, evalúa la relación entre el desplazamiento del sistema y la fuerza cortante normalizada (V/W), considerando distintas propiedades objetivas que fueron seleccionadas, para este caso son diferentes radios de curvatura (R) y coeficientes de fricción (μ) para los registros sísmicos escalados en el dominio de la frecuencia. Dentro de las curvas, se puede observar la presencia de puntos marcados con una "X" de color rojo. Estos puntos corresponden a condiciones que no cumplen con la capacidad de recentrado establecida por el estándar ASCE/SEI 7-22.

Tabla 3.5. Valores promedios de desplazamientos máximos (mm) y cortes basales (V/W) para todos los valores de Radio de curvatura (R) y Coeficiente de Fricción (u)

			Radio de Curvatura (m)									
			Desplazamiento (mm)					Corte Basal (V/W)				
			1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
Coeficiente de Fricción μ	Desplazamiento de Fluencia (uy) de 0.1 pulgadas	0.02	194.3	210.8	240.9	249.8	256.2	0.214	0.125	0.100	0.082	0.071
		0.04	120.2	136.8	148.1	156.8	161.4	0.160	0.108	0.089	0.079	0.072
		0.06	90.1	102.6	111.3	118.6	124.1	0.150	0.111	0.097	0.090	0.085
		0.08	74.2	83.5	89.7	94.2	97.8	0.154	0.122	0.110	0.104	0.100
		0.10	64.9	70.7	76.1	81.2	85.2	0.165	0.135	0.125	0.120	0.117
	Desplazamiento de Fluencia (uy) de 0.2 pulgadas	0.02	197.3	213.3	245.4	254.3	260.4	0.217	0.127	0.102	0.084	0.072
		0.04	124.8	142.8	153.9	161.2	165.5	0.165	0.111	0.091	0.080	0.073
		0.06	95.0	107.4	115.9	123.8	129.4	0.155	0.114	0.099	0.091	0.086
		0.08	79.2	89.2	98.7	105.7	111.2	0.159	0.125	0.113	0.106	0.102
		0.10	68.5	77.3	84.1	90.2	94.6	0.168	0.139	0.128	0.123	0.119

En la Tabla 3.5 se muestran los desplazamientos y cortes basales (V/W) para diferentes valores de radio de curvatura y coeficientes de fricción. Se puede observar que los desplazamientos varían entre 197 y 65 mm y los cortes basales entre 0.214W y 0.117W. El máximo desplazamiento es de 256 mm y corresponde a un radio de curvatura (R) de 5 m y un coeficiente de fricción de 0.02, esto cuando se considera un desplazamiento de fluencia uy de 0.1 pulgadas. Para un desplazamiento de fluencia uy de 0.2 pulgadas, el desplazamiento máximo es de 260 mm y también corresponde a un radio de curvatura (R) de 5 m y un coeficiente de fricción de 0.02. Los máximos cortes basales (V/W) se encuentran para un Radio de curvatura (R) de 1 m y un coeficiente de fricción de 0.02 para ambos desplazamientos de fluencia considerados anteriormente, dichos valores son 0.214W y 0.217W.

La Figura 3.9 y la Figura 3.10 muestra las curvas ADRS elaboradas para los 11 pares de registros sísmicos y se observa como varía el desplazamiento y el corte basal de acuerdo con la variación de radio de curvatura y coeficiente de fricción. Se observa que los mayores desplazamientos ocurren con un coeficiente de fricción (u) de 0.02 y a medida que se va aumentando la fricción del sistema se va disminuyendo el desplazamiento. Los mayores cortes basales se observan para un radio de 1 m, y a medida que aumenta el radio de curvatura el corte basal (V/W) tiende a disminuir. Sin embargo, a medida que se

van reduciendo los desplazamientos y los cortes basales para las propiedades seleccionadas, el sistema de aislación no cumple con las condiciones de recentrado requeridas por ASCE/SEI 7.

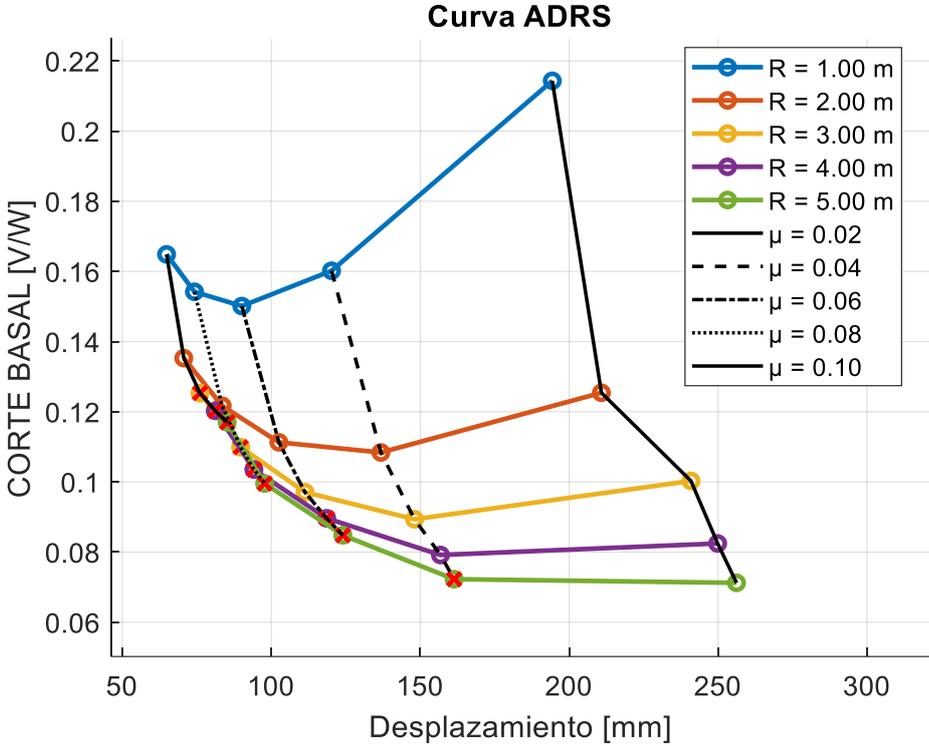


Figura 3.9. Curva ADRS para aisladores para diferentes radios de curvatura (R) y coeficientes de fricción (u) para una deformación de fluencia (uy) de 0.1 pulgadas con 11 pares de registros.

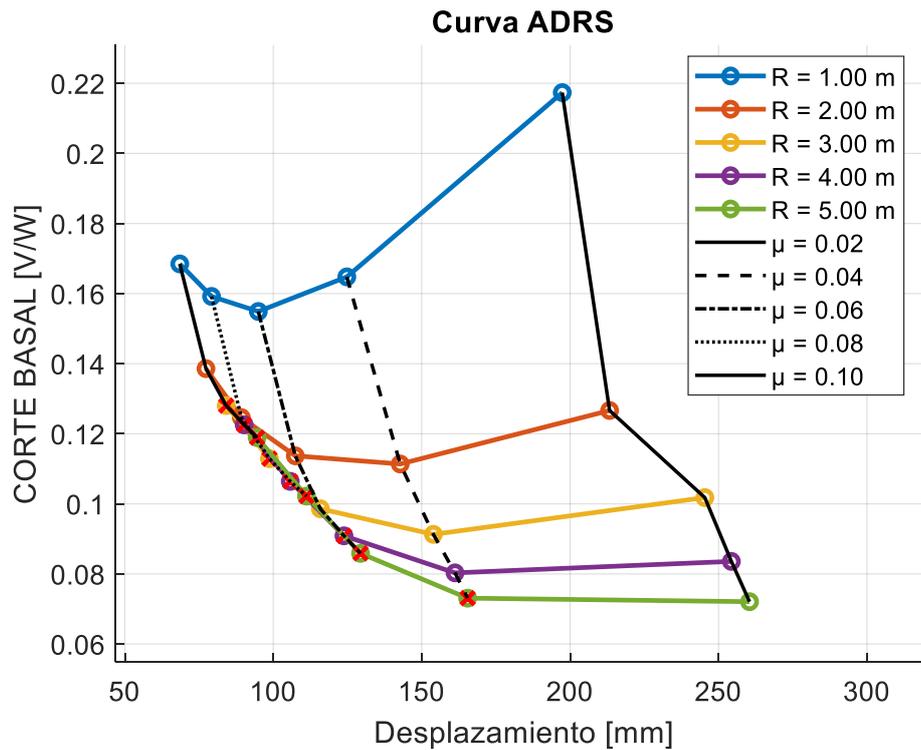


Figura 3.10. Curva ADRS para aisladores para diferentes radios de curvatura (R) y coeficientes de fricción (μ) para una deformación de fluencia (u_y) de 0.2 pulgadas con 11 pares de registros.

La Tabla 3.6 muestra como varían los resultados en función del cambio del desplazamiento de fluencia (u_y) que se considera en el análisis. En términos de desplazamientos, las variaciones con más del 5% ocurren para coeficientes de fricción de 0.08 y 0.10 con radios de curvatura desde 1 m a 5 m, mientras que respecto a variaciones en el corte basal las variaciones son menores al 3.5%, el mayor cambio de respuesta ocurre para radios de curvatura de 1 m y coeficientes de 0.06 y 0.08.

Tabla 3.6. Variación de los desplazamientos y cortes basales respecto al desplazamiento de fluencia (u_y) considerado.

		Radio de Curvatura (m)									
		Desplazamiento (mm)					Corte Basal (V/W)				
		1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
Coeficiente de Fricción μ	0.02	1.5%	1.2%	1.8%	1.8%	1.6%	1.4%	1.0%	1.5%	1.3%	1.2%
	0.04	3.6%	4.2%	3.8%	2.7%	2.5%	2.8%	2.7%	2.1%	1.4%	1.1%
	0.06	5.1%	4.5%	3.9%	4.2%	4.1%	3.1%	2.1%	1.5%	1.4%	1.2%
	0.08	6.3%	6.4%	9.1%	10.9%	12.0%	3.1%	2.3%	2.6%	2.7%	2.6%
	0.10	5.3%	8.6%	9.6%	10.0%	9.9%	2.1%	2.4%	2.1%	1.9%	1.6%

CAPÍTULO 4

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

La metodología ADRS aplicada permite identificar parámetros óptimos para el sistema de aislación elastoméricos y friccionales. Las curvas ADRS generadas, fueron realizadas mediante análisis no lineales de respuesta en el tiempo para un oscilador de un grado de libertad, utilizando 11 pares de registros sísmicos que fueron escalados al espectro objetivo en el dominio de la frecuencia. También se realizaron curvas utilizando el análisis espectral del estándar ASCE/SEI 7.

De acuerdo con los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

- a. Mediante el uso de herramientas de programación y métodos numéricos, el desarrollo de las curvas ADRS, utilizando análisis no lineal de respuesta en el tiempo y análisis modal espectral, permite obtener una visión más completa del comportamiento del sistema de aislación para una amplia variedad de propiedades objetivo seleccionadas, tanto en aisladores elastoméricos como friccionales.
- b. Las curvas ADRS para aisladores elastoméricos, generadas mediante el análisis modal espectral respecto al análisis no lineal de respuesta en el tiempo, muestran variaciones significativas en sus resultados. En el caso de los desplazamientos, las diferencias oscilan entre un 10% y un 33%. Por otro lado, para los cortes basales, las variaciones se encuentran entre un 5% y un 26%. Por lo tanto, las curvas que se realizan mediante el método de análisis de respuesta en el tiempo muestran valores más pequeños de desplazamientos y cortes basales para las mismas propiedades características establecidas.
- c. Las curvas ADRS para aisladores friccionales, generadas mediante el análisis modal espectral respecto al análisis no lineal de respuesta en el tiempo, muestran variaciones en sus resultados. En el caso de los desplazamientos cuando se considera un desplazamiento de fluencia (u_y) de 0.1 pulgadas, las diferencias oscilan entre un 20% y un 37%. Por otro lado, para los cortes basales, las variaciones se encuentran entre un 6% y un 28%. Mientras que para un

desplazamiento de fluencia (u_y) de 0.2 pulgadas los desplazamientos varían entre un 19% y 35%, en cortes basales la diferencia es de 5% a un 27%.

- d. Los resultados obtenidos varían debido a que el método modal espectral se realiza iterativamente para un solo punto de desplazamientos, mientras que el análisis de respuesta en el tiempo muestra el comportamiento no lineal más realista del sistema, a lo largo de la duración del registro.
- e. Las curvas ADRS para aisladores elastoméricos tienen la siguiente tendencia: (i) a medida que aumenta la rigidez post fluencia los cortes basales aumentan, debido a que es directamente proporcional con el periodo post fluencia, es decir a menor periodo se obtiene mayor fuerza cortante; y (ii) a mayor fuerza de activación menores desplazamientos para un mismo valor de rigidez post fluencia (k_d), debido a que a mayor resistencia característica el sistema tendrá que disipar mayor cantidad de energía.
- f. Las curvas ADRS generadas para el caso de aisladores elastoméricos a partir de propiedades características como K_d tiende a ser menos intuitivo que considerar el periodo post fluencia (T_d).
- g. Se observa que cada combinación específica de μ y R para aisladores friccionales modifica el comportamiento de las curvas ADRS, alterando tanto el desplazamiento máximo como el corte basal del sistema. Esta metodología aplicada genera curvas ADRS que consideran de forma precisa los efectos combinados de μ y R . Al capturar la interacción no lineal entre estos parámetros, se garantiza una representación más aproximada del comportamiento real del sistema, lo que permite optimizar el diseño de los aisladores friccionales y reducir la incertidumbre en la selección de sus propiedades.
- h. Las curvas ADRS para aisladores friccionales tienen la siguiente tendencia: (i) a medida que se reduce el radio de curvatura el corte basal aumenta; y (ii) a mayor coeficiente de fricción se obtiene menores desplazamientos para un mismo valor radio de curvatura (R), debido a que, si la plataforma cóncava tiene mucha fricción, el péndulo del aislador se desliza menos.
- i. La variación en el desplazamiento de fluencia (u_y) considerado, tanto para sistemas americanos o europeos, muestran variaciones en los resultados cuando se realiza un análisis no lineal de respuesta en el tiempo. Se puede observar que

existen casos donde el desplazamiento puede variar un 12% en función del valor de fluencia considerado. Para cortes basales puede existir una variación de un 3.1% como máximo. Es decir, existe mayor variación en los resultados de desplazamientos.

- j. En las curvas ADRS generadas mediante el análisis modal espectral, al considerar un desplazamiento de fluencia (uy) de 0.1 pulgadas, no se observa una variación significativa en los resultados. Las diferencias en desplazamiento no superan el 1.5%, mientras que las variaciones en los cortes basales son inferiores al 0.6%, en comparación con los resultados obtenidos al considerar una deformación de fluencia (uy) de 0.2 pulgadas.
- k. Para determinar un diseño preliminar del sistema de aislación de fricción es importante definir la deformación de fluencia debido a que se observan diferencias en las respuestas obtenidas.
- l. En las gráficas ADRS generadas para las propiedades objetivo seleccionadas de aisladores friccionales y elastoméricos se puede observar que a desplazamientos pequeños, los sistemas de aislación no cumplen con la condición de restitución establecidas en la normativa. Por lo tanto, esta zona se la puede considerar no factible para el diseño de sistemas de aislación.
- m. Realizar las curvas ADRS mediante el análisis de respuesta en el tiempo permite visualizar mejor el comportamiento del sistema de aislación sísmica para la demanda considerada y considerar un diseño óptimo y aproximado a la demanda del sitio.

4.2 Recomendaciones

El proyecto desarrollado propone continuar con la investigación para profundizar en los resultados obtenidos mediante la metodología ADRS. A continuación, se plantean las siguientes recomendaciones:

- a. Se propone que se continúe con la investigación de las curvas ADRS para diferentes sitios y niveles de amenaza sísmica, con el objetivo de obtener resultados más generales, y caracterizar las curvas ADRS para los diseños de sistemas y demandas de los sistemas de aislación sísmica elastoméricos y friccionales.

- b. En esta investigación se realiza escalamiento en el dominio de la frecuencia, se recomienda realizar curvas ADRS con escalamiento en el dominio del tiempo para revisar si existen variación de los resultados.
- c. Considerar un nivel de amortiguamiento en los análisis no lineal en los sistemas de aislación sísmica.
- d. En la presente investigación las curvas ADRS muestran el límite de recentrado establecido en la normativa. Se recomienda limitar aún más el espacio de solución o propiedades objetivo para el desarrollo de las curvas ADRS, con el fin de alcanzar un diseño más aproximado del sistema de aislación.
- e. Realizar propuestas de curvas ADRS considerando otros parámetros de propiedades objetivo seleccionadas.

BIBLIOGRAFÍA

- Al Atik, L., & Norman, A. (1 de August de 2010). An Improved Method for Nonstationary Spectral Matching. *Sage Journals*, 26(3), 601-617. doi:<http://dx.doi.org/10.1193/1.3459159>
- ASCE. (2022). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. Virginia: American Society Of Civil Engineers.
- Black , C., Aiken, I., Whittaker, D., Retamales, R., & Jones, L. (2017). An Improved Design Methodology For Seismic Isolation Systems Using Nonlinear Response Spectra. *16th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Cámara Chilena de la Construcción. (2011). Protección Sísmica de Estructuras. *Documentos Técnicos No 29*, 43.
- Charalampakis, A., & Koumoussis, V. (2008). Identification of Bouc–Wen hysteretic systems by a hybrid evolutionary algorithm. *Journal of Sound and Vibration*, 314(3-5), 571-585.
- Cueva, C., & Andres, C. (2015). Análisis, Comportamiento y Diseño de Edificaciones Con Aisladores de Péndulo Friccional. *Pontificia Universidad Católica Del Perú*, 118.
- Dai Nguyen, X., & Guizani, L. (22 de May de 2021). Optimal seismic isolation characteristics for bridges in moderate and high seismicity areas. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 642-655.
- Jones, L., & Whittaker , D. (2013). Design Spectra for Seismic Isolation Systems in Christchurch, New Zealand . *2013 NZSEE Conference*.
- Jones, L., & Whittaker, D. (2014). Displacement and acceleration design spectra for seismic isolation systems in Christchurch. *2014 NZSEE Conference*.
- Jones, L., Aiken, I., Black, C., Whittaker, D., & Şadan, B. (2015). Nonlinear Response Spectra For Isolation System Design: Case Studies In Turkey, California And New Zealand. *3rd Turkish Conference on Earthquake Engineering and Seismology*.
- Li, H.-g., & Meng, G. (October de 2007). Nonlinear dynamics of a SDOF oscillator with Bouc–Wen hysteresis. *Chaos, Solitons & Fractals*, 34(2), 337-343.
- Lucero Rojo, F. (2015). *Slideshare*. Obtenido de <https://slideplayer.es/slide/4437702/>

Marshall, L., & Naeim, F. (February de 1995). Use of Desing Spectrum - Compatible Time Histories In Analysis of Structures. 11(1).

Reyes, J. (2021). *Evaluación del desplazamiento máximo de un sistema de aislacion en funcion del ángulo de aplicacion del registro sísmico*. Guayaquil: Universidad Católica Santiago de Guayaquil.

ANEXOS

ANEXO A

Tabla A.1. 1. Variación de los resultados de las curvas ADRS del método modal espectral respecto al análisis no lineal tiempo historia para aisladores elastoméricos.

		Fuerza Característica (%W)									
		Desplazamiento (mm)					Corte Basal (V/W)				
		2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
Kd (N/m)	2	30%	29%	23%	16%	10%	24%	20%	14%	8%	5%
	4	27%	31%	28%	26%	24%	24%	24%	20%	16%	14%
	6	28%	30%	31%	30%	28%	25%	25%	24%	21%	18%
	8	23%	30%	32%	33%	31%	21%	26%	26%	24%	21%
	10	20%	28%	32%	33%	32%	18%	24%	26%	26%	23%

Tabla A.1. 2 Variación de los resultados de las curvas ADRS del método modal espectral respecto al análisis no lineal tiempo historia para aisladores friccionales y diferentes desplazamientos de fluencia (uy).

		Radio de Curvatura (m)										
		Desplazamiento (mm)					Corte Basal (V/W)					
		1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	
Coeficiente de Fricción μ	Desplazamiento de Fluencia (uy) de 0.1 pulgadas	0.02	20%	30%	28%	31%	33%	19%	27%	24%	26%	27%
		0.04	34%	36%	35%	35%	36%	28%	26%	23%	21%	20%
		0.06	38%	38%	36%	34%	32%	27%	22%	18%	15%	12%
		0.08	39%	38%	35%	35%	34%	23%	17%	13%	11%	9%
		0.10	38%	36%	36%	33%	32%	20%	13%	10%	8%	6%
	Desplazamiento de Fluencia (uy) de 0.2 pulgadas	0.02	19%	30%	27%	30%	33%	18%	26%	23%	25%	26%
		0.04	32%	33%	33%	34%	34%	26%	24%	22%	20%	19%
		0.06	35%	35%	34%	32%	30%	25%	20%	17%	14%	11%
		0.08	35%	34%	29%	27%	26%	21%	16%	11%	8%	7%
		0.10	35%	32%	29%	27%	25%	18%	12%	8%	6%	5%

CERTIFICACIÓN DE APROBACIÓN DE PROYECTO DE TITULACIÓN

Santiago, 21 de diciembre de 2024

Ph. D.

Natividad Leonor García Troncoso

Coordinador(a) del Programa

Maestría en Estructuras Civiles Sismorresistentes

En su Despacho

De mi consideración:

Yo, **Rodrigo Alfonso Retamales Saavedra**, de nacionalidad chilena, portador del pasaporte No. **F57267093**, en mi calidad de Tutor del Proyecto de Titulación correspondiente a la Maestría en **Estructuras Civiles Sismorresistentes**, I Cohorte, de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), certifico lo siguiente:

Con fecha 10 de agosto del 2024, acepté la tutoría del estudiante Jorge Andrés Reyes Sánchez con CI: 0924613334, para el desarrollo del proyecto de titulación denominado: *“Aplicación de la Metodología de Espectros de Respuesta No Lineales de Aceleración-Desplazamiento (ADRS) para Diseño por Desempeño de Sistemas de Aislación Sísmica.”*

Certifico que este trabajo de titulación fue supervisado de manera continua durante todo su desarrollo, revisado en cada una de sus etapas y, finalmente, aprobado por mi persona en su versión final, entregada el día 17 de diciembre del 2024.

Particular que pongo en su conocimiento para los fines pertinentes.

Atentamente,

Powered by  Firma electrónica avanzada
RODRIGO ALFONSO
RETAMALES SAAVEDRA
2024.12.21 16:56:28 -0300

Rodrigo Alfonso Retamales Saavedra

Tutor del Proyecto

Correo electrónico: roretama@espol.edu.ec; rodrigo.retamales@gmail.com