

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Estudio paramétrico de estructuras con aislación sísmica considerando el uso de factores de reducción de resistencia mediante modelos de 2GDL

PROYECTO DE GRADUACIÓN

Previo la obtención del Título de:

Máster en Estructuras Civiles Sismorresistentes

Presentado por:

Dennis Xavier Garces Andrade

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2024

DEDICATORIA

Dedico este proyecto con todo mi amor y gratitud a mis hijos y a mi querido abuelo.

Ustedes son mi mayor inspiración y motivación para seguir adelante. Este logro es la prueba de que, con esfuerzo, dedicación y perseverancia, los sueños sí se pueden alcanzar. Cada paso en este camino lo he dado pensando en su futuro y en ser un ejemplo digno para ustedes.

Son el motor de mi vida, y mi mayor anhelo es que siempre se sientan orgullosos de mí, tanto como yo me siento orgulloso de ser su padre.

Con amor infinito y eterno, este proyecto es para ustedes.

AGRADECIMIENTOS

Mi más profundo agradecimiento a mi madre, por su amor incondicional y su apoyo constante, y a la madre de mis hijos, por su comprensión y fortaleza a lo largo de este proceso. Extiendo también mi gratitud al Ing. Luis Villavicencio Caveró, tutor de este proyecto, cuya guía y dedicación fueron esenciales para la culminación de este trabajo.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Dennis Xavier Garces Andrade* 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”

Ing. Dennis Xavier Garces Andrade

EVALUADORES

Ing. Nadia Quijano Arteaga M.Sc

PROFESOR DE LA MATERIA

Ing. Samantha Hidalgo Astudillo M.Sc

PROFESOR DE LA MATERIA

Ing. Luis Fernando Villavicencio M.Sc

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El presente proyecto analiza el impacto de los factores de reducción de resistencia (R) en estructuras aisladas sísmicamente, utilizando modelos de dos grados de libertad (2GDL) implementados en OpenSeesPy. El objetivo principal es optimizar el diseño estructural y garantizar un desempeño sísmico seguro y eficiente, abordando las incertidumbres relacionadas con los valores de R recomendados por normativas internacionales, como la ASCE 7-16.

Para ello, se desarrollaron modelos matemáticos simplificados de 1 y 2 grados de libertad para estructuras con y sin sistemas de aislamiento. El análisis no lineal tiempo-historia empleó registros sísmicos reales, evaluando respuestas dinámicas como desplazamiento, fuerzas y ductilidad. El estudio utilizó espectros elásticos, algoritmos de integración directa y amortiguamiento proporcional para simular el comportamiento estructural bajo cargas sísmicas.

Los resultados evidencian que los sistemas de aislamiento reducen significativamente desplazamientos y demandas de ductilidad en la mayoría de los casos. Sin embargo, cuando los factores R superan ciertos valores, las demandas de ductilidad en estructuras aisladas pueden ser mayores que en estructuras de base fija, dependiendo de las características del aislador y el periodo natural. Esto resalta la necesidad de precaución en el diseño.

Se concluye que el aislamiento sísmico es efectivo para optimizar el desempeño estructural, aunque su efectividad disminuye en periodos largos o con factores R altos. Se recomienda ampliar los estudios con más registros sísmicos y explorar variaciones en la rigidez de los sistemas de aislamiento.

Palabras Clave: Aislamiento sísmico, OpenSeesPy, ductilidad, reducción de resistencia, análisis no lineal.

ABSTRACT

His project analyzes the impact of reduction factors (R) on seismically isolated structures using two-degree-of-freedom (2DOF) models implemented in OpenSeesPy. The main objective is to optimize structural design and ensure safe and efficient seismic performance, addressing uncertainties related to the R -values recommended by international standards, such as ASCE 7-16.

For this purpose, simplified mathematical models of 1 and 2 degrees of freedom were developed for structures with and without isolation systems. Nonlinear time-history analyses were performed using real seismic records to evaluate dynamic responses such as displacement, forces, and ductility. The study employed elastic response spectra, direct integration algorithms, and proportional damping to simulate the structural behavior under seismic loads.

The results demonstrate that isolation systems significantly reduce displacements and ductility demands in most cases. However, when R -factors exceed certain values, ductility demands in isolated structures may surpass those of fixed-base structures, depending on the isolator's characteristics and the natural period. This highlights the need for careful design considerations.

It is concluded that seismic isolation is effective in optimizing structural performance, although its effectiveness diminishes with longer periods or higher R -factors. It is recommended to extend the analysis with additional seismic records and explore variations in the stiffness of isolation systems to enhance their design.

Keywords: *Seismic isolation, reduction factors, ductility, parametric analysis, OpenSeesPy.*

ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES.....	5
RESUMEN	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
CAPÍTULO 1	10
1. Introducción	10
1.1 Antecedentes	11
1.2 Estudios previos	12
1.3 Problemática a resolver	13
1.4 Justificación	14
1.5 Objetivos	15
1.5.1 Objetivo General	15
1.5.2 Objetivos Específicos	16
CAPÍTULO 2	17
2. Desarrollo del proyecto	17
2.1 Marco conceptual	17
2.2 Comportamiento no Lineal de una Estructura con Sistemas de Aislación Sísmica	20
2.3 Modelo no Lineal de 1 Grado de Libertad (1-DOF)	21
2.4 Modelo no Lineal de 2 Grados de Libertad (2-DOF)	22

2.5	Sistema de Aislación Sísmica.....	23
2.6	Marco metodológico	26
2.7	Trabajo de laboratorio o gabinete	27
2.8	Tabulación de datos	30
2.9	Solución a diseñar	30
CAPÍTULO 3		31
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	31
3.1	Resultados	31
3.2	Resultados en estructuras analizadas con el Registro APED-E.....	31
3.2.1	Modelo realizado para OpenseesPy 1GDL	32
3.2.2	Modelo realizado para OpenseesPy 2GDL	33
3.3	Resultados en estructuras analizadas con el Registro APED-E.....	33
3.3.1	Estructuras con Periodo de 1.0s y Aislador Tipo 1.....	38
3.3.2	Estructuras con Periodo de 1.0 y Aislador Tipo 2.....	39
3.4	Resultados en estructuras analizadas con el Registro AMNT-N	40
3.4.1	Estructuras con Periodo de 1.5s y Aislador Tipo 1	41
3.4.2	Estructuras con Periodo de 1.0s y Aislador Tipo 2	43
3.5	Interpretación de Resultados del Análisis	44
CAPÍTULO 4		46
4.	Conclusiones Y Recomendaciones.....	46
4.1	Conclusiones	46
4.2	Recomendaciones	47
BIBLIOGRAFÍA		48
5.	Referencias.....	48
6.	ANEXOS.....	51
6.1.1	Estructuras con Periodo de 1.5s y Aislador Tipo 1.....	53

6.1.2	Estructuras con Periodo de 2.0s y Aislador Tipo 1.....	55
6.1.3	Estructuras con Periodo de 0.5s y Aislador Tipo 2.....	57
6.1.4	Estructuras con Periodo de 1.5 y Aislador Tipo 2.....	59
6.1.5	Estructuras con Periodo de 2.0s y Aislador Tipo 2.....	61
6.1.6	Estructuras con Periodo de 0.5s y Aislador Tipo 1.....	63
6.1.7	Estructuras con Periodo de 1.0s y Aislador Tipo 1.....	65
6.1.8	Estructuras con Periodo de 2.0s y Aislador Tipo 1.....	67
6.1.9	Estructuras con Periodo de 0.5s y Aislador Tipo 2.....	69
6.1.10	Estructuras con Periodo de 1.5s y Aislador Tipo 2.....	71
6.1.11	Estructuras con Periodo de 2.0s y Aislador Tipo 2.....	73
6.2	Modelo realizado para OpenseesPy 1GDL.....	74
6.3	Modelo realizado para OpenseesPy 2GDL.....	75

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASTM	American Society for Testing and Materials
NACE	National Association of Corrosion Engineer
SSC	Electrodo de Plata Cloruro de Plata
CSE	Electrodo de Cobre Sulfato de Cobre
HWL	High Water Level
LWL	Low Water Level
CIS	Inspección pasó a paso, medición de potenciales de encendido
MPY	Milésimas de pulgadas por año
Q_d/W	Fuerza de activación del aislador
T_{na}	Periodo estructura base de fija
d_{ye_elast}	desplazamiento elástico de la estructura no aislada $R=1$
F_{ye_elast}	Fuerza elástica de la estructura no aislada $R=1$
R_{na}	Factor de reducción de respuesta no aislado
μ_{na}	Razón de ductilidad para estructura de base fija
d_{yea_elast}	Desplazamiento elástico de la estructura aislada $R=1$
F_{yea_elast}	Fuerza elástica de la estructura aislada $R=1$
d_{mas_ea}	Desplazamiento máximo de la estructura aislada
D_{max_ais}	Desplazamiento máximo del aislador
R_a	Factor de reducción de resistencia para estructura aislada
μ_{na}	Razón de ductilidad para estructura aislada

SIMBOLOGÍA

mil	Milésima de pulgada
mg	Miligramo
pH	Potencial de Hidrógeno
m	Metro
mV	Milivoltio
Cu	Cobre
Ni	Níquel
C	Carbono
Mn	Manganeso
P	Fósforo

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Aislador de caucho con núcleo de plomo.....	19
Figura 2.2 Aislador de fricción de péndulo doble	20
Figura 2.3 Aislador de fricción de péndulo doble	21
Figura 2.4 Aislador de fricción de péndulo doble	22
Figura 2.5 Sistema de dos grados de libertad simulado una estructura aislada.....	22
Figura 2.6 Simulación en OpenseesPy del sistema de 2GDL.....	23
Figura 2.7 Modelo bilineal asignado al sistema de aislación sísmica.....	24
Figura 2.8 Registro APED-E. Sismo de Pedernales del 16 de Abril de 2016.	28
Figura 2.9 Registro AMANT-N. Sismo de Pedernales del 16 de Abril de 2016.	28
Figura 3.1 Modelo realizado para OpenseesPy 1GDL.....	32
Figura 3.2 Modelo realizado para OpenseesPy 2GDL.....	33
Figura 3.3: Respuesta histerética de estructura de base fija para $T_{na}=0.5s$ y $R_{na}=4$	35
Figura 3.4 Respuesta histerética del Aislador Tipo 1	36
Figura 3.5 Respuesta histerética de la estructura con $T_{na} =0.5s$ y $R_{na}=4$	37
Figura 3.6 Razón de ductilidad vs. Factores de Reducción de Resistencia	38
Figura 3.7 Razón de ductilidad vs. Factores de Reducción de Resistencia	40
Figura 3.8 Razón de ductilidad vs. Factores de Reducción de Resistencia	42
Figura 3.9 Razón de ductilidad vs. Factores de Reducción de Resistencia	44
Figura 6.1 Razón de ductilidad vs. Factores de Reducción de Resistencia	52
Figura 6.2 Razón de ductilidad vs. Factores de Reducción de Resistencia	54
Figura 6.3 Razón de ductilidad vs. Factores de Reducción de Resistencia	56
Figura 6.4 Razón de ductilidad vs. Factores de Reducción de Resistencia	58
Figura 6.5 Razón de ductilidad vs. Factores de Reducción de Resistencia	60
Figura 6.6 Razón de ductilidad vs. Factores de Reducción de Resistencia	62
Figura 6.7 Razón de ductilidad vs. Factores de Reducción de Resistencia	64
Figura 6.8 Razón de ductilidad vs. Factores de Reducción de Resistencia	66
Figura 6.9 Razón de ductilidad vs. Factores de Reducción de Resistencia	68
Figura 6.10 Razón de ductilidad vs. Factores de Reducción de Resistencia	70
Figura 6.11 Razón de ductilidad vs. Factores de Reducción de Resistencia	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1	Parámetros de análisis y resultados para estructura con $T_{na}=1.0s$	35
Tabla 3-2	Parámetros de análisis y resultados para estructura con $T_{na}=1.0s$	39
Tabla 3-3	Parámetros de análisis y resultados para estructura con $T_{na}=1.5s$	41
Tabla 3-4	Parámetros de análisis y resultados para estructura con $T_{na}=1.0s$	43
Tabla 6-1	Parámetros de análisis y resultados para estructura con $T_{na}=0.5s$	51
Tabla 6-2	Parámetros de análisis y resultados para estructura con $T_{na}=1.5s$	53
Tabla 6-3	Parámetros de análisis y resultados para estructura con $T_{na}=2.0s$	55
Tabla 6-4	Parámetros de análisis y resultados para estructura con $T_{na}=0.5s$	57
Tabla 6-5	Parámetros de análisis y resultados para estructura con $T_{na}=1.5s$	59
Tabla 6-6	Parámetros de análisis y resultados para estructura con $T_{na}=2.0s$	61
Tabla 6-7	Parámetros de análisis y resultados para estructura con $T_{na}=0.5s$	63
Tabla 6-8	Parámetros de análisis y resultados para estructura con $T_{na}=1.0s$	65
Tabla 6-9	Parámetros de análisis y resultados para estructura con $T_{na}=2.0s$	67
Tabla 6-10	Parámetros de análisis y resultados para estructura con $T_{na}=0.5s$	69
Tabla 6-11	Parámetros de análisis y resultados para estructura con $T_{na}=1.5s$	71
Tabla 6-12	Parámetros de análisis y resultados para estructura con $T_{na}=2.0s$	73
Tabla 6-13	Razón de ductilidad vs. Factores de Reducción de Resistencia	74

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La aislación sísmica es una técnica madura en ingeniería estructural considerada para minimizar el impacto de los terremotos en las edificaciones. Este enfoque consiste en incorporar dispositivos especializados, conocidos como aisladores sísmicos, que se instalan entre la base de la estructura y el suelo. Estos dispositivos permiten desligar la estructura del movimiento del suelo durante un evento sísmico, reduciendo significativamente las fuerzas que se transmiten a la edificación y, por ende, disminuyendo los daños estructurales y no estructurales (Skinner et al., 1993). Este sistema es especialmente eficaz en edificaciones críticas como hospitales, puentes y centros de operación, donde alcanzar la funcionalidad después de un terremoto es esencial (Kelly & Naeim, 1999). Su aplicación se basa en el principio de desacoplar los movimientos del terreno de los de la estructura, lo que mejora tanto la seguridad como el desempeño sísmico.

Los estándares actuales, como la ASCE 7-16, permiten la aplicación de factores de reducción de resistencia (R) en el diseño de estructuras aisladas, con valores que no superan $R = 2$. Sin embargo, se ha realizado un análisis limitado sobre cómo la variación de estos factores afecta el comportamiento dinámico no lineal de las estructuras aisladas. Esta falta de investigación detallada genera incertidumbre en la capacidad de diseño para garantizar un comportamiento adecuado bajo demandas sísmicas extremas.

Este trabajo presenta un análisis no lineal tiempo-historia en un sistema idealizado de dos grados de libertad (2GDL) para evaluar el impacto de la variación del factor de reducción de resistencia (R) en el desempeño sísmico de estructuras aisladas. A través de un análisis paramétrico, se evaluarán las respuestas dinámicas clave, como los desplazamientos, la ductilidad y las fuerzas internas. El objetivo es determinar si los valores de diseño actuales son adecuados para alcanzar niveles satisfactorios de seguridad estructural y eficiencia en el diseño sísmico.

1.1 Antecedentes

El diseño de estructuras sismorresistentes ha avanzado significativamente con la implementación de sistemas de aislamiento sísmico, los cuales han demostrado ser eficaces en la reducción de demandas de desplazamiento y aceleración en edificaciones durante eventos sísmicos. Estudios recientes han examinado el comportamiento de estos sistemas bajo condiciones extremas. (Bustamante R, 2022) evaluaron la respuesta inelástica de superestructuras aisladas mediante espectros de respuesta no lineales, demostrando cómo las cargas sísmicas extremas pueden afectar el rendimiento de las estructuras aisladas.

En otro estudio, (Bustamante R E. K., 2024) analizaron edificaciones diseñadas bajo normativas antiguas, lo que reveló la necesidad de actualizar los criterios de diseño para mejorar el comportamiento sísmico, especialmente en lo que respecta a la demanda de desplazamiento y la interacción con elementos adyacentes.

Aunque estos estudios han abordado aspectos clave del comportamiento de las estructuras aisladas, la influencia del factor de modificación de respuesta de resistencia (R) en la demanda de ductilidad ha sido poco explorada. (TORO, 2024) investigó el impacto de los factores de reducción de resistencia (R) en la respuesta de estructuras aisladas, aportando un análisis preliminar sobre cómo estos valores afectan la eficiencia del diseño estructural.

La presente investigación, titulada "Estudio paramétrico de estructuras con aislación sísmica considerando el uso de factores de reducción de resistencia mediante modelos de 2GDL", busca profundizar en este tema mediante simulaciones avanzadas en OpenSees. El objetivo es evaluar si los valores del factor R propuestos por ASCE 7-16 son adecuados para alcanzar un diseño estructural óptimo y proponer mejoras que ajusten estos criterios a las condiciones sísmicas reales.

1.2 Estudios previos

En relación con el tema "Análisis de la Respuesta Dinámica de Edificios con Sistemas de Aislamiento Sísmico Utilizando Modelos Simplificados", los estudios previos relevantes abarcan investigaciones teóricas, normativas y experimentales, que han permitido comprender el comportamiento de los sistemas de aislamiento sísmico y su aplicación en estructuras. A continuación, se presentan los principales estudios relacionados:

I. Investigaciones sobre sistemas de aislamiento sísmico:

Los sistemas de aislamiento sísmico, como los aisladores de base de goma laminada (LRB) y los de péndulo de fricción (FPS), han sido ampliamente estudiados en investigaciones internacionales, destacándose su capacidad para reducir significativamente las fuerzas sísmicas en las estructuras. Estudios como los de Kelly (1993) y Naeim y Kelly (1999) han establecido las bases para el diseño y análisis de estos sistemas.

II. Aplicación de modelos simplificados en estructuras aisladas:

Los modelos de 2 grados de libertad (2GDL) han demostrado ser herramientas efectivas para estudiar el comportamiento dinámico de estructuras aisladas. Investigaciones como las de Zhang y Makris (2001) han explorado la interacción dinámica entre la superestructura y los aisladores, lo que permite simplificar análisis complejos y reducir tiempos computacionales.

III. Normativas internacionales:

Documentos como ASCE/SEI 7-16 y EN 15129 proporcionan directrices para el diseño de sistemas de aislamiento sísmico, incluyendo el uso de modelos matemáticos simplificados para evaluar su desempeño. Estas normativas también abordan la selección de registros sísmicos y la evaluación de la demanda de ductilidad.

IV. Análisis tiempo-historia no lineal:

El análisis tiempo-historia se ha consolidado como la metodología más precisa para evaluar la respuesta de estructuras con sistemas de aislamiento sísmico bajo excitaciones reales. Estudios como los de Constantinou et al. (1998) han utilizado esta técnica para validar modelos simplificados.

V. Estudios locales:

En países de alta sismicidad, como Japón, Chile y Ecuador, se han realizado investigaciones orientadas a adaptar los sistemas de aislamiento sísmico a las condiciones específicas del suelo y los registros sísmicos locales. Trabajos recientes en Ecuador han explorado la viabilidad económica y técnica de implementar estos sistemas en edificaciones de importancia estratégica, como hospitales y escuelas.

VI. Software especializado en análisis dinámico:

Herramientas como OpenSeesPy han sido utilizadas ampliamente en estudios paramétricos, facilitando la implementación de modelos 2GDL y el análisis de registros sísmicos. Investigaciones recientes han demostrado su capacidad para realizar análisis no lineales con alta precisión y versatilidad.

Estos estudios previos constituyen la base técnica y científica que respalda el desarrollo de este proyecto de tesis, proporcionando un marco sólido para la implementación de modelos simplificados y el análisis dinámico de estructuras con aislamiento sísmico.

1.3 Problemática a resolver

La aislación sísmica se ha implementado para mitigar las demandas sísmicas en superestructuras. No obstante, la ASCE7-16 establece un factor de modificación de la respuesta (R) igual a 2 para el diseño de estas estructuras, generando incertidumbres sobre si este valor es apropiado para lograr un comportamiento adecuado en términos de ductilidad.

La demanda de ductilidad, que refleja la capacidad de una estructura para deformarse sin alcanzar el colapso, es esencial para asegurar su integridad estructural durante un sismo. Se espera que las estructuras con aislamiento sísmico trabajen

predominantemente en su rango elástico. Sin embargo, el uso de un factor de reducción de resistencia $R=2$ puede subestimar las demandas de ductilidad cuando se presentan terremotos excepcionalmente severos, comprometiendo la capacidad de la superestructura para resistir deformaciones inelásticas significativas.

Dado que la ASCE7-16 no proporciona evidencia concluyente de este valor para todas las condiciones sísmicas, persiste un margen de incertidumbre en su aplicación. Por lo tanto, es necesario un análisis paramétrico utilizando modelos de dos grados de libertad (2GDL) para evaluar el impacto del factor R en la demanda de ductilidad. Esto permitirá determinar si el valor de $R = 2$ es adecuado para alcanzar un desempeño sísmico seguro en estructuras con aislación sísmica.

1.4 Justificación

El diseño de estructuras con aislamiento sísmico ha mostrado ser una solución eficaz para reducir las fuerzas y desplazamientos inducidos por sismos. En particular, los sistemas de aislamiento permiten que las estructuras incursionen en el rango no lineal de manera controlada, sin comprometer su integridad estructural. La normativa ASCE 7-16 permite el uso de factores de reducción de resistencia (R) en el diseño de estructuras aisladas, con valores de R igual o menores a 2, para garantizar que la estructura mantenga un adecuado desempeño sísmico.

Sin embargo, a medida que se busca optimizar los diseños estructurales y mejorar su eficiencia económica, se ha planteado la posibilidad de incrementar dichos factores de reducción de resistencia, lo que implicaría un mayor aprovechamiento de la capacidad de deformación inelástica de las estructuras. Este enfoque, aunque ventajoso desde el punto de vista económico, conlleva el riesgo de aumentar la demanda de ductilidad en las estructuras, lo que podría comprometer su comportamiento sísmico.

En este sentido, la presente investigación busca llenar un vacío en el conocimiento actual, al evaluar el impacto que tiene la variación de los factores de reducción de resistencia en la demanda de ductilidad de estructuras con aislamiento sísmico. Para

ello, se desarrollará un análisis paramétrico utilizando modelos de dos grados de libertad (2GDL) y simulaciones no lineales en OpenSees. Se espera que los resultados obtenidos permitan determinar si los valores de R recomendados en la normativa son adecuados o si deben ser ajustados para lograr un diseño seguro y eficiente.

Este estudio es relevante no solo para la optimización de los sistemas de aislamiento, sino también para contribuir a la mejora de las normativas actuales, ofreciendo una base técnica para el diseño de estructuras aisladas que logren un equilibrio entre seguridad, funcionalidad y costo. Asimismo, los análisis comparativos entre estructuras con base fija y estructuras con aislamiento proporcionarán una visión clara de los beneficios que los sistemas de aislamiento pueden ofrecer en distintos tipos de edificaciones.

La meta de esta investigación es contribuir al desarrollo de infraestructuras más seguras y resilientes, optimizando el diseño de sistemas de aislamiento sísmico para mejorar la capacidad de las estructuras de soportar eventos sísmicos, reduciendo riesgos para las comunidades y promoviendo ciudades sostenibles. Esto se alinea directamente con el *Objetivo de Desarrollo Sostenible 9*, al enfocarse en fortalecer la resiliencia y sostenibilidad de las infraestructuras, Protegiendo su funcionalidad y calidad frente a desastres naturales. Además, busca fomentar la innovación en el ámbito de la ingeniería estructural, integrando eficiencia técnica y responsabilidad social para apoyar el desarrollo de entornos urbanos más preparados, seguros y sostenibles.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Evaluar el impacto de los factores de reducción de resistencia en la demanda de desplazamiento y ductilidad de estructuras aisladas sísmicamente mediante simulaciones numéricas avanzadas en OpenSees, utilizando modelos de dos grados de libertad (2GDL), con el fin de optimizar el diseño estructural y alcanzar un desempeño sísmico seguro y eficiente.

1.5.2 Objetivos Específicos

Elaborar modelos matemáticos simplificados de 1 grado de libertad (1-DOF) para estructuras de base fija y de 2 grados de libertad (2-DOF) para estructuras con sistemas de aislación.

Evaluar el comportamiento de estructuras de base fija y con sistemas de aislación ante demandas de registros sísmicos mediante análisis no lineal tiempo-historia.

Determinar las respuestas dinámicas de desplazamiento, fuerzas y ductilidad en estructuras aisladas con distintos periodos naturales, para varios niveles de fluencia, sometidas a terremotos.

Comprobar las relaciones entre las demandas de ductilidad, factores de reducción y periodo natural de la estructura, para obtener rangos de periodo o reducciones de resistencia donde haya mayor incidencia en la respuesta.

CAPÍTULO 2

2. DESARROLLO DEL PROYECTO

2.1 Marco conceptual

En el análisis estructural, comprender la respuesta elástica y no lineal de una estructura es fundamental para evaluar su comportamiento sísmico. La respuesta elástica se define como el rango en el cual la estructura responde proporcionalmente a las cargas aplicadas y retorna a su estado inicial una vez que estas cargas se eliminan (Chopra, 2012). En el contexto de cargas sísmicas, esta respuesta puede variar considerablemente según si la estructura está sobre una base fija o equipada con aisladores sísmicos. Los sistemas de aislación no solo afectan la dinámica estructural al desacoplar los movimientos del terreno de la superestructura, sino que también contribuyen a reducir la demanda de deformaciones no lineales en la estructura (Skinner et al., 1993).

El país de Sudamérica en donde se ha extendido ampliamente el uso de aisladores en estructuras es Chile (Almazán, 2010). Durante el terremoto del 27 de febrero de 2010, de Magnitud, $M_w=8.8$, se pudo evidenciar la eficacia de los aisladores colocados en las estructuras. Durante el mencionado terremoto todos los dispositivos de aislamiento sísmico se activaron y el desempeño tanto de las estructuras como de los componentes no estructurales fue excelente en todos los casos (Almazán JL, 2010)

Los aisladores sísmicos son dispositivos diseñados para minimizar las fuerzas transmitidas desde la base de una edificación durante un evento sísmico. Estos dispositivos logran este efecto al incrementar el período de vibración de la estructura, reduciendo así la aceleración que experimenta la superestructura (Skinner et al., 1993). Por esta razón, el análisis detallado de las demandas de desplazamiento y ductilidad de la estructura, tanto en condiciones aisladas como no aisladas, resulta esencial para evaluar la efectividad y el desempeño de los sistemas de aislación sísmica (Kelly & Naeim, 1999).

En términos de diseño estructural, (Morejón-Blanco, 2018) se utilizan los llamados factores de reducción de respuesta (R), que permiten modificar el diseño elástico idealizado para obtener un comportamiento más ajustado a la realidad, utilizando menos recursos materiales como el acero, sin comprometer la seguridad estructural. Cuando se aplica un factor R , la respuesta elástica de la estructura es reducida, lo que implica que la estructura soportará las mismas cargas sísmicas, pero con menos material, a cambio de permitir cierto nivel de deformación inelástica.

Al comparar una estructura con y sin aisladores, la demanda de fuerza y desplazamiento cambia considerablemente. En una estructura con base fija, la demanda elástica es mayor debido a la interacción directa con las fuerzas sísmicas. En cambio, al introducir aisladores, la demanda se reduce significativamente, disminuyendo la necesidad de refuerzos como el acero, ya que la estructura se mantiene en un régimen predominantemente elástico hasta niveles más altos de carga sísmica.

Los aisladores sísmicos ayudan a desacoplar la estructura del suelo durante un terremoto, reduciendo la aceleración que se transmite desde el suelo hasta el edificio. Este desacoplamiento permite que los valores de aceleración en la base del edificio sean mucho menores que los experimentados en el terreno circundante. Además, los aisladores tienen la capacidad de regresar a su posición original una vez que el evento sísmico ha terminado, lo que significa que el sistema es "auto-recentrante".

Estos dispositivos actúan disipando la energía que el terremoto introduce en el sistema estructural, protegiendo al edificio. Funcionan como fusibles, absorbiendo la energía sísmica, pero sin sufrir daños permanentes. Los aisladores se diseñan y prueban rigurosamente en laboratorios para garantizar su eficacia.

Los tipos más comunes de aisladores se clasifican según sus materiales de fabricación. Entre ellos se destacan los aisladores de caucho con núcleo de plomo (LRB) y los aisladores con sistema de péndulo de fricción. Los primeros utilizan

plomo para mejorar la disipación de energía, mientras que los segundos se fabrican con acero y superficies deslizantes que imitan el movimiento de un péndulo.

Una clasificación más detallada incluye:

- Aisladores de caucho con núcleo de plomo (LRB)
- Aisladores de caucho sin núcleo de plomo
- Aisladores de caucho con núcleo de material polimérico (PPRB)
- Aisladores de caucho de alto amortiguamiento (HDRB)
- Aisladores de fricción de péndulo simple
- Aisladores de fricción de doble péndulo
- Aisladores de fricción de péndulo triple



Figura 2.1 Aislador de caucho con núcleo de plomo.

Elaborado por: (MAGEBA GROUP, 2016)



Figura 2.2 Aislador de fricción de péndulo doble

Elaborado por: (MAGEBA GROUP, 2016)

La selección de un tipo específico de aislador sísmico para un proyecto depende de las características particulares del proyecto y de los resultados obtenidos a partir de análisis detallados, tal como lo exige la normativa aplicable. Estos análisis se llevan a cabo con el fin de evaluar el comportamiento de la estructura con la inclusión de un sistema de aislamiento sísmico.

El proceso de diseño de un sistema de aislamiento suele ser iterativo, es decir, requiere de múltiples ajustes y cálculos, lo que implica un uso significativo de recursos computacionales y tiempo. A medida que se avanza en el diseño, los ingenieros evalúan diferentes configuraciones hasta encontrar la solución más adecuada para reducir al mínimo las fuerzas sísmicas transmitidas y asegurar la integridad estructural.

2.2 Comportamiento no Lineal de una Estructura con Sistemas de Aislación Sísmica

Estudios previos indican que el comportamiento no lineal de una estructura con un sistema de aislamiento es notablemente distinto en comparación con una estructura sobre base fija (Vassiliou et al., 2013).

Los códigos de diseño sísmico en países como Europa, Japón y Estados Unidos establecen límites en la reducción de la resistencia permitida en estructuras con sistemas de aislamiento. Por ejemplo, el Eurocódigo permite un factor máximo de comportamiento

de 1.5 para edificios con aislamiento sísmico, lo cual es similar al Código de Construcción Japonés. La normativa ASCE7-16 en los Estados Unidos permite que el factor de reducción de resistencia para una estructura aislada sea 0.375 veces el valor de una estructura de base fija, con un límite máximo de 2.

2.3 Modelo no Lineal de 1 Grado de Libertad (1-DOF)

Para definir los límites en las reducciones de resistencia y realizar comparaciones con estructuras de base fija, se desarrolló un modelo de 1 grado de libertad (1GDL). Este modelo permite simular y estudiar el comportamiento de las estructuras al modificar el factor de reducción de resistencia R_{na}

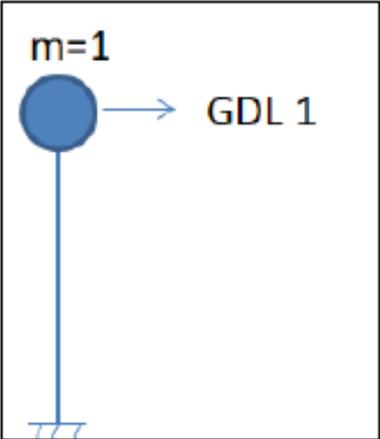


Figura 2.3 Aislador de fricción de péndulo doble
Elaborado por: (TORO, 2024)

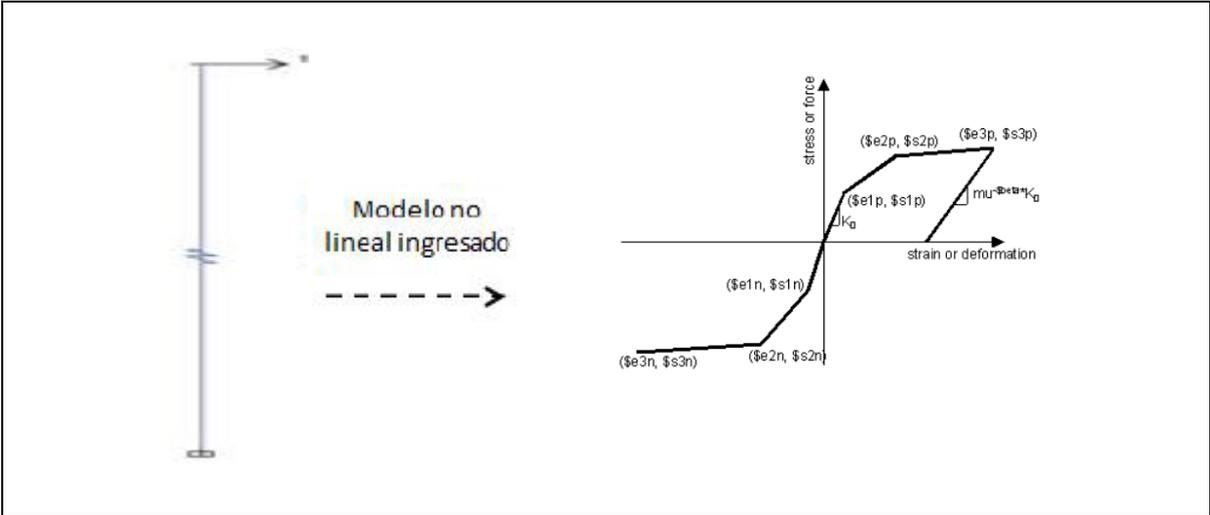


Figura 2.4 Aislador de fricción de péndulo doble

Elaborado por: Dennis Garcés

El modelo fue realizado en OpenSeesPy, que desarrolla no linealidad mediante la incorporación de un modelo trilineal constitutivo fuerza-deformación plástico (EPP). Esta configuración permite simular de manera precisa el comportamiento no lineal de los elementos estructurales, capturando tanto la respuesta elástica como inelástica bajo cargas sísmicas. OpenSeesPy ofrece flexibilidad para implementar estos modelos y realizar análisis avanzados de estructuras sometidas a demandas sísmicas.

2.4 Modelo no Lineal de 2 Grados de Libertad (2-DOF)

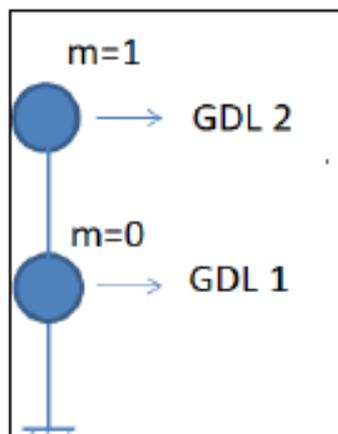


Figura 2.5 Sistema de dos grados de libertad simulado una estructura aislada

Elaborado por: (TORO, 2024)

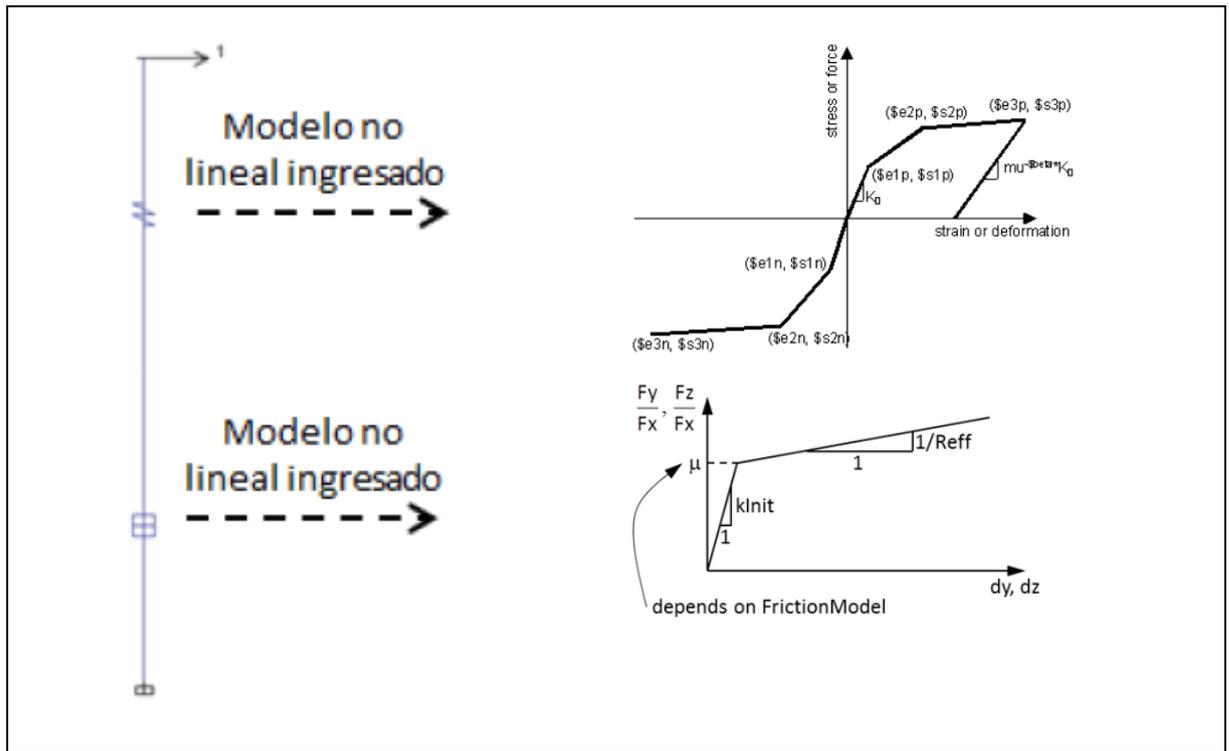


Figura 2.6 Simulación en OpenseesPy del sistema de 2GDL

Elaborado por: Dennis Garcés

2.5 Sistema de Aislación Sísmica

Se utilizó un modelo bilineal para modelar el sistema de aislación sísmica, permitiendo representar el comportamiento del aislador bajo cargas sísmicas. Este enfoque es comúnmente utilizado para simular la respuesta histerética de sistemas de aislamiento, capturando tanto la rigidez inicial como la reducción de rigidez al alcanzar un determinado límite de desplazamiento.

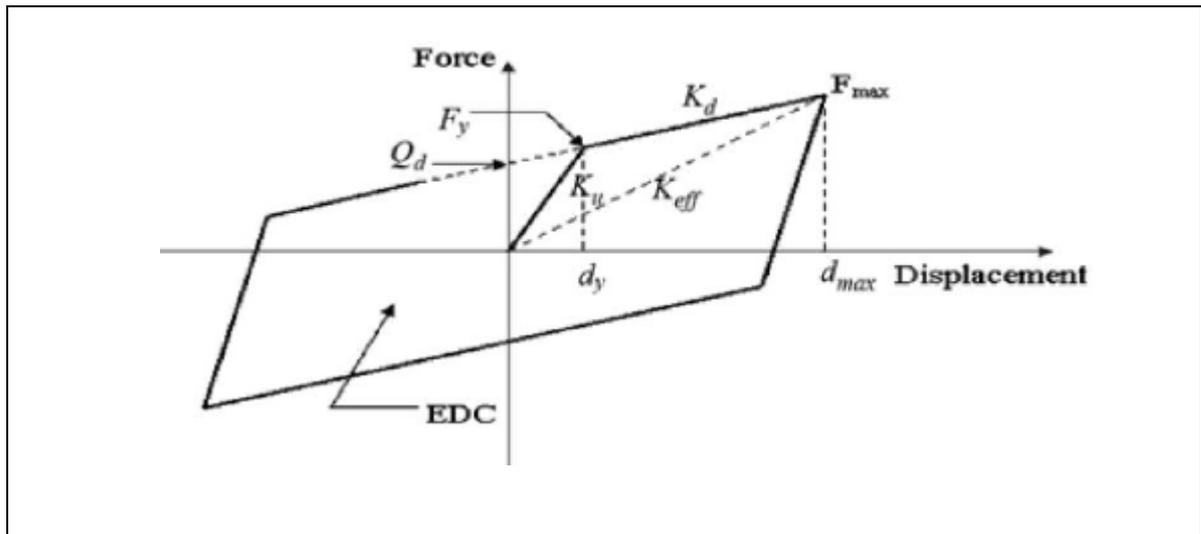


Figura 2.7 Modelo bilineal asignado al sistema de aislamiento sísmica

Elaborado por: Dennis Garcés

La definición de las variables del modelo bilineal para aisladores sísmicos es la siguiente:

F_y : Fuerza de fluencia.

K_u : Rigidez inicial elástica.

K_d : Rigidez post-elástica

K_{eff} : Rigidez efectiva.

d_y : Desplazamiento de fluencia.

d_{max} : Desplazamiento máximo.

Q_d : Resistencia característica. También denominada fuerza de activación del aislador

Factores de Reducción de Resuesta y Razón de Ductilidad

Para el diseño estructural en sismorresistencia, los códigos normativos de muchos países emplean factores de reducción de resistencia (R), con el objetivo de aprovechar la plasticidad de los materiales estructurales. Este enfoque permite que los elementos soporten mayores deformaciones, superando los límites elásticos de fluencia. En

particular, materiales como el acero de refuerzo y el acero estructural pueden desarrollar importantes niveles de plasticidad antes de llegar a su falla.

En el caso de Ecuador, la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-15) establece valores de R que pueden alcanzar hasta 8, dependiendo del sistema estructural utilizado. El uso de estos factores permite el diseño de estructuras más económicas, ya que se reduce la demanda sísmica de manera controlada.

Dado que el uso de R lleva a las estructuras a un comportamiento no lineal, es esencial que los desplazamientos máximos estén bajo control para evitar el colapso estructural. Por esta razón, las normativas limitan el uso de R, asociándolo generalmente a una razón de ductilidad, que se define como la relación entre el desplazamiento máximo que experimenta una estructura y su desplazamiento en el punto de fluencia. Esto asegura que las estructuras puedan deformarse de manera controlada y segura bajo eventos sísmicos. (TORO, 2024)

$$\mu = \frac{\text{Máximo Desplazamiento de la estructura}}{\text{Desplazamiento de fluencia de la estructura}}$$

En esta sección se explica que μ representa la razón de ductilidad para las estructuras. Las normativas de diseño también resaltan la importancia de los detalles constructivos, los cuales deben ajustarse al sistema estructural elegido y su nivel de reducción de resistencia. Esto permite que la estructura pueda soportar las deformaciones requeridas sin colapsar, cumpliendo con los valores de ductilidad establecidos.

Estudios han demostrado que, cuanto mayor es el factor de reducción de resistencia, mayor es la demanda de ductilidad que se genera. Por esta razón, un mayor factor de reducción implica una mayor exigencia en los detalles constructivos y consideraciones adicionales para el diseño.

En este estudio se definen dos factores clave de reducción de resistencia:

- R_{na} : Factor de reducción para estructuras de base fija o no aisladas.
- R_a : Factor de reducción para estructuras aisladas.

Asimismo, se definen las razones de ductilidad:

- μ_{na} : Razón de ductilidad para estructuras de base fija o no aisladas.
- μ_a : Razón de ductilidad para estructuras aisladas.

2.6 Marco metodológico

El marco metodológico para este proyecto de investigación se desarrolla en base a un enfoque tipo experimental, utilizando modelos de simulación computacional para evaluar el comportamiento estructural de edificios con y sin sistemas de aislamiento sísmico. El propósito principal es analizar cómo los factores de reducción de respuesta (R) influyen en la demanda de desplazamiento y ductilidad de las estructuras. El proceso metodológico incluye la utilización de OpenSeesPy para la simulación, un software reconocido en el ámbito de la ingeniería estructural, que permite la realización de análisis dinámicos avanzados en estructuras sometidas a cargas sísmicas.

El análisis estructural de las edificaciones se realizó mediante el método dinámico no lineal tiempo-historia, utilizando la técnica de integración directa. Para este caso, se empleó el algoritmo de Hilber-Hughes-Taylor (HHT), el cual es comúnmente utilizado en análisis dinámicos debido a su estabilidad en la integración de las ecuaciones de movimiento.

En cuanto al amortiguamiento, se utilizó el amortiguamiento de Rayleigh, que es proporcional tanto a la masa como a la rigidez de la estructura. La fracción de amortiguamiento adoptada fue del 5% (0.05), un valor estándar en análisis sísmicos, aplicable al periodo seleccionado de la estructura. Este tipo de amortiguamiento es adecuado para captar las propiedades de disipación de energía inherentes a la estructura durante un sismo

2.7 Trabajo de laboratorio o gabinete

El trabajo metodológico se llevó a cabo en gabinete, utilizando OpenSeesPy para las simulaciones. No se realizaron ensayos experimentales ni trabajo de campo, ya que el enfoque del proyecto se centró en simulaciones numéricas basadas en modelos teóricos. Los datos procesados incluyen:

2.7.1.1 Registros Sísmicos Utilizados

Los registros de aceleraciones utilizados en la presente investigación fueron obtenidos de los datos del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN) y pertenecen al Terremoto de Pedernales del 16 de abril de 2016.

Las características de los registros se muestran a continuación:

Registro de la Estación APED, dirección Este-Oeste:

- Duración del registro: 175 s
- Máxima aceleración del registro, PGA = 1.40g
- Máxima velocidad del registro, PGV = 96.48 cm/s
- Máxima desplazamiento del registro, PGD = 25.72 cm

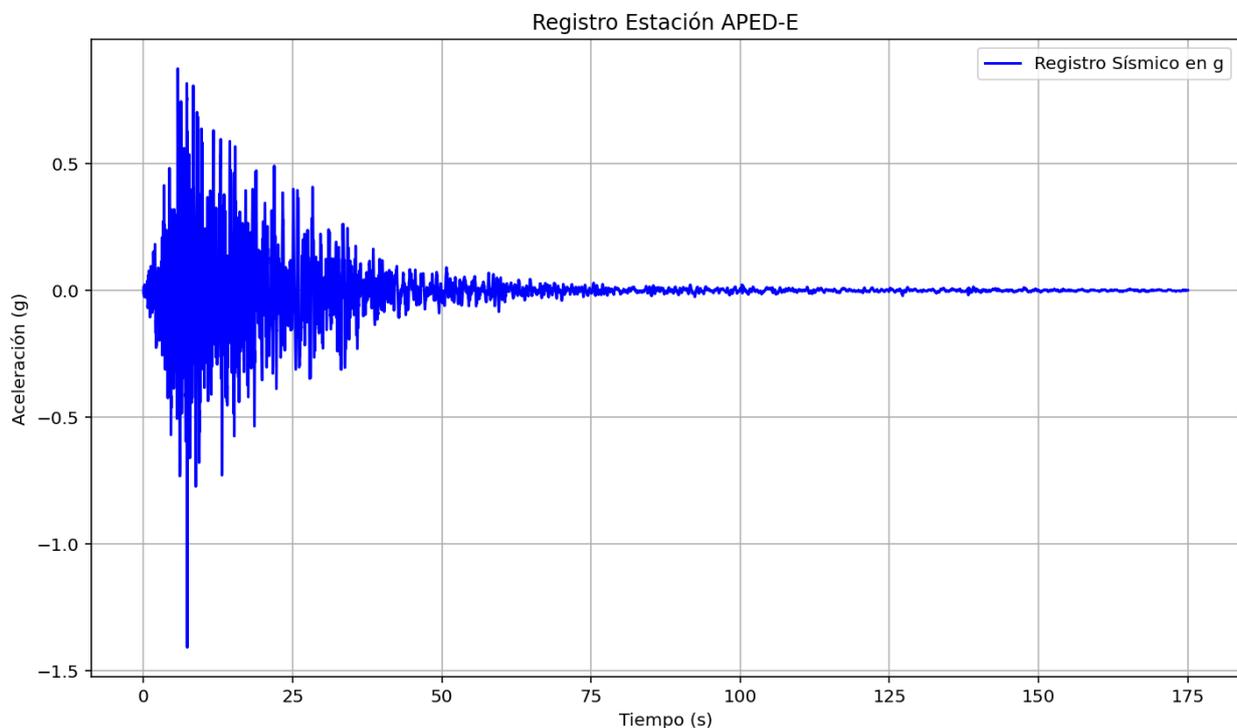


Figura 2.8 Registro APED-E. Sismo de Pedernales del 16 de Abril de 2016.

Elaborado por: Dennis Garces

Registro de la Estación AMANT-N, dirección Norte-Este:

- Duración del registro: 50 s
- Máxima aceleración del registro, PGA = 0.52g
- Máxima velocidad del registro, PGV = 43.10 cm/s
- Máxima desplazamiento del registro, PGD = 20.08 cm

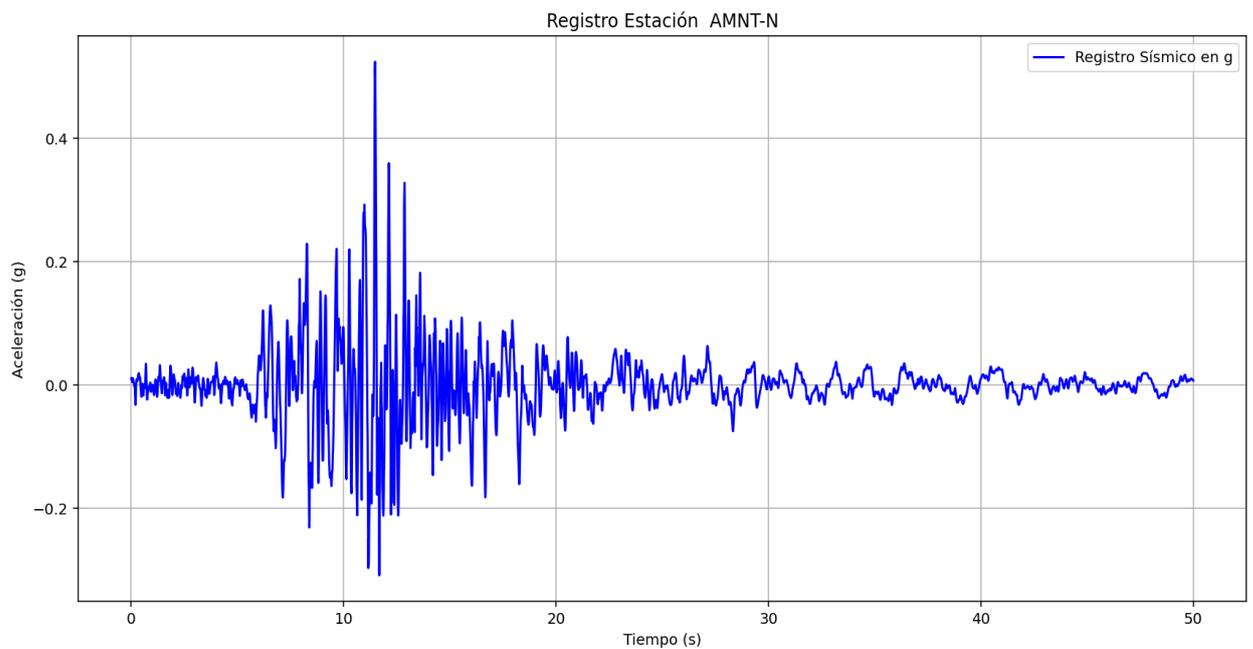


Figura 2.9 Registro AMANT-N. Sismo de Pedernales del 16 de Abril de 2016.

Elaborado por: Dennis Garces

2.7.1.2 Asignación de Masa:

En ambos sistemas, tanto en el de 1 grado de libertad (1GDL) como en el de 2 grados de libertad (2GDL), se asigna una masa unitaria con el objetivo de generalizar los análisis realizados. Esta masa es de m.

$$m = 1 \text{ KN} * \frac{\text{s}^2}{\text{m}}$$

2.7.1.3 Características de las Estructuras y de los Sistemas de Aislación:

Para el análisis de las estructuras, se consideraron rigideces iniciales correspondientes a la zona elástica, en función de tres períodos naturales para la estructura no aislada: 0.5 s, 1.0 s, 1.5s y 2.0 s. Las rigideces asociadas son: 158.0 KN/m, 39.5 KN/m, 17.5 KN/m y 9.9 KN/m.

Estas rigideces se mantienen constantes en el análisis no lineal, variando únicamente el factor de reducción de rigidez.

En cuanto al sistema de aislamiento, se realizó un prediseño que permite alcanzar un período de aproximadamente 3.9 segundos, con un desplazamiento de 0.25 m. Dado que se ha definido una masa unitaria, se prevé que todas las características del aislador estén directamente proporcionales a dicha masa, lo que garantiza consistencia en los análisis estructurales.

Los resultados obtenidos para los aisladores muestran las siguientes características:

Aislador Tipo 1:

Rigidez inicial elástica: 26.8 kN/m

Fuerza de fluencia: 0.26 kN

Rigidez post-elástica: 2.68 kN/m

Rigidez efectiva: 3.67 kN/m

Relación entre la fuerza de activación del aislador y el peso (Q_d/W): 0.03

Aislador Tipo 2:

Rigidez inicial: 40.2 kN/m

Fuerza de fluencia: 0.39 kN

Rigidez post-elástica: 4.02 kN/m

Rigidez efectiva: 5.50 kN/m

Relación entre la fuerza de activación del aislador y el peso (Q_d/W): 0.04

2.8 Tabulación de datos

Los datos obtenidos de las simulaciones fueron procesados y tabulados para realizar comparaciones entre los distintos modelos. Los resultados fueron organizados en tablas que incluyen parámetros clave como la fuerza máxima elástica (FY), el desplazamiento máximo elástico (DY), el desplazamiento máximo no lineal, y la ductilidad (definida como la relación entre el desplazamiento máximo y el desplazamiento en el punto de fluencia).

2.9 Solución a diseñar

La solución planteada se basa en el uso de sistemas de aislamiento sísmico y la optimización del diseño estructural mediante el uso de factores de reducción de resistencia. A partir de los resultados obtenidos en las simulaciones, se identificaron las configuraciones más eficientes en términos de desplazamientos y ductilidad, lo que permitió desarrollar recomendaciones específicas para el diseño de edificios sismorresistentes.

El análisis plantea que el uso de aisladores reduce significativamente las demandas elásticas en las estructuras, permitiendo que estas se mantengan en un régimen de comportamiento lineal incluso bajo sismos de gran magnitud. Sin embargo, se observó que la aplicación de factores de reducción R excesivos puede comprometer la capacidad de la estructura para soportar deformaciones significativas, especialmente en estructuras con periodos más largos.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados

Para los casos estudiados, se llevaron a cabo dos tipos de análisis. El primero empleó un modelo de 1 grado de libertad (1GDL), simulando una estructura de base fija (sin aislación). El segundo análisis utilizó un modelo de 2 grados de libertad (2GDL) para analizar el comportamiento de la misma estructura cuando se instalan aisladores sísmicos.

Los aisladores Tipo 1 y Tipo 2 tienen las características previamente descritas en el Capítulo II, con fuerzas de activación equivalentes al 3% y 4% del peso de la estructura, respectivamente. Se estudian estos dos tipos de aisladores para evaluar su desempeño.

Se realizó un análisis elástico tanto para la estructura no aislada como para la estructura aislada, determinando las máximas respuestas elásticas de cada sistema. En el caso de la estructura sin aislación, se obtuvieron los valores de desplazamiento elástico d_{ye_elast} y fuerza elástica F_{ye_elast} . En el caso de la estructura aislada, se calcularon los correspondientes desplazamientos elástico d_{yea_elast} y fuerza elástica F_{yea_elast} sobre los aisladores, lo que permitió comparar el comportamiento de ambos sistemas bajo cargas sísmicas.

3.2 Resultados en estructuras analizadas con el Registro APED-E

Para obtener los resultados, se llevaron a cabo inicialmente análisis de estructuras con base fija y períodos naturales de 0.5 s, 1.0 s, 1.5 s y 2.0 s, considerando factores de reducción de respuesta de 4, 7, 10, 17, 18, 20, 25 y 30, utilizando un modelo simplificado de un grado de libertad 1GDL.

3.2.1 Modelo realizado para OpenseesPy 1GDL

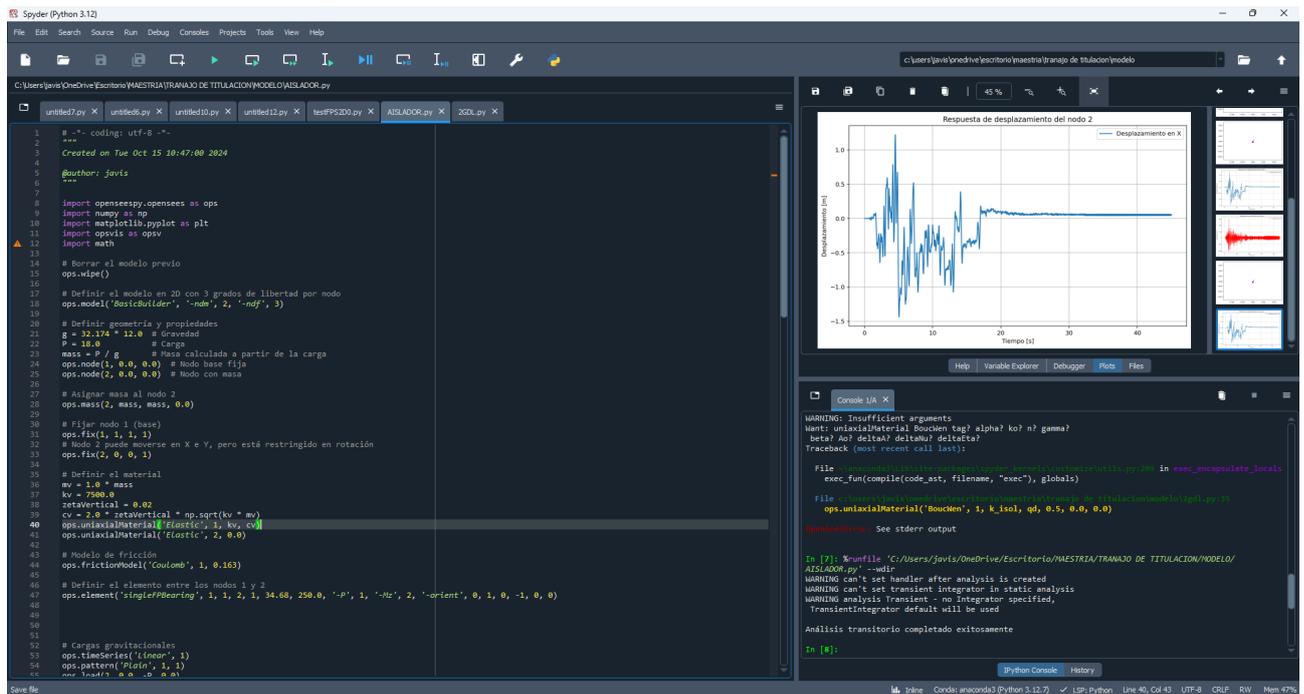


Figura 3.1 Modelo realizado para OpenseesPy 1GDL

Elaborado por: Dennis Garces

Posteriormente, en el modelo dos grados de libertad 2GDL las mismas estructuras con base fija se evaluaron con la incorporación de un sistema de aislamiento sísmico. En esta etapa, se analizaron tanto las respuestas elásticas como las inelásticas, tanto de las estructuras aisladas como del sistema de aislamiento.

3.2.2 Modelo realizado para OpenseesPy 2GDL

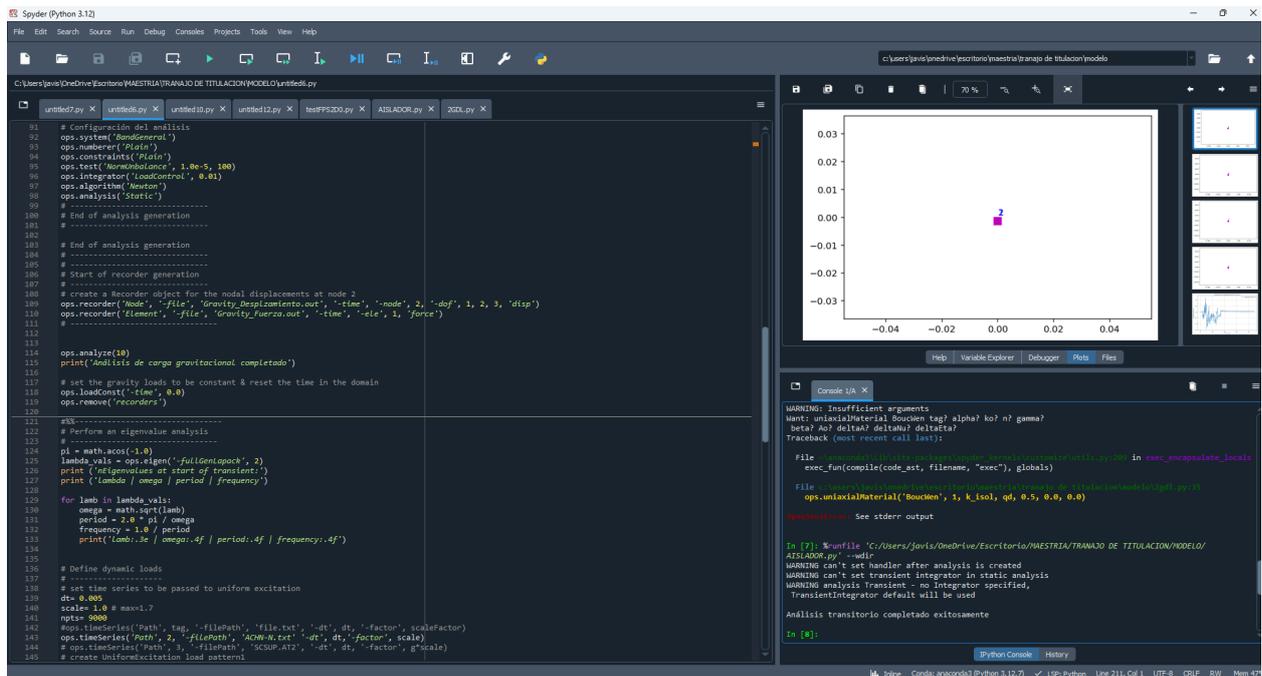


Figura 3.2 Modelo realizado para OpenseesPy 2GDL

Elaborado por: Dennis Garces

3.3 Resultados en estructuras analizadas con el Registro APED-E.

Los cálculos presentados en la Tabla 3-1 Parámetros de análisis y resultados para estructura con $T_{na}=0.5s$, se realizaron utilizando el registro sísmico APED-E, aplicando modelos de análisis estructural para estructuras no aisladas y aisladas. En el caso de la estructura no aislada, modelada como un sistema de un grado de libertad (1GDL) con un período base fija de 0.5 s, se realizó un análisis tiempo-historia para obtener la respuesta elástica inicial, obteniendo un desplazamiento elástico de $d_{ye_elastico}=0.170$ m y una fuerza elástica de $F_{ye_elastico}=26.98kN$. A partir de estos valores, se aplicaron diferentes factores de reducción de resistencia (R) como 4, 7,10, 17,18, 20, 25 y 30, dividiendo los valores elásticos por cada factor. Para este caso, $R=4$ el desplazamiento reducido fue $d_{ye}(m)=0.042$ y la fuerza reducida $F_{ye}=6.74$. Posteriormente, estos valores ajustados se implementaron en el modelo de un grado de libertad 1GDL, obteniendo el desplazamiento máximo no lineal (d_{max_e}) y la razón de ductilidad para la estructura de

base fija. Para $R=4$, el desplazamiento máximo resultó $d_{max}=0.196m$ y la razón de ductilidad $\mu_{na}=4.61$.

En el caso de la estructura aislada, modelada como un sistema de dos grados de libertad (2GDL), se determinó la respuesta elástica inicial, obteniendo un desplazamiento elástico de $d_{ye_elast}=0.004$ y una fuerza elástica de $F_{ye_elast}=0.67KN$. A continuación, se colocó la estructura sobre el aislador modelo de 2GDL, ajustando los valores para el factor de reducción de resistencia correspondiente. Mediante el análisis, se calcularon el desplazamiento máximo de la estructura aislada d_{max_ea} y el desplazamiento máximo del aislador d_{max_ais} . La razón de ductilidad aislada μ_a se obtuvo dividiendo el desplazamiento máximo de la estructura aislada entre el desplazamiento elástico inicial. Por ejemplo, para $R=4$ es $d_{max_ea}=0.04$ y $d_{max_ais}=0.16m$ y la razón de ductilidad aislada fue $\mu_a=0.09$. En resumen, la metodología permitió obtener y comparar las respuestas máximas y las razones de ductilidad tanto en la estructura no aislada como en la estructura aislada, evidenciando que el sistema de aislación sísmica reduce significativamente la respuesta de la estructura y mejora su desempeño frente al registro sísmico APED-E.

REGISTRO APED-E								
Qd/W	0.03							
Periodo estructural base fija, Tna	1.00	s						
Estructura No Aislada (Modelo 1GDL)								
Respuesta Elástica								
dye_elastico	0.285	m						
Fye_elastico	11.31	KN						
Factor de reduccion de resistencia para estructura de base fija, Rna								
	4	7	10	17	18	20	25	30
dy_e (m)	0.071	0.041	0.028	0.017	0.016	0.014	0.011	0.009
Fy_e (KN)	2.83	1.616	1.131	0.665	0.628	0.566	0.452	0.377
Respuesta no lineal máxima para cada Rna								
dmax_e (m)	0.232	0.1625	0.17	0.24	0.24	0.23	0.26	0.30
Razon de ductilidad para estructura base, μ_{na}	3.26	4.00	6.12	14.30	15.04	16.17	22.85	31.63
Estructura Aislada (Modelo 2GDL)								
Respuesta Elástica								
dyea_elast	0.016	m						
Fyea_elast	0.64	KN						
Respuesta no lineal maxima-Estructura con Rna colocada sobre el aislador								
dmax_ea (m)	0.016	0.016	0.016	0.016	0.018	0.036	0.070	0.123
dmax_ais (m)	0.15	0.14	0.150	0.150	0.178	0.130	0.090	0.065
Factor de reduccion de resistencia para estructura aislada, Ra	0.23	0.40	0.57	0.96	1.02	1.13	1.41	1.70
Razon de ductilidad para estructura aislada, μ_a	0.22	0.39	0.56	0.96	1.14	2.53	6.15	12.97

Tabla 3-1 Parámetros de análisis y resultados para estructura con $T_{na}=1.0s$

Elaborado por: Dennis Garces

Los resultados presentados en la tabla previa corresponden a las respuestas no lineales en términos de la relación fuerza cortante-desplazamiento. Como ilustración, la Figura 3.1 muestra la respuesta histerética de una estructura de base fija con un período natural $T_{na}=0.5s$ y un factor de reducción de resistencia $R_{na}=4$, evaluada utilizando el modelo de un grado de libertad 1GDL.

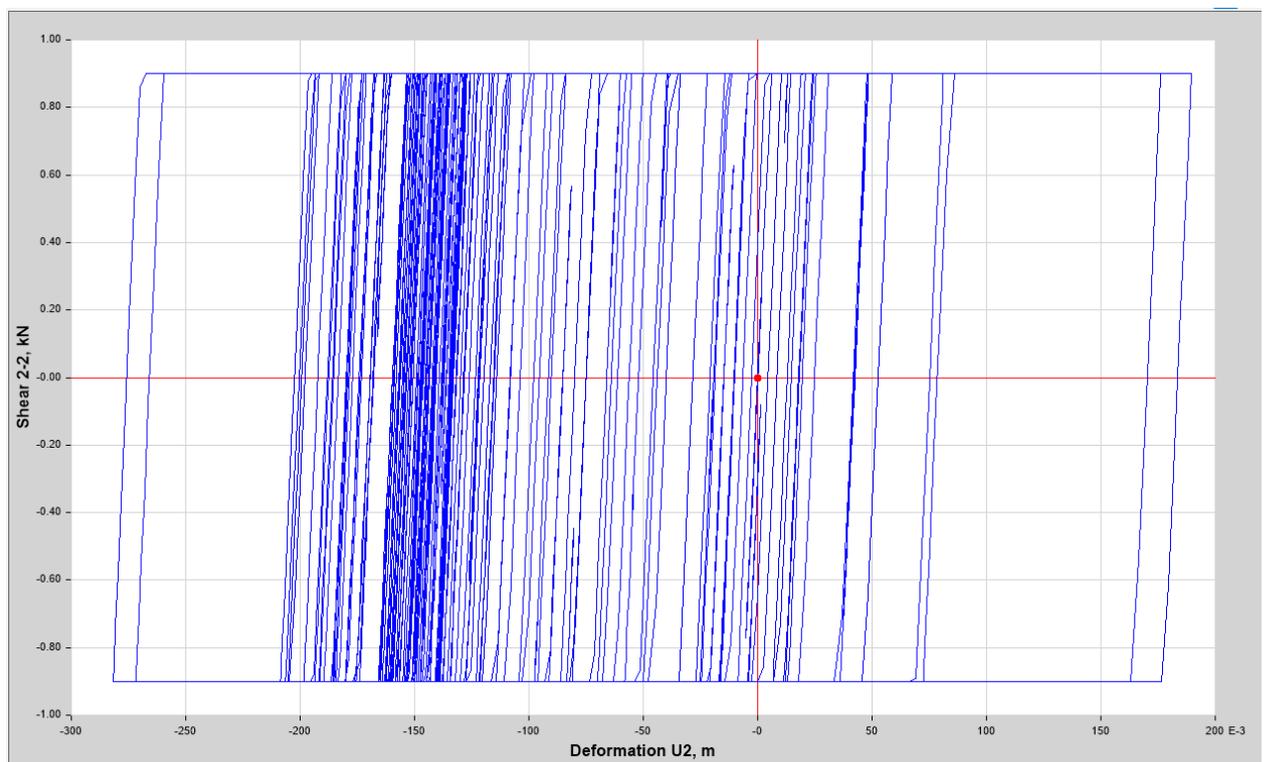


Figura 3.3: Respuesta histerética de estructura de base fija para $T_{na}=0.5s$ y $R_{na}=4$

Elaborado por: Dennis Garces

En las figuras siguientes se presenta la misma estructura, con un período $T_{na}=0.5s$ y un factor de reducción de resistencia $R_{na}=4$, pero ahora considerando la incorporación de un sistema de aislamiento, utilizando un Aislador Tipo 1.

En la Figura 3.4 se puede observar la respuesta histerética del aislador,

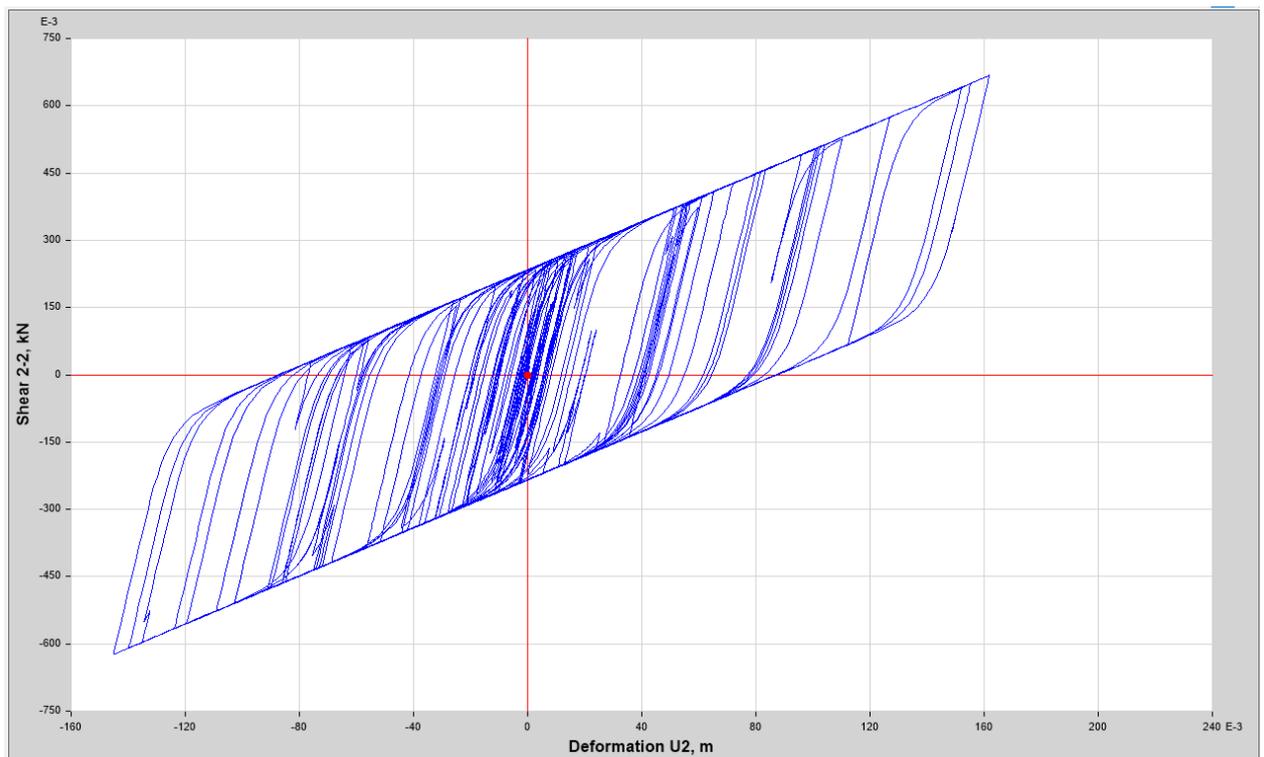


Figura 3.4 Respuesta histerética del Aislador Tipo 1

Elaborado por: Dennis Garces

mientras que en la Figura 3.5 se muestra la respuesta histerética correspondiente a la estructura aislada. Estos análisis fueron realizados empleando el modelo de dos grados de libertad 2GDL.

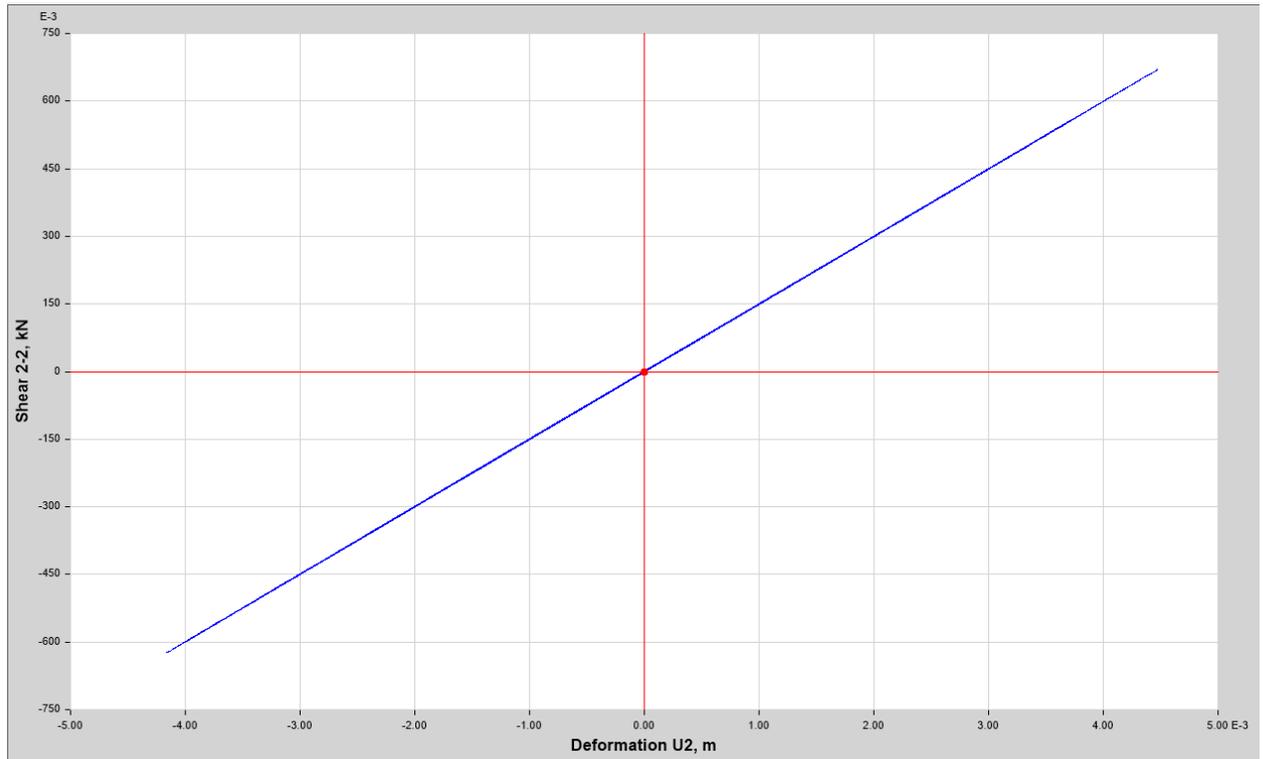


Figura 3.5 Respuesta histerética de la estructura con $T_{na} = 0.5s$ y $R_{na} = 4$

Elaborado por: Dennis Garces

Al comparar la Figura 3.2 con la Figura 3.1, se puede notar claramente cómo la respuesta de la estructura disminuye significativamente tras la inclusión del sistema de aislamiento. Esta reducción en la respuesta evidencia el beneficio del aislamiento sísmico, que reduce las fuerzas y desplazamientos que experimenta la estructura, mejorando así su comportamiento frente a eventos sísmicos.

3.3.1 Estructuras con Periodo de 1.0s y Aislador Tipo 1.

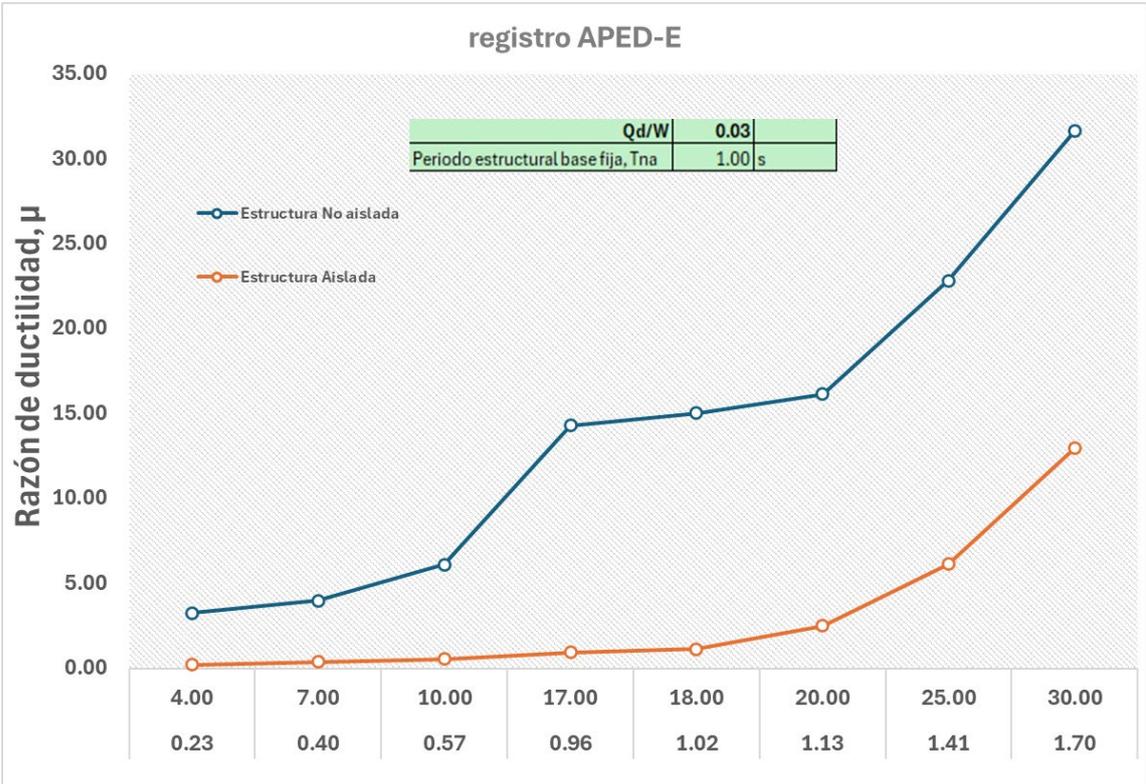


Figura 3.6 Razón de ductilidad vs. Factores de Reducción de Resistencia
Elaborado por: Dennis Garces

3.3.2 Estructuras con Periodo de 1.0 y Aislador Tipo 2.

REGISTRO APED-E								
Qd/W	0.04							
Periodo estructural base fija, Tna	1.00 s							
Estructura No Aislada (Modelo 1GDL)								
Respuesta Elástica								
dye_elastico	0.285	m						
Fye_elastico	11.31	KN						
Factor de reduccion de resistencia para estructura de base fija, Rna								
	4	7	10	17	18	20	25	30
dy_e(m)	0.071	0.041	0.028	0.017	0.016	0.014	0.011	0.009
Fy_e(KN)	2.83	1.616	1.131	0.665	0.628	0.566	0.452	0.377
dmax_e (m)	0.232	0.1625	0.17	0.24	0.24	0.23	0.26	0.30
Razon de ductilidad para estructura base, μ_{na}	3.26	4.00	6.12	14.30	15.04	16.17	22.85	31.63
Estructura Aislada (Modelo 2GDL)								
Respuesta Elástica								
dyea_elast	0.05	m						
Fyea_elast	0.81	KN						
Respuesta no lineal maxima-Estructura con Rna colocada sobre el aislador								
dmax_ea(m)	0.02	0.023	0.022	0.090	0.090	0.100	0.200	0.280
dmax_ais(m)	0.14	0.14	0.140	0.080	0.080	0.060	0.040	0.020
Factor de reduccion de resistencia para estructura aislada, Ra	0.29	0.50	0.72	1.22	1.29	1.43	1.79	2.15
Razon de ductilidad para estructura aislada, μ_{na}	0.28	0.57	0.77	5.38	5.69	7.03	17.57	29.52

Tabla 3-2 Parámetros de análisis y resultados para estructura con Tna=1.0s

Elaborado por: Dennis Garces

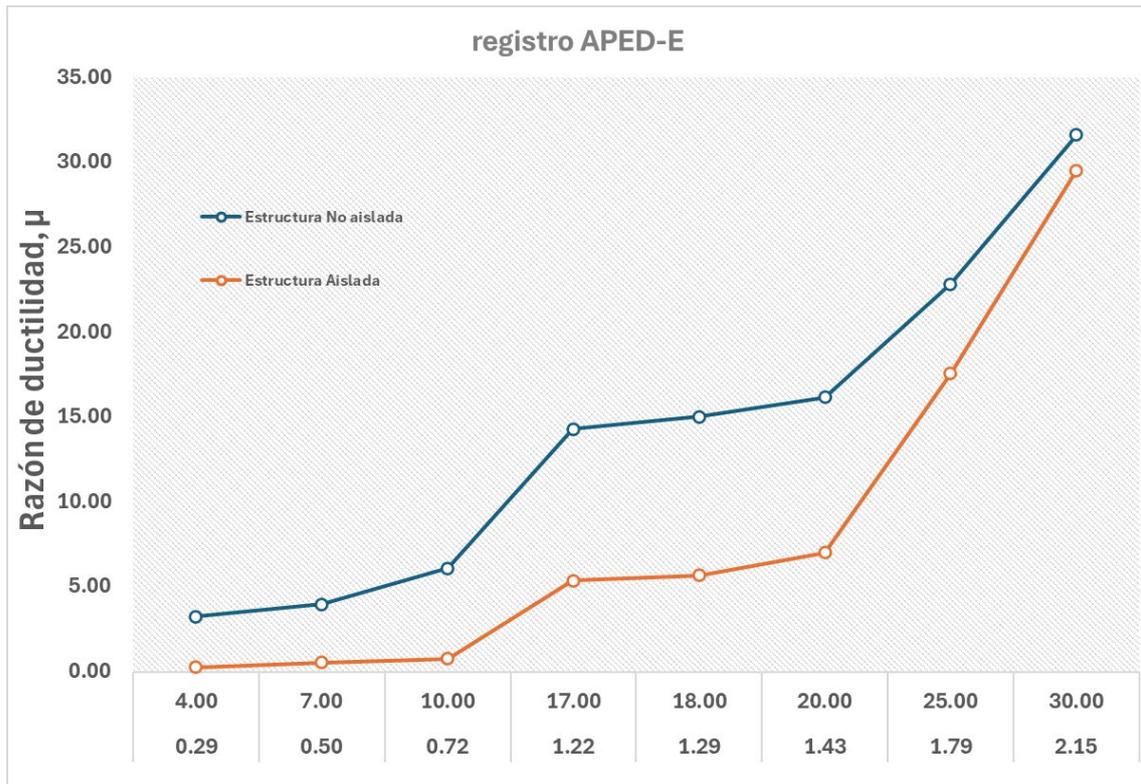


Figura 3.7 Razón de ductilidad vs. Factores de Reducción de Resistencia
Elaborado por: Dennis Garces

3.4 Resultados en estructuras analizadas con el Registro AMNT-N

Para estos casos, se han analizado estructuras de base fija de período natural, $T_{na}=0.5s$, $1.0s$, $1.5s$, y $2.0s$. Pero, a diferencia de los análisis con el Registro APED-E, fue necesario utilizar factores de reducción de 4, 7, 10, 17 y 18 para fines de realizar una mejor interpretación de resultados.

Luego, a cada una de las estructuras analizadas en base fija se la analiza sobre el sistema de aislación y se obtienen respuestas elásticas e inelásticas de la estructura aislada y de su sistema de aislación.

3.4.1 Estructuras con Periodo de 1.5s y Aislador Tipo 1

REGISTRO AMNT-N								
Qd/W	0.03							
Periodo estructural base fija, Tna	1.50	s						
Estructura No Aislada (Modelo 1GDL)								
Respuesta Elástica								
dye_elastico	0.259	m						
Fye_elastico	4.58	KN						
Respuesta no lineal máxima para cada Rna								
Factor de reduccion de resistencia para estructura de base fija, Rna	4	7	10	17	18			
dy_e(m)	0.065	0.037	0.026	0.015	0.014			
Fy_e(KN)	1.14	0.654	0.458	0.269	0.254			
Respuesta no lineal máxima para cada Rna								
dmax_e (m)	0.21	0.26	0.27	0.29	0.25			
Razon de ductilidad para estructura base fija, μ_{na}	3.24	7.02	10.41	19.01	17.35			
Estructura Aislada (Modelo 2GDL)								
Respuesta Elástica								
dyea_elast	0.04	m						
Fyea_elast	0.71	KN						
Respuesta no lineal maxima-Estructura con Rna colocada sobre el aislador								
dmax_ea(m)	0.04	0.06	0.130	0.203	0.210			
dmax_ais(m)	0.18	0.16	0.090	0.020	0.020			
Factor de reduccion de resistencia para estructura aislada, Ra	0.62	1.09	1.55	2.64	2.79			
Razon de ductilidad para estructura aislada, μ_{na}	0.62	1.62	5.01	13.30	14.57			

Tabla 3-3 Parámetros de análisis y resultados para estructura con Tna=1.5s

Elaborado por: Dennis Garces

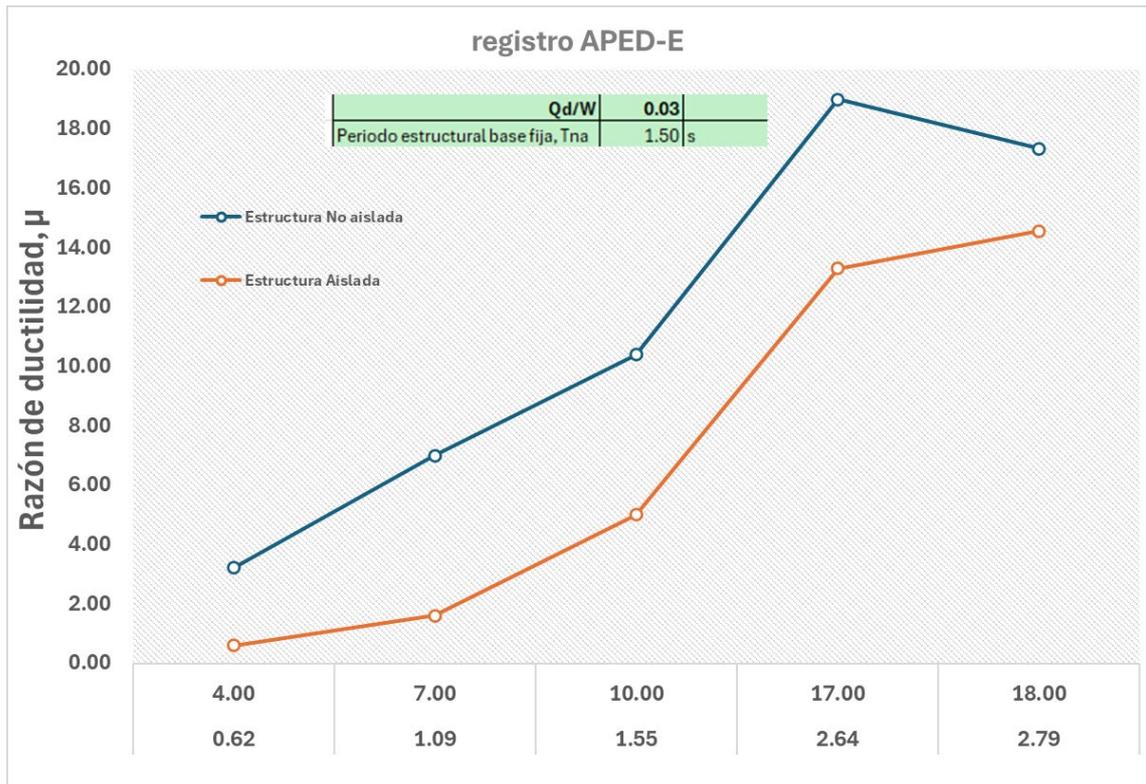


Figura 3.8 Razón de ductilidad vs. Factores de Reducción de Resistencia
Elaborado por: Dennis Garces

3.4.2 Estructuras con Periodo de 1.0s y Aislador Tipo 2

REGISTRO AMNT-N								
Qd/W	0.04							
Periodo estructural base fija, Tna	1.00	s						
Estructura No Aislada (Modelo 1GDL)								
Respuesta Elástica								
dye_elastico	0.098	m						
Fye_elastico	3.88	KN						
Factor de reduccion de resistencia para estructura de base fija, Rna	4	7	10	17	18			
dy_e(m)	0.024	0.014	0.010	0.006	0.005			
Fy_e(KN)	0.97	0.554	0.388	0.228	0.215			
dmax_e (m)	0.28	0.28	0.29	0.25	0.26			
Razon de ductilidad para estructura base fija, μ_{na}	11.48	20.10	29.74	43.58	47.99			
Estructura Aislada (Modelo 2GDL)								
Respuesta Elástica								
dyea_elast	0.02	m						
Fyea_elast	0.78	KN						
Respuesta no lineal maxima-Estructura con Rna colocada sobre el aislador								
dmax_ea(m)	0.07	0.29	0.240	0.240	0.230			
dmax_ais(m)	0.16	0.16	0.020	0.008	0.008			
Factor de reduccion de resistencia para estructura aislada, Ra	0.81	1.41	2.01	3.42	3.62			
Razon de ductilidad para estructura aislada, μ_{na}	2.87	20.81	24.61	41.83	42.45			

Tabla 3-4 Parámetros de análisis y resultados para estructura con Tna=1.0s

Elaborado por: Dennis Garces

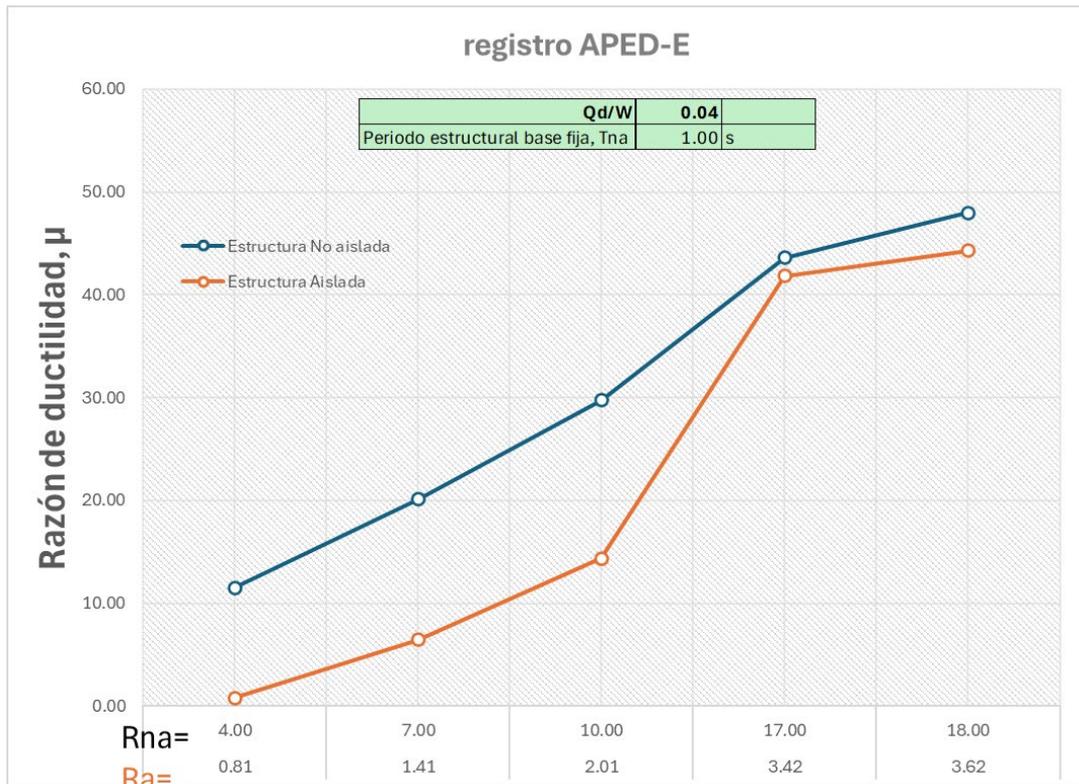


Figura 3.9 Razón de ductilidad vs. Factores de Reducción de Resistencia

Elaborado por: Dennis Garces

3.5 Interpretación de Resultados del Análisis

Los resultados obtenidos muestran que la razón de ductilidad aumenta a medida que crece el factor de reducción de resistencia, tanto en estructuras no aisladas como en estructuras con aislamiento. Sin embargo, las estructuras aisladas presentan una mayor sensibilidad a este incremento, particularmente cuando los factores de reducción son mayores a 1. En este rango, el aumento en la razón de ductilidad ocurre de manera más lenta en comparación con las estructuras no aisladas, aunque sigue siendo considerable.

Para los análisis con períodos naturales de $T_{na}=0.5$ y $T_{na}=1.0$ s, empleando los aisladores Tipo 1 y Tipo 2, se verificó que las estructuras aisladas experimentan desplazamientos menores y demandas de ductilidad más reducidas en comparación con estructuras no aisladas. Este comportamiento también fue evidente en la mayoría de los análisis realizados para períodos de $T_{na}=2.0$ S

El uso del aislamiento sísmico demostró ser beneficioso, ya que disminuye tanto los desplazamientos como las demandas de ductilidad. Sin embargo, se observó que, a medida que la estructura es más rígida dentro del sistema de aislamiento, las respuestas disminuyen, lo que mejora su eficiencia. Por otro lado, cuando la respuesta del aislador disminuye, la demanda de ductilidad en la estructura incrementa proporcionalmente.

En algunos casos puntuales, cuando las reducciones de resistencia en la estructura aislada alcanzaron valores superiores a 1.80 ($R_a > 1.80$), se identificó que la razón de ductilidad superó a la de una estructura de base fija. Este fenómeno ocurrió debido a que el desplazamiento relativo del sistema de aislamiento fue significativamente mayor, aunque el desplazamiento absoluto de la estructura fue menor. Esto indica que, en estos casos, el sistema de aislamiento contribuyó poco a mejorar la eficiencia. Además, cuando se aplicaron factores de reducción muy altos $R_{na} > 8$, el diseño de la estructura de base fija presentaba niveles de resistencia muy bajos. Este comportamiento requiere de análisis más detallados con diferentes registros sísmicos para comprender mejor las implicaciones de estos hallazgos.

Limitaciones y observaciones adicionales. Es relevante señalar que ninguno de los análisis realizados consideró factores como la sobre-resistencia, el peso propio o las propiedades específicas de los materiales. Tampoco se tuvieron en cuenta las restricciones normativas que limitan las resistencias mínimas en el diseño. En la práctica, esto significa que las estructuras suelen diseñarse con resistencias mayores a las requeridas, lo que podría influir en el comportamiento observado.

Eficiencia según el período natural. En estructuras con $T_{na} = 2.0$ s, los registros sísmicos evaluados mostraron que los aisladores fueron menos efectivos en la reducción de respuestas en comparación con períodos más cortos ($T_{na} = 0.5$ s y $T_{na} = 1.0$ s. sin duda se debe al efecto de las demandas de ductilidad en estructuras de base fija con $T_{na} = 2.0$ s son naturalmente más bajas, lo que reduce ampliamente la contribución relativa del sistema de aislamiento.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este trabajo aporta al entendimiento del comportamiento de estructuras aisladas sísmicamente, evaluando demandas de ductilidad bajo diversos factores de reducción. Los resultados destacan la efectividad del aislamiento en reducir desplazamientos, pero revelan limitaciones con períodos largos o factores altos. Esto impulsa mejoras en el diseño de sistemas de aislamiento y sugiere futuras investigaciones sobre combinaciones de aisladores y efectos de sobre-resistencia.

4.1 Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos, se concluye que el sistema de aislamiento, en la mayoría de los casos analizados, logra reducir de manera significativa la respuesta máxima de las estructuras comparado con aquellas con base fija.

La razón de ductilidad se incrementa de forma acelerada cuando se reduce el límite elástico, es decir, al aumentar el factor de reducción de resistencia, manteniendo el mismo período natural. En las estructuras no aisladas, estas demandas alcanzan valores elevados que, en muchos casos, superan lo esperado, requiriendo un diseño detallado según las normativas vigentes. Sin embargo, en estructuras aisladas, estas demandas tienden a ser menores, aunque ligeros aumentos en el factor de reducción pueden ocasionar incrementos significativos en la demanda de ductilidad.

Por otro lado, el desplazamiento máximo del sistema de aislamiento disminuye conforme se reduce la resistencia estructural, pero el desplazamiento máximo de la estructura puede aumentar considerablemente. En algunos casos específicos, cuando el factor de reducción de resistencia R_a superó valores de 1.80, las razones de ductilidad en las estructuras aisladas llegaron a ser mayores que en las no aisladas, particularmente cuando se combinó una alta reducción de resistencia con desplazamientos de fluencia reducidos.

Asimismo, se observó que la flexibilidad de la estructura sobre los aisladores no tiene un impacto significativo en el período del sistema aislado. Este estudio destaca la necesidad de tener precaución al permitir que las estructuras aisladas desarrollen ductilidad, ya que la incursión en la no linealidad podría generar deformaciones excesivas en la estructura.

4.2 Recomendaciones

Como resultado de este estudio, se sugiere continuar investigando, utilizando una mayor cantidad de registros sísmicos. Esto permitirá evaluar con mayor profundidad si las demandas de ductilidad dependen significativamente de las características de los registros empleados. Ampliar el rango de registros sísmicos analizados podría proporcionar una base más robusta para diseñar sistemas de aislamiento efectivos en diversas condiciones sísmicas.

Asimismo, se recomienda explorar otras características de los sistemas de aislamiento, como la variación en su rigidez o fuerza de fluencia, con el objetivo de comprender cómo estos parámetros afectan las respuestas estructurales. Esto podría contribuir a optimizar el diseño y desempeño de los sistemas aislados, adaptándolos a diferentes tipos de estructuras y demandas.

Dado que este estudio se basó en modelos bidimensionales de dos grados de libertad, se sugiere realizar análisis dinámicos no lineales en modelos tridimensionales. Estos modelos deben incluir elementos estructurales con características no lineales que reflejen con mayor precisión el comportamiento real de las estructuras. Esto permitirá evaluar de manera más detallada el desempeño de los sistemas aislados y el impacto de los factores de reducción de resistencia en el comportamiento global y local de los elementos estructurales.

Por último, se recomienda llevar a cabo estudios adicionales enfocados en factores de reducción de resistencia altos $R_a > 1.80$, especialmente en combinación con diferentes registros sísmicos. Esto ayudará a identificar posibles limitaciones o riesgos asociados a estos valores y a establecer parámetros de diseño más seguros y efectivos.

BIBLIOGRAFÍA

5. REFERENCIAS

- Almazán JL. (2010). Comportamiento de estructuras antisísmicas durante el terremoto del Maule y su posible efecto en las normas de diseño sísmico en Chile. *Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural, Passo Fundo, v. 7, n. Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural, Passo Fundo, v. 7, n.* Obtenido de <http://www.seer.upf.br/index.php/rsae/article/viewFile/2594/1769>
- Bustamante R, E. K. (2024). Evaluation of Seismic Isolation Retrofit Following Early Design Standards. [18th World Conference on Earthquake Engineering, Milan, Italy.].
- Bustamante R, M. G. (2022). Inelastic superstructure response of baseisolated systems using nonlinear response spectra under extreme loading.[12th National Conference on Earthquake Engineering - 12NCEE 2022, Utah, Salt Lake City.]. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/361118429>
- Bustamante R, M. G. (2022). Moat wall pounding for a prototype baseisolated building in Wellington, New Zealand [12th National Conference on Earthquake Engineering - 12NCEE 2022, Utah, Salt Lake City.]. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/361118339>
- TORO, C. D. (2024). *EFFECTOS EN LA DEMANDA DE DUCTILIDAD DEBIDO AL USO DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA EN EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS SÍSMICAMENTE AISLADAS [Trabajo de Maestría, Universidad de Guayaquil].*

Repositorio Institucional. Obtenido de

<https://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/72270>

- Constantinou, M. C., Whittaker, A. S., Kalpakidis, Y., Fenz, D. M., & Warn, G. P. (2007). Performance of Seismic Isolation Hardware under Service and Seismic Loading. Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (MCEER), University at Buffalo.
- Kelly, J. M. (1993). Earthquake-Resistant Design with Rubber. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-58110-4>
- Naeim, F., & Kelly, J. M. (1999). Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470172628>
- Zhang, J., & Makris, N. (2001). Seismic response analysis of highway overcrossings including soil–structure interaction. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 30(12), 1967–1991. <https://doi.org/10.1002/eqe.96>
- American Society of Civil Engineers. (2016). Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-16). American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784414248>
- European Committee for Standardization. (2009). EN 15129: Anti-Seismic Devices. European Committee for Standardization.
- OpenSeesPy Documentation. (2024). OpenSeesPy – Open System for Earthquake Engineering Simulation. Retrieved from <https://openseespydocumentation.readthedocs.io>
- Skinner, R. I., Robinson, W. H., & McVerry, G. H. (1993). An Introduction to Seismic Isolation. John Wiley & Sons.
- Kelly, J. M., & Naeim, F. (1999). Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice. John Wiley & Sons.

- Chopra, A. K. (2012). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering* (4th ed.). Pearson.

ANEXOS

6. ANEXOS

REGISTRO APED-E								
Qd/W	0.03							
Periodo estructural base fija, Tna	0.50	s						
Estructura No Aislada (Modelo 1GDL)								
Respuesta Elástica								
dye_elastico	0.170	m						
Fye_elastico	26.98	KN						
Factor de reduccion de resistencia para estructura de base fija, Rna	4	7	10	17	18	20	25	30
dy_e(m)	0.042	0.024	0.017	0.010	0.009	0.008	0.007	0.006
Fy_e(KN)	6.74	3.854	2.698	1.587	1.499	1.349	1.079	0.899
Respuesta no lineal máxima para cada Rna								
dmax_e (m)	0.196	0.1625	0.22	0.41	0.41	0.40	0.32	0.28
Razon de ductilidad para estructura base, μ_{na}	4.61	6.69	12.95	41.01	43.43	47.08	47.66	49.61
Estructura Aislada (Modelo 2GDL)								
Respuesta Elástica								
dyea_elast	0.004	m						
Fyea_elast	0.67	KN						
Respuesta no lineal maxima-Estructura con Rna colocada sobre el aislador								
dmax_ea(m)	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
dmax_ais(m)	0.16	0.16	0.160	0.160	0.162	0.160	0.161	0.161
Factor de reduccion de resistencia para estructura aislada, Ra	0.10	0.17	0.25	0.42	0.45	0.50	0.62	0.75
Razon de ductilidad para estructura aislada, μ_{na}	0.09	0.16	0.24	0.40	0.42	0.47	0.59	0.71

Tabla 6-1 Parámetros de análisis y resultados para estructura con Tna=0.5s

Elaborado por: Dennis Garces

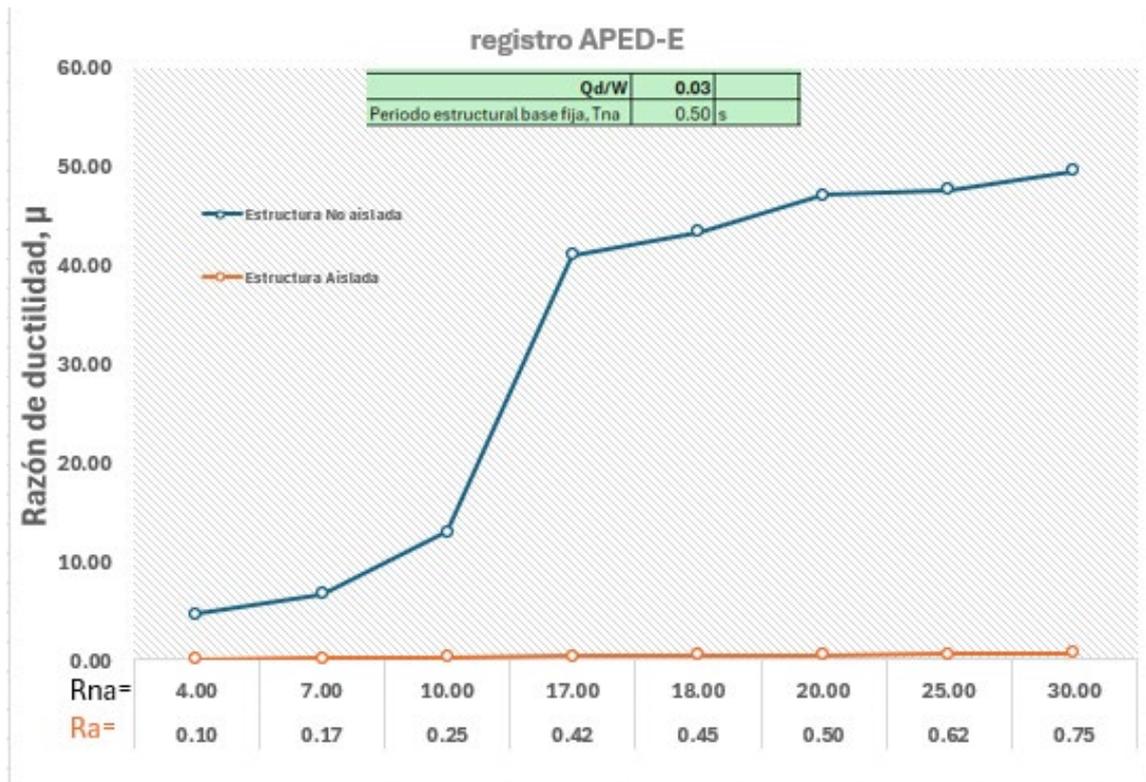


Figura 6.1 Razón de ductilidad vs. Factores de Reducción de Resistencia

Elaborado por: Dennis Garces

6.1.1 Estructuras con Periodo de 1.5s y Aislador Tipo 1.

REGISTRO APED-E								
Qd/W	0.03							
Periodo estructural base fija, Tna	1.50	s						
Estructura No Aislada (Modelo 1GDL)								
Respuesta Elástica								
dye_elastico	0.274	m						
Fye_elastico	4.82	KN						
Factor de reduccion de resistencia para estructura de base fija, Rna	4	7	10	17	18	20	25	30
dy_e(m)	0.068	0.039	0.027	0.016	0.015	0.014	0.011	0.009
Fy_e(KN)	1.21	0.689	0.482	0.284	0.268	0.241	0.193	0.161
Respuesta no lineal máxima para cada Rna								
dmax_e (m)	0.28	0.24	0.30	0.28	0.27	0.25	0.23	0.22
Razon de ductilidad para estructura base, μ_{na}	4.09	6.14	11.11	17.40	17.77	18.28	21.02	24.13
Estructura Aislada (Modelo 2GDL)								
Respuesta Elástica								
dyea_elast	0.033	m						
Fyea_elast	0.58	KN						
Respuesta no lineal maxima-Estructura con Rna colocada sobre el aislador								
dmax_ea(m)	0.033	0.03	0.060	0.160	0.170	0.180	0.197	0.196
dmax_ais(m)	0.13	0.16	0.100	0.030	0.023	0.018	0.010	0.008
Factor de reduccion de resistencia para estructura aislada, Ra	0.48	0.84	1.20	2.04	2.16	2.40	3.01	3.61
Razon de ductilidad para estructura aislada, μ_{na}	0.48	0.77	2.19	9.94	11.19	13.16	18.00	21.49

Tabla 6-2 Parámetros de análisis y resultados para estructura con Tna=1.5s

Elaborado por: Dennis Garces

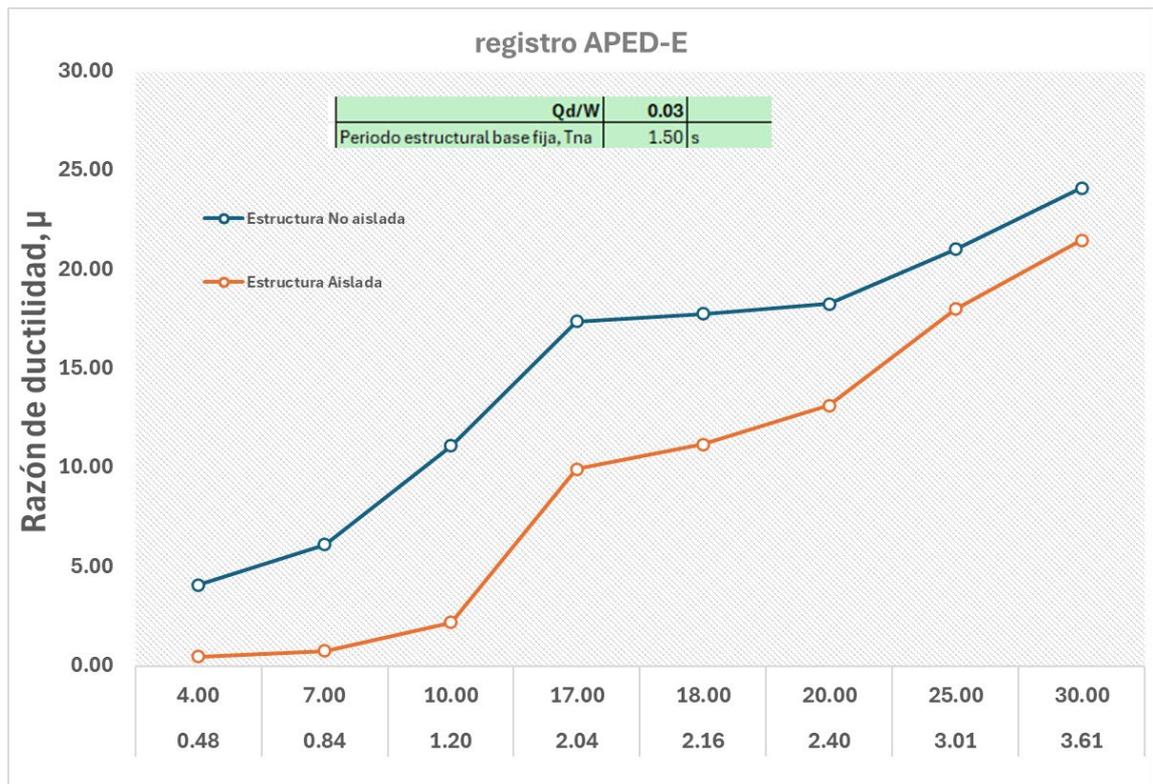


Figura 6.2 Razón de ductilidad vs. Factores de Reducción de Resistencia

Elaborado por: Dennis Garces

6.1.2 Estructuras con Periodo de 2.0s y Aislador Tipo 1.

REGISTRO APED-E								
Qd/W	0.03							
Periodo estructural base fija, Tna	2.00	s						
Estructura No Aislada (Modelo 1GDL)								
Respuesta Elástica								
dye_elastico	0.332	m						
Fye_elastico	3.31	KN						
Factor de reduccion de resistencia para estructura de base fija, Rna	4	7	10	17	18	20	25	30
dy_e(m)	0.083	0.047	0.033	0.020	0.018	0.017	0.013	0.011
Fy_e(KN)	0.83	0.473	0.331	0.195	0.184	0.165	0.132	0.110
Respuesta no lineal máxima para cada Rna								
dmax_e (m)	0.38	0.405	0.298	0.20	0.20	0.19	0.21	0.21
Razon de ductilidad para estructura base, μ_{na}	4.58	8.54	8.98	10.40	11.01	11.33	15.52	18.80
Estructura Aislada (Modelo 2GDL)								
Respuesta Elástica								
dyea_elast	0.05	m						
Fyea_elast	0.52	KN						
Respuesta no lineal maxima-Estructura con Rna colocada sobre el aislador								
dmax_ea(m)	0.033	0.08	0.228	0.178	0.173	0.180	0.190	0.196
dmax_ais(m)	0.11	0.096	0.040	0.010	0.009	0.008	0.006	0.008
Factor de reduccion de resistencia para estructura aislada, Ra	0.70	1.23	1.75	2.98	3.16	3.51	4.38	5.26
Razon de ductilidad para estructura aislada, μ_{na}	0.40	1.69	6.87	9.12	9.38	10.85	14.31	17.72

Tabla 6-3 Parámetros de análisis y resultados para estructura con Tna=2.0s

Elaborado por: Dennis Garces

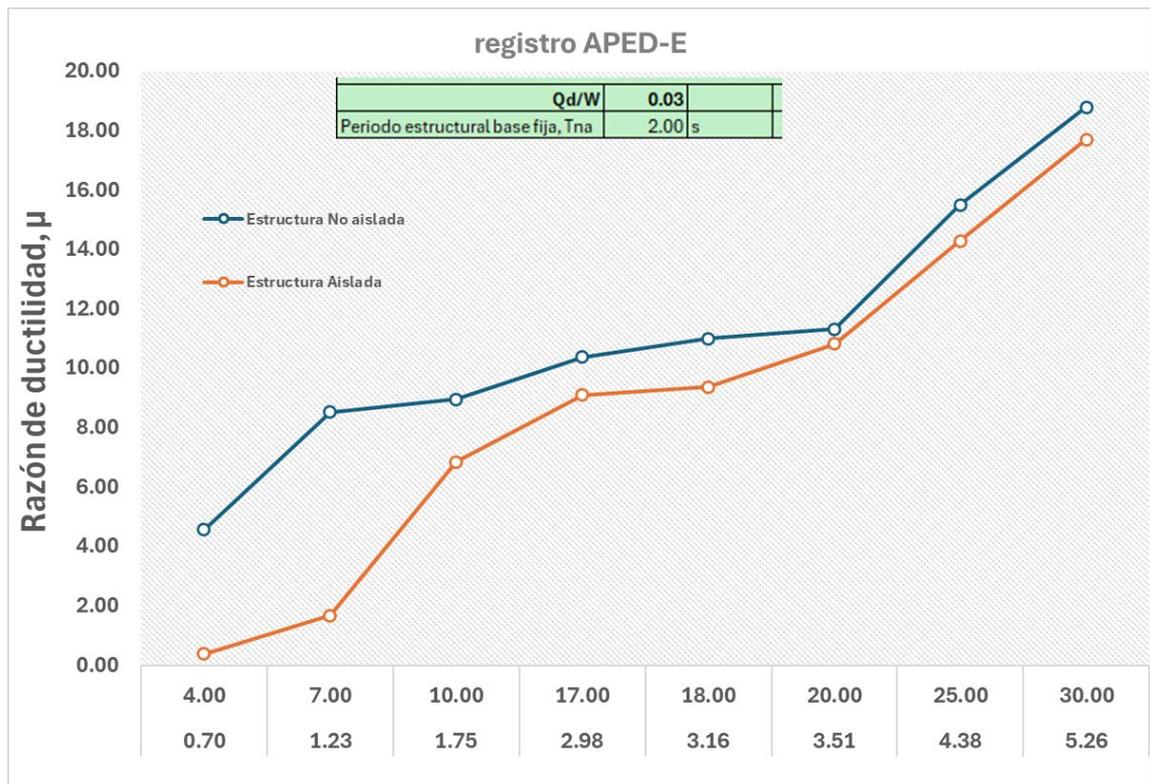


Figura 6.3 Razón de ductilidad vs. Factores de Reducción de Resistencia
Elaborado por: Dennis Garces

6.1.3 Estructuras con Periodo de 0.5s y Aislador Tipo 2.

REGISTRO APED-E								
Qd/W	0.04							
Periodo estructural base fija, Tna	0.50	s						
Estructura No Aislada (Modelo 1GDL)								
Respuesta Elástica								
dye_elastico	0.170	m						
Fye_elastico	26.98	KN						
Factor de reduccion de resistencia para estructura de base fija, Rna								
	4	7	10	17	18	20	25	30
dy_e(m)	0.042	0.024	0.017	0.010	0.009	0.008	0.007	0.006
Fy_e(KN)	6.74	3.854	2.698	1.587	1.499	1.349	1.079	0.899
dmax_e (m)	0.196	0.192	0.17	0.41	0.41	0.40	0.32	0.28
Razon de ductilidad para estructura base, μ_{na}	4.61	7.91	10.24	41.01	43.43	47.08	47.66	49.61
Estructura Aislada (Modelo 2GDL)								
Respuesta Elástica								
dyea_elast	0.006	m						
Fyea_elast	0.96	KN						
Respuesta no lineal maxima-Estructura con Rna colocada sobre el aislador								
dmax_ea(m)	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.015
dmax_ais(m)	0.15	0.15	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.140
Factor de reduccion de resistencia para estructura aislada, Ra	0.14	0.25	0.36	0.60	0.64	0.71	0.89	1.07
Razon de ductilidad para estructura aislada, μ_{na}	0.14	0.25	0.35	0.60	0.64	0.71	0.88	2.65

Tabla 6-4 Parámetros de análisis y resultados para estructura con Tna=0.5s

Elaborado por: Dennis Garces

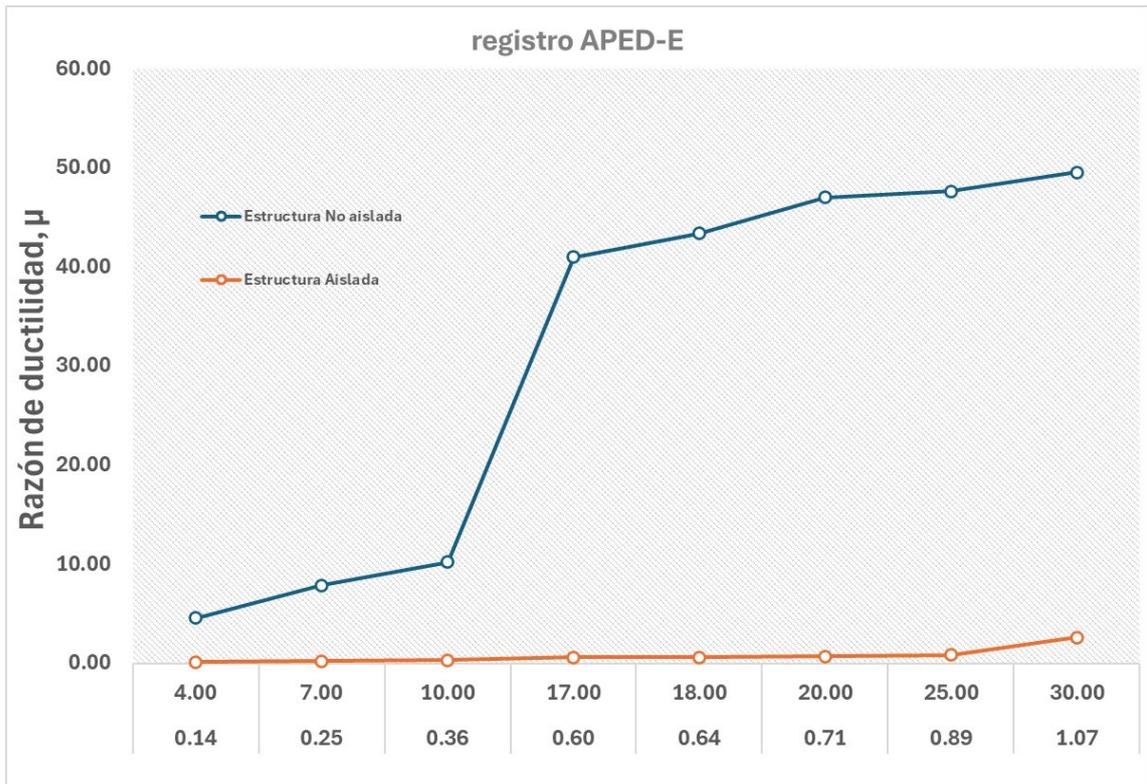


Figura 6.4 Razón de ductilidad vs. Factores de Reducción de Resistencia
Elaborado por: Dennis Garces

6.1.4 Estructuras con Periodo de 1.5 y Aislador Tipo 2.

REGISTRO APED-E								
Qd/W	0.04							
Periodo estructural base fija, Tna	1.50	s						kn
Estructura No Aislada (Modelo 1GDL)								
Respuesta Elástica								
dye_elastico	0.274	m						
Fye_elastico	4.82	KN						
Factor de reduccion de resistencia para estructura de base fija, Rna	4	7	10	17	18	20	25	30
dy_e(m)	0.068	0.039	0.027	0.016	0.015	0.014	0.011	0.009
Fy_e(KN)	1.21	0.689	0.482	0.284	0.268	0.241	0.193	0.161
dmax_e (m)	0.28	0.24	0.30	0.28	0.27	0.25	0.23	0.22
Razon de ductilidad para estructura base, μ_{na}	4.09	6.14	11.11	17.40	17.77	18.28	21.02	24.13
Estructura Aislada (Modelo 2GDL)								
Respuesta Elástica								
dyea_elast	0.05	m						
Fyea_elast	0.81	KN						
Respuesta no lineal maxima-Estructura con Rna colocada sobre el aislador								
dmax_ea(m)	0.05	0.12	0.190	0.220	0.220	0.210	0.200	0.200
dmax_ais(m)	0.11	0.09	0.040	0.011	0.009	0.008	0.006	0.005
Factor de reduccion de resistencia para estructura aislada, Ra	0.67	1.18	1.68	2.85	3.02	3.36	4.20	5.04
Razon de ductilidad para estructura aislada, μ_{na}	0.73	3.07	6.95	13.67	14.48	15.35	18.28	21.93

Tabla 6-5 Parámetros de análisis y resultados para estructura con Tna=1.5s

Elaborado por: Dennis Garces

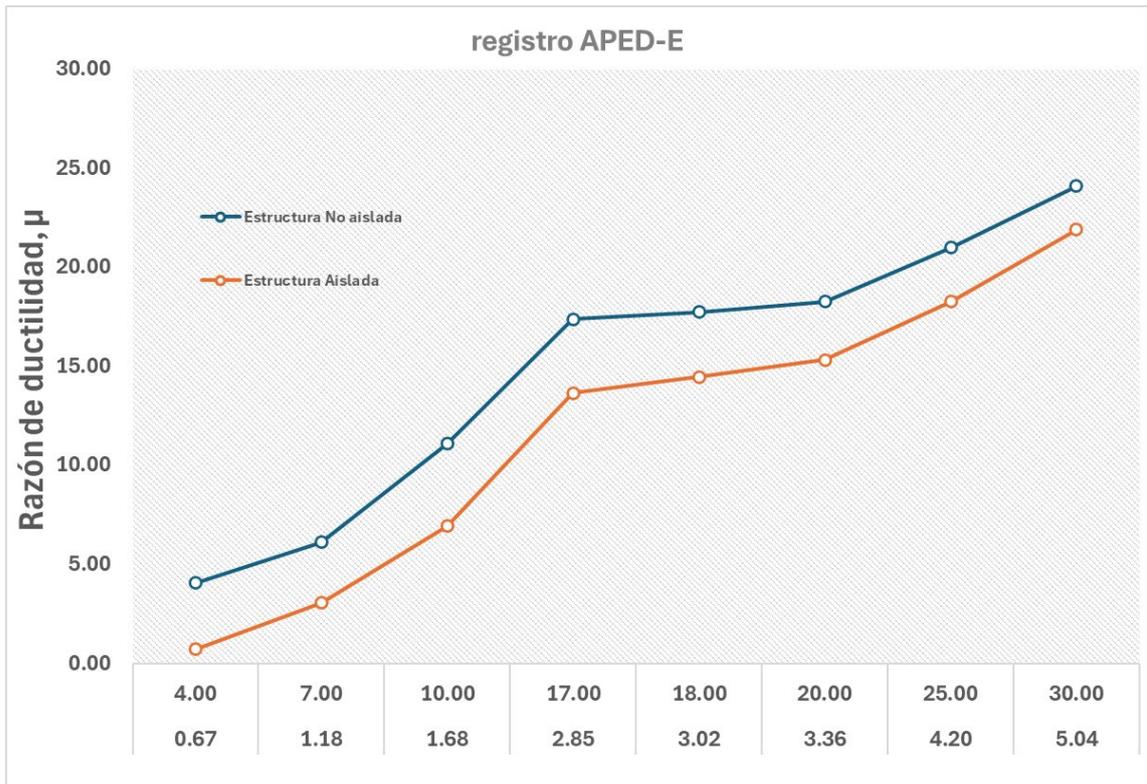


Figura 6.5 Razón de ductilidad vs. Factores de Reducción de Resistencia
Elaborado por: Dennis Garces

6.1.5 Estructuras con Periodo de 2.0s y Aislador Tipo 2.

REGISTRO APED-E								
Qd/W	0.04							
Periodo estructural base fija, Tna	2	s						kn
Estructura No Aislada (Modelo 1GDL)								
Respuesta Elástica								
dye_elastico	0.332	m						
Fye_elastico	3.31	KN						
Estructura Aislada (Modelo 2GDL)								
Respuesta Elástica								
dyea_elast	0.05	m						
Fyea_elast	0.81	KN						
Respuesta no lineal maxima-Estructura con Rna colocada sobre el aislador								
dmax_ea(m)	0.05	0.415	0.298	0.178	0.187	0.188	0.194	0.199
dmax_ais(m)	0.11	0.04	0.016	0.006	0.005	0.005	0.004	0.005
Factor de reduccion de resistencia para estructura aislada, Ra	0.98	1.71	2.45	4.16	4.41	4.90	6.12	7.34
Razon de ductilidad para estructura aislada, μ_{na}	0.60	8.75	8.98	9.12	10.14	11.33	14.62	17.99

Tabla 6-6 Parámetros de análisis y resultados para estructura con Tna=2.0s

Elaborado por: Dennis Garces

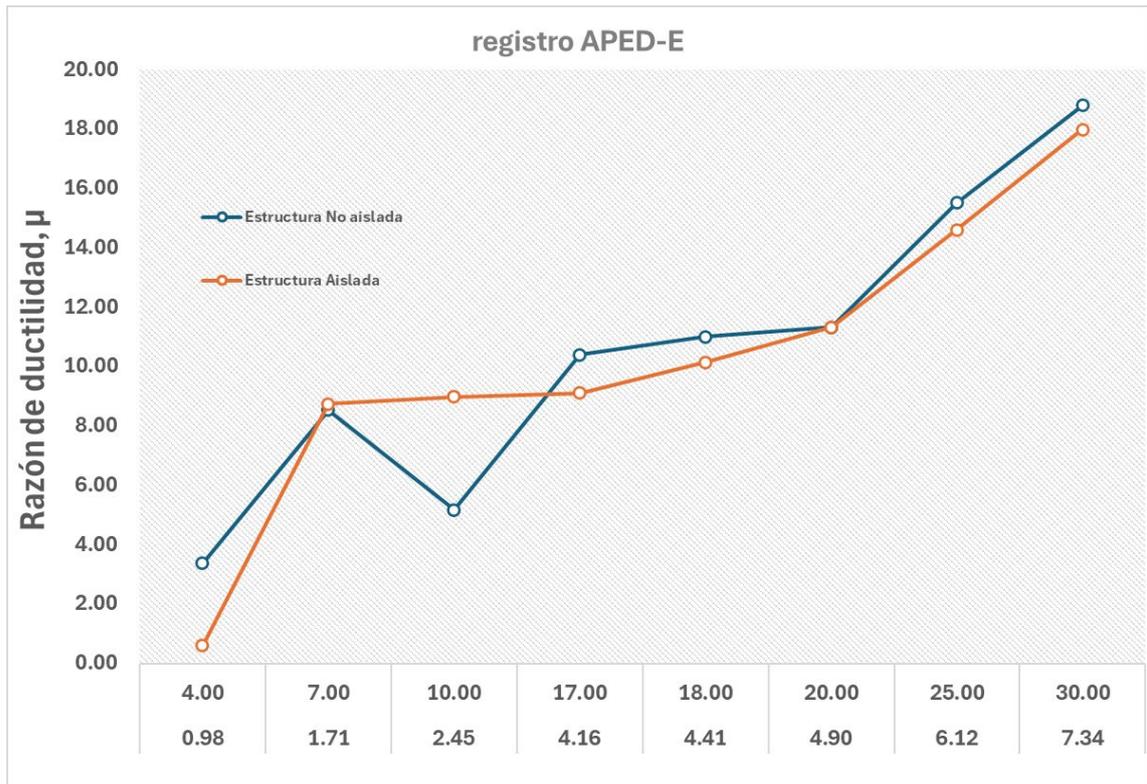


Figura 6.6 Razón de ductilidad vs. Factores de Reducción de Resistencia
Elaborado por: Dennis Garces

6.1.6 Estructuras con Periodo de 0.5s y Aislador Tipo 1.

REGISTRO AMNT-N								
Qd/W	0.03							
Periodo estructural base fija, Tna	0.50	s						
Estructura No Aislada (Modelo 1GDL)								
Respuesta Elástica								
dye_elastico	0.040	m						
Fye_elastico	6.34	KN						
Factor de reduccion de resistencia para estructura de base fija, Rna								
	4	7	10	17	18			
dy_e(m)	0.010	0.006	0.004	0.002	0.002			
Fy_e(KN)	1.59	0.906	0.634	0.373	0.352			
Respuesta no lineal máxima para cada Rna								
dmax_e (m)	0.19	0.25	0.29	0.29	0.29			
Razon de ductilidad para estructura base fija, μ_{na}	18.99	43.73	72.46	123.19	130.43			
Estructura Aislada (Modelo 2GDL)								
Respuesta Elástica								
dyea_elast	0.05	m						
Fyea_elast	0.82	KN						
Respuesta no lineal maxima-Estructura con Rna colocada sobre el aislador								
dmax_ea(m)	0.005	0.005	0.050	0.110	0.120			
dmax_ais(m)	0.22	0.22	0.180	0.120	0.110			
Factor de reduccion de resistencia para estructura aislada, Ra	0.52	0.90	1.29	2.20	2.33			
Razon de ductilidad para estructura aislada, μ_{na}	0.50	0.87	12.49	46.73	53.97			

Tabla 6-7 Parámetros de análisis y resultados para estructura con Tna=0.5s

Elaborado por: Dennis Garces

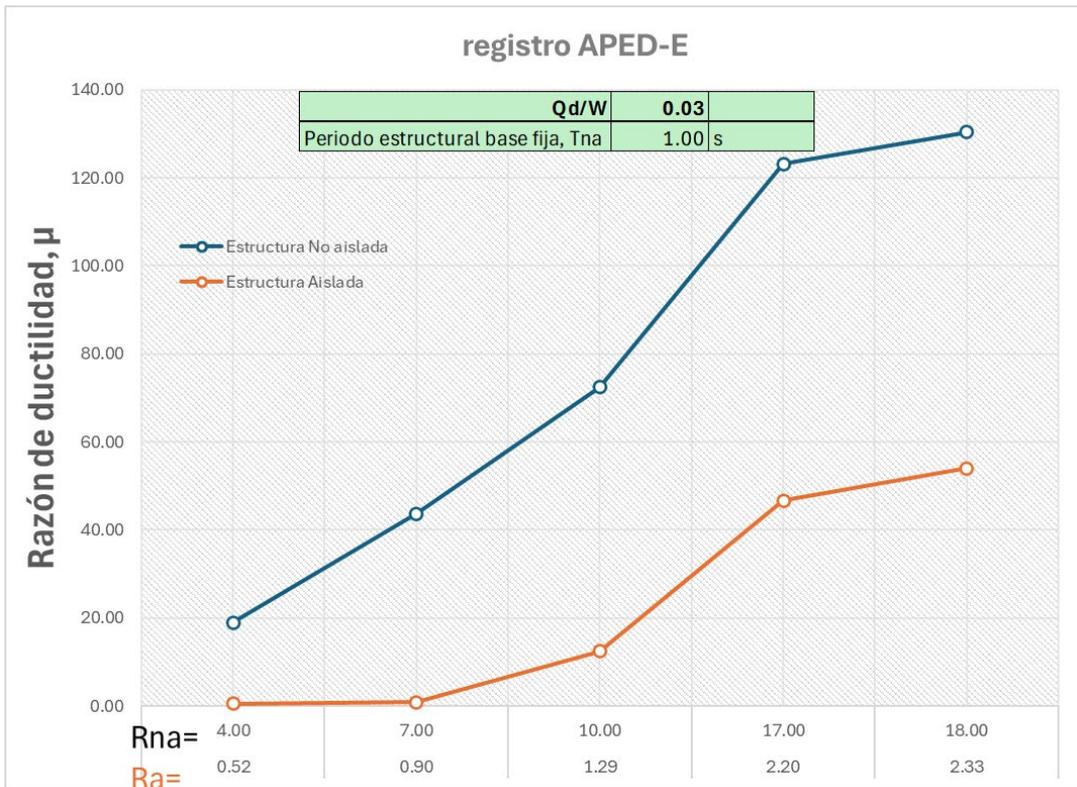


Figura 6.7 Razón de ductilidad vs. Factores de Reducción de Resistencia
Elaborado por: Dennis Garces

6.1.7 Estructuras con Periodo de 1.0s y Aislador Tipo 1.

REGISTRO AMNT-N								
Qd/W	0.03							
Periodo estructural base fija, Tna	1.00	s						
Estructura No Aislada (Modelo 1GDL)								
Respuesta Elástica								
dye_elastico	0.098	m						
Fye_elastico	3.88	KN						
Factor de reduccion de resistencia para estructura de base fija, Rna	4	7	10	17	18			
dy_e (m)	0.024	0.014	0.010	0.006	0.005			
Fy_e (KN)	0.97	0.554	0.388	0.228	0.215			
Respuesta no lineal máxima para cada Rna								
dmax_e (m)	0.28	0.28	0.29	0.25	0.26			
Razon de ductilidad para estructura base fija, μ_{na}	11.48	20.10	29.74	43.58	47.99			
Estructura Aislada (Modelo 2GDL)								
Respuesta Elástica								
dyea_elast	0.02	m						
Fyea_elast	0.78	KN						
Respuesta no lineal maxima-Estructura con Rna colocada sobre el aislador								
dmax_ea (m)	0.019	0.09	0.140	0.240	0.240			
dmax_ais (m)	0.2	0.13	0.070	0.020	0.020			
Factor de reduccion de resistencia para estructura aislada, Ra	0.81	1.41	2.01	3.42	3.62			
Razon de ductilidad para estructura aislada, μ_a	0.78	6.46	14.36	41.83	44.30			

Tabla 6-8 Parámetros de análisis y resultados para estructura con Tna=1.0s

Elaborado por: Dennis Garces

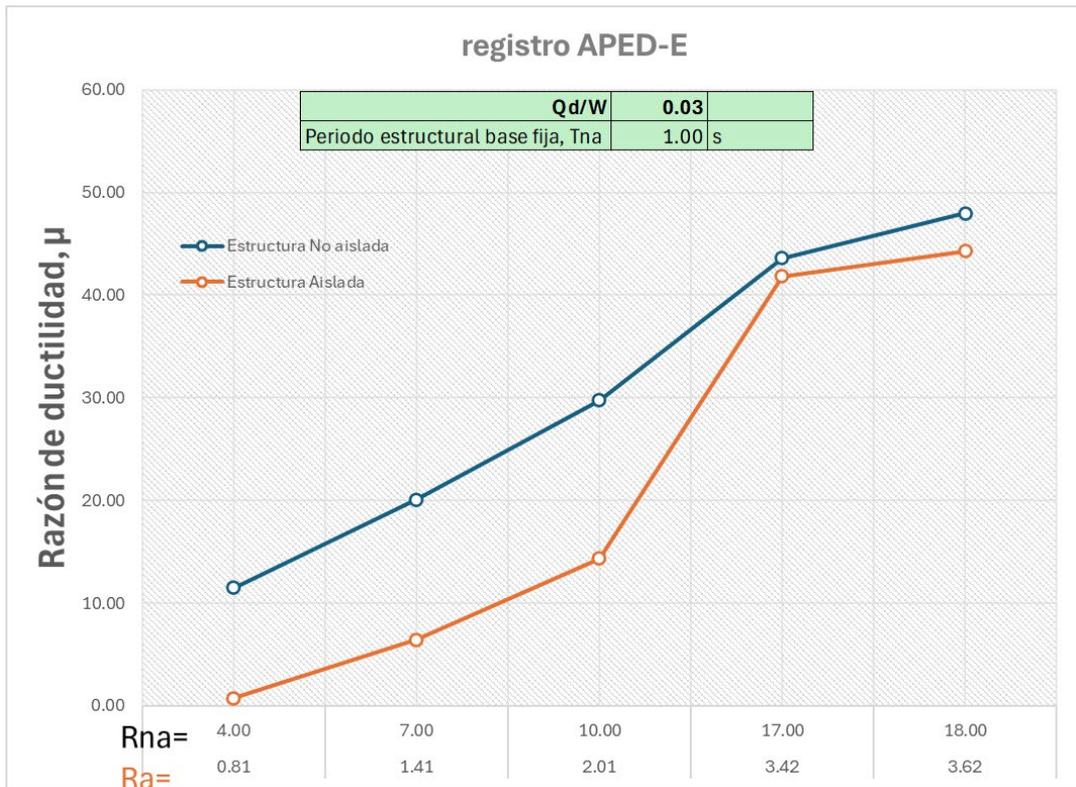


Figura 6.8 Razón de ductilidad vs. Factores de Reducción de Resistencia
Elaborado por: Dennis Garces

6.1.8 Estructuras con Periodo de 2.0s y Aislador Tipo 1

REGISTRO AMNT-N								
Qd/W	0.03							
Periodo estructural base fija, Tna	2.00	s						
Estructura No Aislada (Modelo 1GDL)								
Respuesta Elástica								
dye_elastico	0.345	m						
Fye_elastico	3.42	KN						
Respuesta no lineal máxima para cada Rna								
Factor de reduccion de resistencia para estructura de base fija, Rna	4	7	10	17	18			
dy_e(m)	0.086	0.049	0.034	0.020	0.019			
Fy_e(KN)	0.86	0.489	0.342	0.201	0.190			
Respuesta no lineal máxima para cada Rna								
dmax_e (m)	0.29	0.405	0.210	0.24	0.24			
Razon de ductilidad para estructura base fija, μ_{na}	3.36	8.22	6.09	11.83	12.52			
Estructura Aislada (Modelo 2GDL)								
Respuesta Elástica								
dyea_elast	0.07	m						
Fyea_elast	0.65	KN						
Respuesta no lineal maxima-Estructura con Rna colocada sobre el aislador								
dmax_ea(m)	0.07	0.12	0.170	0.200	0.200			
dmax_ais(m)	0.16	0.099	0.050	0.010	0.010			
Factor de reduccion de resistencia para estructura aislada, Ra	0.83	1.45	2.07	3.53	3.73			
Razon de ductilidad para estructura aislada, μ_{na}	0.81	2.43	4.93	9.86	10.44			

Tabla 6-9 Parámetros de análisis y resultados para estructura con Tna=2.0s

Elaborado por: Dennis Garces



Figura 6.9 Razón de ductilidad vs. Factores de Reducción de Resistencia
Elaborado por: Dennis Garces

6.1.9 Estructuras con Periodo de 0.5s y Aislador Tipo 2

REGISTRO AMNT-N								
Qd/W	0.04							
Periodo estructural base fija, Tna	0.50	s						
Estructura No Aislada (Modelo 1GDL)								
Respuesta Elástica								
dye_elastico	0.040	m						
Fye_elastico	6.34	KN						
Factor de reduccion de resistencia para estructura de base fija, Rna	4	7	10	17				
dy_e(m)	0.010	0.006	0.004	0.002				
Fy_e(KN)	1.59	0.906	0.634	0.373				
dmax_e (m)	0.19	0.25	0.29	0.29				
Razon de ductilidad para estructura base fija, μ_{na}	18.99	43.73	72.46	123.19				
Estructura Aislada (Modelo 2GDL)								
Respuesta Elástica								
dyea_elast	0.05	m						
Fyea_elast	0.82	KN						
Respuesta no lineal maxima-Estructura con Rna colocada sobre el aislador								
dmax_ea(m)	0.007	0.06	0.120	0.230				
dmax_ais(m)	0.22	0.16	0.110	0.060				
Factor de reduccion de resistencia para estructura aislada, Ra	0.52	0.90	1.29	2.20				
Razon de ductilidad para estructura aislada, μ_{na}	0.70	10.49	29.98	97.70				

Tabla 6-10 Parámetros de análisis y resultados para estructura con Tna=0.5s

Elaborado por: Dennis Garces

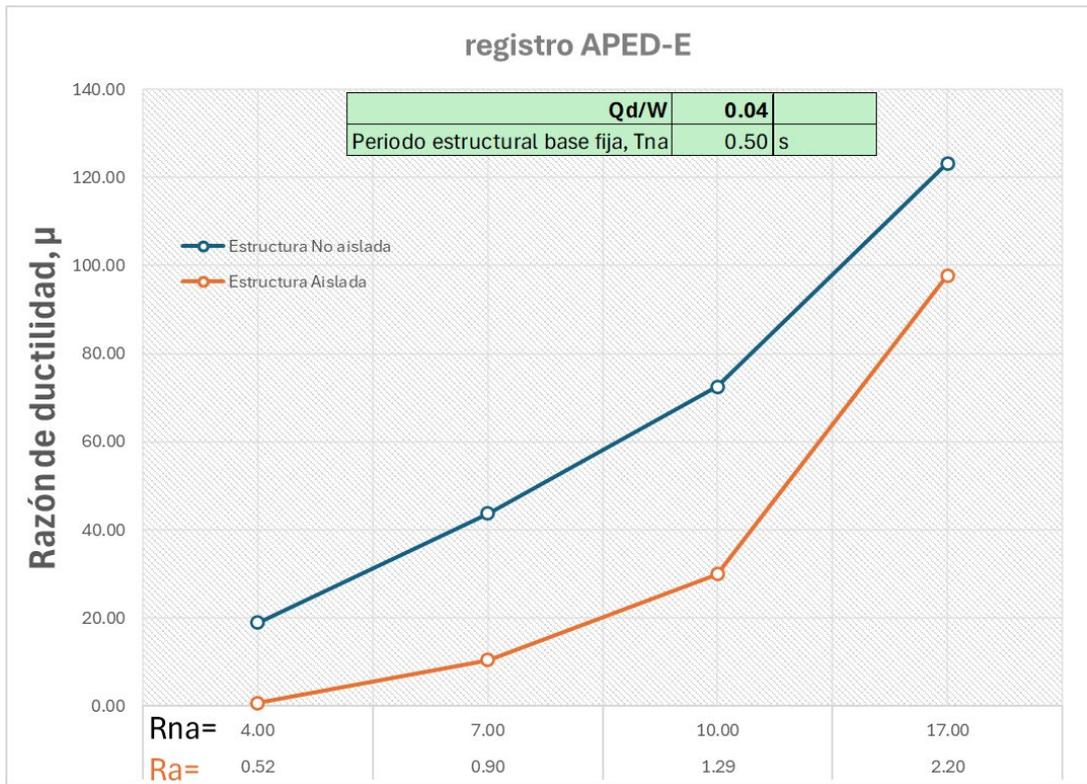


Figura 6.10 Razón de ductilidad vs. Factores de Reducción de Resistencia
Elaborado por: Dennis Garces

6.1.10 Estructuras con Periodo de 1.5s y Aislador Tipo 2

REGISTRO AMNT-N								
Qd/W	0.04							
Periodo estructural base fija, Tna	1.50	s						
Estructura No Aislada (Modelo 1GDL)								
Respuesta Elástica								
dye_elastico	0.259	m						
Fye_elastico	4.58	KN						
Factor de reduccion de resistencia para estructura de base fija, Rna	4	7	10	17				
dy_e(m)	0.065	0.037	0.026	0.015				
Fy_e(KN)	1.14	0.654	0.458	0.269				
dmax_e (m)	0.21	0.26	0.27	0.29	0.25			
Razon de ductilidad para estructura base fija, μ_{na}	3.24	7.02	10.41	19.01	#;DIV/0!			
Estructura Aislada (Modelo 2GDL)								
Respuesta Elástica								
dyea_elast	0.04	m						
Fyea_elast	0.71	KN						
Respuesta no lineal maxima-Estructura con Rna colocada sobre el aislador								
dmax_ea(m)	0.23	0.14	0.180	0.250				
dmax_ais(m)	0.002	0.08	0.030	0.009				
Factor de reduccion de resistencia para estructura aislada, Ra	0.62	1.09	1.55	2.64				
Razon de ductilidad para estructura aislada, μ_{na}	3.55	3.78	6.94	16.39				

Tabla 6-11 Parámetros de análisis y resultados para estructura con Tna=1.5s

Elaborado por: Dennis Garces

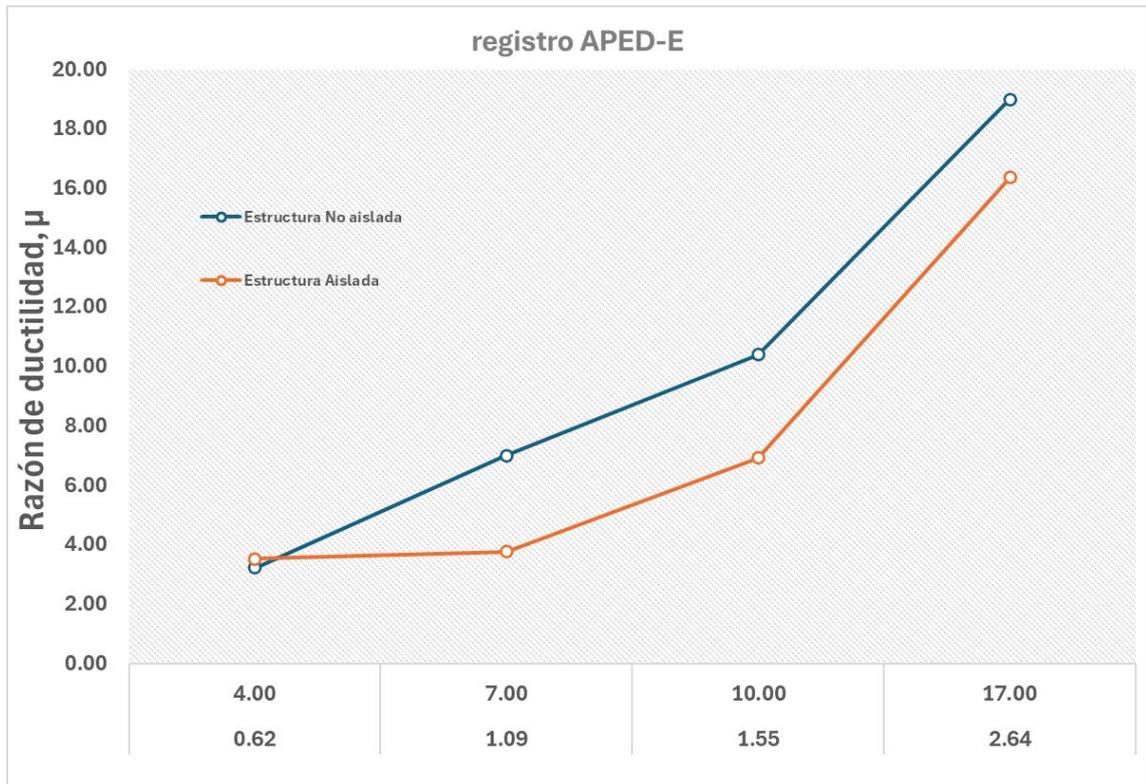


Figura 6.11 Razón de ductilidad vs. Factores de Reducción de Resistencia
Elaborado por: Dennis Garces

6.1.11 Estructuras con Periodo de 2.0s y Aislador Tipo 2

REGISTRO AMNT-N								
Qd/W	0.04							
Periodo estructural base fija, Tna	2	s						kn
Estructura No Aislada (Modelo 1GDL)								
Respuesta Elástica								
dye_elastico	0.345	m						
Fye_elastico	3.42	KN						
Factor de reduccion de resistencia para estructura de base fija, Rna								
	4	7	10	17	18			
dy_e(m)	0.086	0.049	0.034	0.020	0.019			
Fy_e(KN)	0.86	0.489	0.342	0.201	0.190			
dmax_e (m)	0.29	0.405	0.210	0.24	0.24			
Razon de ductilidad para estructura base fija, μ_{na}	3.36	8.22	6.09	11.83	12.52			
Estructura Aislada (Modelo 2GDL)								
Respuesta Elástica								
dyea_elast	0.09	m						
Fyea_elast	0.89	KN						
Respuesta no lineal maxima-Estructura con Rna colocada sobre el aislador								
dmax_ea(m)	0.098	0.18	0.190	0.220	0.220			
dmax_ais(m)	0.13	0.04	0.020	0.006	0.006			
Factor de reduccion de resistencia para estructura aislada, Ra	0.83	1.45	2.07	3.53	3.73			
Razon de ductilidad para estructura aislada, μ_{na}	1.14	3.65	5.51	10.84	11.48			

Tabla 6-12 Parámetros de análisis y resultados para estructura con Tna=2.0s

Elaborado por: Dennis Garces



Tabla 6-13 Razón de ductilidad vs. Factores de Reducción de Resistencia
Elaborado por: Dennis Garces

6.2 Modelo realizado para OpenseesPy 1GDL

```
# Importar las bibliotecas necesarias
from openseespy.opensees import *
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Limpiar el modelo existente
wipe()

# Parámetros del sistema masa-resorte
masa = 1.0 # Masa en kN*s²/m
rigidez_resorte = 158.0 # Rigidez del resorte en kN/m
amortiguamiento = 0.05 # Factor de amortiguamiento (5%)

registro_sismico = np.loadtxt("APED-E--E.txt")
dt = 0.02 # Paso de tiempo del registro sísmico en segundos (ajustar según tu archivo)
tiempo = np.arange(0, len(registro_sismico) * dt, dt)

# Crear el modelo de 1GDL
model("BasicBuilder", "-ndm", 1, "-ndf", 1)

# Definir nodos
node(1, 0.0) # Nodo base (fijo)
node(2, 0.0) # Nodo de masa
```

```

# Restringir el nodo base (nodo 1)
fix(1, 1)

# Asignar la masa al nodo de masa (nodo 2)
mass(2, masa)

# Definir el material elástico para el resorte
uniaxialMaterial("Elastic", 1, rigidez_resorte)

# Definir el elemento resorte como un "zeroLength" entre los nodos 1 y 2
element("zeroLength", 1, 1, 2, "-mat", 1, "-dir", 1)

# Configurar el amortiguamiento de Rayleigh
omega = (rigidez_resorte / masa) ** 0.5 # Frecuencia natural
alpha_m = 2 * amortiguamiento * omega
rayleigh(alpha_m, 0.0, 0.0, 0.0)

# Crear la serie de tiempo con el registro sísmico
timeSeries("Path", 1, "-dt", dt, "-values", *registro_sismico)

# Definir el patrón de carga con la serie de tiempo
pattern("UniformExcitation", 1, 1, "-accel", 1)

# Configuración de análisis
constraints("Plain")
numberer("Plain")
system("BandGeneral")
test("NormDisplncr", 1e-6, 10)
algorithm("Newton")
integrator("Newmark", 0.5, 0.25)
analysis("Transient")

# Ejecutar el análisis y almacenar los desplazamientos
desplazamientos = []
for i in range(len(registro_sismico)):
    analyze(1, dt)
    desplazamiento = nodeDisp(2, 1)
    desplazamientos.append(desplazamiento)

# Limpiar el modelo después del análisis
wipe()

# -----
ops.recorder('Node', '-file', 'Node_Dsp1111.out', '-time', '-node', 2, '-dof', 1, 2, 3, 'disp')
ops.recorder('Element', '-file', 'Elmt_Frc1111.out', '-time', '-ele', 1, 'force')
# -----
# Fin de la generación de grabadores
ops.wipe() # Limpiar el modelo

```

6.3 Modelo realizado para OpenseesPy 2GDL

```

import openseespy.opensees as ops
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import opsviz as opsv
import math

#%% Modelo
ops.wipe()
# Parámetros del sistema masa-resorte

```

```

masa = 1.0 # Masa en kN*s2/m
rigidez_resorte = 158.0 # Rigidez del resorte en kN/m
amortiguamiento = 0.05 # Factor de amortiguamiento (5%)
# etiqueta xCrd yCrd masa
ops.node(1, 0.0, 0.0) # Coordenadas del nodo 1
ops.node(2, 0.0, 3.0) # Coordenadas del nodo 2
ops.mass(2, masa, masa, 0.0) # Masa aplicada al nodo 2

# Definir las condiciones de frontera
# etiqueta DX DY RZ
ops.fix(1, 1, 1, 1) # Fija el nodo 1 en todos los GDL
ops.fix(2, 0, 0, 0) # El nodo 2 queda libre para moverse

# Definir modelos de materiales
# -----
kv= 7500.0 # Rigidez
zetaVertical= 0.02 # Razón de amortiguamiento para la dirección vertical
cv= 2.0*zetaVertical*np.sqrt(masa) # Coeficiente de amortiguamiento viscoso

ops.uniaxialMaterial('Elastic', 1, kv, cv) # Material elástico para la rigidez vertical
ops.uniaxialMaterial('Elastic', 2, 1.0e5) # Material elástico para rigidez grande

# Definir el modelo de fricción para elementos FP
# -----
# frictionModel Coulomb etiqueta mu
ops.frictionModel('Coulomb', 1, 0.163) # Modelo de fricción Coulomb con coeficiente mu

# Definir un elemento de apoyo de péndulo de fricción simple
ops.element('singleFPBearing', 1, 1, 2, 1, 0.30, 36.498, '-P', P, '-Mz', 2, '-orient', 0, 1, 0, -1, 0, 0)

# Definir cargas gravitacionales
# -----
# Crear un patrón de carga simple con una serie de tiempo lineal
ops.timeSeries('Linear', 1) # Crea una serie de tiempo lineal con etiqueta 1
ops.pattern('Plain', 1, 1) # Define un patrón de carga estática
ops.load(2, 0.0, -P, 0.0) # Aplica una carga gravitacional al nodo 2 en la dirección Y
# -----
# Inicio de la generación de grabadores
# -----
# Crear un grabador para los desplazamientos en el nodo 2
ops.recorder('Node', '-file', 'Gravity_Dsp.out', '-time', '-node', 2, '-dof', 1, 2, 3, 'disp')
# Crear un grabador para las fuerzas del elemento
ops.recorder('Element', '-file', 'Gravity_Frc.out', '-time', '-ele', 1, 'force')
# -----

# -----
# Realizar un análisis de valores propios
# -----
pi = math.acos(-1.0)
lambda_vals = ops.eigen('-fullGenLapack', 2) # Realiza el análisis de valores propios
print('Valores propios al inicio del transitorio:')
print('lambda | omega | periodo | frecuencia')

for lamb in lambda_vals:
    omega = math.sqrt(lamb)
    period = 2.0 * pi / omega
    frequency = 1.0 / period
    print(f'lamb: {lamb:.3e} | omega: {omega:.4f} | periodo: {period:.4f} | frecuencia: {frequency:.4f}')

# -----
# Definir cargas dinámicas
# -----

```

```

dt= 0.01 # Paso de tiempo
scale= 1.0 # Factor de escala
npts= 9944 # Número de puntos de tiempo

# Crear una serie de tiempo con datos de registros sísmicos
ops.timeSeries('Path', 2, '-filePath', 'APO1--E.txt', '-dt', dt, '-factor', g*scale)

# Definir un patrón de carga UniformExcitation en la dirección X
ops.pattern('UniformExcitation', 2, 1, '-accel', 2)

# Definir parámetros de amortiguamiento de Rayleigh
alphaM = 0.05 # Amortiguamiento proporcional a la masa
betaK = 0.0 # Amortiguamiento proporcional a la rigidez actual
betaKinit = 0.0 # Amortiguamiento proporcional a la rigidez inicial
betaKcomm = 0.0 # Amortiguamiento proporcional a la rigidez última comprometida

ops.rayleigh(alphaM, betaK, betaKinit, betaKcomm) # Configura el amortiguamiento de Rayleigh

# -----
# Inicio de la generación de grabadores
# -----
ops.recorder('Node', '-file', 'Node_Dsp1111.out', '-time', '-node', 2, '-dof', 1, 2, 3, 'disp')
ops.recorder('Element', '-file', 'Elmt_Frc1111.out', '-time', '-ele', 1, 'force')
# -----
# Fin de la generación de grabadores
# -----

# -----
# Inicio del análisis transitorio
# -----
ops.system('BandGeneral')
ops.numberer('Plain')
ops.constraints('Plain')
ops.test('NormDispIncr', 1.0e-12, 25) # Prueba de convergencia
ops.integrator('Newmark', 0.5, 0.25) # Integrador Newmark
ops.algorithm('Newton')
ops.analysis('Transient') # Configuración del análisis transitorio

# Realizar el análisis
ops.logFile('TestFPS2d_0.log')
dtAna = dt / 1.0 # Paso de tiempo inicial
dtMin = 1.0e-8 # Paso de tiempo mínimo
dtMax = dtAna # Paso de tiempo máximo

ok = 0 # Inicializa la bandera de éxito
tFinal = npts * dt # Tiempo total del análisis
tCurrent = ops.getTime() # Tiempo actual del análisis

ops.record() # Inicia la grabación de datos de la simulación
while ok == 0 and tCurrent < tFinal:
    ok = ops.analyze(1, dtAna)
    if ok != 0:
        if dtAna / 2.0 >= dtMin:
            dtAna /= 2.0
            print(f"Reduciendo el paso de tiempo (nuevo dt = {dtAna:.6e})")
            ok = 0
        else:
            tCurrent = ops.getTime()
            print(f"t = {tCurrent:.4f} seg")
            if dtAna * 2.0 <= dtMax:

```

```
dtAna *= 2.0
print(f"Aumentando el paso de tiempo (nuevo dt = {dtAna:.6e})")

if ok != 0:
    print(f"El modelo falló (tiempo = {tCurrent:.3e})")
else:
    print("Análisis transitorio completado")

opsv.plot_model(1,2) # Graficar la geometría del modelo
opsv.wipe() # Limpiar el modelo
```