

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO



Análisis de un sistema de aislamiento sísmico modular para la protección de personas vulnerables y contenidos en ambientes pequeños en el Perú

TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAGÍSTER EN INGENIERÍA CIVIL

AUTOR

Ing. Fernando José Campos De la Cruz

ASESOR

Mag. Ing. Carlos Alberto Sosa Cárdenas

Febrero, 2021

RESUMEN

En la actualidad, el uso de sistemas de aislamiento sísmico en el Perú está dirigido a edificaciones esenciales, y otros edificios si el costo del sistema es rentable. Sin embargo, hay casos poco atendidos como la protección efectiva de personas vulnerables dentro de sus viviendas, y contenidos delicados dentro de algún ambiente de un edificio ya existente.

La ingeniería sismorresistente se enfoca en una persona promedio –persona que puede evacuar una edificación sin ayuda–. Sin embargo, el 10% de la población del Perú son personas con discapacidad, y durante un sismo es más probable que se encuentren solas en sus viviendas (edificio común) y no en un hospital con aislamiento sísmico (edificación esencial). Diversos estudios internacionales indican que la situación de estas personas, ya de por sí vulnerables, se agrava luego de un sismo moderado o severo. Asimismo, actualmente no hay una opción económica de aislamiento sísmico, que proteja al menos los contenidos importantes dentro de una zona de una estructura existente. Por estas razones, se necesitan propuestas de aislamiento sencillas y económicas para casos de pequeña escala como: la habitación de una persona vulnerable en un primer piso, un sector de un hospital antiguo, un ambiente con contenidos delicados dentro una estructura existente o nueva, etc.

La tesis propone y analiza numéricamente un modelo de sistema de aislamiento sísmico modular que reduce las aceleraciones en la plataforma o piso sobre el que estarían las personas vulnerables y/o contenido delicado. Para definir un sismo representativo para el análisis se incluyen: parámetros estandarizados como la aceleración máxima del suelo y la intensidad de Mercalli modificada, y otras variables como el potencial destructivo del sismo y la duración del sismo. En base a estos criterios, entre los sismos históricos más relevantes del Perú, las señales sísmicas que mejor representan al sismo de mayor intensidad son de Arequipa 2001 y Pisco 2007. Luego, se define el modelo de sistema de aislamiento sísmico modular, con apoyos cada 0.25m^2 para que sea adaptable en ambientes pequeños. Cada apoyo aísla la plataforma del movimiento sísmico en la base, mediante una rótula mecánica y contacto liso, dentro de una superficie cóncava que le permite moverse libremente.

Para el análisis, se considera una plataforma unitaria cuadrada de 0.25m^2 y se varía sus diferentes parámetros dinámicos para evaluar su influencia en la atenuación del movimiento y de la aceleración. Esto permite definir los parámetros dinámicos optimizados de diseño. Se calculó su comportamiento con Matlab y se simuló su comportamiento en Ansys Workbench, con resultados similares. El sistema propuesto puede reducir la aceleración máxima hasta en un 85%. Con esto se logra un efecto que cumple con estándares de confort de personas ante vibraciones cotidianas. Finalmente, se presenta los planos del sistema de aislamiento modular, así como planos de una serie de ejemplos de aplicación.

KEYWORDS: base isolated, modular seismic isolation system, seismic protection, people with disabilities, non-structural elements, earthquake characterization



DEDICATORIA

A mi madre y mi abuela
Todos mis logros se deben a su infinito amor



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas las personas que participaron directa o indirectamente en esta tesis. Cada comentario hizo posible que el resultado de la tesis sea mejor.

Agradezco a cada uno de mis profesores de la maestría. En cada uno de sus cursos encontré una contribución a la idea de esta tesis.

Un agradecimiento especial a mi asesor Carlos Sosa, por creer en esta idea y ayudarme a desarrollarla.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABLAS.....	iv
LISTA DE ABREVIATURAS	v
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2 ESTADO DEL ARTE	3
1.2.1 Consecuencias de los desastres sobre las personas vulnerables.....	4
1.2.2 Estudios de reducción de riesgo de daño sobre las personas con discapacidad.....	4
1.2.3 Sistemas de aislamiento sísmico	5
1.2.4 Modelamiento de la respuesta de sistemas de aislamiento sísmico.....	6
1.2.5 Sismo de diseño para la evaluación de un sistema de aislamiento sísmico	7
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	8
1.4 OBJETIVOS.....	10
Objetivo general.....	10
Objetivos específicos.....	10
1.5 HIPÓTESIS	11
1.6 ALCANCES Y LIMITACIONES	11
CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	13
2.1 PERSONA CON DISCAPACIDAD	13
2.2 PERSONA EN SILLA DE RUEDAS.....	13
2.3 ESTUDIOS Y NORMATIVA SOBRE DISCAPACIDAD Y ACCESIBILIDAD	14
2.4 FILOSOFÍA DEL DISEÑO SISMORRESISTENTE	16
2.5 DAÑO NO ESTRUCTURAL EN EDIFICACIONES.....	18
2.6 PROTOCOLOS DE PROTECCIÓN SÍSMICA	20
2.7 SISTEMAS DE PROTECCIÓN SÍSMICA.....	20
2.8 SISMOS LOCALES.....	22
2.9 SISMO SEVERO DE DISEÑO	22
2.10 PARÁMETROS DINÁMICOS DE DISEÑO DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN SÍSMICA.....	23
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	25
3.1 MÉTODO TEÓRICO.....	25
3.1.1 MODELOS TEÓRICOS	28
3.1.2 OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DINÁMICOS	29

3.1.3	RESPUESTA DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO EN MATLAB/SIMULINK.....	29
3.2	MÉTODO NUMÉRICO	30
3.2.1	RESPUESTA DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO EN ANSYS WORKBENCH.....	31
3.3	MÉTODO COMPARATIVO.....	32
CAPÍTULO IV: SISTEMA DE AISLAMIENTO SÍSMICO.....		33
4.1	CARACTERIZACIÓN LOCAL DE SISMOS.....	33
4.2	SISMOS LEVE, MODERADO, Y SEVERO.....	41
4.3	MODELOS PRELIMINARES DE SISTEMAS DE AISLAMIENTO	46
4.3.1	Primer modelo de apoyo.....	51
4.3.2	Segundo modelo de apoyo	56
4.3.3	Tercer modelo de apoyo	60
4.4	MODELO TEÓRICO DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO	62
4.5	OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DINÁMICOS DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO	66
4.6	SIMULACIÓN EN MATLAB DE LA RESPUESTA DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO A UN SISMO	77
4.7	MODELO NUMÉRICO DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO.....	84
4.7.1	Primer modelo del sistema de aislamiento.....	84
4.7.2	Segundo modelo del sistema de aislamiento	87
4.7.3	Tercer modelo del sistema de aislamiento.....	89
4.8	SIMULACIÓN EN ANSYS WORKBENCH DE LA RESPUESTA DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO A UN SISMO	92
4.8.1	MODELO 2:	93
4.8.2	MODELO 3.....	97
CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		99
5.1	MODELO TEÓRICO.....	99
5.1.1	Respuesta del aislador en Matlab/Simulink.....	99
5.2	MODELO NUMÉRICO.....	99
5.2.1	Respuesta del aislador en Ansys Workbench	100
5.3	PARÁMETROS DE OPTIMIZACIÓN DE LA PLATAFORMA DE PROTECCIÓN	100
5.4	COMPARACIÓN DE RESPUESTAS DE LA PLATAFORMA DE PROTECCIÓN	100
5.5	PLANOS DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO SÍSMICO MODULAR.....	102
5.6	EJEMPLOS DE APLICACIÓN.....	106
CONCLUSIONES		110
RECOMENDACIONES		113
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		115

ANEXOS.....	122
1. PROGRAMA EN MATLAB: COMPARACIÓN DE SISMOS PERUANOS	122
2. ECUACIONES DE EQUILIBRIO DINÁMICO EN MATLAB.....	124
3. CÓDIGOS MATLAB DE OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DINÁMICOS DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO	125
4. CÓDIGOS MATLAB DE RESPUESTA EN EL TIEMPO, DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO, PARA ACELERACIÓN Y DESPLAZAMIENTOS.....	127



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. 1: Influencia de los sismos sobre las personas dentro de las edificaciones.	2
Figura 1. 2: Esquema de funcionamiento del Triple péndulo de fricción.	5
Figura 1. 3: Optimización del desempeño del triple péndulo de fricción.	6
Figura 1. 4: Modelo del cuerpo humano sentado, con 20 grados de libertad.....	7
Figura 2. 1: Silla de ruedas estándar.....	14
Figura 2. 2: Desglose de los costos en edificios de oficinas, hoteles, y hospitales.....	19
Figura 2. 3: Esquema de una estructura de un nivel.....	24
Figura 3. 1: Entorno de SeismoSignal para la corrección de acelerogramas.....	26
Figura 3. 2: Entorno de AnalisisSismo para la comparación de sismos.....	28
Figura 3. 3: Entorno del módulo Mechanical, dentro de Ansys Workbench.....	31
Figura 4. 1: Localización de epicentros y estaciones de los terremotos peruanos seleccionados.....	33
Figura 4. 2: Gráfico comparativo de acelerogramas de los 5 sismos peruanos seleccionados	35
Figura 4. 3: Gráfico comparativo de velocidades de los 5 sismos peruanos seleccionados.	36
Figura 4. 4: Gráfico comparativo de desplazamientos de los 5 sismos peruanos seleccionados.....	37
Figura 4. 5: Gráfico comparativo de PGA.....	39
Figura 4. 6: Gráfico comparativo de PGV.....	39
Figura 4. 7: Gráfico comparativo de PGD.....	40
Figura 4. 8: Gráfico comparativo de Intensidad de Arias.....	40
Figura 4. 9: Gráfico comparativo de Poder Destructivo.....	40
Figura 4. 10: Señal de Arequipa 2001, escalada a sismo leve, moderado y severo.....	41
Figura 4. 11: Gráfico comparativo de PGV.....	43
Figura 4. 12: Gráfico comparativo de PGD.....	43
Figura 4. 13: Gráfico comparativo de Intensidad de Arias.....	44
Figura 4. 14: Gráfico comparativo de Poder Destructivo.....	44
Figura 4. 15: Contenido de frecuencias de 5 registros sísmicos peruanos.....	45
Figura 4. 16: Elevación y planta del primer modelo de sistema de aislamiento.....	48
Figura 4. 17: Elevación y planta del segundo modelo de sistema de aislamiento.....	49
Figura 4. 18: Elevación y planta del tercer modelo de sistema de aislamiento.....	50
Figura 4. 19: Modelo 1 para los ejes horizontales x e y.....	51
Figura 4. 20: Modelo 1 para el eje vertical z.....	52
Figura 4. 21: Medición del amortiguamiento: a) Eje horizontal, b) Eje vertical.....	53
Figura 4. 22: Medición del decremento logarítmico.....	54
Figura 4. 23: Variación de la Transmisibilidad (TR) en función de la diferencia de radios (R-r) [m].....	54
Figura 4. 24: Variación de la Transmisibilidad (TR) en función del coeficiente de amortiguamiento (ξ).....	55
Figura 4. 25: Modelo 2 para los ejes horizontales.....	57
Figura 4. 26: Variación de la Transmisibilidad (TR) en función de la diferencia de radios (R-r) [m].....	58

Figura 4. 27: Variación de la Transmisibilidad (TR) en función del coeficiente de amortiguamiento (ξ)	59
Figura 4. 28: Juntas tipo rótula de acero.	60
Figura 4. 29: Modelo 3, tridimensional, para Ansys Workbench	61
Figura 4. 30: Rótula del tercer modelo	62
Figura 4. 31: Modelo OVE1GDL ante sismo	62
Figura 4. 32: Modelo para equilibrio dinámico horizontal ante sismo	63
Figura 4. 33: Diagrama de equilibrio dinámico horizontal ante sismo	64
Figura 4. 34: Influencia de la rigidez K [kg/m] en la respuesta	68
Figura 4. 35: Influencia de la masa [kg] en la respuesta	69
Figura 4. 36: Influencia del coeficiente de rugosidad μ_2 en la respuesta	70
Figura 4. 37: Influencia del coeficiente de rugosidad μ_1 en la respuesta	71
Figura 4. 38: Influencia del radio efectivo [m] en la respuesta	72
Figura 4. 39: Influencia del radio efectivo [m] y coeficiente de rugosidad μ_1 [%] en la respuesta de aceleraciones	73
Figura 4. 40: Influencia del radio efectivo [m] y coeficiente de rugosidad μ_1 [%] en la respuesta de desplazamientos	74
Figura 4. 41: Influencia del radio efectivo [m] y coeficiente de rugosidad μ_1 [%] en la respuesta de aceleraciones	75
Figura 4. 42: Influencia del radio efectivo [m] y coeficiente de rugosidad μ_1 [%] en la respuesta de desplazamientos	76
Figura 4. 43: Gráfico de respuesta a sismo leve Arequipa 2001	78
Figura 4. 44: Gráfico de respuesta a sismo moderado Arequipa 2001	79
Figura 4. 45: Gráfico de respuesta a sismo severo Arequipa 2001	80
Figura 4. 46: Gráfico de respuesta a sismo leve Pisco 2007	81
Figura 4. 47: Gráfico de respuesta a sismo moderado Pisco 2007	82
Figura 4. 48: Gráfico de respuesta a sismo severo Pisco 2007	83
Figura 4. 49: Modelo 1 de la plataforma en Ansys	84
Figura 4. 50: Modelo 1: Contacto bola - base	85
Figura 4. 51: Desplazamiento en función al tiempo, por caída libre, registrado en Ansys	86
Figura 4. 52: Modelo 2 de la plataforma en Ansys: a) Reff 3.00m, b) Reff 2.00m	87
Figura 4. 53: Modelo 2: Contacto rotula - plato	88
Figura 4. 54: Modelo 3 de la plataforma en Ansys	89
Figura 4. 55: Conexiones sujetador - rótula - base del Modelo 3	90
Figura 4. 56: Modelo 3 + persona en silla de ruedas	91
Figura 4. 57: Acelerograma sinusoidal corregido.	92
Figura 4. 58: Acelerograma Pisco 2007 N-S 60 segundos	92
Figura 4. 59: Comparativo de respuesta de desplazamientos Ejemplo 1	93
Figura 4. 60: Comparativo de respuesta de aceleraciones Ejemplo 1	93
Figura 4. 61: Comparativo de respuesta de desplazamientos Ejemplo 2	94
Figura 4. 62: Comparativo de respuesta de aceleraciones Ejemplo 2	94
Figura 4. 63: Comparativo de respuesta de desplazamientos Ejemplo 3	95
Figura 4. 64: Comparativo de respuesta de aceleraciones Ejemplo 3	95
Figura 4. 65: Comparativo de respuesta de desplazamientos Ejemplo 4	96
Figura 4. 66: Comparativo de respuesta de aceleraciones Ejemplo 4	96
Figura 4. 67: Comparativo de respuesta de desplazamientos Ejemplo 1	97
Figura 4. 68: Comparativo de respuesta de aceleraciones caso 1	97
Figura 4. 69: Comparativo de respuesta de desplazamientos caso 2	98
Figura 4. 70: Comparativo de respuesta de aceleraciones caso 2	98

Figura 5. 1: Comparativo de respuesta de aceleraciones del Modelo 3 en Matlab	100
Figura 5. 2: Comparativo de respuesta de aceleraciones del Modelo 3 en Ansys	101
Figura 5. 3: Comparativo de respuesta de desplazamientos del Modelo 3 en Matlab	101
Figura 5. 4: Comparativo de respuesta de desplazamientos del Modelo 3 en Ansys	101
Figura 5. 5: Frecuencias de confort ante vibraciones.....	102
Figura 5. 6: Elevación y planta de una plataforma de 2.0 m x 2.0 m.....	103
Figura 5. 7: Corte y planta de la plataforma unitaria.....	104
Figura 5. 8: Junta entre el aislador y la estructura existente	106
Figura 5. 9: Planta de una habitación sobre la plataforma de aislamiento	107
Figura 5. 10: Planta de un ambiente de hospital sobre la plataforma de aislamiento	108
Figura 5. 11: Planta de un sector con contenidos delicados	109



LISTA DE TABLAS

Tabla 4. 1: Características de los registros sísmicos seleccionados	33
Tabla 4. 2: Resumen comparativo de los parámetros considerados para sismos locales ...	38
Tabla 4. 3: Resumen comparativo de los parámetros considerados para sismos severos (PGA 7.5m/s ²)	42
Tabla 4. 4: Valores utilizados en la optimización de los parámetros dinámicos	66
Tabla 4. 5: Respuestas máximas de aceleración de la plataforma optimizada	77
Tabla 4. 6: Resumen de propiedades de los componentes del Modelo 1	86
Tabla 4. 7: Resumen de propiedades de los componentes del Modelo 2	88
Tabla 4. 8: Resumen de propiedades de los componentes del Modelo 3	91



LISTA DE ABREVIATURAS

CENEPRED	Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres
CONADIS	Consejo Nacional para la Integración de las Personas con Discapacidad
GDL	Grados de libertad
la	Intensidad de Arias
IMM	Intensidad Modificada de Mercalli
INDECI	Instituto Nacional de Defensa Civil
ODE	Ordinary Differential Equation
OMS	Organización Mundial de la Salud
OVE1GDL	Objeto visco elástico de un grado de libertad
PCD	Persona Con Discapacidad
PD	Poder Destructivo
PGA	Peak Ground Acceleration
PGD	Peak Ground Displacement
PGV	Peak Ground Velocity
PSR	Persona en Silla de Ruedas
RNE	Reglamento Nacional de Edificaciones
TEPT	Trastorno de Estrés Postraumático
WHODAS	World Health Organization Disability Assessment Schedule

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, el uso de sistemas de aislamiento en zonas de alta sismicidad en el Perú está dirigido a edificaciones esenciales como los hospitales y, si el costo del sistema es rentable, a otros edificios como multifamiliares y comerciales. Sin embargo, hay muchos casos poco atendidos como son la protección efectiva de personas vulnerables dentro de sus viviendas, y la protección de contenidos delicados dentro de algún ambiente de un edificio ya existente. Incluso, los hospitales antiguos que no tienen un sistema de aislamiento sísmico aún no tienen una solución eficiente de reforzamiento, al menos para sus sectores donde se encuentren pacientes en estado crítico, emergencia, o sus instalaciones que no pueden tener interrupción en su funcionamiento. Necesitan alternativas de aislamiento sísmico que sean para ambientes pequeños, y además que sean económicos.

El objetivo de la ingeniería sismorresistente es la protección de la vida y la mejora del comportamiento sísmico de las edificaciones para reducir el riesgo de colapso (NTP E030, 2016). Sin embargo, la construcción de edificaciones que no sufren daños durante un sismo severo resulta muy costoso. Por esta razón, la filosofía sismorresistente establece que se debe asegurar el funcionamiento luego del sismo severo sólo de las edificaciones esenciales en caso de una emergencia (NTP E030, 2016). En contraposición, existen estudios que sustentan la necesidad de una nueva filosofía de diseño. Takagi y Wada (2017) indican que muchos de los edificios que no colapsan luego del sismo severo, quedan muy dañados y deben ser demolidos y reconstruidos. Esto representa un mayor gasto económico, por lo que sugieren que la filosofía debería ser garantizar la continuidad de las actividades socioeconómicas, con mínimas reparaciones (Takagi & Wada, 2017). Es decir, esta continuidad no debería ser solo para los servicios básicos definidos con la actual filosofía de diseño sismorresistente. Por su parte, Liang et al (2018) indican que, después de un desastre, se presentan muchos efectos sobre la salud mental, como el trastorno de estrés postraumático (TEPT). Esto es más incidente en los sobrevivientes altamente expuestos como el adulto mayor, personas con enfermedades, y las personas de bajo nivel socioeconómico (Liang et al, 2018). Estas personas, en su gran mayoría, no se encuentran en una edificación esencial, sino en su vivienda. La tesis sugiere que tal vez se deba incluir dentro de la categoría de edificaciones esenciales, a aquellas que tengan como ocupantes a personas vulnerables.

Los reglamentos, sistemas, y construcciones existentes están orientados al *usuario promedio* —una persona que camina y puede evacuar su vivienda sin ayuda durante un sismo—. En ese caso las viviendas sí pueden ser consideradas dentro de la categoría C, *edificaciones comunes*, definida en la norma E 030 (NTP E030, 2016). Pero una persona con discapacidad no puede evacuar sola su vivienda, necesita el apoyo de otras personas (INDECI, 2017). En general, a nivel mundial existe poca investigación sobre las experiencias de las personas con discapacidad durante y después de un desastre (Phibbs, Good, Severinsen, Woodbury, & Williamson, 2014). Por esta razón esta tesis considera que, casi con seguridad, las edificaciones comunes no generan una respuesta satisfactoria ante sismos para una persona vulnerable y en particular, para una persona postrada en cama, una persona en silla de ruedas, o un adulto mayor. Durante un sismo, la mayoría de estas personas se encontrará en su vivienda y no podrá evacuarla aún con alguien que la ayude (Ver Figura 1.1a).

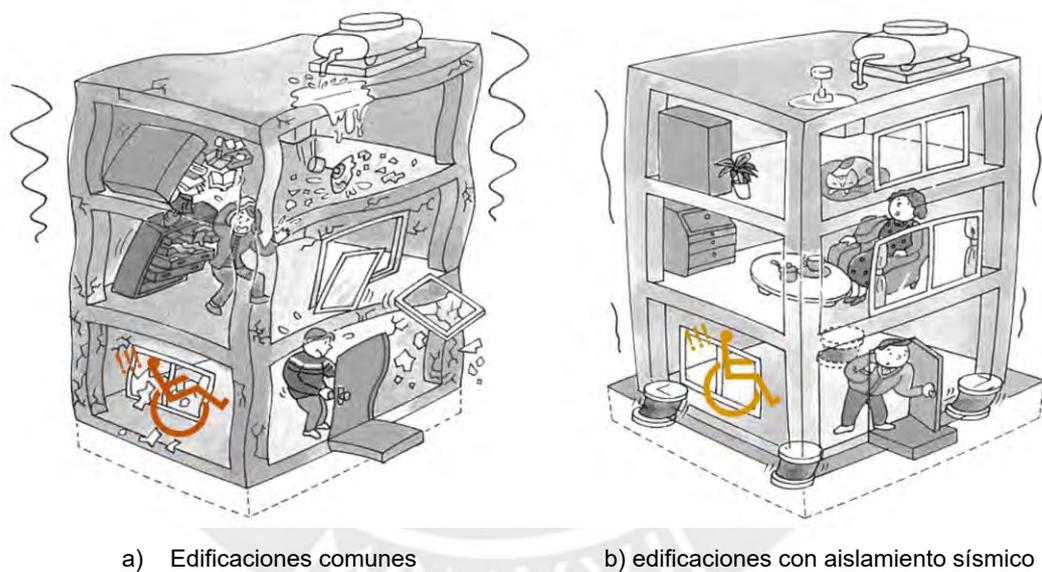


Figura 1. 1: Influencia de los sismos sobre las personas dentro de las edificaciones.

Fuente: Adaptado de Civil Digital, 2019

Es cierto que muchas personas con discapacidad física se encuentran en un hospital, y es necesario que el hospital funcione durante y después de un sismo severo. Asimismo, el hospital debe mantener su funcionamiento para poder albergar, luego de un sismo severo, a las potenciales nuevas personas con discapacidad física producto del sismo. Por estas razones un hospital es una *edificación esencial* —edificación definida en la norma E 030 (NTP E030, 2016), que no colapsa durante un sismo severo, se mantiene funcional luego del sismo, y donde los equipamientos médicos contenidos no sufrirán daños—. Pero la gran mayoría de personas vulnerables no se encuentra dentro de un hospital. En la actualidad,

los hospitales recientemente construidos cuentan con un sistema de aislamiento sísmico que les permite mantener una mayor funcionalidad, pero también existen muchos hospitales que, en su momento, se construyeron sin sistemas de aislamiento sísmico. La estructura de estos hospitales aún no está reforzada para conseguir siquiera un comportamiento parecido al de los hospitales con aislamiento sísmico. Se debería proponer sistemas de aislamiento localizado para proteger al menos los sectores más importantes de un hospital antiguo. Por ejemplo, se debería aislar al menos su sala de cuidados intensivos, los ambientes de emergencia, entre otros.

1.2 ESTADO DEL ARTE

Cada vez se incrementa el uso de sistemas de aislamiento sísmico, pero estos sistemas están enfocados en la protección de edificaciones de importancia nacional, cultural, económica, entre otros (NTP E030, 2016; NTP E031, 2018). También existen guías prácticas de diseño sismorresistente para reducir el riesgo de daño en elementos no estructurales durante un sismo (ATC, 2011), guías de evaluación de la respuesta de elementos no estructurales durante un sismo (Taghavi y Miranda, 2003), algunos estudios sobre protección de obras de arte (Sorace, Terenzi, Bitossi & Mori, 2016; Wittich & Hutchinson, 2016), entre otros. Se debe indicar que en todos estos casos se puede cubrir el costo significativo del empleo de los sistemas de aislamiento sísmico. El costo económico es una de las razones por las que los sistemas de aislamiento sísmico no se expanden a toda edificación que se ubique en una zona de alta sismicidad. Pero el problema empieza incluso antes, con el desconocimiento de la necesidad de tener que aislar más edificaciones.

Ante esto, existen estudios de otras disciplinas que miden las consecuencias de los sismos sobre las personas con discapacidad física, y aunque no dan una solución estructural, al menos buscan reducir el riesgo de daño sobre estas personas con mejores protocolos durante, y después de un sismo (Tatsuki, 2012; Tomata et al, 2014; Tuohy, Stephens & Johnston, 2014; Smith, 2009; Parker et al, 2015). Asimismo, sí se ha desarrollado el aislamiento de vibraciones de maquinarias, pero está enfocado al confort en el trabajo, y también se ha desarrollado el aislamiento en el sector automotriz, con los sistemas de suspensión para los ocupantes de automóviles. Sin embargo, desde la ingeniería estructural solo se puede mencionar que existen algunas investigaciones de técnicas ancestrales como la protección de viviendas con bases con bolsas de piedras (shicras), como las encontradas en las construcciones de la cultura Caral, en Perú. Se trata de recuperar y mejorar estas técnicas para la protección sísmica de las construcciones pequeñas de adobe de la actualidad (Vargas, J., Sosa, C., & Montoya, J., 2019).

1.2.1 Consecuencias de los desastres sobre las personas vulnerables

Existen algunos estudios que miden de forma incipiente los efectos y consecuencias de los desastres en general sobre las personas vulnerables (Tatsuki, 2012). Un estudio estadístico en Japón muestra que luego de un sismo severo o tsunami se agrava la condición de los adultos mayores y de las personas con discapacidad física (Tomata et al, 2014). Otro estudio, a partir del sismo de Canterbury del 2010, indica que los adultos mayores corren gran riesgo de agravar su condición luego de un sismo severo. Debido a su condición de movilidad reducida tardarán más, o no podrán evacuar las edificaciones (Tuohy, Stephens & Johnston, 2014). Un estudio en discapacidad y salud muestra que, en caso de desastres, las personas con discapacidad están menos preparadas para la emergencia y son más vulnerables a las lesiones y/o muerte (Smith, 2009). También existen estudios de psiquiatría, como los de Zhou et al (2015), que observaron que luego del terremoto del 2008 en Wenchuan, China, se agravó el grado de estrés postraumático de las personas con discapacidad física. Estos estudios sugieren tener un programa de prevención para esta población (Zhou et al, 2015). Como evidencia cuantitativa, se puede mencionar el trabajo de Parker, K., Adderson, J., Arseneau, M., & O'Connell, C. (2015), quienes midieron un incremento significativo del grado de discapacidad de un grupo de personas vulnerables estudiadas en Haití antes y después del sismo del 2010. Parker et al (2015), realizaron encuestas a 72 personas vulnerables antes del sismo, y a 122 personas vulnerables luego del sismo. Estas personas forman parte de la población que recibe el apoyo del Team Canada Healing Hands, una institución que ayuda a personas vulnerables. Para la evaluación utilizaron WHODAS 2.0, que es un sistema de puntuación que mide el grado de discapacidad de 0 a 100. Se encontró un incremento general de 6.6 puntos (de 43.9 aumentó a 50.5). Se resalta el incremento de 18.8 puntos en movilidad (de 43.7 a 62.5), 30 puntos en las actividades diarias (de 50 a 80), y 16.7 puntos en participación (de 58.3 a 75) (Parker et al, 2015).

1.2.2 Estudios de reducción de riesgo de daño sobre las personas con discapacidad

Se han desarrollado plataformas basadas en el aislamiento del impacto como protección de personas en sillas de ruedas debido a vibraciones cuando un vehículo está en movimiento o cuando choca (Balandin, 2007). Se ha evaluado la resistencia de las sillas de ruedas al choque frontal (Bertocci, 2000), y al impacto cuando las sillas de ruedas son utilizadas como asientos vehiculares por personas con discapacidad (Ha, 2002). Es decir, existen estudios de reducción de daño, pero desde otras especialidades con la ingeniería mecánica y biomédica. Asimismo, existen estudios que han registrado los efectos de los desastres sobre

las personas con discapacidad, pero no existen estudios que desarrollen directamente soluciones de infraestructuras que reduzcan el riesgo sísmico de las personas con discapacidad física.

1.2.3 Sistemas de aislamiento sísmico

En la actualidad, existen muchos sistemas de aislamiento sísmico. En esta tesis se puso especial atención al aislador de triple péndulo de fricción (Ver [Figura 1.2](#)), inventado por el Dr. Víctor Zayas en el 2006, y patentado en el 2013 ([Zayas, 2013](#)). Según el Dr. Zayas, la ventaja del triple péndulo de fricción es que está pensado para evitar daño, mientras que los aisladores elastoméricos solo están pensados para cumplir con la norma ([Zayas, 2016](#)). El Dr. Zayas indica que la aceleración espectral dentro de los pisos debe ser mínimo, y que su sistema propuesto no necesita mantenimiento. El triple péndulo de fricción minimiza los daños a menos de 2%, y derivas menores a 0.3% ([Zayas, 2016](#)). Se puede indicar además que, en la práctica, las piezas 3 y 5 (Ver [Figura 1.2](#)) son cubiertas en sus bordes con una manta elástica negra.

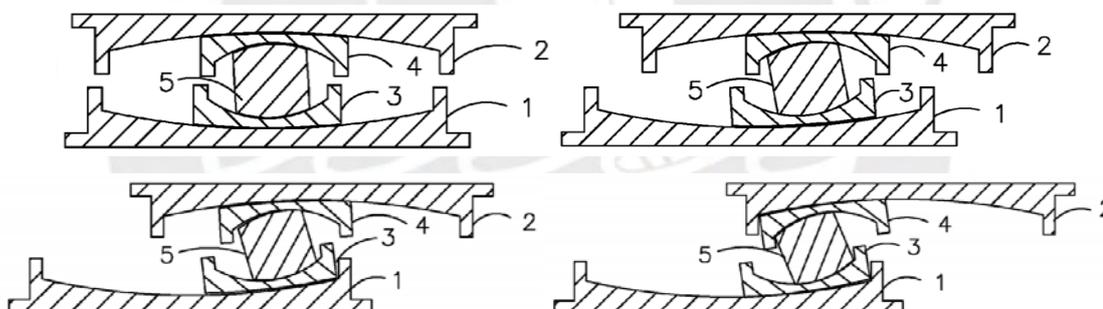


Figura 1. 2: Esquema de funcionamiento del Triple péndulo de fricción.

Fuente: [United States Patent N° US 8,484,911 B2](#)

El aislador de triple péndulo de fricción garantiza la funcionalidad continua de hospitales ([Zayas, 2016](#)). Sin embargo, no se ha justificado si los sistemas de aislamiento sísmico de hospitales tienen un comportamiento satisfactorio durante un sismo severo para sus ocupantes, como por ejemplo los pacientes en camilla dentro de una sala de cuidados intensivos del hospital. Finalmente, el protocolo actual en los hospitales peruanos ante un sismo, en los ambientes de cuidados intensivos y demás ambientes con camillas, es que el personal médico debe sujetar las camillas y estar pendientes de evitar la caída de algún paciente. Sí tienen protocolos de evacuación ([Minsa, 2019](#)) y plan de acción luego del sismo de gran magnitud ([Minsa, 2014](#)).

1.2.4 Modelamiento de la respuesta de sistemas de aislamiento sísmico

Existen varios estudios que evalúan y optimizan el sistema de triple péndulo de fricción. Para los fines de la tesis destaca el artículo *Isolation performance of optimized triple friction pendulum* (Weber, F., Distl, H., & Braun, C., 2016). En este artículo se explica cómo optimizar el diseño del aislador utilizando Matlab/Simulink para diferentes señales sísmicas como El Centro, Kobe, Loma Prieta, y Northridge, escalados a sismo severo. En la Figura 1.3 se observa a la izquierda la geometría y parámetros calibrados, y a la derecha se muestra un resultado para el caso del sismo de El Centro, escalado a sismo severo (PGA de 7.5m/s²). Se observa que la aceleración total máxima sobre el aislador resulta como la sexta parte de la aceleración máxima en el suelo (Weber et al, 2016).

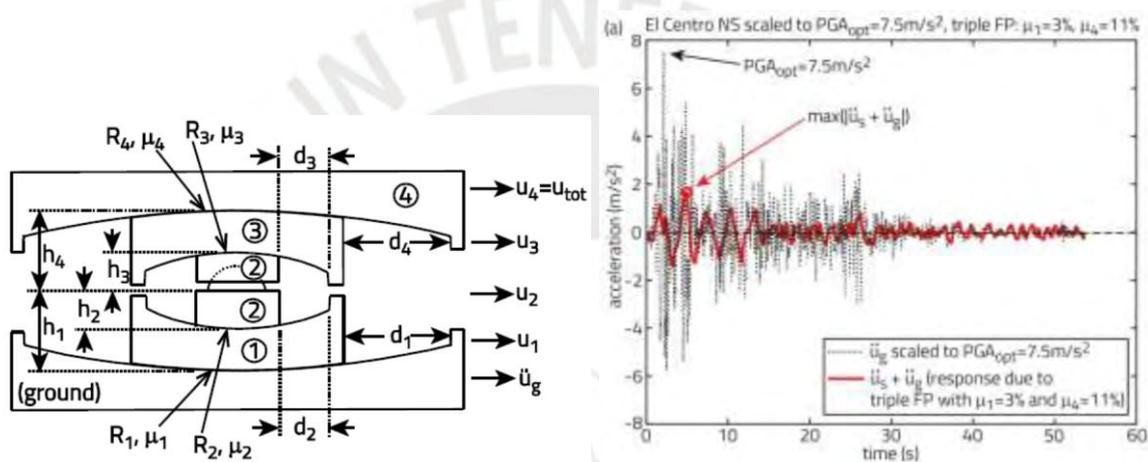


Figura 1. 3: Optimización del desempeño del triple péndulo de fricción.

Fuente: Weber et al, 2016

En la actualidad, con los avances computacionales, se ha empezado a modelar matemáticamente la respuesta del cuerpo humano a vibraciones. Por ejemplo, se ha medido la respuesta del cuerpo humano sentado a vibración, y la asociación entre resonancias en la transmisibilidad y masa aparente (Zheng, 2018). También se ha medido la respuesta del cuerpo humano a vibración, mediante un modelado biomecánico multi cuerpo (Desai, 2018). Estos estudios se encuentran en una primera etapa, donde evalúan si la respuesta matemática corresponde a la respuesta medida experimentalmente para movimientos o vibraciones sencillas. Por ejemplo, Desai (2018) verifica la confiabilidad de las respuestas de transmisibilidad y masa aparente de un modelo matricial del cuerpo humano sentado, con 20 grados de libertad (Ver Figura 1.4), con respecto a las respuestas medidas experimentalmente.

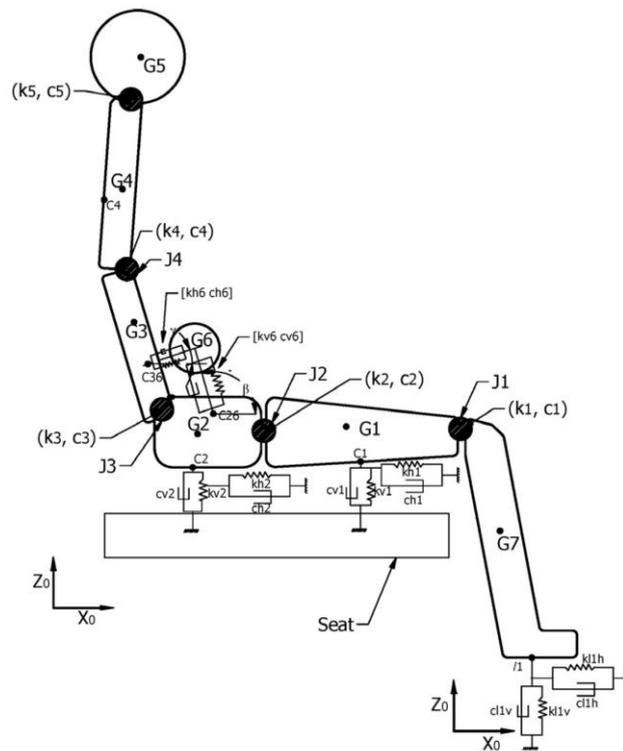


Figura 1. 4: Modelo del cuerpo humano sentado, con 20 grados de libertad.

Fuente: [Desai, 2018](#)

En la revisión de la literatura no se ha encontrado algún estudio donde se evalúe la respuesta del cuerpo humano sentado, menos en una silla de ruedas, y aún menos dentro de un edificio ante un sismo severo. Sin embargo, los más recientes avances matemáticos observados de otras disciplinas permiten estimar que en poco tiempo sus aportes pueden servir a la ingeniería sismorresistente para adaptar sus modelos de respuesta de la persona dentro del modelo de estructuras de edificios. Por ahora, en el caso de edificios como hospitales con aislamiento sísmico, no se ha evaluado si, ante un sismo severo, la reducción de los desplazamientos y aceleraciones en su interior es suficiente para evitar la pérdida de equilibrio, o caída de personas vulnerables, pacientes en una sala de cuidados intensivos, entre otros. El diseño sismorresistente actual de edificaciones esenciales se concentra más en la protección de la estructura y de los equipos médicos.

1.2.5 Sismo de diseño para la evaluación de un sistema de aislamiento sísmico

Es necesario definir el sismo de diseño que facilite la evaluación de la respuesta tiempo - historia de algún sistema de aislamiento sísmico que se quiera proponer. Desde luego, el sismo de diseño es uno de gran tamaño, propio de cada lugar, con un periodo de retorno de 475 años, conocido como el *sismo severo* (NTP E030, 2016). La forma estandarizada de conocer la intensidad de un sismo es a través de parámetros como la aceleración máxima

del suelo (PGA), la intensidad de Mercalli modificada (IMM), y la magnitud (De Richter). Sin embargo, en la actualidad muchas investigaciones necesitan conocer mejor la intensidad de un sismo, incluyendo su capacidad de generar daño en las estructuras. Por otra parte, el diseño por desempeño requiere que las edificaciones sean diseñadas y evaluadas para diferentes niveles de peligro sísmico (SEAOC, 1995). Con respecto al daño generado a una estructura, es un tema complejo ya que también depende del tipo de estructura, su calidad constructiva, y su estado previo al sismo.

En Chile se ha realizado mucha investigación sobre la caracterización del movimiento sísmico. El ingeniero Arturo Arias definió una forma de medir la intensidad de un sismo en función a la energía medida a partir de los registros de los acelerogramas (Arias, 1969). Los ingenieros Araya y Saragoni definieron una forma de cuantificar el potencial destructivo (Pd) de un sismo (Araya & Saragoni, 1984). El ingeniero Rafael Riddell analizó la respuesta no lineal de sistemas sujetos a sismos (Riddell, 1979), y propuso factores de modificación de respuesta para el diseño sismorresistente de edificios de periodo corto (Riddell, 1989). Este segundo trabajo utiliza y evalúa varios de los sismos peruanos más conocidos por el nivel de daño que causaron en su momento. Finalmente, Matías Hube (2012) explica cómo caracterizar los sismos con las variables de PGA, PGV, PGD, el contenido de frecuencias, espectros de respuesta, intensidad de Arias (Arias, 1969), duración significativa del sismo (Trifunac y Brandy, 1975), duración acotada (Bolt, 1973), y la intensidad espectral de Housner (Housner, 1952).

En Perú se han realizado investigaciones sobre caracterización de sismos raro o severo (Alva y Escalaya, 2003), que definen las zonificaciones sísmicas para una vida útil de 50 años y con una probabilidad de excedencia de 10% (periodo de retorno de 475 años). Las zonificaciones sísmicas se encuentran establecidas en la norma peruana sismorresistente (NTP E030, 2016).

Todos estos estudios permiten establecer una manera de caracterización de sismos peruanos según el movimiento del suelo, el nivel de daño, y la respuesta de sistemas de un grado de libertad. Así, en esta tesis, se puede definir dos señales sísmicas con las cuales se evalúa la respuesta del sistema de aislamiento sísmico modular.

1.3 JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, la población peruana con algún tipo de discapacidad es el 10% del total (INEI, 2017). En la costa peruana, la zona con mayor peligro sísmico, viven cerca de un

millón y medio de personas con discapacidad y representan más del 50% de la población vulnerable (INEI, 2017). Estas personas vulnerables son razones suficientes para evaluar si las edificaciones actuales, donde se encuentren estas personas, garantizan realmente su protección. En este sentido, también se sabe que más del 90% de personas con discapacidad vive en casa independiente (INEI, 2017), del tipo edificación común, sin sistema de aislamiento; y poco más del 6% vive en edificios multifamiliares (INEI, 2017), de donde solo algunos tendrían sistema de aislamiento sísmico. Por lo tanto, es necesario buscar una solución de aislamiento sísmico para ambientes pequeños y edificaciones de poca masa, porque son los lugares donde estará con mayor probabilidad la mayoría de las personas vulnerables cuando ocurra un sismo. En la actualidad, los sistemas de aislamiento sísmico están concentrados para edificaciones esenciales o en aquellas donde se puede cubrir el elevado costo del sistema.

Esta tesis propone una solución de aislamiento sísmico, modular, sencilla, y económica, que pueda implementarse en un ambiente donde habite una persona vulnerable. Ya en este punto, se extiende la solución a la protección de contenidos delicados o cuyo funcionamiento no debe interrumpirse, ubicados en algún ambiente de una edificación existente. Algunos ejemplos de aplicación serían: la habitación de una persona vulnerable en un primer piso de una vivienda, el área de cuidados intensivos de un hospital antiguo, el área de emergencias de un hospital antiguo, una vivienda de 1 o 2 niveles, un ambiente con contenidos delicados y costosos dentro una estructura existente o nueva de una empresa, entre otros. Esta propuesta es necesaria debido a que los sistemas de aislamiento sísmico existentes son costosos y están destinados a ciertos tipos de edificios de masa importante. Por ejemplo, una unidad de aislador de triple péndulo cuesta alrededor de diez mil dólares, que no es viable para los ejemplos de aplicación de esta tesis.

Las personas vulnerables como las personas con movilidad reducida están expuestas a un gran riesgo de daño durante un sismo moderado o severo. Por ejemplo, una simple caída de un adulto mayor implica que muy probablemente tendrá una fractura de huesos (Järvinen, Sievänen, Khan, Heinonen, & Kannus, 2008). Estas personas necesitan ser protegidas, sea cual sea el lugar donde se encuentren, no solamente en un hospital sino también en su vivienda. Esta necesidad es desatendida por la ingeniería sismorresistente. Los reglamentos, sistemas, y construcciones existentes están orientados a una persona promedio –persona que puede evacuar una edificación sin ayuda–, y no generan una respuesta satisfactoria para una persona vulnerable.

Esta tesis busca que la persona vulnerable no necesite evacuar el lugar donde se encuentre, para estar segura. Esta consideración se aproxima mejor a la realidad, ya que la

persona vulnerable ante un sismo por lo general no logra evacuar el lugar donde se encuentra. Se debe indicar que, si se continua sin investigar y explorar nuevas formas de protección sísmica adecuadas para estas personas, se limita su derecho humano a una vida digna, porque luego del sismo se agravará su condición, su salud, o perderán la vida. Finalmente, si se reflexiona y considera que en algún momento todos seremos adultos mayores, se puede decir que los usuarios objetivo no son el 10% de habitantes (INEI, 2017) sino el 100% de habitantes, y por lo tanto la tesis cobra suma importancia.

1.4 OBJETIVOS

Esta tesis de investigación busca proteger a las personas vulnerables que se encuentren en sus viviendas (edificación común) durante un sismo moderado y/o severo. Para este fin se propone un sistema de aislamiento sísmico modular, y se optimiza sus parámetros dinámicos de diseño para reducir el riesgo de daño de las personas vulnerables que se encuentren sobre dicho sistema durante un sismo moderado o severo en las zonas de mayor peligro sísmico del Perú.

Objetivo general

Proponer y analizar numéricamente un modelo de sistema de aislamiento sísmico modular que reduzca las aceleraciones en su contenido, ya sean personas vulnerables o material delicado, en zonas de alta sismicidad del Perú.

Objetivos específicos

- a. Definir un modelo analítico que represente la respuesta de un sistema de aislamiento sísmico modular.
- b. Analizar la influencia de las propiedades dinámicas representativas del sistema de aislamiento frente a sollicitaciones sísmicas.
- c. Identificar los parámetros principales de la respuesta que permitan definir un desempeño sísmico adecuado.
- d. Validar el modelo de aislamiento modular mediante ensayos de simulación sísmica en computadora.
- e. Diseñar el sistema de aislamiento modular que proteja a personas vulnerables y contenidos, y verificar que las respuestas del sistema estén dentro de rangos permisibles para sus ocupantes.

1.5 HIPÓTESIS

El modelo de sistema de aislamiento modular propuesto en la tesis disminuye la aceleración, en la plataforma sobre la que se encontrarían personas vulnerables y/o contenidos delicados, y genera un movimiento suave cuando es simulado ante un acelerograma de un sismo severo de la costa peruana.

1.6 ALCANCES Y LIMITACIONES

Los alcances de esta tesis comprenden la definición de los parámetros dinámicos de diseño, y una propuesta en planos del sistema de aislamiento sísmico modular. Este sistema está orientado a personas vulnerables y a contenidos delicados, pero se puede aplicar a cualquier otro caso. Esta tesis propone una primera aplicación, de una plataforma de protección sísmica, de menor escala, que se pueda adaptar en un ambiente del primer piso de una vivienda, hospital antiguo, u otras edificaciones ya construidas o por construirse. Asimismo, esta plataforma de protección sísmica no es un trabajo de aplicación o continuación de algún sistema existente o de algún reglamento. Por esta razón, el análisis sigue una metodología propositiva, mas no una metodología normalizada.

Para definir el sismo de diseño del sistema de aislamiento, se comparan diversos indicadores de la intensidad de los sismos más representativos del Perú. Dado que la zona peruana de mayor peligro sísmico y donde se concentra la mayoría de la población es la costa, los sismos de diseño elegidos son los que ocurrieron allí. Se presenta un código en Matlab que facilita la comparación y elección de la señal sísmica que representa al sismo de mayor intensidad. Dado que en esta tesis lo importante es el estudio de un sistema de aislamiento modular en un lugar de alta sismicidad, la definición del sismo severo (la intensidad de este sismo es diferente en cada lugar de la costa peruana), se ha simplificado escalando todas las señales consideradas a un PGA de 7.5m/s^2 . El análisis de respuesta del sistema de aislamiento se realiza para las dos señales sísmicas que representan mejor un sismo severo: Arequipa 2001 y Pisco 2007. La justificación de la selección de estas dos señales se encuentra en el capítulo 4 de esta tesis.

La respuesta del sistema de aislamiento corresponde a aceleraciones y desplazamientos en el tiempo, para la dirección predominante (Este-Oeste o Norte-Sur). Para el análisis matemático con Matlab, se evalúa la respuesta del sistema de aislamiento solo para los dos minutos más fuertes de las señales sísmicas, porque el procesamiento computacional exige mucho tiempo. En una primera etapa se evalúa la influencia al variar diferentes parámetros

dinámicos del sistema de aislamiento. En una segunda etapa se evalúa la respuesta del sistema de aislamiento con sus parámetros dinámicos optimizados. Para el análisis con Ansys Workbench, se evalúa la respuesta del sistema de aislamiento para el minuto más fuerte de las señales sísmicas porque el procesamiento computacional exige aún más tiempo que en el caso de Matlab.

En Matlab se presenta las respuestas de aceleración y desplazamiento, para una señal sinusoidal, y para los dos sismos representativos escalados a sismo leve, moderado, y severo. En Ansys Workbench se presenta la respuesta de aceleración y desplazamiento, para una señal sinusoidal, y para un sismo severo.

Para ejemplificar la aplicación del sistema de aislamiento sísmico modular, se presenta el caso de la modulación del sistema dentro de un ambiente del primer piso de una vivienda de dos pisos. El ambiente seleccionado es la habitación de una persona en silla de ruedas. En el caso del diseño arquitectónico y de interiores, se recomienda las distancias mínimas de separación entre los elementos no estructurales y contenidos con respecto al espacio que ocupen las personas en silla de ruedas. En el diseño estructural se define los parámetros de diseño del sistema de aislamiento sísmico modular. Finalmente, se presentan los planos de la geometría del sistema de aislamiento sísmico modular que cumple con los parámetros dinámicos optimizados como el radio efectivo, coeficiente de fricción, rigidez, masa, entre otros.

CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1 PERSONA CON DISCAPACIDAD

La Ley peruana N° 29973, en su artículo 2, define a la *persona con discapacidad* como aquella que tiene una o más deficiencias físicas, sensoriales, mentales o intelectuales permanentes que, al interactuar con diversas barreras actitudinales y del entorno, no pueda ejercer sus derechos en igualdad de condiciones que las demás (Congreso de la República, 2012). Jaime Huerta (2007) clasifica bastante bien las dificultades más comunes de las personas con discapacidad en el entorno urbano y arquitectónico. Con el fin de contemplar el problema de la discapacidad en forma global, la Organización Mundial de la Salud (OMS) redefine las categorías definidas en el Clasificador Internacional de las deficiencias, discapacidades y minusvalías (CIDDM), en el Clasificador Internacional del Funcionamiento, de la Discapacidad y de la Salud (CIF), (OMS, 2001). Deficiencia se reemplaza por funcionamiento, las connotaciones negativas de la discapacidad se reemplazan por limitaciones para la actividad, y las condiciones negativas de la minusvalía se reemplazan por restricciones a la participación. Actualmente la discapacidad no se trata solo como una condición médica, sino como el resultado de la interacción entre impedimentos físicos, mentales o sensoriales y la cultura, las instituciones sociales y los medios físicos (OMS, 2001). La interacción entre las limitaciones individuales y el entorno se conoce como el modelo social de la discapacidad (Palacios, 2008). Finalmente, se debe indicar que *persona con discapacidad* comprende un grupo muy diverso y con diferentes requerimientos, por lo que hasta la actualidad se presentan algunos conflictos. Por ejemplo, una baldosa podo táctil que ayuda a una persona invidente, si está mal ubicada, perjudica a una persona en silla de ruedas.

2.2 PERSONA EN SILLA DE RUEDAS

Es la persona con discapacidad física que tiene dificultad para caminar, moverse, o no puede mantener el equilibrio, de forma temporal o permanente (OMS, 2008), por lo que requiere una silla de ruedas para sus desplazamientos.

La silla de ruedas es uno de los medios de asistencia de uso más frecuente para mejorar la movilidad personal. Es un dispositivo que proporciona apoyo para sentarse y movilidad sobre ruedas a una persona que tiene dificultad para caminar o desplazarse (OMS, 2008).

Existen muchos tipos de sillas de ruedas, pero la más utilizada es la silla de ruedas manual plegable, propulsada por el usuario o empujada por otra persona, y que puede plegarse para su fácil transporte.

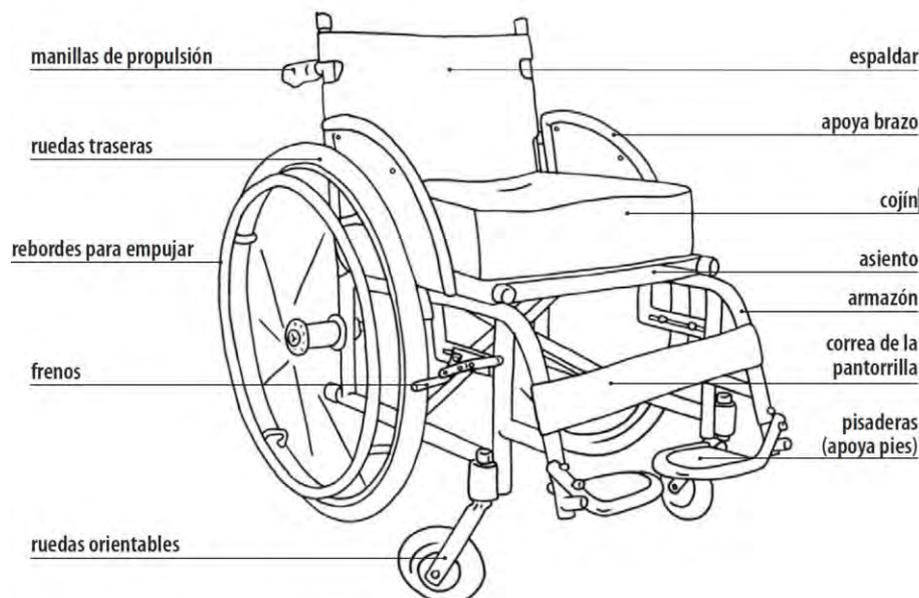


Figura 2. 1: Silla de ruedas estándar

Fuente: OMS, 2008

El conjunto persona – silla de ruedas, es un elemento cuyo comportamiento aún debe estudiarse desde la ingeniería estructural. A partir de esto se podría incorporarlo en los análisis sísmicos.

2.3 ESTUDIOS Y NORMATIVA SOBRE DISCAPACIDAD Y ACCESIBILIDAD

Los estudios existentes, aunque recientes, están ampliamente desarrollados en el mundo con respecto a: normativas que garanticen el cumplimiento del derecho de uso de la ciudad y sus servicios sin restricción alguna por todos sus habitantes, manuales de antropometría de personas con discapacidad, guías de diseño accesible, entre otros. Lo que está poco desarrollada es la seguridad de las personas con discapacidad física durante y después de siniestros como los sismos.

En el Perú, en 1998, se estableció la Ley N° 27050: Ley General de la Persona con Discapacidad ([Congreso de la República, 1998](#)), y se actualizó en el año 2005. En 2006, la Comisión de Estudios sobre Discapacidad del Congreso de la República presentó un conjunto de nueve publicaciones sobre la discapacidad y su relación con: la salud, el trabajo, la educación, la niñez, la accesibilidad, entre otros. En 2012, se estableció la Ley N° 29973, que reemplazó a la Ley N° 27050, y rige en la actualidad ([Congreso de la República, 2012](#)).

Todas estas leyes peruanas se centran en los derechos de las personas con discapacidad a la salud, educación, trabajo, accesibilidad, y su integración a la sociedad. Pero estas leyes son insuficientes porque no hay una especificación para cada tipo de discapacidad, donde cada tipo puede tener incluso requerimientos opuestos. Sumado al poco conocimiento de estas normativas por parte de la ciudadanía, los avances normativos en el Perú no implican avances reales en la ciudad o en la conciencia de los ciudadanos. En el Perú no se han encontrado estudios o normativas que garanticen la seguridad de las personas con discapacidad durante siniestros como un sismo. Solo se dispone de protocolos de evacuación (Minsa, 2019) y protocolos después del siniestro (Minsa, 2014), donde se evidencia que la persona con discapacidad no podrá evacuar sola su vivienda, sino que necesita el apoyo de otras personas (INDECI, 2017).

El artículo 18 de la ley 29973 trata sobre las viviendas para la persona con discapacidad. Se indica el acceso preferente y bonificación a programas públicos de vivienda del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Estos programas contemplan solo el aspecto arquitectónico, es decir, que la persona con discapacidad pueda realizar con autonomía sus actividades cotidianas (Congreso de la República, 2012).

El artículo 32 de la ley 29973 trata sobre la prevención en salud, por parte de las instituciones de salud, y para las poblaciones vulnerables. Su objetivo es prevenir y reducir, en las personas con discapacidad, la aparición de nuevas deficiencias y/o el agravamiento de las ya existentes (Congreso de la República, 2012). Incluso se promueven investigaciones, estudios científicos y tecnológicos, pero solo consideran unos aspectos de la salud como las enfermedades o las condiciones físicas de las personas. No se considera cómo se afecta la salud física y mental durante y después de los siniestros.

El artículo 15 de la ley 29973 trata sobre ambientes y rutas accesibles en edificaciones públicas y privadas para permitir el desplazamiento de las personas con discapacidad, e incorpora medidas y acciones preventivas de seguridad y protección para las personas con discapacidad (Congreso de la República, 2012). El Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED) inspecciona los ambientes y rutas, mientras que el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) implementa medidas de preparación, respuesta y rehabilitación a fin de asistir oportunamente a las personas con discapacidad en situación de riesgo y desastre (INDECI, 2017). El Consejo Nacional para la Integración de las Personas con Discapacidad (CONADIS) se encarga de empadronar y velar por los derechos a la igualdad y de oportunidades para las personas con discapacidad. El CONADIS fue creado como una institución fundamental en la sociedad peruana, sin embargo, todavía es intrascendente por la poca seriedad que le otorgan las instituciones y la

ciudadanía en general. Finalmente, el autor de esta tesis considera que ninguna de estas instituciones considera la seguridad de las personas con discapacidad física, que se encuentran en sus viviendas, durante y después de los sismos.

2.4 FILOSOFÍA DEL DISEÑO SISMORRESISTENTE

Los reglamentos, sistemas, y construcciones existentes están orientados al usuario promedio, una persona que puede evacuar su vivienda durante un sismo. Sin embargo, no generan una respuesta satisfactoria para una persona con discapacidad física. Esta es una filosofía generalizada, como se observa en el siguiente reporte de filosofías de diseño sismorresistente de algunos países:

Filosofía del diseño sismorresistente en Perú

Dado que la protección completa frente a sismos no es técnica ni económicamente factible, la filosofía se centra en “evitar pérdida de vidas humanas” (NTP E030, 2016).

Ante un sismo severo, la estructura no debe colapsar ni causar daños graves a las personas. Se debe “asegurar la continuidad de los servicios básicos” aunque la estructura presente daños importantes (NTP E030, 2016). Las edificaciones esenciales sí deben permanecer en condiciones operativas luego del sismo severo. Asimismo, ante un sismo moderado, la estructura debe permanecer operativa, aceptando solo daños reparables en el caso de las edificaciones que no son esenciales (NTP E030, 2016).

Filosofía del diseño sismorresistente en Ecuador

Su filosofía de diseño se basa en el desempeño, y busca evitar la pérdida de vidas a través de impedir el colapso de todo tipo de estructura (NEC SE DS, 2014). Además, la protección debe ser mayor y debe garantizar la funcionalidad luego de un evento sísmico extremo para las estructuras de ocupación especial y esencial (NEC SE DS, 2014). La tendencia actual es, además, la protección de la propiedad y la búsqueda del cumplimiento de diversos niveles de desempeño sísmico, para cualquier tipo de estructura (NEC SE DS, 2014).

Filosofía del diseño sismorresistente en Chile

Su filosofía (NCH 433, 2009) es lograr que:

- las estructuras resistan sin daños movimientos sísmicos de intensidad moderada
- se limite los daños en elementos no estructurales durante sismos de mediana intensidad
- se evite el colapso durante los sismos severos, aunque se presenten daños

Aun cuando los puntos anteriores mencionan tres niveles de intensidad de movimiento sísmico, su norma no los define en forma explícita (NCH 433, 2009).

Filosofía del diseño sismorresistente en Argentina

Su reglamento establece los requisitos básicos a cumplir en el diseño, cálculo, ejecución, reparación y refuerzo de las construcciones y de sus partes componentes con el objeto de considerar en ellas el efecto sísmico ([INPRES-CIRSOC 103, 2013](#)).

Las acciones sísmicas de diseño, procedimientos de análisis estructural, requisitos de resistencia, rigidez y estabilidad, construcción y previsiones generales se establecen con el propósito principal de evitar el colapso total o parcial de la construcción y las pérdidas de vida ([INPRES-CIRSOC 103, 2013](#)). No establece como objetivo limitar los daños ni mantener las funciones de las construcciones luego de la ocurrencia de un terremoto.

Filosofía del diseño sismorresistente en Colombia

Su objetivo es salvaguardar las vidas humanas ante la ocurrencia de un sismo fuerte, y un resultado indirecto de la aplicación de las normas al defender las vidas humanas es que se obtiene una protección de la propiedad ([NSR-10, 2010](#)).

Las expectativas de los usuarios o propietarios son muy diferentes a los objetivos del Reglamento Sismo Resistente en lo que respecta a la defensa de la propiedad. En general el usuario espera que la edificación no tenga ningún daño con la ocurrencia de un sismo, y la normativa contempla la posibilidad de daño estructural grave y colapso de la edificación. Su filosofía acepta que, en sismos severos, se pueden presentar daños graves a los elementos no estructurales de la edificación, especialmente en los muros divisorios y fachadas ([NSR-10, 2010](#)).

Filosofía del diseño sismorresistente en Europa

Su propósito es asegurarse de que en caso de sismos: las vidas humanas estén protegidas, el daño sea limitado, y las estructuras importantes para la protección civil permanezcan operativas ([EUROCODE 8, 2012](#)). Estos objetivos condicionan todos sus principios y reglas de aplicación. Los diseños deben cumplir 2 requisitos:

- requisito de no colapso, conservando la integridad estructural y una capacidad residual de carga después del evento sísmico
- requisito de limitación de daños: resistir los sismos con mayor probabilidad de ocurrencia que el sismo de diseño, sin la ocurrencia de daño y las limitaciones de uso asociadas, cuyos costos serían altos en comparación con los costos de la estructura misma.

Finalmente, el Euro código también busca proteger la vida humana en el proceso de evacuación o durante las réplicas ([EUROCODE 8, 2012](#)).

Filosofía del diseño sismorresistente en Venezuela

Se permite que la estructura incurra en el rango inelástico para el sismo de diseño, pero se establecen límites de deformaciones para atenuar los daños no estructurales (COVENIN 1756-2, 2001). En general se espera que en las edificaciones:

- bajo sismos leves, solo pueden aceptarse daños no estructurales despreciables, que no afecte su operación y funcionamiento.
- bajo sismos moderados, se podrá sufrir daños moderados en sus componentes no estructurales y daños muy limitados en los componentes estructurales.
- bajo sismo de diseño, exista muy baja probabilidad de alcanzar el estado de agotamiento resistente, y la mayoría de los daños estructurales y no estructurales sean reparables.
- bajo sismo severo, se reduzca la probabilidad de derrumbe, aunque la reparación de la edificación pueda llegar a ser inviable económicamente.

2.5 DAÑO NO ESTRUCTURAL EN EDIFICACIONES

Históricamente, la ingeniería sismorresistente se ha centrado en el desempeño de los sistemas estructurales y formas de mitigar el daño estructural. A medida que suben las expectativas de un mejor comportamiento sísmico, y que el público demanda un mayor nivel de protección contra terremotos, es necesario entender el significado de daños no estructurales.

Los componentes no estructurales de un edificio incluyen todas las piezas de construcción y contenidos adquiridos por los ocupantes, a excepción de las columnas, placas, vigas, losas, escaleras, entre otros. Estos componentes son generalmente especificados por arquitectos, ingenieros mecánicos, ingenieros eléctricos, y diseñadores de interiores. Incluyen la plomería, muebles, accesorios y equipos, y el contenido adquirido por los usuarios.

En general estos componentes representan el 75-85% del costo de construcción (Taghavi y Miranda, 2003). Los daños en estos componentes producto de un sismo pueden resultar en lesiones o muertes, causar daños materiales costosos en edificios y su contenido; y forzar el cierre de las instalaciones residenciales, médicas y de fabricación, las empresas y oficinas hasta que se completen las reparaciones oportunas.

La mayor inversión en la mayoría de los edificios se encuentra en los componentes no estructurales y contenidos. En general, los componentes estructurales de un edificio comercial corresponden aproximadamente al 15-25 % del coste de construcción original, mientras que los componentes no estructurales y contenidos pertenecientes a los ocupantes del edificio representan el 75-85 % restante del costo (Taghavi y Miranda, 2003). Se hace

evidente que la inversión de capital más grande en la mayoría de los edificios comerciales es en los sistemas no estructurales y contenidos.

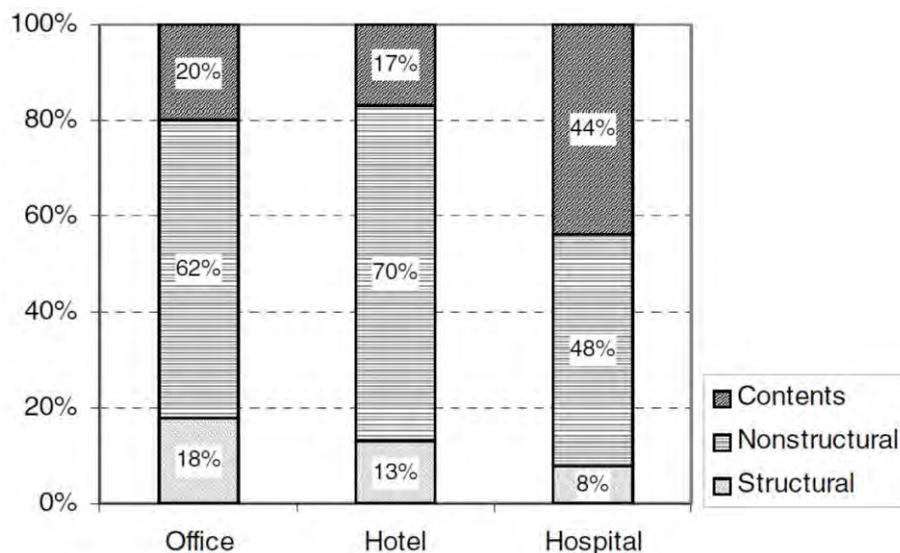


Figura 2. 2: Desglose de los costos en edificios de oficinas, hoteles, y hospitales

Fuente: [Taghavi y Miranda, 2003](#)

Las posibles consecuencias de los daños del terremoto a los componentes no estructurales suelen dividirse en tres tipos de riesgo: seguridad para la vida, pérdida de propiedad, y pérdida funcional ([Taghavi y Miranda, 2003](#)).

Un sismo causa daños a los componentes no estructurales en cuatro formas principales:

1. inercial: deslizarse, balancearse o vuelco.
2. daños y deformaciones en componentes no estructurales interconectados.
3. La separación entre las estructuras pueden dañar los componentes no estructurales que cruzan entre ellos.
4. Interacción entre los componentes no estructurales adyacentes que se mueven de forma diferente una de otra.

[Taghavi y Miranda \(2003\)](#) desarrollaron una base de datos relacionada con el comportamiento sísmico de componentes no estructurales y contenidos de los edificios comerciales. La base de datos soluciona varios problemas y aspectos de los componentes no estructurales, incluyendo los daños y la información de costos. También muestran curvas de fragilidad. También se incluyen numerosas fotografías de los elementos dañados con una descripción detallada. Los datos son accesibles a través de un motor de búsqueda diseñado para la base de datos utilizando varias interfaces gráficas de usuario. Se explican las curvas de fragilidad, así como el modo de recojo y desarrollo de los componentes de datos. Parte de la base de datos está dedicada a la información sobre el costo de los componentes no

estructurales. Se propone una nueva clasificación de los componentes no estructurales para que coincida con lo que se necesita en el diseño basado en desempeño. Los componentes no estructurales se clasifican de acuerdo con su funcionalidad en el edificio y al parámetro de respuesta estructural sensible (Taghavi y Miranda, 2003).

Los componentes no estructurales se clasifican de acuerdo con su funcionalidad en el edificio y al parámetro de respuesta estructural sensible. FEMA (2011) proporciona una guía donde explica cómo identificar los peligros no estructurales y la forma de poner en práctica medidas de protección antisísmica. En caso de duda acerca de la vulnerabilidad sísmica de una instalación, se debe consultar a un ingeniero civil o estructural con experiencia en relación con la evaluación y mitigación de riesgos sísmicos no estructurales.

2.6 PROTOCOLOS DE PROTECCIÓN SÍSMICA

Los protocolos son un conjunto de reglas que rigen el proceder de las personas ante una determinada situación. Se han desarrollado recomendaciones para antes, durante y después de los siniestros, y protocolos de evacuación durante sismos, sin embargo, estos no son adecuados para las personas con discapacidad física. Su movilidad reducida hace lenta su evacuación (Tuohy, 2014) y, por lo tanto, muchas veces solo se las ubica en el lugar seguro más próximo. Smith (2009) indica que las personas con discapacidad física deben ser capacitadas para afrontar las situaciones de emergencia. Park, E., Yoon, D., & Choi, Y. (2019) realizaron entrevistas semi estructuradas a personas con discapacidad, sobre el sismo de Pohang, Corea del Sur, en el 2017. Las personas vulnerables indican que no perciben un plan de evacuación, falta información inclusiva, y que ellos deberían participar en la mejora de las políticas de plan ante desastres (Park, E., Yoon, D., & Choi, Y., 2019).

2.7 SISTEMAS DE PROTECCIÓN SÍSMICA

No se sabe desde cuando el ser humano intentó proteger una edificación del movimiento del suelo debido a un sismo. Algunas estructuras antiguas, especialmente en zonas sísmicas como Persia, ya tenían sistemas de aislamiento. La tumba de Ciro el Grande, que data del 550 a.C., tiene uno de los primeros sistemas de aislamiento básico (Naderzadeh, 2009). En esta tumba, los bloques de piedra en la parte superior de la fundación fueron construidos sin mortero. Cada bloque, a la vez que soporta el peso de los bloques por encima de él, también es independiente de los demás a su alrededor, lo que permite la libertad de movimiento flexible ante un terremoto (Naderzadeh, 2009). En el Perú también se encuentran algunos sistemas de aislamiento ancestrales. Por ejemplo, en Caral —una

cultura que se desarrolló dentro de territorio peruano hace 5000 años—, se encontró que utilizaron piedras dentro de sacos de cuerdas de paja (shicras), para dar estabilidad al núcleo estructural de sus pirámides, y así mitigar los efectos de los terremotos e inundaciones (Vargas, J., Iwaki, C., y Rubiños, A., 2012).

En la época del imperio romano, Plinio el viejo, en su obra Historia Natural, indicó que el templo de Diana de Éfeso se construyó sobre un terreno pantanoso con el fin de protegerlo de los terremotos. Para ello se colocó una capa de carbón y lana entre la cimentación del templo y el suelo (Genatios y Lafuente, 2016).

A lo largo de la historia se observan diversos ejemplos de aislamiento sísmico, sin embargo, el concepto moderno de aislamiento sísmico se desarrolla recién desde hace unos 130 años cuando el inglés John Milne realizó varios experimentos de aislamiento sísmico ante sollicitaciones sísmicas en la universidad de Tokyo (Booth, 2006).

En el último siglo se han buscado diversos mecanismos que permitan desacoplar a la estructura del suelo, para reducir las fuerzas y por tanto los daños. Sin embargo, recién en los últimos 40 años se ha ido difundiendo para ser aplicado de forma práctica, y solo en los últimos 15 años su aplicación se ha incrementado de forma exponencial debido al buen desempeño que presentaron los pocos edificios aislados existentes ante los sismos (Genatios y Lafuente, 2016).

En 1969 se construyó la escuela Pestalozzi en Skopje, Yugoslavia. Fue el primer edificio aislado con bloques de caucho. A fines de los 70s se construyó en Japón algunos edificios aislados con SREI (Steel reinforced elastomer isolator), en los cuales se vulcanizan las capas de caucho y las placas de acero intercaladas con el fin de aumentar la rigidez vertical (Naemin & Kelly, 1999). En 1978 se construyó el viaducto de Toe-toe en North Island, Nueva Zelanda. Fue la primera estructura con aisladores sísmicos LRB (Lead Rubber Bearing), en los cuales se intercalan capas de caucho y acero, con un núcleo de plomo en el centro para que ayude a disipar la energía. Este sistema es el de mayor uso hasta la actualidad (Naemin & Kelly, 1999). En 1996 James M. Kelly presenta dos edificios aislados sobre esferas (Ucrania y México), y un edificio aislado sobre una capa de arena (China) (Naemin & Kelly, 1999).

En 2006 el Dr. Víctor Zayas inventa el aislador de triple péndulo de fricción, y lo patenta en el 2013. El Dr. Zayas indica que la ventaja del triple péndulo de fricción es que está pensado para evitar daño, mientras que los aisladores elastoméricos solo están pensados para cumplir con la norma (Zayas, 2016).

El Perú es un país sísmico y tampoco es ajeno a la construcción de edificios con aislamiento sísmico. El 24 de noviembre del 2014 se inauguró el Complejo de Innovación Académica (4 pisos) y el Aulario (8 pisos) de la PUCP, con aisladores sísmicos elastoméricos.

2.8 SISMOS LOCALES

La forma estandarizada de conocer la intensidad de un sismo en forma local es a través de parámetros como la aceleración máxima del suelo (PGA) y la intensidad de Mercalli modificada (IMM). Sin embargo, en la actualidad muchas investigaciones necesitan conocer mejor la intensidad de un sismo, ya no solo por su magnitud sino también por su capacidad de generar daño en las estructuras.

El *diseño por desempeño* requiere que las edificaciones sean diseñadas y evaluadas para diferentes niveles de peligro sísmico (SEAOC, 1995). Con respecto al daño generado a una estructura, es un tema complejo ya que también dependerá del tipo de estructura, su calidad constructiva, y su estado previo al sismo. La VISION 2000 de la SEAOC establece para ingeniería basada en desempeño, una matriz que relaciona la probabilidad de ocurrencia de un sismo con el desempeño objetivo de las estructuras en un determinado lugar (totalmente operacional, operacional, resguardo de la vida, y cercano al colapso) (SEAOC, 1995). Es decir, relaciona un sismo, cuya severidad es relativa a lo que se podría presentar en tal o cual lugar, con el desempeño de una estructura (cuya calidad es difícil de verificar) ante ese sismo en ese lugar. El diseño por desempeño busca registros sísmicos cuyas características (contenido de frecuencias, duración, entre otros.) representen el nivel de peligro sísmico para un lugar (SEAOC, 1995). Para obtener estos registros se escala los registros existentes, variando el contenido de frecuencias y su duración o ajustando los valores espectrales de estos registros, a los valores espectrales de un espectro de diseño (espectro objetivo) acorde al nivel de peligro requerido.

2.9 SISMO SEVERO DE DISEÑO

El sismo de diseño se puede definir a partir de una caracterización local de sismos, según el movimiento del suelo y la respuesta de sistemas de un grado de libertad. Se comparan diversos parámetros entre las señales sísmicas. Los parámetros de comparación son: intensidad, PGA, PGV, Intensidad de Arias (Arias, 1969), Poder Destructivo (Araya & Saragoni, 1984), y la respuesta lineal y no lineal de un objeto visco elástico de un grado de libertad (OVE1GDL) ante cada uno de los sismos seleccionados. Luego, la señal sísmica más intensa puede ser escalada a tres niveles: sismo leve, sismo moderado, sismo severo.

Para generar un registro para sismo severo, es usual escalar el registro en función al PGA. Por ejemplo, Weber (2016) optimizó el aislador de triple péndulo de fricción a estos tres niveles de sismo. Para definir un sismo leve, se escala el PGA a 2.5m/s². Para definir un sismo moderado, se escala el PGA a 5.0m/s². Para definir un sismo severo, se escala el PGA a 7.5m/s². En esta tesis se adoptan estos mismos valores.

2.10 PARÁMETROS DINÁMICOS DE DISEÑO DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN SÍSMICA

Los sistemas de aislamiento sísmico, en general, consisten en una capa de baja rigidez lateral entre la estructura y la cimentación. Su objetivo es tener un periodo natural del conjunto estructura-aislador mucho mayor que el periodo en la base (Chopra, 2014). Un periodo largo reduce la pseudo aceleración y por tanto las fuerzas sísmicas sobre la estructura, pero la deformación se incrementa. Sin embargo, la deformación se concentra en la base, en el sistema de aislamiento, y solo habrá pequeñas deformaciones en el resto de la estructura (Chopra, 2014).

Una estructura de un piso sin aislamiento (ver Figura 2.3a) se puede caracterizar a partir de los parámetros T_f (Periodo natural de vibración) y ξ_f (coeficiente de amortiguamiento).

$$T_f = \frac{2\pi}{\omega_f}; \omega_f = \sqrt{\frac{k}{m}}; \xi_f = \frac{c}{2m\omega_f} \quad (2.1)$$

Donde ω_f es la frecuencia circular natural, y c es el amortiguamiento de la estructura.

Una estructura de un piso, con aislamiento de base (ver Figura 2.3b), se puede modelar en general como un sistema de dos grados de libertad, de masas m_b (masa de la base) y m (masa de la estructura), visco elástico (de rigidez lateral k_b y amortiguamiento c_b), sometido a una señal de aceleración sísmica (\ddot{u}_g). El sistema de aislamiento se puede caracterizar a partir de los parámetros T_b (Periodo natural de vibración) y ξ_b (coeficiente de amortiguamiento).

$$T_b = \frac{2\pi}{\omega_b}; \omega_b = \sqrt{\frac{k_b}{m+m_b}}; \xi_b = \frac{c_b}{2(m+m_b)\omega_b} \quad (2.2)$$

Donde ω_b es la frecuencia circular del sistema, y c_b es el amortiguamiento del sistema.

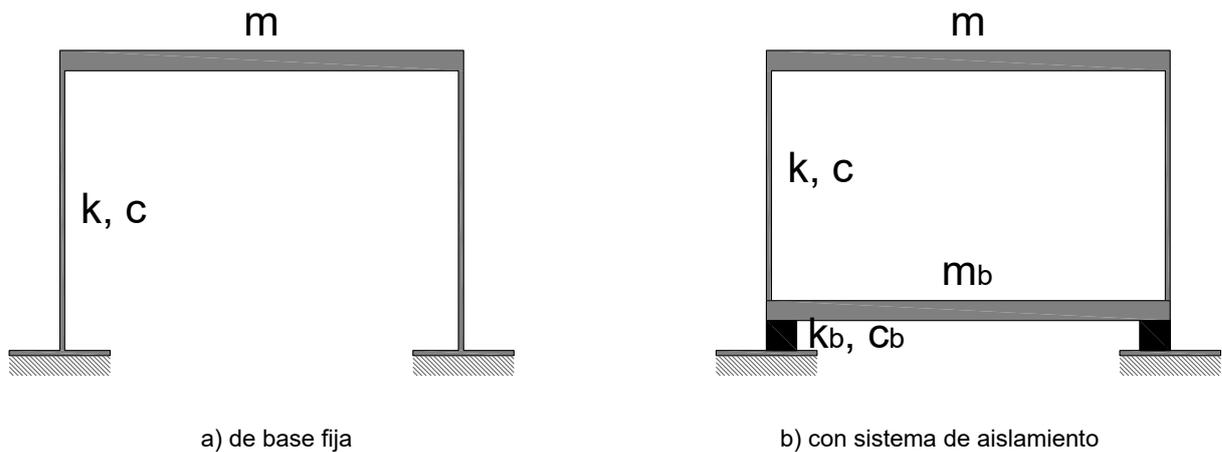


Figura 2. 3: Esquema de una estructura de un nivel

Fuente: [Chopra, 2014](#)

Para reducir las fuerzas en la estructura, T_b debe ser mucho mayor que T_f ([Chopra, 2014](#)). La estructura de un piso, con aislamiento de base, es un sistema de dos grados de libertad. El aislamiento de base alarga el periodo fundamental de vibración de la estructura, y por lo tanto reduce la pseudo aceleración de este primer modo. El segundo modo, que produce deformación en la estructura, esencialmente no está excitado por el movimiento del suelo, aunque su pseudo aceleración sea grande. Esto se debe a que el primer modo de vibración de la estructura con aislamiento de base envuelve la deformación solo en el sistema de aislamiento. La estructura de encima sigue siendo esencialmente rígida. El segundo modo es muy pequeño debido a una respuesta modal estática muy pequeña. El amortiguamiento en el sistema de aislamiento y la energía de disipación son solo un factor secundario al reducir la respuesta estructural. La efectividad del aislamiento de base depende de alargar el periodo natural de la estructura tanto como sea práctico ([Chopra, 2014](#)).

La ecuación de equilibrio dinámico es:

$$(m_b + m) \ddot{u} + (c_b) \dot{u} + (k_b) u = - (m_b + m) \ddot{u}_g \quad (2.3)$$

Donde \ddot{u}, \dot{u}, u son la aceleración, velocidad, y desplazamiento de respuesta a la aceleración \ddot{u}_g del terreno.

En el caso de los sistemas de aislamiento que se componen de elementos deslizantes, entre la cimentación y la base de la estructura, se busca que la fuerza cortante transmitida a la estructura sea baja. Para esto se debe mantener el coeficiente de fricción de las superficies deslizantes tan bajo como sea práctico. Los desplazamientos y la restauración de la posición y equilibrio inicial son controlados por la superficie curva de los elementos deslizantes.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La metodología utilizada se puede dividir en tres partes: método teórico, método numérico, y método comparativo.

En el método teórico se definen dos sismos de diseño que permitan evaluar la respuesta del sistema de aislamiento. Luego, se definen algunos modelos de sistema de aislamiento y se estima sus respuestas según la teoría de las vibraciones mecánicas, y la transmisión de la fuerza en sistemas masa-resorte-amortiguador. Finalmente, se calcula la respuesta del sistema según la teoría del equilibrio dinámico, con ayuda del programa Matlab/Simulink.

En el método numérico se modela el sistema de aislamiento a escala real, considerando su geometría, material, masa, rugosidad, entre otros. Con ayuda del programa Ansys Workbench, se calcula la respuesta del sistema a acelerogramas. Finalmente se evalúa las respuestas a diferentes señales.

En el tercer método se compara los resultados de reducción de pseudo aceleración, desplazamientos, y las respuestas del modelo teórico y el modelo numérico.

Finalmente, se elaboran los planos de diseño del sistema de aislamiento sísmico modular, y se proponen algunos ejemplos de aplicación en ambientes pequeños.

3.1 MÉTODO TEÓRICO

Primero se define el conjunto de parámetros de comparación entre las distintas señales sísmicas consideradas, para seleccionar dos sismos de diseño. El primer sismo de diseño no se escala, se comparan las señales sísmicas directamente:

- Magnitud del sismo
- Intensidad Modificada de Mercalli
- Peak Ground Acceleration (East-West, North-South, Up-Down)
- Peak Ground Velocity (East-West, North-South, Up-Down)
- Peak Ground Displacement (East-West, North-South, Up-Down)
- Intensidad de Arias (East-West, North-South, Up-Down)
- Poder destructivo (East-West, North-South, Up-Down)
- Frecuencia dominante (East-West, North-South, Up-Down)

Como se debe evaluar el sistema ante sismos severos, se escalan todas las señales sísmicas a un PGA de 7.5m/s^2 y se define el conjunto de parámetros de comparación entre las distintas señales sísmicas, para definir al sismo severo que genere los mayores efectos y utilizarlo como un segundo sismo de diseño:

- Peak Ground Velocity (East-West, North-South, Up-Down)
- Peak Ground Displacement (East-West, North-South, Up-Down)
- Intensidad de Arias (East-West, North-South, Up-Down)
- Poder destructivo (East-West, North-South, Up-Down)
- Frecuencia dominante (East-West, North-South, Up-Down)

Los acelerogramas se deben corregir primero por línea base y filtrar con filtro pasa-banda, con ayuda del programa SeismoSignal (Ver Figura 3.1). El objetivo es obtener señales de velocidades y desplazamientos que terminan en cero, para obtener el estado final de reposo y en la misma ubicación que en donde se inició.

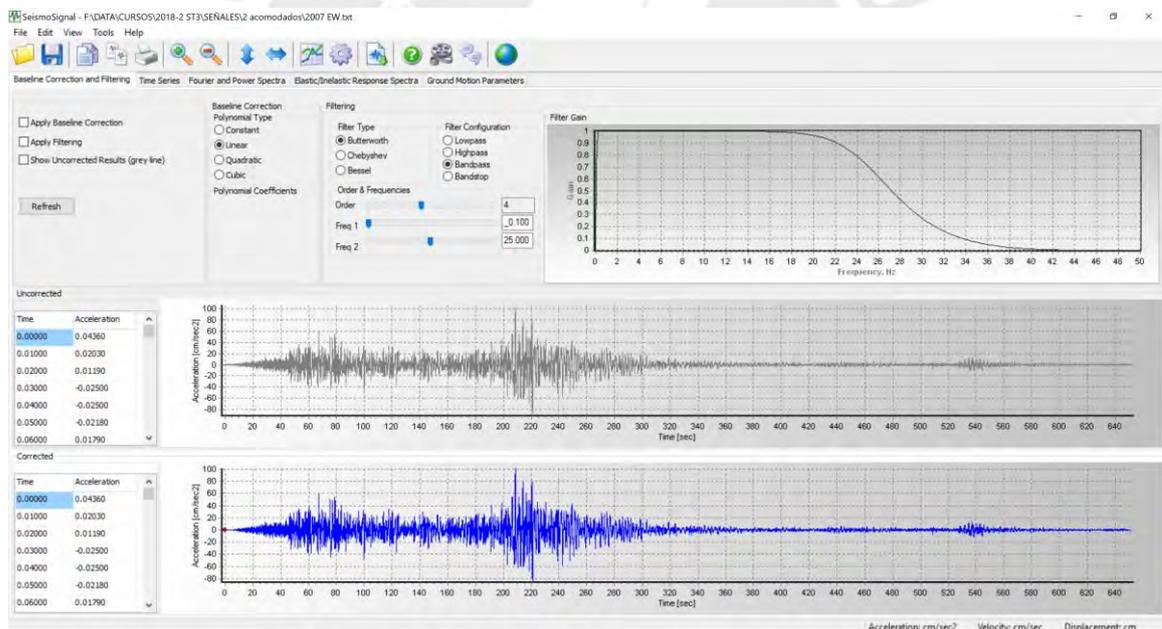


Figura 3. 1: Entorno de SeismoSignal para la corrección de acelerogramas

Luego, el resto de los parámetros para comparación entre sismos se obtienen con la ayuda del ejecutable de nombre AnalisisSismo.m programado en Matlab.

El registro de velocidades se obtiene como la integración, durante un tiempo t , del registro de aceleraciones, o sumatoria de las áreas bajo la curva de aceleraciones:

$$V = \int_0^t A dt = \sum_{i=1}^n \left(\frac{A_i + A_{i+1}}{2} \right) (t_{i+1} - t_i) \quad (3.1)$$

El registro de desplazamientos se obtiene como la integración, durante un tiempo t , del registro de velocidades, o la sumatoria de las áreas bajo la curva de velocidades:

$$D = \int_0^t V dt = \sum_{i=1}^n \left(\frac{V_i + V_{i+1}}{2} \right) (t_{i+1} - t_i) \quad (3.2)$$

La Intensidad de Arias (Arias, 1969) se define como la energía por unidad de peso disipada por una familia de osciladores de un grado de libertad, para un sismo y amortiguamiento dados.

$$I_A = \frac{\pi \int_0^t a^2(t) dt}{2g} \quad (3.3)$$

El Potencial Destructivo (Araya y Saragoni, 1984), es un parámetro que permite comparar la capacidad de producir daño del movimiento sísmico debido a mecanismos transcursivos, subductivos e intraplaca.

$$P_D = \frac{I_A}{v_0^2} \quad (3.4)$$

Donde v_0 es la intensidad de cruces por cero por segundo. Para obtener este valor solo se considera la parte de la señal donde se tiene una liberación de energía entre 5% y 95% (Trifunac & Brady, 1975).

Como los acelerogramas están en el dominio del tiempo, la frecuencia dominante de cada acelerograma se obtiene con una transformada rápida de Fourier (FFT).

Con estas variables se compara el “tamaño” de los sismos más conocidos de la costa peruana, y se eligen dos: uno como el sismo local más grande, y otro como el sismo más grande luego de escalar todas señales a un PGA de sismo severo.

El modelo teórico de la plataforma de protección se somete a estas dos señales sísmicas, a fin de tener una evaluación exigente de su respuesta.

La pantalla de AnalisisSismo se presenta en la Figura 3.2. Este ejecutable de Matlab permite comparar el “tamaño” de varios sismos, a partir de sus acelerogramas. En el Anexo 1 se explica su modo de uso.

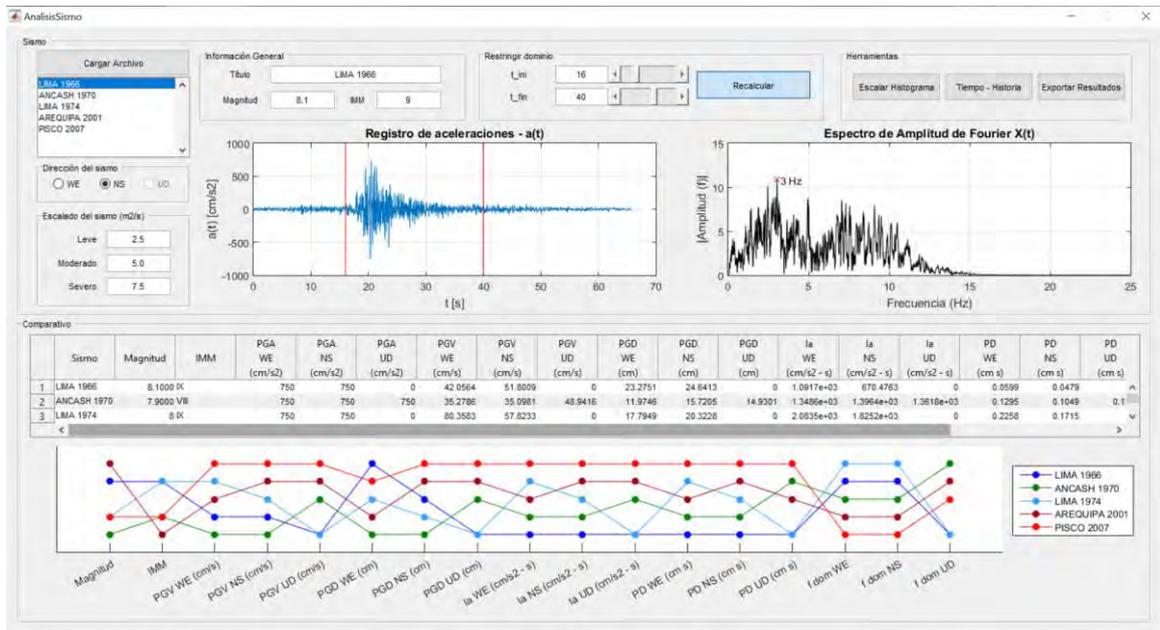


Figura 3. 2: Entorno de AnalisisSismo para la comparación de sismos

3.1.1 MODELOS TEÓRICOS

Se plantean diversos modelos sencillos de un sistema de aislamiento, y se estima sus respuestas según la teoría de las vibraciones mecánicas y la transmisión de la fuerza en sistemas masa-resorte-amortiguador.

Para el periodo y frecuencia angular naturales, se emplea la conservación de la energía:

$$E_{potencial\ 1} + E_{cinética\ 1} = E_{potencial\ 2} + E_{cinética\ 2} \quad (3.5)$$

La transmisibilidad (TR) en las direcciones horizontales se calcula como:

$$TR = \frac{1 + (2\xi(\omega/\omega_b))^2}{\sqrt{(1 - (\omega/\omega_b)^2)^2 + (2\xi(\omega/\omega_b))^2}} \quad (3.6)$$

Finalmente, se obtiene un modelo simplificado, que responde al movimiento en una sola dirección, y que sea equivalente a un modelo real que sí puede responder al movimiento en las tres direcciones principales.

3.1.2 OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DINÁMICOS

Se evalúa la influencia de cuatro variables de la plataforma de protección ante las sollicitaciones sísmicas de diseño. Se busca la mejor combinación que reduzca las respuestas de aceleraciones y desplazamientos de la plataforma. Con esta combinación se espera lograr una respuesta tan baja ante un sismo severo, que esté dentro de rangos permisibles para sus ocupantes. Se identifica los parámetros dinámicos del modelo computacional.

Las cuatro variables de la plataforma de protección sobre la aceleración y desplazamiento de respuesta son:

- la rigidez k
- la masa m de la estructura
- el coeficiente de rugosidad μ de los apoyos cóncavos
- el radio efectivo R_{eff} de la base cóncava

Finalmente, se elabora un gráfico tridimensional que muestre la influencia del radio efectivo y la rugosidad en la respuesta, con el resto de las variables optimizadas previamente.

3.1.3 RESPUESTA DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO EN MATLAB/SIMULINK

Se propone un modelo matemático que responde, mediante las ecuaciones de equilibrio dinámico, al movimiento sísmico. El equilibrio se plantea independientemente para cada dirección registrada en un acelerograma. Se formula la ecuación de equilibrio dinámico para cada pieza del aislador, incluida la plataforma y, para resolver el sistema de ecuaciones generado se utiliza el código de Matlab ODE15s.

Una ecuación diferencial ordinaria (ODE) contiene una o más derivadas de una variable dependiente y , con respecto a una única variable independiente t , que normalmente corresponde al tiempo (MathWorks, 2019). Los *Matlab ODE solvers* sólo resuelven ecuaciones de primer orden, por lo que, si se tienen ecuaciones de grado n , se deberán hacer sustituciones genéricas para presentar n ecuaciones de primer orden (MathWorks, 2019).

Por ejemplo:

$$\begin{array}{l}
 y_1 = y \\
 y_2 = y' \\
 y_3 = y'' \\
 \vdots \\
 y_n = y^{(n-1)}
 \end{array}
 \left\{
 \begin{array}{l}
 y_1 = y \\
 y'_1 = y_2 \\
 y'_2 = y_3 \\
 \vdots \\
 y'_n = f(t, y_1, y_2, \dots, y_n)
 \end{array}
 \right.$$

Esta propiedad es adecuada para resolver ecuaciones de equilibrio dinámico, de la forma:

$$m \ddot{u} + c \dot{u} + k u = -m \ddot{u}_g$$

$$u_1 = u$$

$$u_2 = \dot{u}$$

$$u'_1 = u_2$$

$$u'_2 = (-c u_2 - k u_1 - m \ddot{u}_g) / m$$

El código para el sistema de ecuaciones es:

$$\text{function dudt} = f(t, u)$$

$$\text{dudt}(1) = u(2);$$

$$\text{dudt}(2) = (-c u(2) - k u(1) - m \ddot{u}_g) / m;$$

La evaluación se realiza para los dos acelerogramas seleccionados previamente. Los resultados se presentan en gráficos de pseudo aceleraciones y de desplazamientos del sistema de aislamiento. Estos resultados se comparan con las aceleraciones y desplazamientos en el suelo.

3.2 MÉTODO NUMÉRICO

Es un método que representa, o simula, la realidad con mayor detalle que el método anterior. En la simulación se especifica la geometría real de las piezas del aislador, las masas, las rigideces, entre otros. Se puede realizar el estudio en las tres direcciones principales del movimiento sísmico, por separado y en simultáneo. El software utilizado es Ansys Workbench 2019 R1. A pesar de ser un método más realista, no se puede prescindir del método teórico porque permite evaluar con mayor facilidad y rapidez las variables del sistema de aislamiento.

Para el modelamiento en Ansys, primero se define el sistema de análisis, que en este caso puede ser *Rigid Dynamics* o *Transient Structural*. Luego, se ingresan las propiedades de los materiales empleados en el módulo *Engineering Data*. Luego, se ingresa la geometría del sistema en el módulo *Geometry*. Luego, en el módulo *Mechanical* se asignan las propiedades a los elementos, las señales sísmicas, y los puntos de medición de aceleraciones y desplazamientos. Finalmente, se analiza el sistema y genera los reportes. El entorno del módulo Mechanical se presenta en la [Figura 3.3](#).

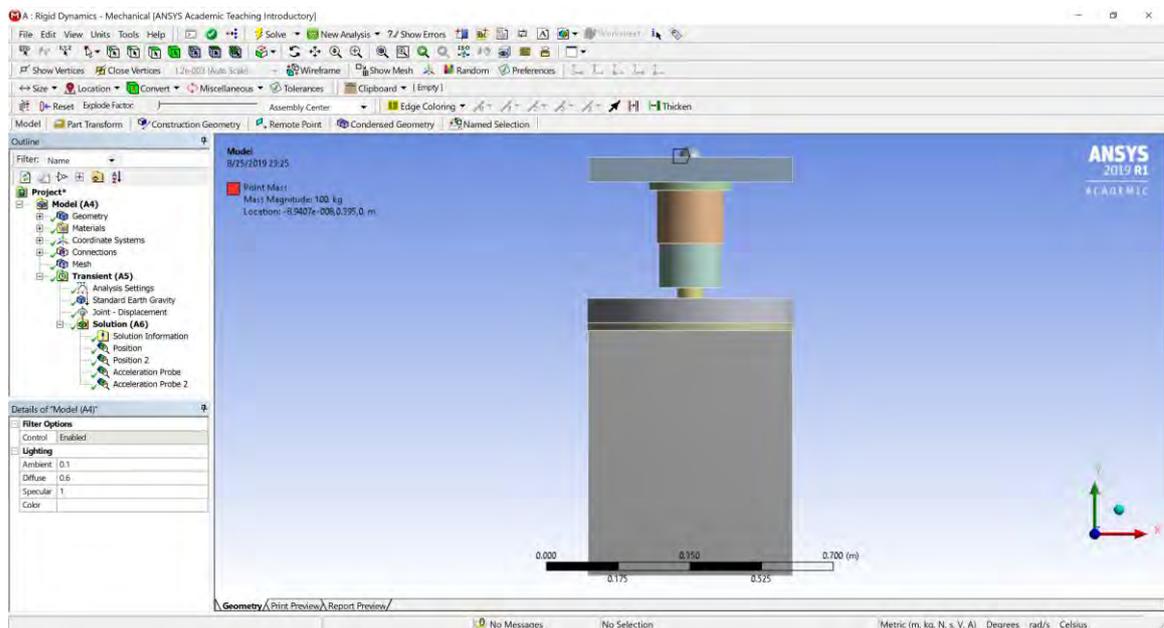


Figura 3. 3: Entorno del módulo Mechanical, dentro de Ansys Workbench

3.2.1 RESPUESTA DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO EN ANSYS WORKBENCH

El modelo analítico se somete a diferentes señales. Se inicia con una señal sinusoidal de desplazamiento, luego una sinusoidal corregida de aceleraciones, y finalmente un acelerograma. El inconveniente es que cuanto más tiempo dura y mayor detalle tiene la señal, el tiempo requerido de procesamiento aumenta considerablemente. Por esta razón, la señal sísmica asignada es del minuto que más influye sobre el sistema de aislamiento.

La simulación se realiza para los dos acelerogramas seleccionados en el método teórico. Los resultados se presentan en gráficos de pseudo aceleraciones y de desplazamientos de la plataforma de protección. Estos resultados se comparan con las aceleraciones y desplazamientos en el suelo.

3.3 MÉTODO COMPARATIVO

El funcionamiento correcto del código de Matlab se valida previamente, al evaluarlo con los datos y resultados de estudios de optimización del aislador de triple péndulo de fricción, que también emplearon Matlab, y validaron sus resultados con ensayos de laboratorio. A partir de esto, se emplea el código para el modelo teórico de sistema de aislamiento sísmico modular propuesto en la tesis.

La primera comparación se realiza a partir del modelo teórico en Matlab. Se compara el movimiento del suelo y el movimiento del sistema de aislamiento. Para verificar si se logró el objetivo de aislar, se debe comparar:

- El registro del acelerograma escalado a sismo leve, moderado, y severo, versus el registro de aceleraciones de respuesta del sistema al sismo leve, moderado, y severo. No solo se compara en función del PGA, sino a toda la respuesta.
- El registro de desplazamientos del suelo y del sistema, para los sismos leve, moderado, y severo. En este punto, más que reducir la amplitud de respuesta de desplazamiento, se espera aumentar el periodo del movimiento, o lo que es lo mismo, reducir la frecuencia de respuesta. El objetivo es lograr un movimiento más suave o pausado.

La segunda comparación se realiza entre las respuestas del modelo teórico de Matlab y el modelo numérico de Ansys. Los parámetros de comparación son:

- La máxima aceleración de respuesta registrada en cada programa, para sismo leve, moderado, y severo.
- El periodo de respuesta del sistema de aislamiento en cada programa, para sismo leve, moderado, y severo.

Finalmente, se elabora los planos de ubicación del sistema de aislamiento sísmico modular, aplicado dentro de un ambiente del primer piso de tres casos: una vivienda donde reside una persona en silla de ruedas, el área de emergencias de un hospital, y un edificio pequeño con contenidos delicados y/o costosos. Se presentan esquemas de uso: lo cotidiano debe estar dentro o cerca del área protegida, radio de alcance o influencia, alejamiento y enganche de las cosas altas que pueden caer sobre las personas, estanterías bajas para que una persona vulnerable alcance sus cosas, entre otros.

CAPÍTULO IV: SISTEMA DE AISLAMIENTO SÍSMICO

4.1 CARACTERIZACIÓN LOCAL DE SISMOS

En Perú, cinco de los sismos más conocidos por el daño que generaron en su momento en la población son Lima 1966, Ancash 1970, Lima 1974, Arequipa 2001, y Pisco 2007.

Tabla 4. 1: Características de los registros sísmicos seleccionados

Sismo	Estación	Ubicación de la estación	Coordenadas de la estación		Coordenadas del epicentro		Magnitud (Mw)	Tipo de suelo
			LON	LAT	LON	LAT		
OCT 17, 1966	Parque de la reserva	Lima	-77.04	-12.07	-78.7	-10.7	8.1	Grava gruesa densa y canto rodado
MAY 31, 1970	Parque de la reserva	Lima	-77.04	-12.07	-78.87	-9.36	6.6	Grava gruesa densa y canto rodado
OCT 3, 1974	Parque de la reserva	Lima	-77.04	-12.07	-77.98	-12.5	8.1	Grava gruesa densa y canto rodado
JUN 23, 2001	Cesar Vizcarra Vargas	Moquegua	-70.928	-17.186	-73.77	-16.08	8.3	Gravas con matriz arenosa y limosa
AGO 15, 2007	Dirección de Hidrografía y Navegación	Callao	-77.155	-12.065	-76.76	-13.67	8	Suelo blando

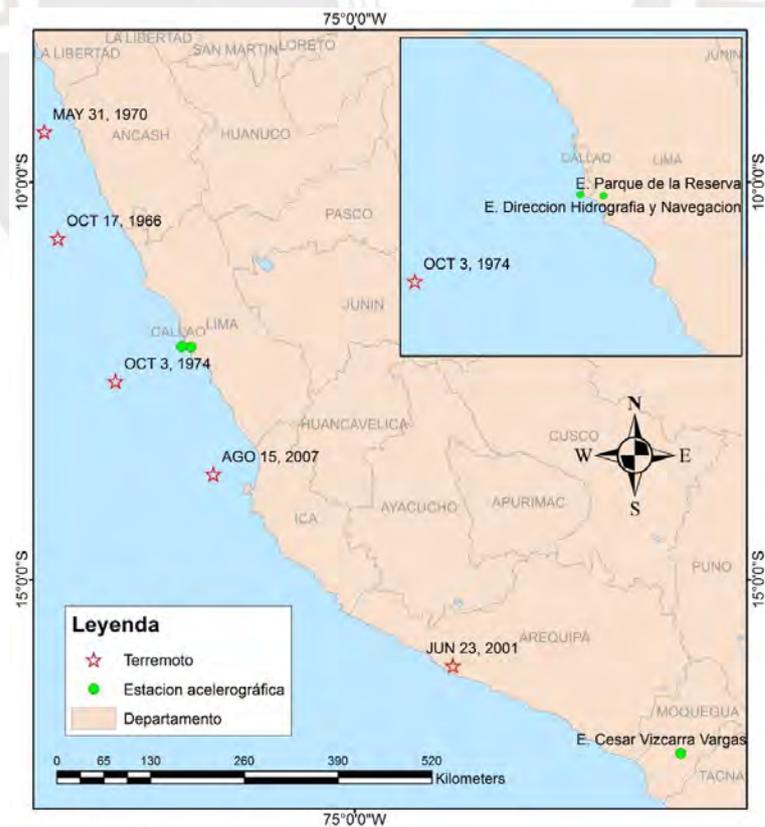


Figura 4. 1: Localización de epicentros y estaciones de los terremotos peruanos seleccionados

A los ya conocidos PGA, PGV, e IMM, se agrega los conceptos de energía y potencial destructivo. La Intensidad de Arias (Arias, 1969) se define como la energía por unidad de peso disipada por una familia de osciladores de un grado de libertad, para un sismo y amortiguamiento dados (ecuación 3.3). El potencial destructivo (Araya y Saragoni, 1984) es un parámetro que permite comparar la capacidad de producir daño del movimiento sísmico (ecuación 3.4) debido a mecanismos transcurivos, subductivos e intraplaca.

La respuesta sísmica de las estructuras a los movimientos del terreno puede ser analizada convenientemente mediante espectros de respuesta, los mismos que representan un medio para caracterizar el movimiento del suelo y sus efectos sobre la estructura. Aquí se puede comprobar la influencia que tiene la geología local a través de las condiciones de suelo donde se ha registrado el movimiento. Asimismo, se puede comprobar que cada señal sísmica genera diferentes valores máximos de desplazamientos según el periodo.

A continuación, se muestran tres figuras donde se compara los registros de aceleración (Figura 4.2), y gráficos calculados para velocidad (Figura 4.3) y desplazamiento del suelo (Figura 4.4), de los cinco sismos considerados. Cada tipo de registro está a la misma escala para comparar su forma, amplitud, y duración.

Finalmente, se elaboró una tabla resumen (Tabla 4.2) donde se compara las diferentes variables consideradas. Aquí se ordenó de mayor a menor la incidencia del sismo para cada variable.

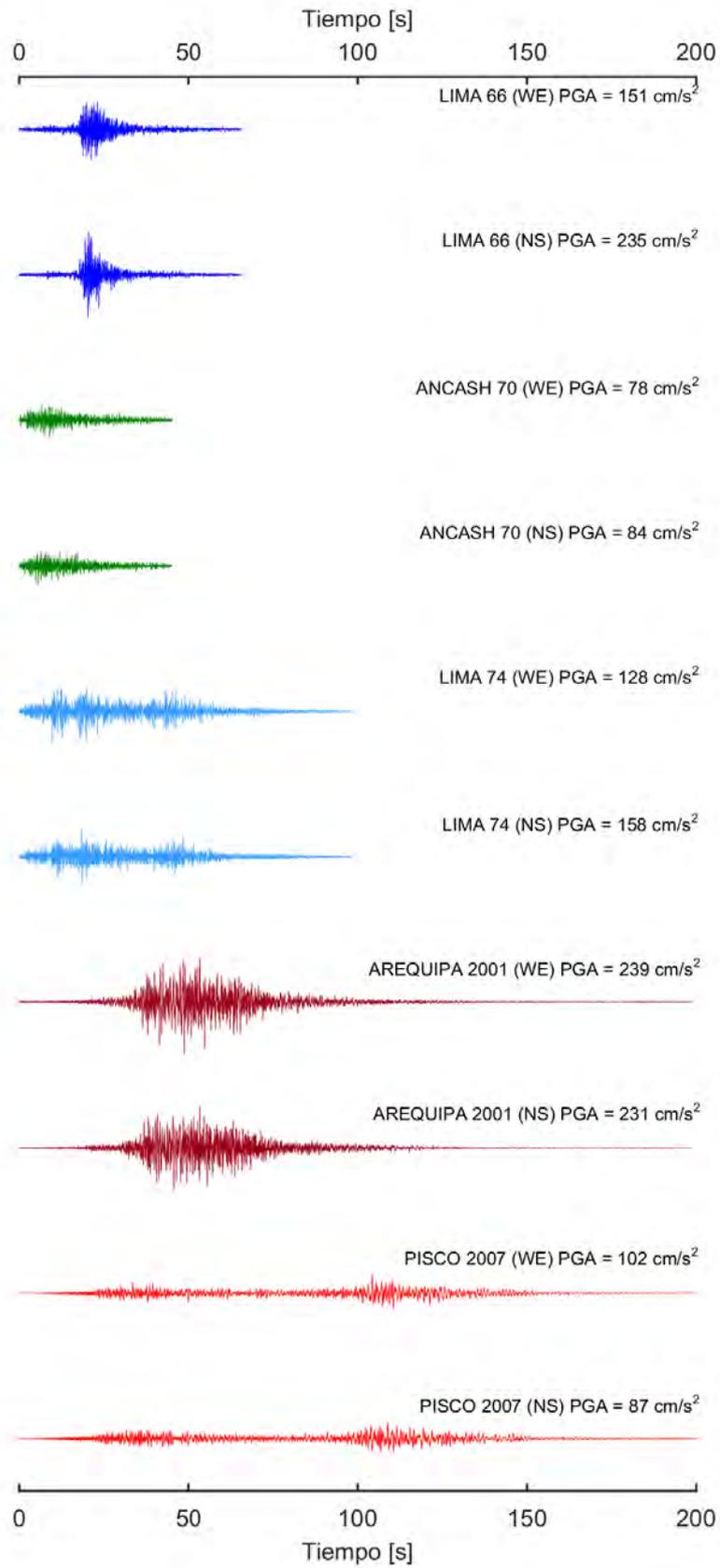


Figura 4. 2: Gráfico comparativo de acelerogramas de los 5 sismos peruanos seleccionados

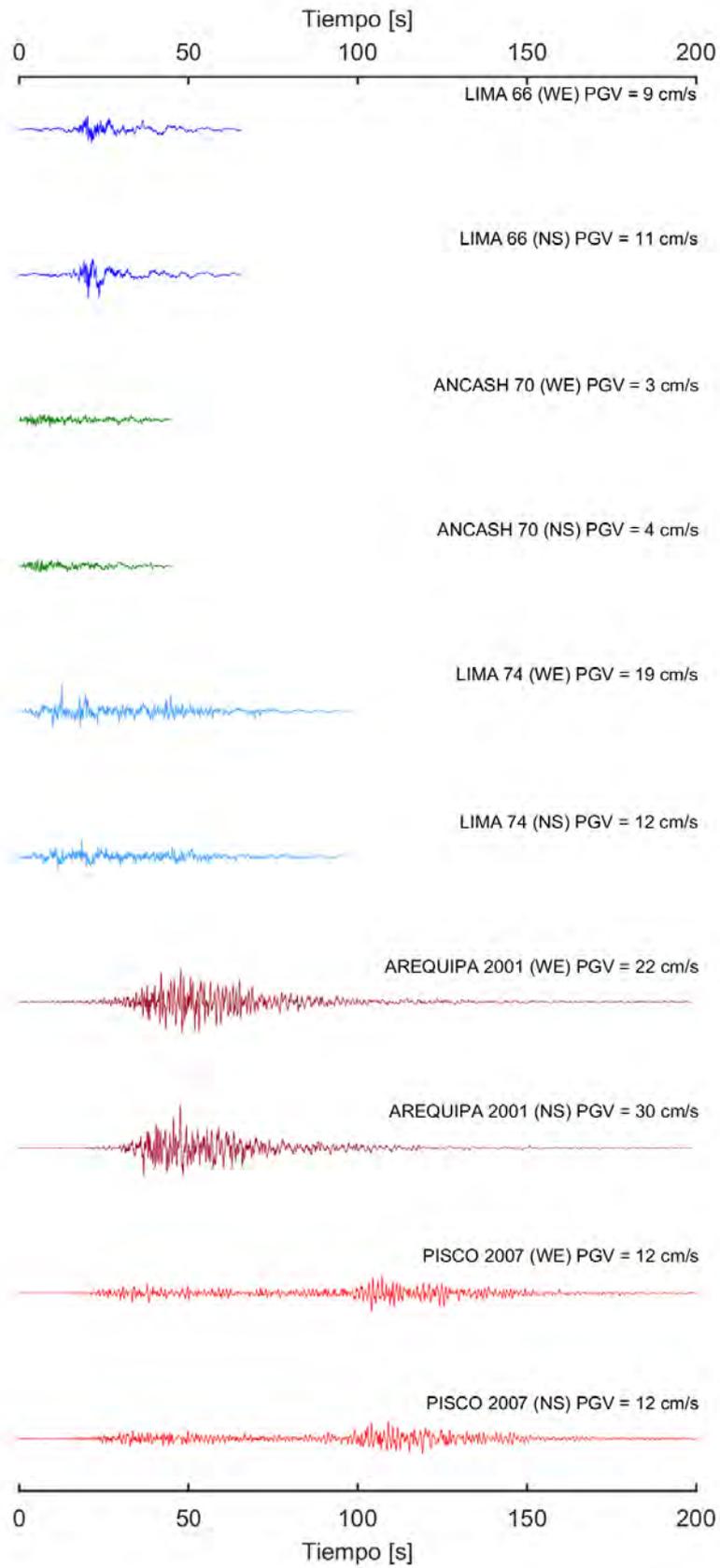


Figura 4. 3: Gráfico comparativo de velocidades de los 5 sismos peruanos seleccionados

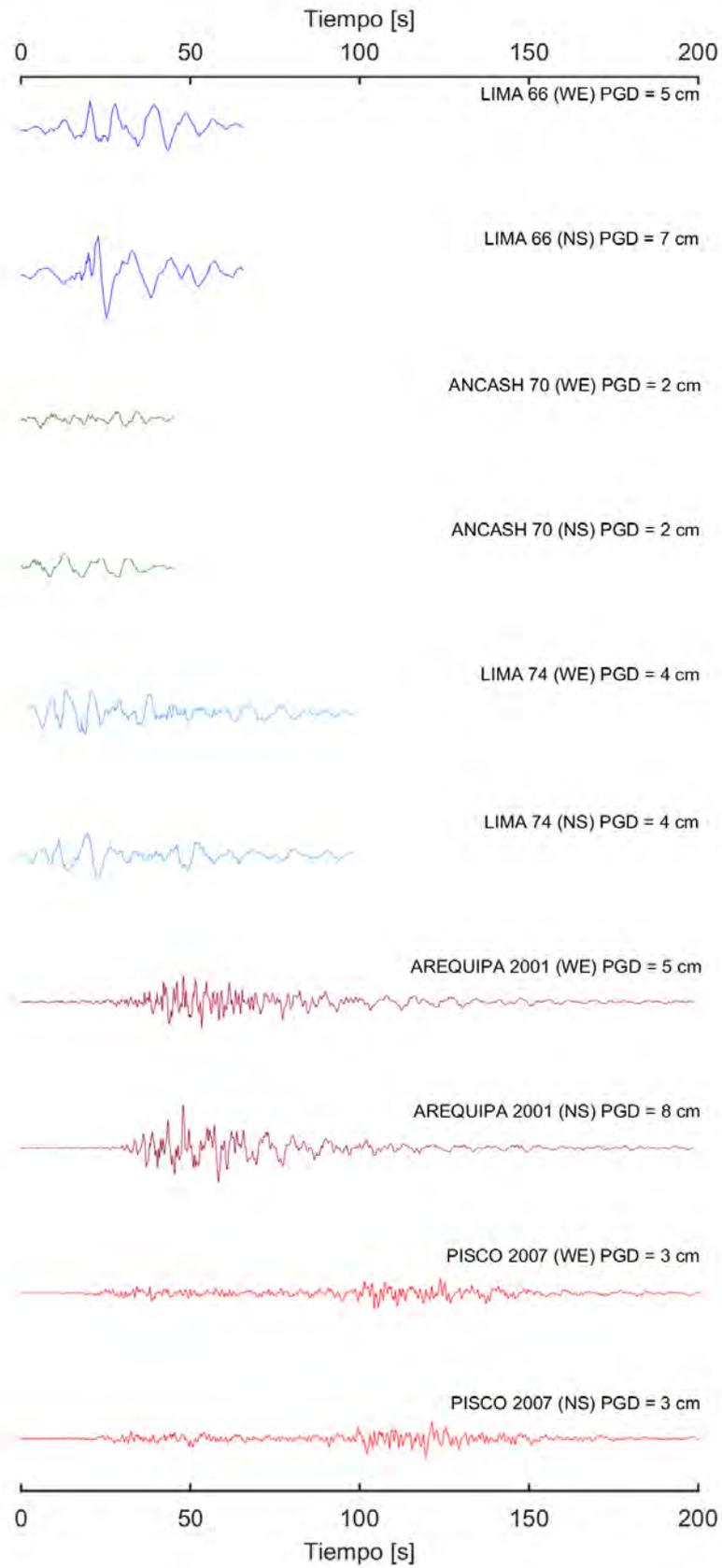
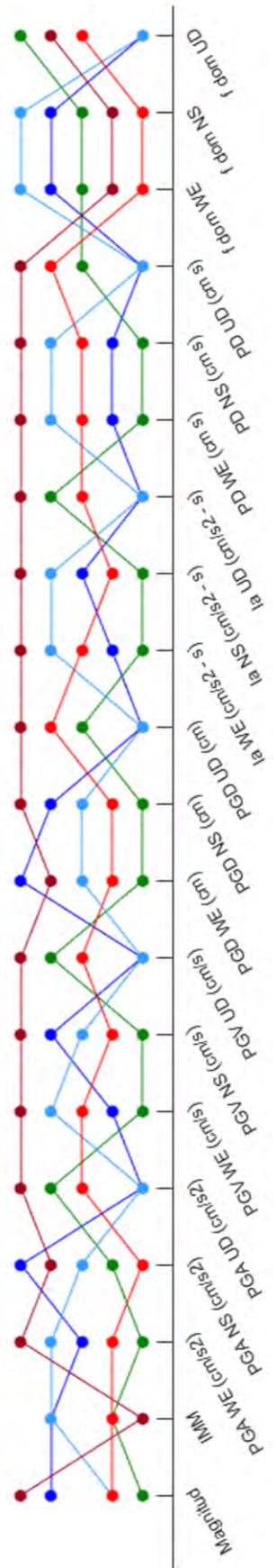


Figura 4. 4: Gráfico comparativo de desplazamientos de los 5 sismos peruanos seleccionados

Tabla 4. 2: Resumen comparativo de los parámetros considerados para sismos locales

SISMOS LOCALES	Magnitud	IMM	PGA (cm/s ²)		PGV (cm/s)		PGD (cm)		Intensidad de Arias (cm/s ² - s)		Poder destructivo (cm - s ²)		frecuencia dominante (Hz)							
			E-W	N-S	U-D	E-W	N-S	U-D	E-W	N-S	U-D	E-W	N-S	U-D	E-W	N-S				
LIMA OCT 17, 1966	8.1	IX	170.61	235.11	0.00	9.57	16.24	0.00	5.29	7.73	0.00	56.49	65.89	0.00	0.0031	0.0059	0.0000	3.23	3.03	0.00
ANCASH MAY 31, 1970	7.9	VIII	100.10	100.41	63.99	4.71	4.70	4.18	1.59	2.10	1.27	24.03	25.03	9.91	0.0023	0.0019	0.0009	2.37	2.73	1.77
LIMA OCT 3, 1974	8.0	IX	177.27	158.18	0.00	18.99	12.20	0.00	4.20	4.29	0.00	116.40	81.19	0.00	0.0126	0.0088	0.0000	3.31	3.27	0.00
AREQUIPA JUN 23, 2001	8.5	VII	288.59	230.60	158.83	22.43	29.67	12.85	4.74	7.88	5.45	284.54	247.12	98.48	0.0377	0.0272	0.0039	1.04	1.39	1.38
PISCO AGO 15, 2007	8.0	VIII	102.17	86.89	31.53	12.56	11.82	4.17	2.75	3.41	2.38	57.35	59.94	9.55	0.0072	0.0072	0.0010	0.85	0.78	1.12



Se puede concluir que la señal sísmica de Arequipa 2001 representa mejor las mayores sollicitaciones sobre la plataforma de protección que se desea diseñar.

Otro punto que resaltar es que, no siempre los registros de la dirección paralela a la línea epicentro-estación generan mayores respuestas que en la dirección perpendicular.

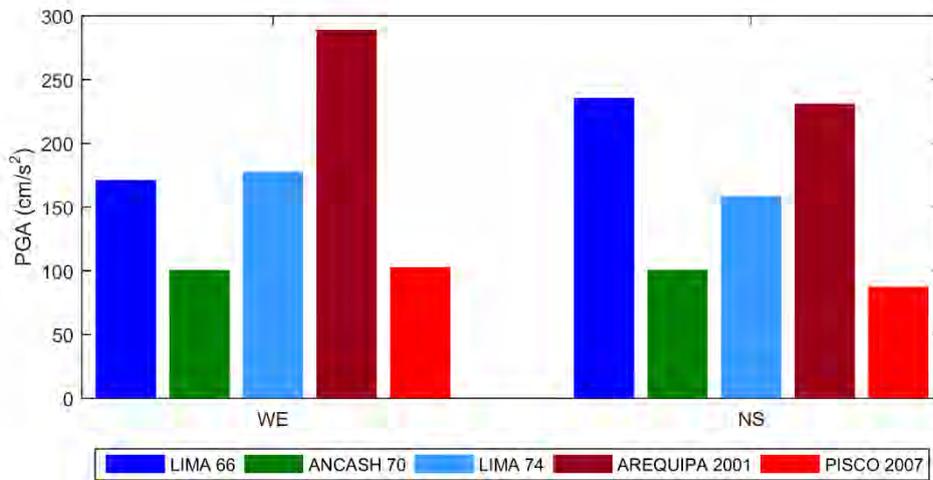


Figura 4. 5: Gráfico comparativo de PGA

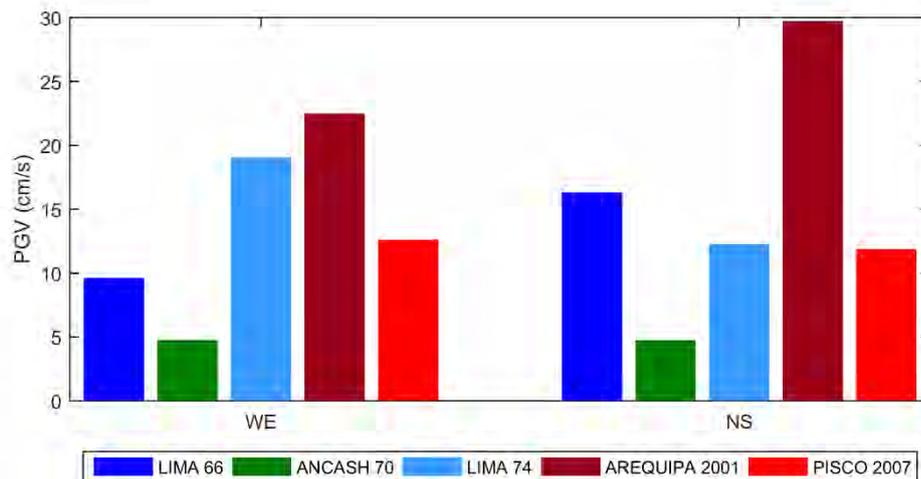


Figura 4. 6: Gráfico comparativo de PGV

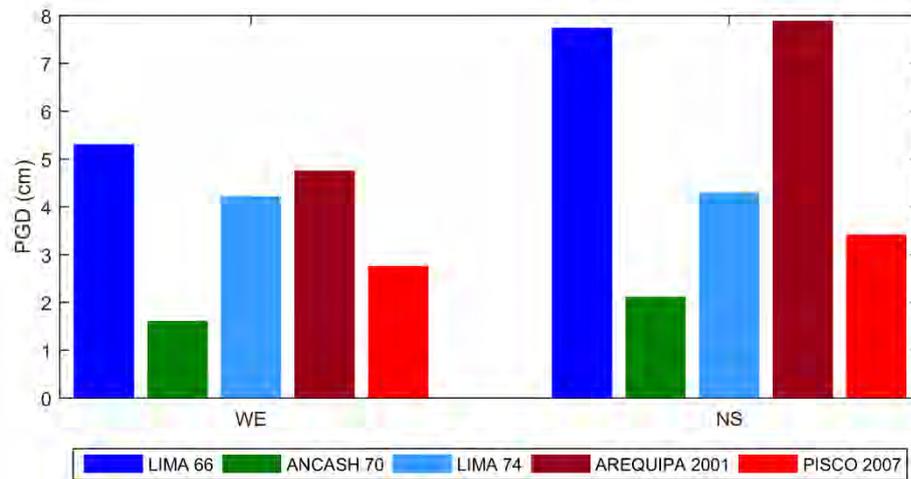


Figura 4. 7: Gráfico comparativo de PGD

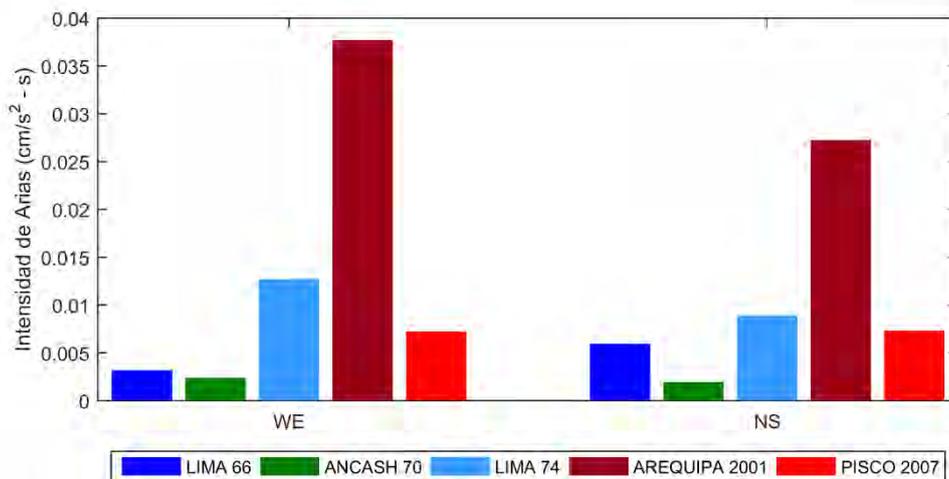


Figura 4. 8: Gráfico comparativo de Intensidad de Arias

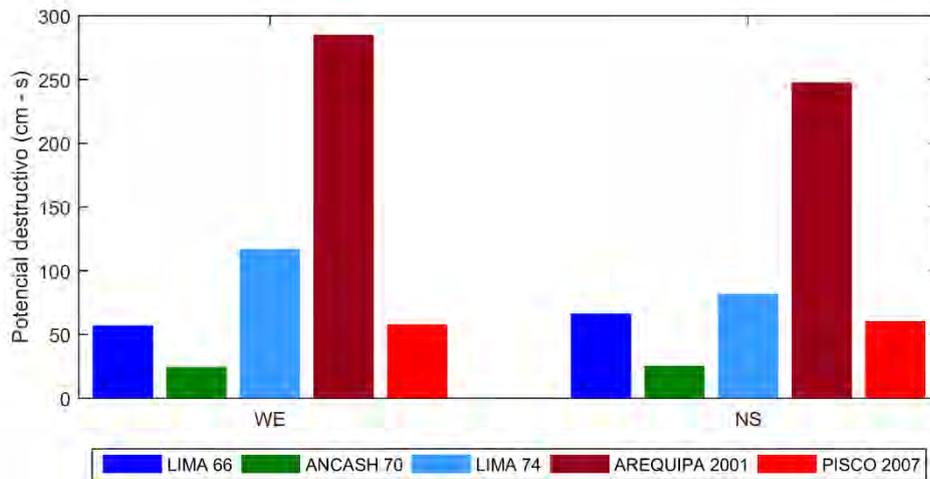


Figura 4. 9: Gráfico comparativo de Poder Destructivo

4.2 SISMOS LEVE, MODERADO, Y SEVERO

El sismo severo se define a partir de la caracterización de sismos peruanos, según el movimiento del suelo y la respuesta de sistemas de un grado de libertad, y la escala a tres niveles: sismo leve, sismo moderado, sismo severo.

En esta tesis se define: el sismo leve al escalar el PGA a 2.5m/s^2 , el sismo moderado al escalar el PGA a 5.0m/s^2 , y el sismo severo al escalar el PGA a 7.5m/s^2 .

Se debe recordar que la señal solo se escala en función a la amplitud (PGA), porque se analiza sobre un prototipo a escala natural.

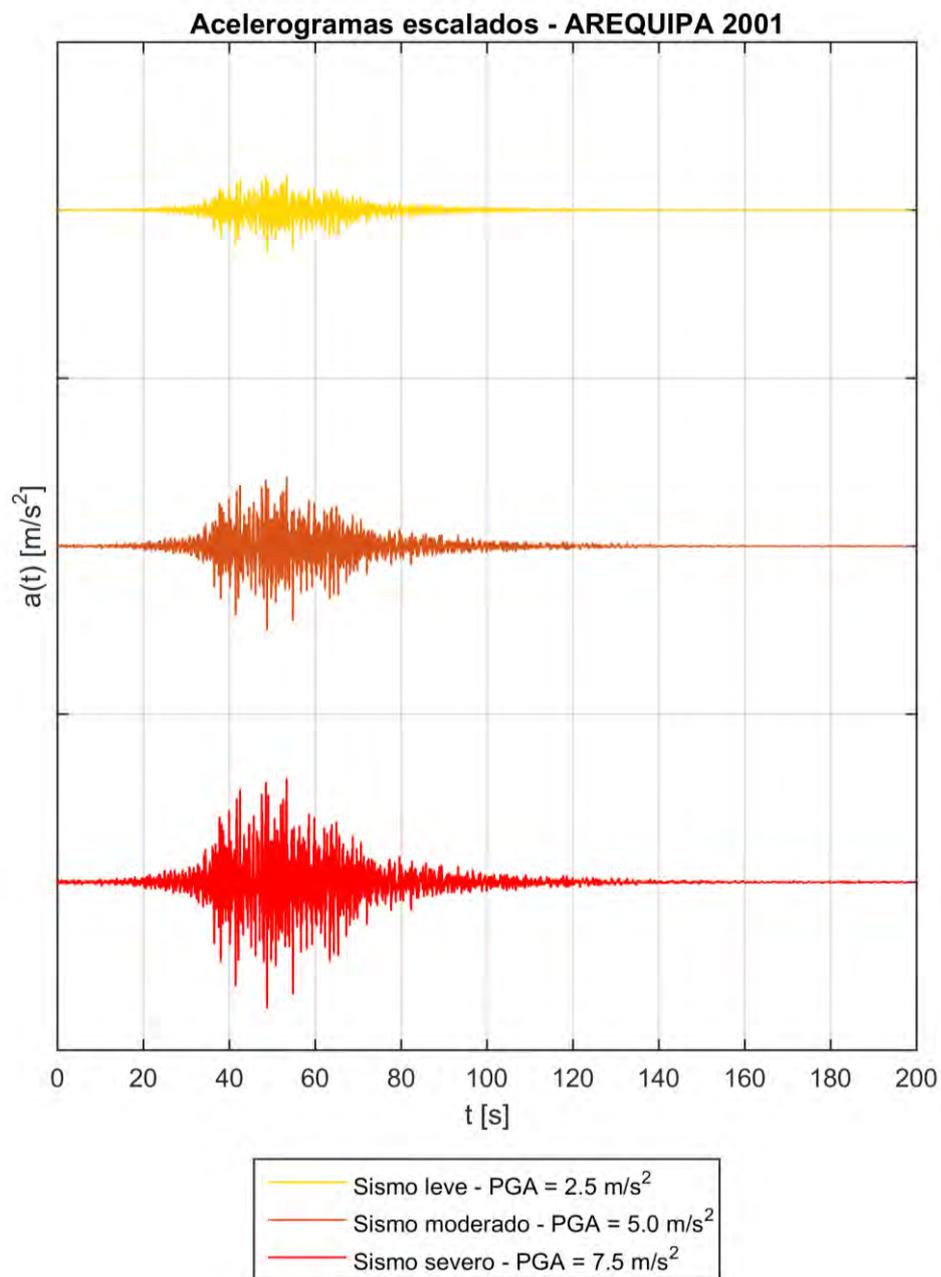
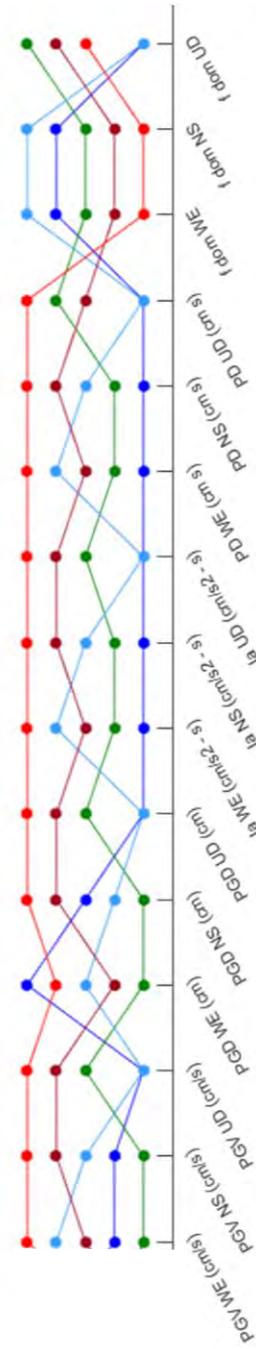


Figura 4. 10: Señal de Arequipa 2001, escalada a sismo leve, moderado y severo

Tabla 4. 3: Resumen comparativo de los parámetros considerados para sismos severos (PGA 7.5m/s²)

SISMOS ESCALADOS	Magnitud	IMM	PGA (cm/s ²)			PGV (cm/s)			PGD (cm)			Ia (cm/s ² - s)			Pd (cm - s ²)			f dom (Hz)		
			E-W	N-S	U-D	E-W	N-S	U-D	E-W	N-S	U-D	E-W	N-S	U-D	E-W	N-S	U-D	E-W	N-S	U-D
LIMA OCT 17, 1966	8.1	IX	750.00	750.00	0.00	42.06	51.80	0.00	23.28	24.64	0.00	1091.70	670.48	0.00	0.0505	0.0479	0.0000	3.23	3.03	0.00
ANCASH MAY 31, 1970	7.9	VIII	750.00	750.00	750.00	35.28	35.10	48.94	11.97	15.72	14.93	1348.60	1396.40	1361.80	0.1295	0.1049	0.1291	2.37	2.73	1.77
LIMA OCT 3, 1974	8.0	IX	750.00	750.00	0.00	80.36	57.82	0.00	17.79	20.32	0.00	2083.50	1825.20	0.00	0.2194	0.1871	0.0000	3.31	3.27	0.00
AREQUIPA JUN 23, 2001	8.5	VII	750.00	750.00	750.00	58.30	96.49	60.68	12.32	25.61	25.74	1921.80	2614.00	2195.90	0.2031	0.2016	0.0523	1.04	1.39	1.38
PISCO AGO 15, 2007	8.0	VIII	750.00	750.00	750.00	92.17	102.01	99.26	20.18	29.52	56.50	3090.60	4465.40	5404.90	0.6579	0.9276	0.5515	0.85	0.78	1.12



En la [tabla 4.3](#) se compara las diferentes variables consideradas en los sismos, pero todos escalados a sismo severo, es decir, con un PGA igual a 7.5m/s². Aquí se ordenó de mayor a menor la incidencia del sismo para cada variable. Se puede concluir que la señal sísmica de Pisco 2007 representa mejor las mayores sollicitaciones sobre la plataforma de protección que se desea diseñar.

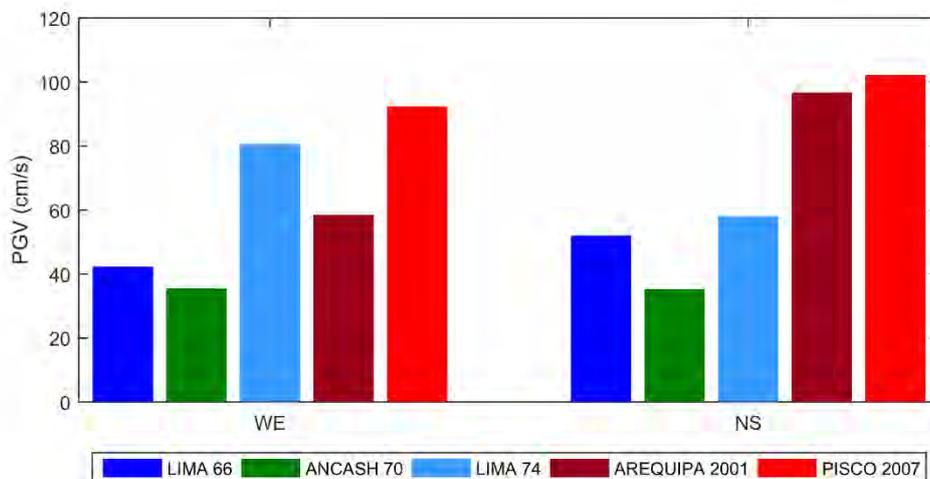


Figura 4. 11: Gráfico comparativo de PGV

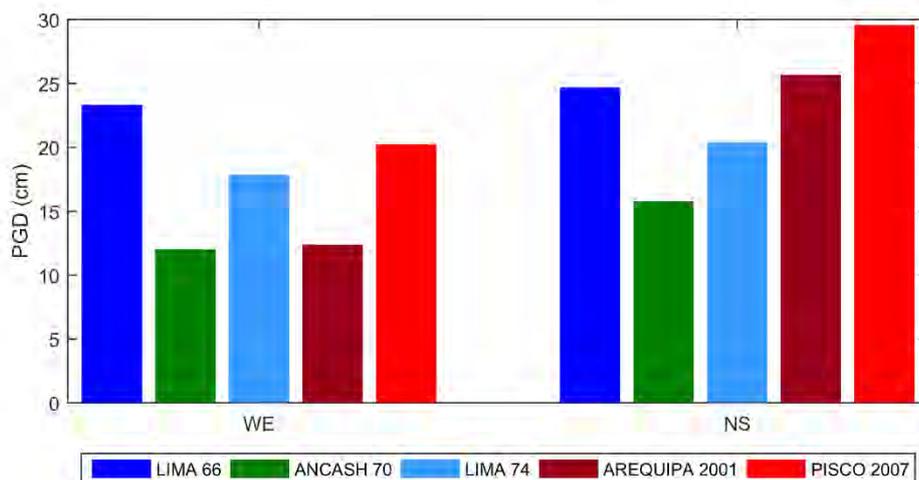


Figura 4. 12: Gráfico comparativo de PGD

Se observa que, a pesar de que todas las señales están escaladas a un PGA de 7.5 m/s², los parámetros que mejor los diferencian son la Intensidad de Arias (Ver [Figura 4.13](#)) y el Poder Destructivo (Ver [Figura 4.14](#)).

Para las señales de Pisco 2007 y Arequipa 2001 se cumple que la respuesta en la dirección Norte-Sur es mayor que la respuesta en la dirección Este-Oeste.

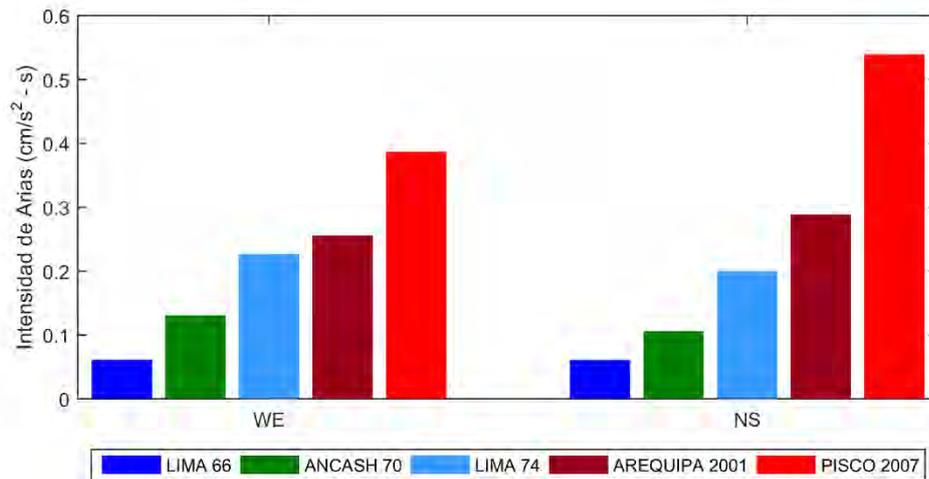


Figura 4. 13: Gráfico comparativo de Intensidad de Arias

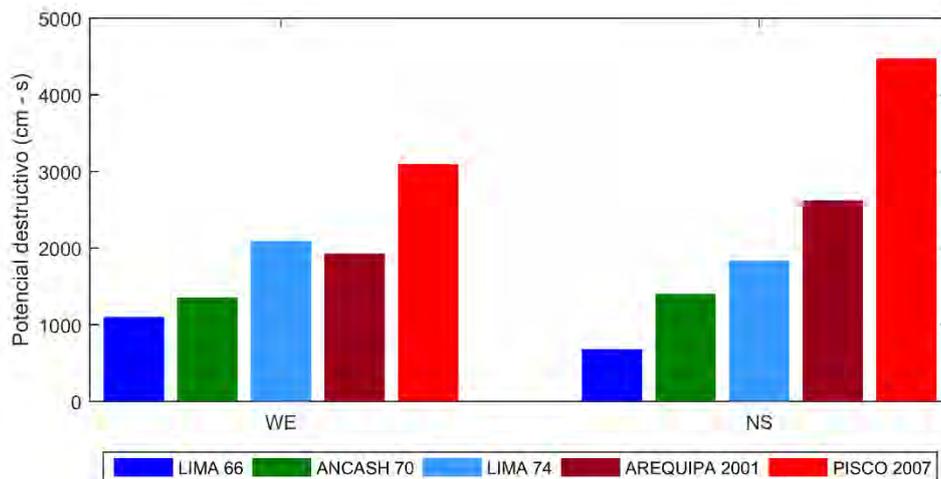


Figura 4. 14: Gráfico comparativo de Poder Destructivo

Finalmente, sobre el contenido de frecuencias de los cinco registros sísmicos peruanos analizados (Ver [Figura 4.15](#)), se observa que la frecuencia predominante se encuentra entre 1Hz y 3Hz. Asimismo, para el caso de los dos registros que representarían al sismo de mayor intensidad: Arequipa 2001, y Pisco 2007, la frecuencia predominante es cercana a 1Hz.

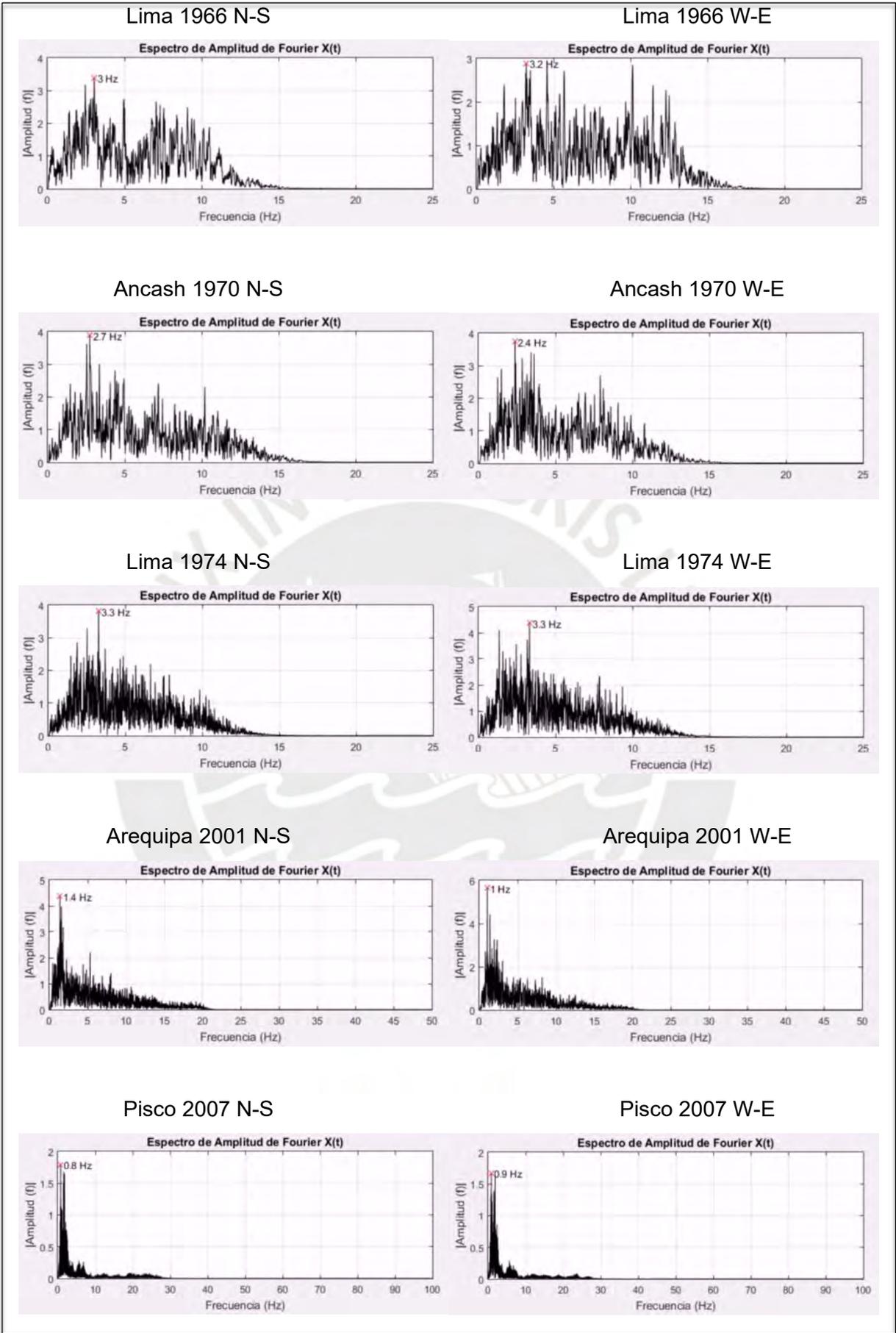


Figura 4. 15: Contenido de frecuencias de 5 registros sísmicos peruanos

4.3 MODELOS PRELIMINARES DE SISTEMAS DE AISLAMIENTO

La idea general es proponer una plataforma de apoyos múltiples, de manera que se repartan las solicitaciones, no sean exigidos al límite, y se pueda tener un mayor factor de seguridad. Además, se busca construir el sistema a partir de piezas fáciles de fabricar y de piezas ya existentes y económicas. Cada apoyo tiene asignado un área de la plataforma de 0.50 m x 0.50 m. Como la sobre carga típica en viviendas es de 200 kg por cada metro cuadrado de piso (NTP E020, 2006), y que cuatro apoyos soportan un metro cuadrado, a cada apoyo le corresponde 50 kg de sobre carga.

Los modelos preliminares consideran una geometría básica, peso aproximado, y son modelados como cuerpos rígidos con contactos lisos. Sus respuestas se estiman con la teoría de las vibraciones mecánicas y la transmisión de la fuerza en sistemas masa-resorte-amortiguador. Se evaluaron varios modelos, y a continuación se presentan tres de los que pueden ejemplificar mejor el proceso:

- El primero modelo de plataforma unitaria es de 1.00 m x 1.00 m (Ver [Figura 4.16](#)). Se intenta aislar a la plataforma de manera similar a los sistemas de suspensión de los automóviles. Se aísla del suelo por medio de un apoyo esférico y de contacto liso, que a su vez está contenido dentro de una superficie cóncava esférica, que le permite moverse libremente, y que le permite regresar a su posición por gravedad. El inconveniente de este modelo es que el contacto teórico entre el apoyo y la base es en un punto, haciéndolo inestable y difícil de procesar posteriormente. Es decir, el apoyo se modela como una bola de acero de radio pequeño como 0.05 m, que gira y desliza libremente en una base cóncava esférica de radio 2.00 m. La base de apoyo tiene un área en planta circular de radio 0.25m.
- El segundo modelo de plataforma unitaria es de 0.50 m x 0.50 m (Ver [Figura 4.17](#)). Está ideado para el movimiento sísmico en una sola dirección. Por esta razón, el modelo se aísla del suelo por medio de un apoyo cilíndrico, con libertad de movimiento tipo articulación y de contacto liso, que a su vez está contenido dentro de una superficie cóncava cilíndrica. La particularidad es que el radio del apoyo y la base coinciden, a fin de mejorar el área de contacto entre superficies. El apoyo se modela como una pieza de acero de base cuyo contacto inferior es de sección cilíndrica de radio 3.50 m, que desliza con facilidad en una base cóncava cilíndrica de radio 3.50 m. La base tiene un área circular en planta de radio 0.25m de tal forma que coincide con el espacio que ocupa la plataforma de 0.50 m x 0.50 m.

- El tercer modelo de plataforma unitaria también es de 0.50 m x 0.50 m (Ver [Figura 4.18](#)). Está ideado para el movimiento sísmico en cualquier dirección horizontal. Se aísla del suelo por medio de un apoyo esférico, con libertad de movimiento tipo rótula y de contacto liso, que a su vez está contenido dentro de una superficie cóncava esférica. La particularidad es que el radio del apoyo y la base coinciden, a fin de mejorar el área de contacto entre superficies. Es decir, el apoyo se modela como una pieza de acero de base de sección esférica de radio 3.50 m, que desliza con facilidad en una base cóncava esférica de radio 3.50 m. La base tiene un área en planta circular de radio 0.25m de tal forma que coincide con el espacio que ocupa la plataforma de 0.50 m x 0.50 m.



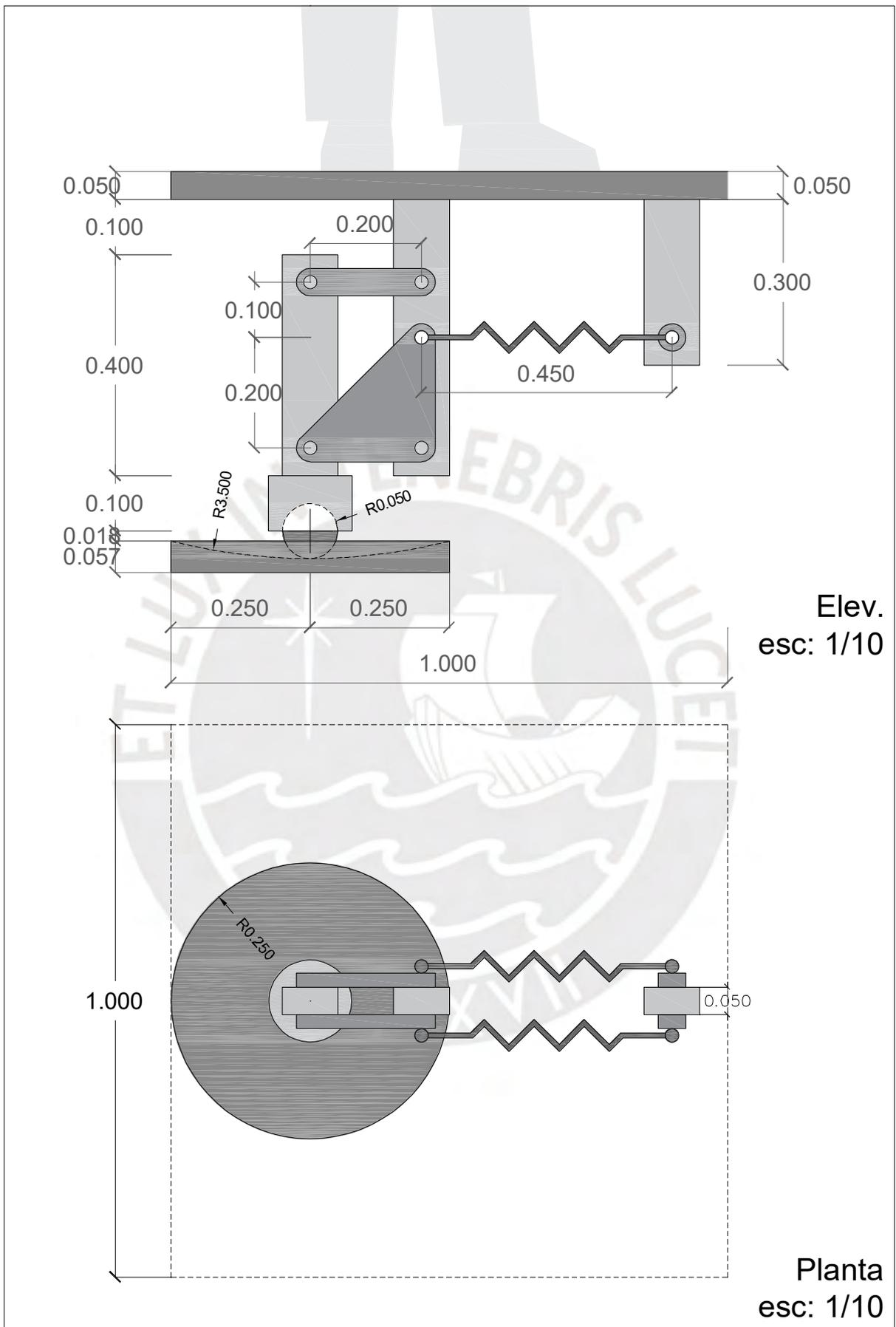


Figura 4. 16: Elevación y planta del primer modelo de sistema de aislamiento.

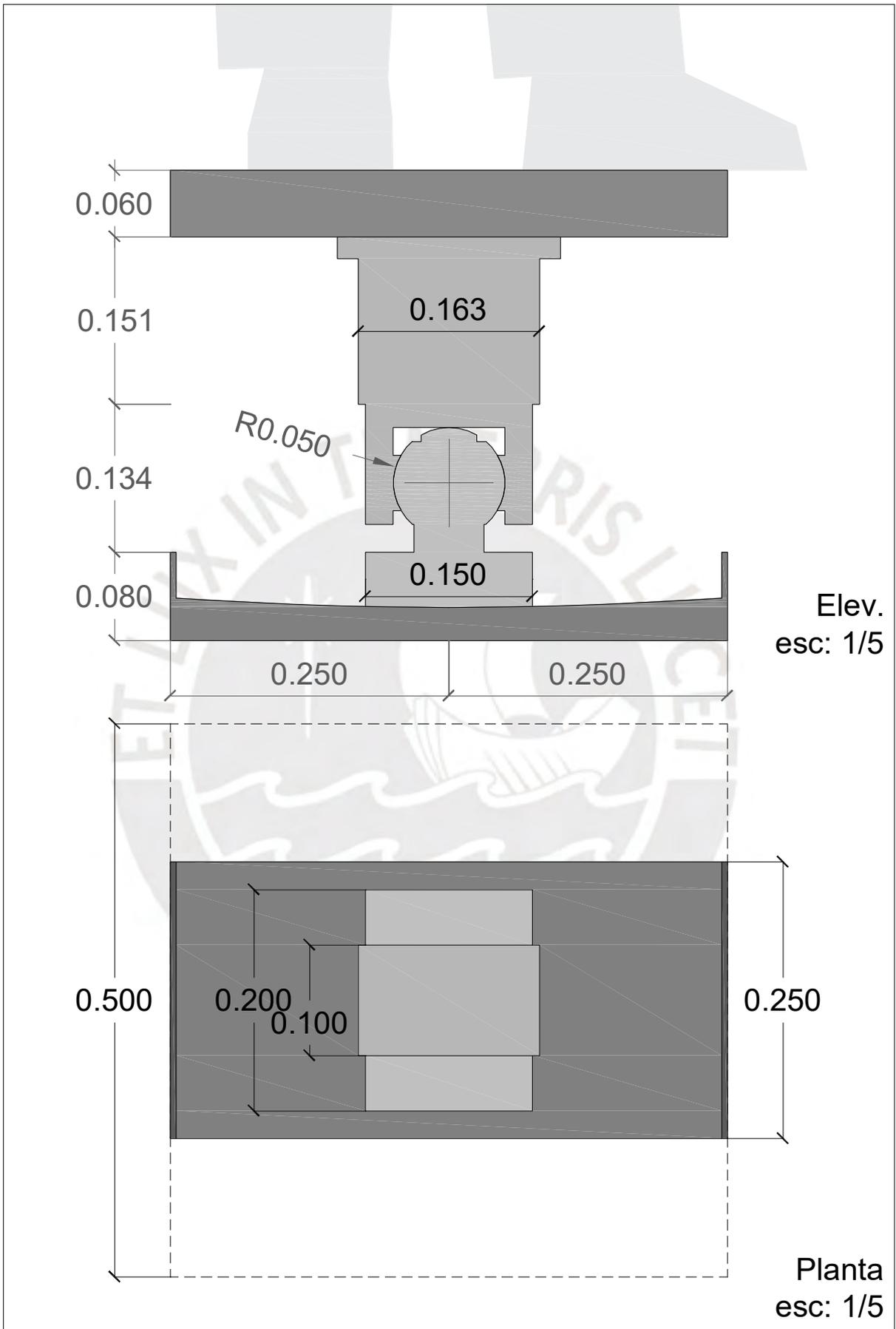


Figura 4. 17: Elevación y planta del segundo modelo de sistema de aislamiento.

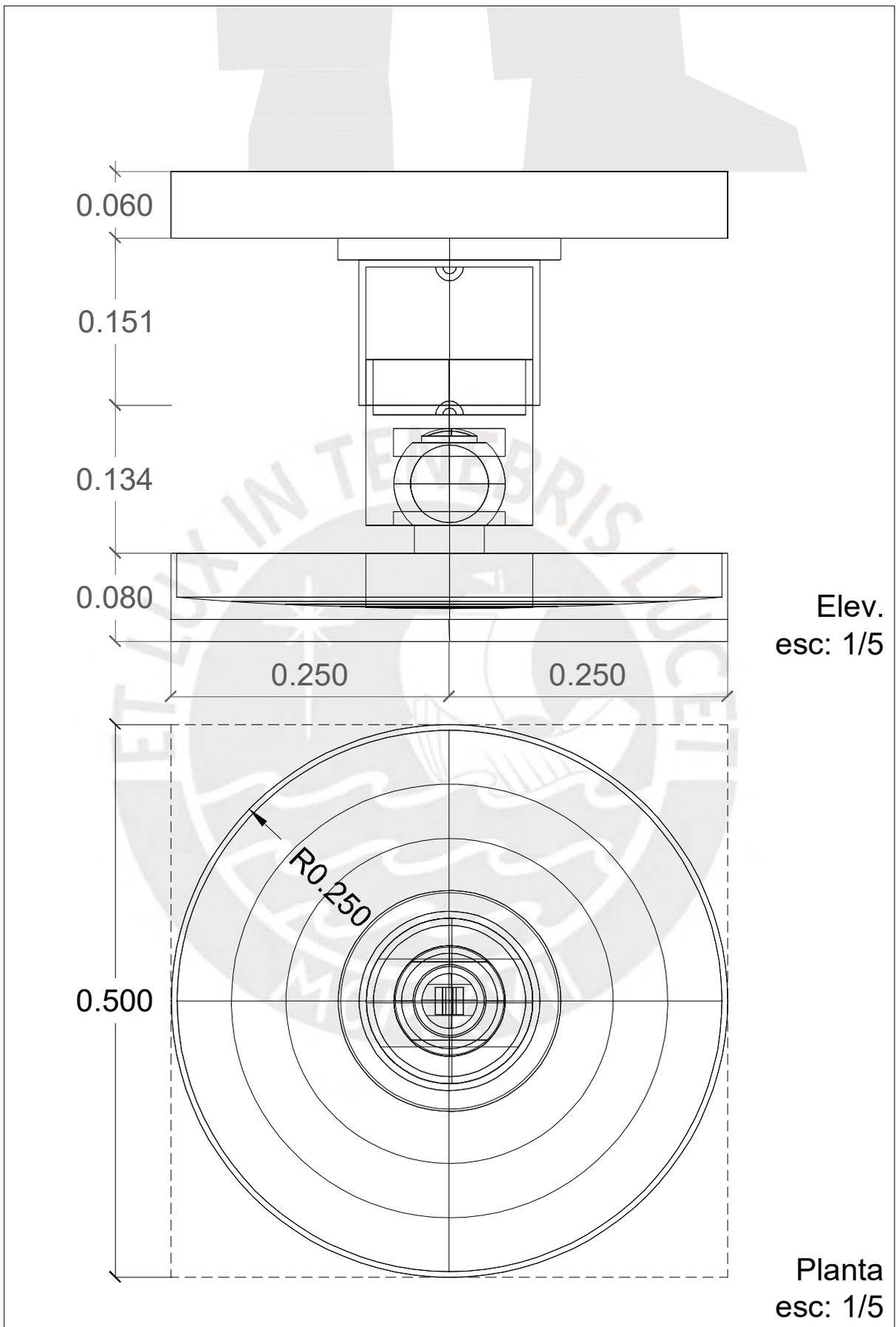


Figura 4. 18: Elevación y planta del tercer modelo de sistema de aislamiento.

$$1 = 2 \quad C_1 + P_1 = C_2 + P_2$$

$$\frac{mg}{2}(R-r)\theta_m^2 = \frac{m}{2}(R-r)^2\theta_m^2\omega_n^2 + \frac{m}{5}(R-r)^2\theta_m^2\omega_n^2$$

$$\frac{mg}{2}(R-r)\theta_m^2 = \frac{7m}{10}(R-r)^2\theta_m^2\omega_n^2$$

Frecuencia angular natural del sistema para los ejes horizontales x e y:

$$\omega_b = \sqrt{\frac{5g}{7(R-r)}} \quad (4.1)$$

Periodo natural del sistema para los ejes horizontales x e y:

$$T_b = \sqrt{\frac{28\pi^2(R-r)}{5g}} \quad (4.2)$$

Rigidez del sistema para los ejes horizontales x e y:

$$k_b = \omega_b^2 (m_b + m) = \frac{5g(m_b + m)}{7(R-r)} \quad (4.3)$$

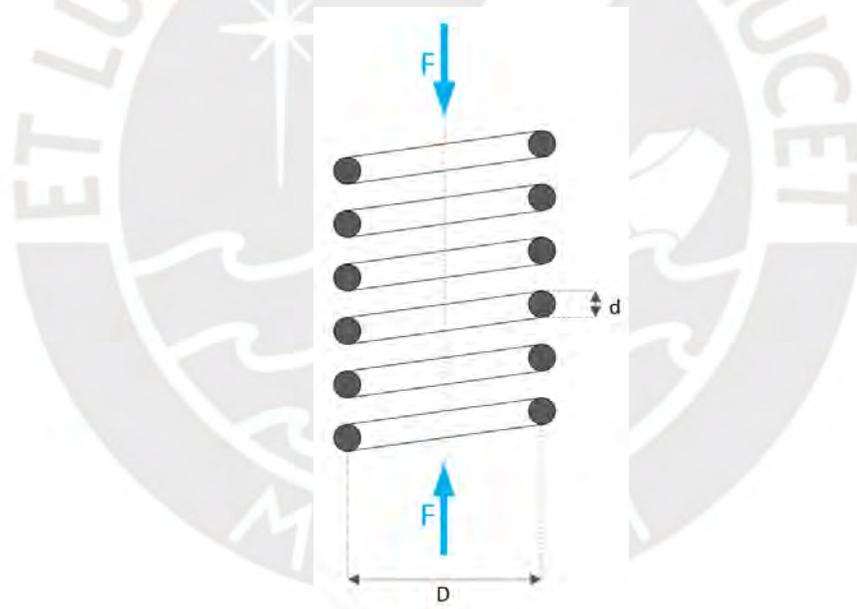


Figura 4. 20: Modelo 1 para el eje vertical z

$$\theta = \frac{TL}{GJ} ; T = F(D/2) ; L = \pi DN$$

$$\theta = \frac{16FD^2N}{Gd^4}$$

$$y = \theta(D/2) = \frac{8FD^3N}{Gd^4}$$

Rigidez del sistema para el eje vertical z:

$$k_b = \frac{F}{y} = \frac{G d^4}{8 D^3 N} \quad (4.4)$$

Frecuencia angular natural del sistema para el eje vertical z:

$$\omega_b = \sqrt{\frac{k_b}{m_b+m}} \quad (4.5)$$

Periodo natural del sistema para el eje vertical z:

$$T_b = \frac{2\pi}{\omega_b} \quad (4.6)$$

El coeficiente de amortiguamiento (ξ) se puede medir experimentalmente, a partir del decremento logarítmico, medido a partir de un diagrama de desplazamiento en el tiempo. Para los ejes horizontales se puede soltar el sistema desde un extremo de la superficie cóncava (ver [Figura 4.21a](#)), para que empiece a oscilar. Para el eje vertical se puede elevar el sistema a una altura z, y dejarlo caer verticalmente a la superficie cóncava (ver [Figura 4.21b](#)), para que empiece a oscilar.

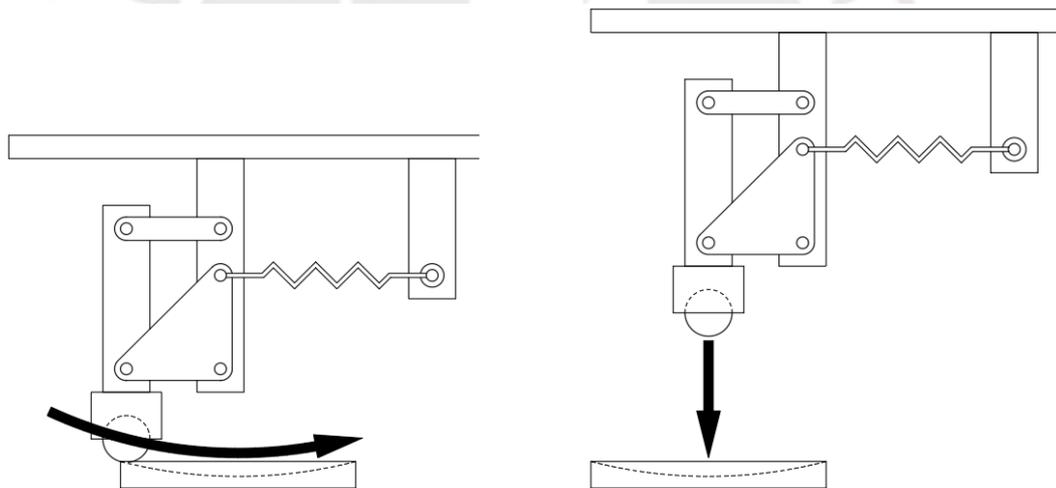


Figura 4. 21: Medición del amortiguamiento: a) Eje horizontal, b) Eje vertical

Del diagrama de desplazamiento en el tiempo se mide el decremento logarítmico:

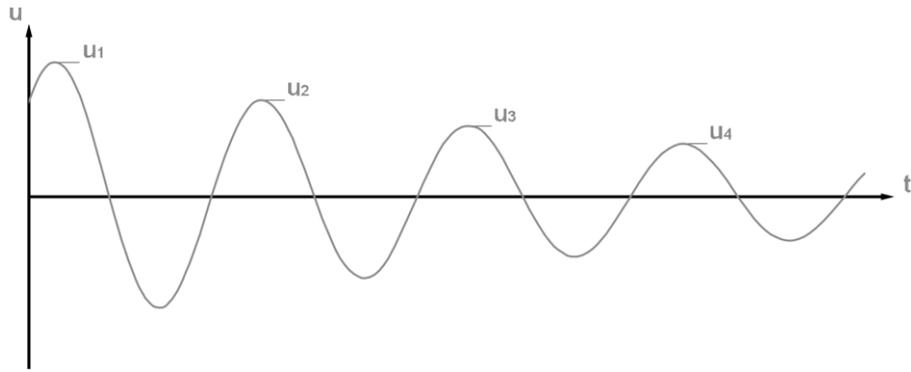


Figura 4. 22: Medición del decremento logarítmico

$$\xi = \frac{\ln(\mu_i/\mu_{i+j})}{2\pi j} \quad (4.7)$$

El amortiguamiento (c_b) para cualquier dirección se determina a partir de su correspondiente coeficiente de amortiguamiento (ξ_b):

$$c_b = 2 \xi_b (m_b + m) \omega_b \quad (4.8)$$

Asimismo, se puede calcular la transmisibilidad (TR), para cualquiera de las direcciones, como:

$$TR = \frac{1 + (2 \xi (\omega/\omega_b))^2}{\sqrt{(1 - (\omega/\omega_b)^2)^2 + (2 \xi (\omega/\omega_b))^2}} \quad (3.6)$$

Para entender la influencia de la rigidez y amortiguamiento en la transmisibilidad, se grafica la relación de TR vs (R-r) en la [Figura 4.23](#), y TR vs ξ en la [Figura 4.24](#).

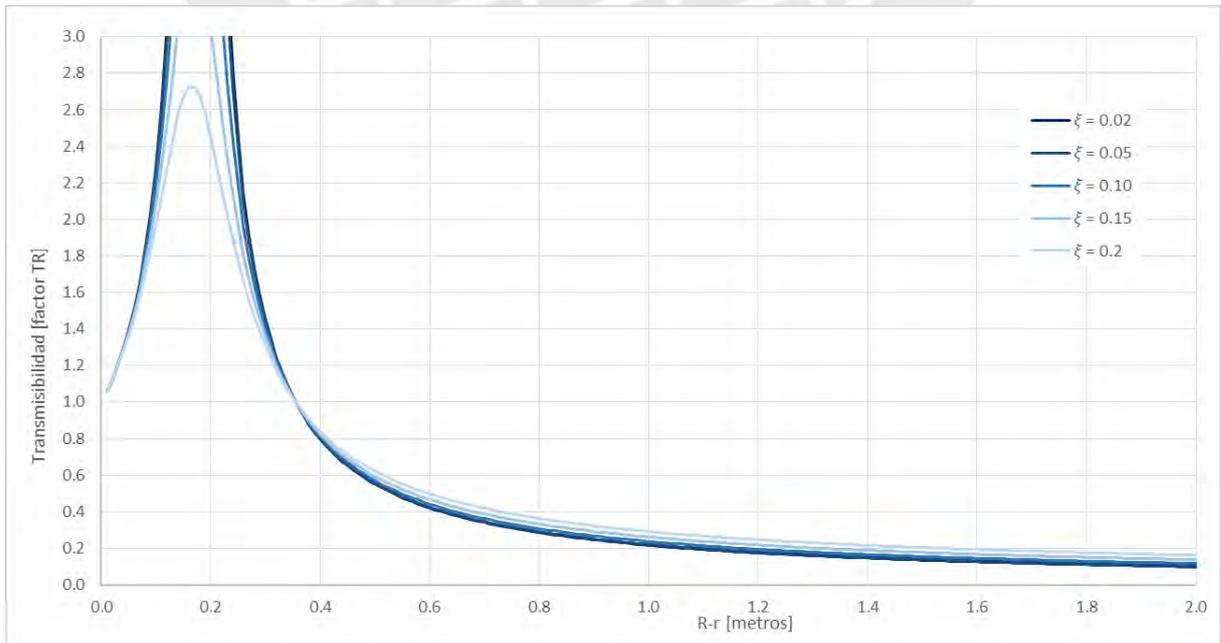


Figura 4. 23: Variación de la Transmisibilidad (TR) en función de la diferencia de radios (R-r) [m]

Para obtener la [Figura 4.23](#) y la [Figura 4.24](#), se consideró la frecuencia de 1Hz, que es la predominante en los acelerogramas analizados, $\omega = 6.283 \text{ rad/s}$. Con la ecuación (4.1) se obtiene ω_b , a partir de (R-r). Con la ecuación (3.6) se obtiene TR a partir de ω , y diferentes valores de ω_b y de ξ .

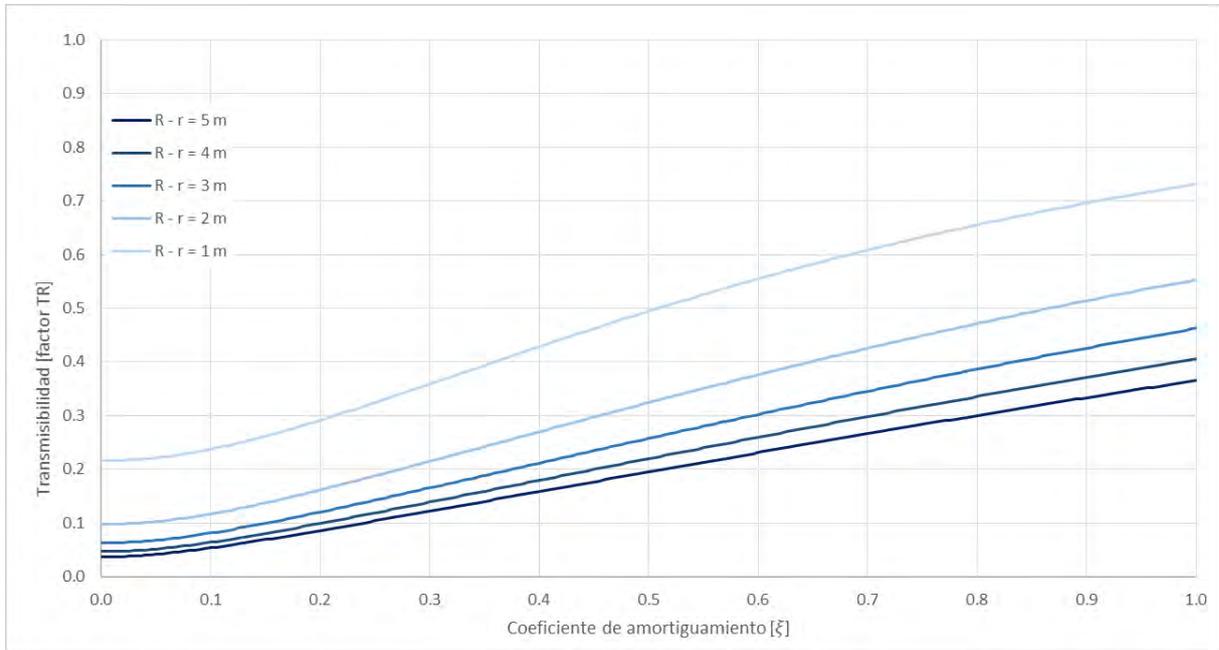


Figura 4. 24: Variación de la Transmisibilidad (TR) en función del coeficiente de amortiguamiento (ξ)

Se observa que el coeficiente de amortiguamiento influye menos que la relación R-r, recomendándose tener una diferencia de R-r mayor a 2 metros, y un coeficiente de amortiguamiento entre 0.02 y 0.20.

Como ejemplo, se considera un sistema de 1000 kg, con una bola de acero de 5cm de radio, sobre una superficie cóncava de 2.00 m de radio, y un resorte de 1cm de diámetro, 10 espirales, y un diámetro de giro de 10cm. Se considera 2% de coeficiente de amortiguamiento. La señal sísmica tiene una frecuencia predominante de 1Hz (una frecuencia circular de 6.283 rad/s).

Para los ejes horizontales x e y:

$$\omega_b = \sqrt{\frac{5 \times 9.81}{7(2.00 - 0.05)}} = 1.90 \text{ rad/s}$$

$$T_b = \sqrt{\frac{28 \pi^2 (2.00 - 0.05)}{5 \times 9.81}} = 3.32 \text{ s}$$

$$k_b = \frac{5 \times 9.81 (1000)}{7(2.00 - 0.05)} = 3593.41 \text{ N/m}$$

$$TR = \sqrt{\frac{1 + (2 \times 0.02 (6.28/1.90))^2}{(1 - (6.28/1.90)^2)^2 + (2 \times 0.02 (6.28/1.90))^2}} = 0.10$$

Para el eje vertical z:

$$k_b = \frac{F}{y} = \frac{800\,000 \times 1^4}{8 \times 10^3 \times 10} = 10 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}} = 9.81 \text{ KN/m}$$

$$\omega_b = \sqrt{\frac{9810}{1000}} = 3.13 \text{ rad/s}$$

$$T_b = \frac{2\pi}{3.13} = 2.01 \text{ s}$$

$$TR = \sqrt{\frac{1 + (2 \times 0.02 (6.28/3.13))^2}{(1 - (6.28/3.13)^2)^2 + (2 \times 0.02 (6.28/3.13))^2}} = 0.33$$

Se verifica que para relaciones ω/ω_b mayores a 2, y ξ pequeños, la transmisibilidad es mucho menor a la unidad. 10% en los ejes horizontales, y 33% en la dirección vertical.

El inconveniente de este primer modelo es constructivo, ya que no se puede fabricar en Perú bolas de acero de 10cm de diámetro, que además sean muy resistentes. Un segundo inconveniente es que no se puede simular correctamente, incluso en programas avanzados como Ansys, ya que el contacto bola - base, por geometría, es de un solo punto, lo que ocasiona inestabilidad en el cálculo.

4.3.2 Segundo modelo de apoyo

Ante los inconvenientes ya descritos del primer modelo, se plantea el segundo modelo, con un apoyo de sección circular que descansa sobre una base cóncava, y cuyos radios coinciden para facilitar el contacto en un área (ya no en un solo punto). Para esto, se tuvo que hacer una variante tipo rótula, ya que se le debía permitir al apoyo cierta libertad a mediana altura, para que se acomode a la forma de la base cóncava.

Este modelo está orientado al movimiento sísmico en una sola dirección, por lo que el modelo se aísla del suelo por medio de un apoyo cilíndrico, con libertad de movimiento tipo articulación y de contacto liso, que a su vez está contenido dentro de una superficie cóncava

cilíndrica. El radio del apoyo y el radio de la base coinciden, a fin de mejorar el área de contacto entre superficies.

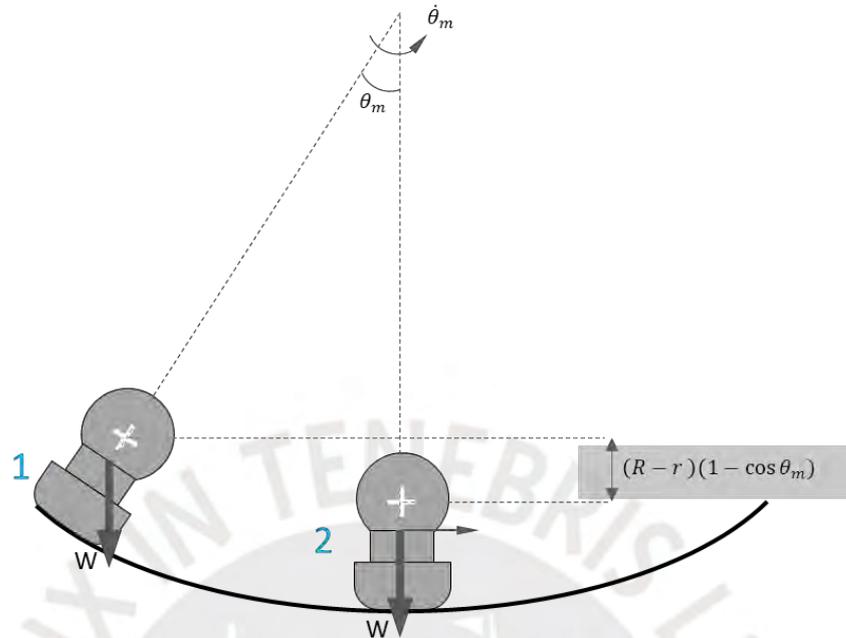


Figura 4. 25: Modelo 2 para los ejes horizontales

1 $E_{cinética} = C_1 = 0$

$E_{potencial} = P_1 = W(R - r)(1 - \cos\theta_m) \approx W(R - r) \frac{\theta_m^2}{2}$

2 $E_{cinética} = C_2 = \frac{m}{2} (R - r)^2 \dot{\theta}_m^2$

$E_{potencial} = P_2 = 0$

1 = 2 $C_1 + P_1 = C_2 + P_2$

$\frac{mg}{2} (R - r) \theta_m^2 = \frac{m}{2} (R - r)^2 \theta_m^2 \omega_n^2$

$g = (R - r) \omega_n^2$

Frecuencia angular natural del sistema para los ejes horizontales x e y:

$$\omega_b = \sqrt{\frac{g}{(R-r)}} \tag{4.9}$$

Periodo natural del sistema para los ejes horizontales x e y:

$$T_b = \sqrt{\frac{4 \pi^2 (R-r)}{g}} \tag{4.10}$$

Rigidez del sistema para los ejes horizontales x e y:

$$k_b = \omega_b^2 (m_b + m) = \frac{g(m_b+m)}{(R-r)} \quad (4.11)$$

Se puede calcular la transmisibilidad (TR) en las direcciones horizontales como:

$$TR = \sqrt{\frac{1+(2\xi(\omega/\omega_b))^2}{(1-(\omega/\omega_b)^2)^2+(2\xi(\omega/\omega_b))^2}} \quad (3.6)$$

Para entender la influencia de la rigidez y amortiguamiento en la transmisibilidad, se grafica la relación de TR vs (R-r) en la [Figura 4.26](#) y TR vs ξ en la [Figura 4.27](#).

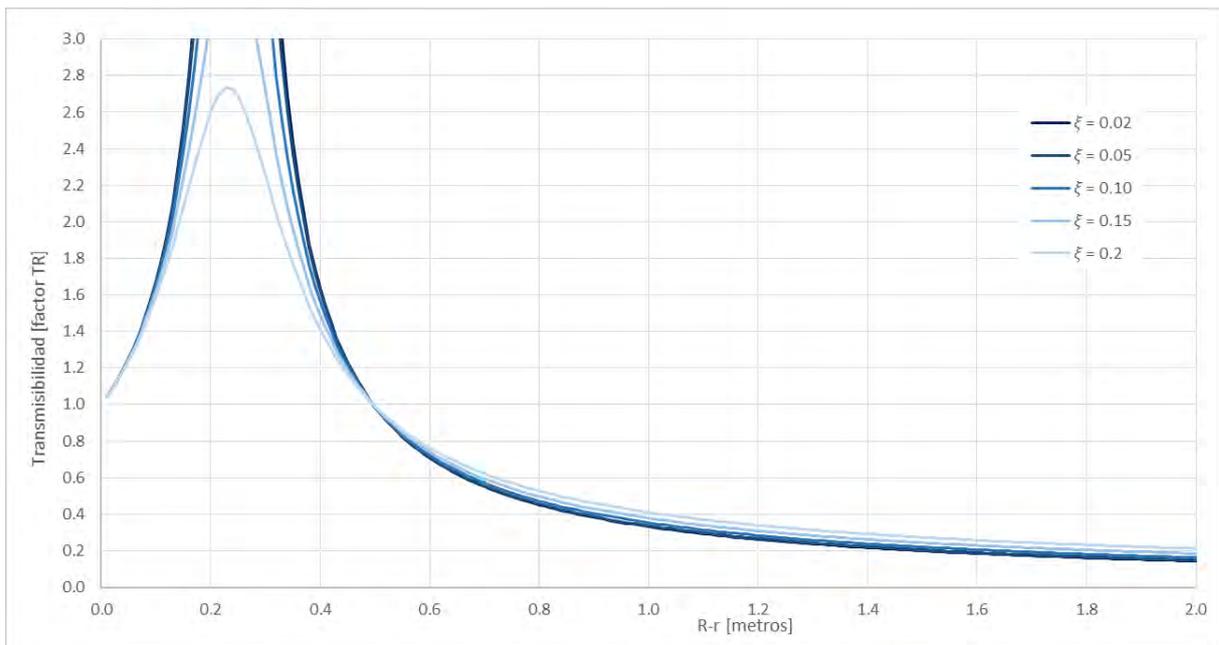


Figura 4. 26: Variación de la Transmisibilidad (TR) en función de la diferencia de radios (R-r) [m]

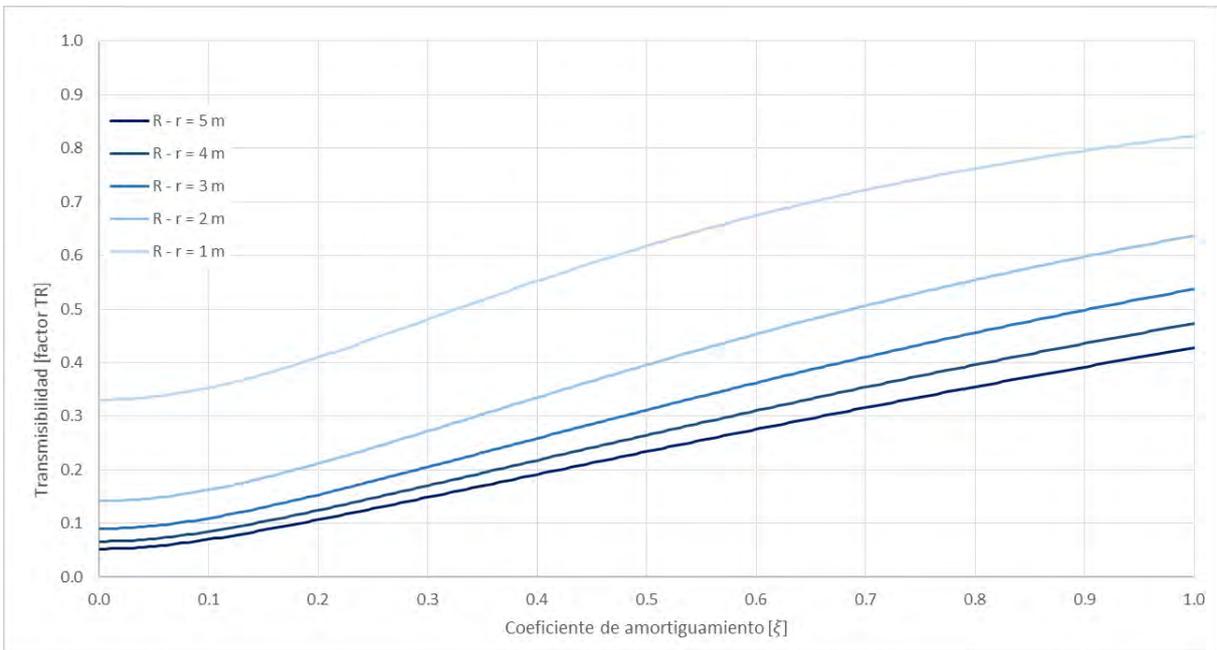


Figura 4. 27: Variación de la Transmisibilidad (TR) en función del coeficiente de amortiguamiento (ξ)

Se observa que, respecto al primer modelo, se requiere de una mayor relación R-r para bajar la transmisibilidad o alejarse de la resonancia. Asimismo, el coeficiente de amortiguamiento también incide más, por lo que se requiere un coeficiente más bajo que en primer modelo. A partir de esto, para el segundo modelo se recomienda tener una diferencia de R-r mayor a 3 metros, y un coeficiente de amortiguamiento entre 0.02 y 0.10.

Como ejemplo, se considera un sistema de 250 kg, con un apoyo (cuyo pivote está 10cm de la base), sobre una base de superficie cóncava de 3.50 m de radio. Se considera 2% de coeficiente de amortiguamiento. La señal sísmica tiene una frecuencia predominante de 1Hz (una frecuencia circular de 6.283 rad/s).

Para los ejes horizontales x e y:

$$\omega_b = \sqrt{\frac{9.81}{(3.50 - 0.10)}} = 1.70 \text{ rad/s}$$

$$T_b = \sqrt{\frac{4 \pi^2 (3.50 - 0.10)}{9.81}} = 3.70 \text{ s}$$

$$k_b = \frac{9.81 (250)}{(3.50 - 0.10)} = 721.32 \text{ N/m}$$

$$TR = \sqrt{\frac{1 + (2 \times 0.02 (6.28/1.70))^2}{(1 - (6.28/1.70)^2)^2 + (2 \times 0.02 (6.28/1.70))^2}} = 0.08$$

Se verifica que para relaciones ω/ω_b mayores a 2, y ξ pequeños, la transmisibilidad es mucho menor a la unidad. 8% en los ejes horizontales. Sin embargo, se debe recordar que este segundo modelo solo trabaja en una dirección.

4.3.3 Tercer modelo de apoyo

El tercer modelo de plataforma unitaria es de área cuadrada, de 0.50 m x 0.50 m. Es el modelo más cercano a lo que se puede construir. Es la versión tridimensional del segundo modelo. Se aísla del suelo por medio de un apoyo de acero de cara esférica de radio 3.50 m en su base.

El apoyo tiene libertad de movimiento tipo rótula y de contacto liso, para adaptarse a la base cóncava esférica de radio 3.50 m donde está contenido. La variante es una junta tipo rótula radial esférica de acero (Ver [Figura 4.28a](#)) o una rótula de rodillos esféricos (Ver [Figura 4.28b](#)).



Figura 4. 28: Juntas tipo rótula de acero.

La base tiene un área en planta de radio 0.25m de tal forma que coincide con el espacio que ocupa la plataforma cuadrada de 0.50 m x 0.50 m.

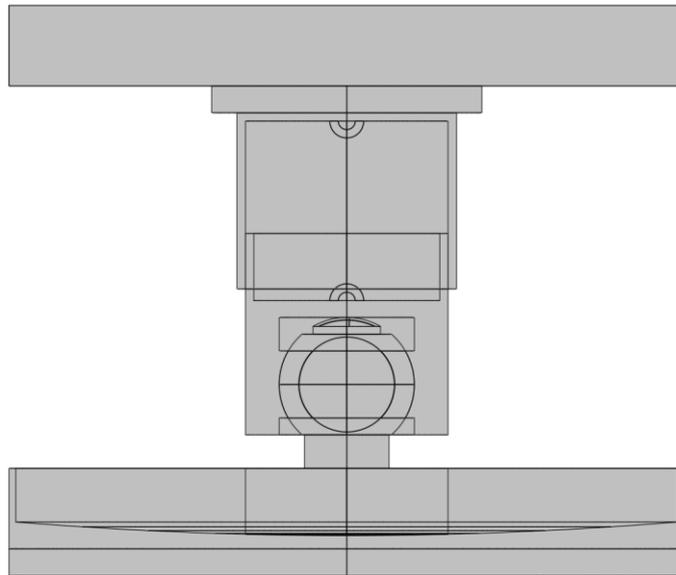


Figura 4. 29:Modelo 3, tridimensional, para Ansys Workbench

No es necesario un ejemplo numérico porque, cuando se analiza en una sola dirección, su respuesta es igual que en el caso del Modelo 2.

La pieza particular de este tercer modelo, propuesto en la tesis, se denomina *rótula*, y es la unión de dos piezas (Ver [Figura 4.30](#)). La primera es una pieza existente (la rótula radial esférica). La segunda pieza será fabricada en acero, y se ajusta dentro de la rótula radial esférica. Esta segunda pieza tiene los extremos (axiales) con superficies esféricas. Su extremo inferior tiene superficie esférica de radio igual a la base (3.50 m). Su extremo superior tiene superficie esférica, de radio ligeramente menor al radio de la rótula radial esférica, para darle un apoyo extra.

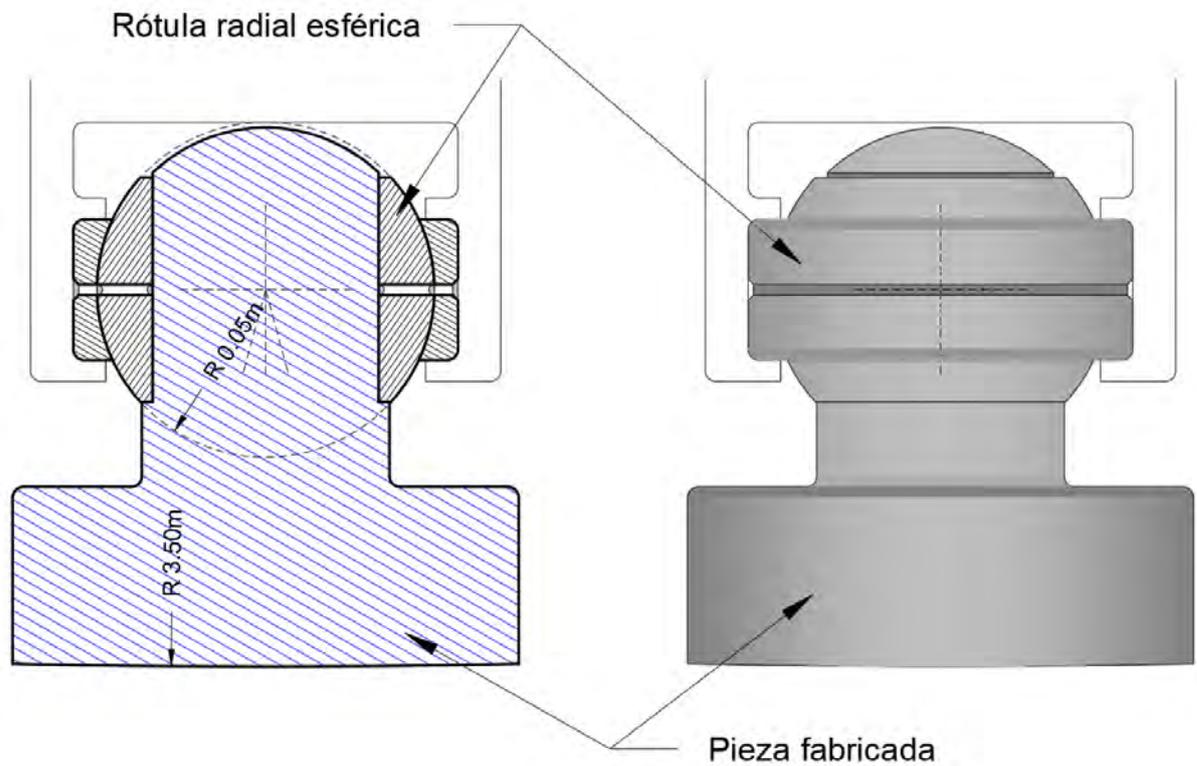


Figura 4. 30: Rótula del tercer modelo

4.4 MODELO TEÓRICO DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO

Un sistema o plataforma de aislamiento, en general, se puede modelar como un bloque (de masa $m_b + m$) visco elástico (de rigidez k_b y amortiguamiento c_b) de un grado de libertad (OVE1GDL) sometido a una señal de aceleración sísmica (\ddot{u}_g). La ecuación de equilibrio dinámico sería:

$$(m_b + m) \ddot{u} + (c_b) \dot{u} + (k_b) u = - (m_b + m) \ddot{u}_g \quad (2.3)$$

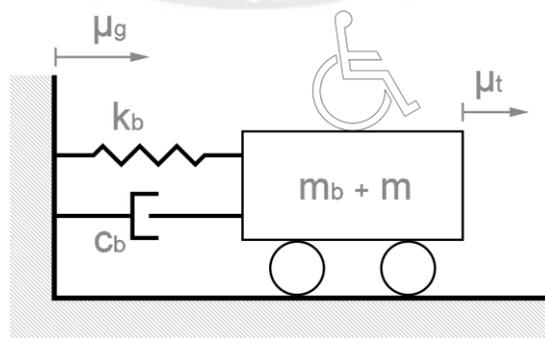


Figura 4. 31: Modelo OVE1GDL ante sismo

Sin embargo, un OVE1GDL no tiene el detalle suficiente para poder evaluar los parámetros dinámicos necesarios para la plataforma de protección. Se debe considerar las características de cada pieza que aporta en el aislamiento (Ver [Figura 4.32](#)).

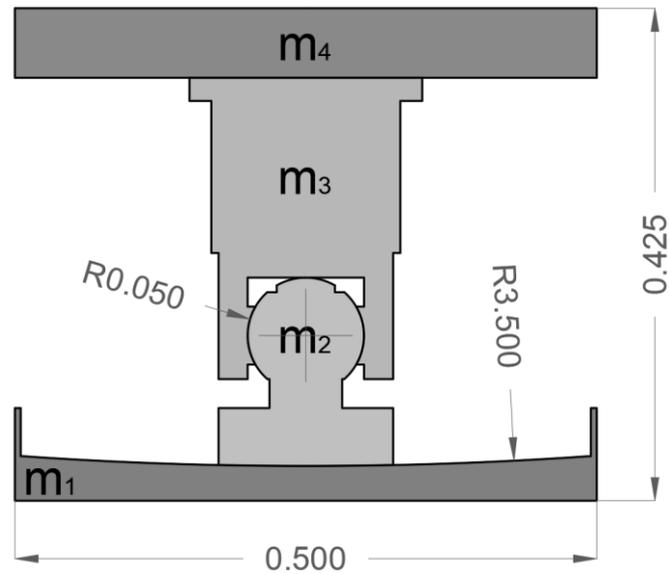


Figura 4. 32: Modelo para equilibrio dinámico horizontal ante sismo

Las ecuaciones de equilibrio dinámico para la plataforma de aislamiento son:

$$m_4 \ddot{u}_4 + C_4(\dot{u}_4 - \dot{u}_3) + K_4(u_4 - u_3) = -m_4 \ddot{u}_g \quad (4.12)$$

$$m_3 \ddot{u}_3 + fh_2 + \frac{(m_3+m_4+s/c)g}{R_{eff2}} (u_3 - u_2) = C_4(\dot{u}_4 - \dot{u}_3) + K_4(u_4 - u_3) - m_3 \ddot{u}_g \quad (4.13)$$

$$m_2 \ddot{u}_2 + fh_1 + \frac{(m_2+m_3+m_4+s/c)g}{R_{eff1}} (u_2 - u_1) + fr_1 = fh_2 + \frac{(m_3+m_4+s/c)g}{R_{eff2}} (u_3 - u_2) - m_2 \ddot{u}_g \quad (4.14)$$

$$m_1 \ddot{u}_1 + C_1(\dot{u}_1) + K_1(u_1) = fh_1 + \frac{(m_2+m_3+m_4+s/c)g}{R_{eff1}} (u_2 - u_1) + fr_1 - m_1 \ddot{u}_g \quad (4.15)$$

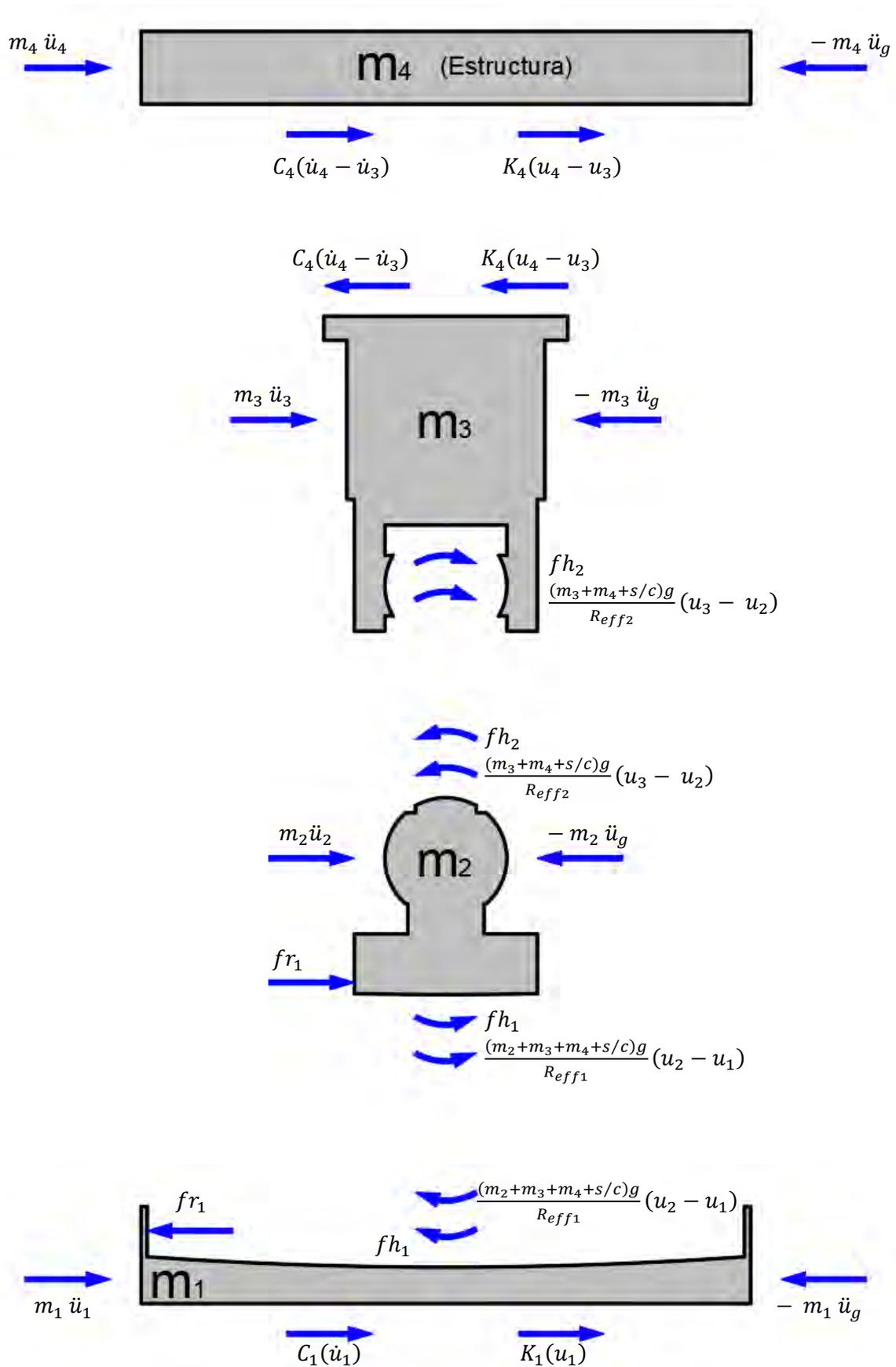


Figura 4. 33: Diagrama de equilibrio dinámico horizontal ante sismo

Para resolver estas ecuaciones, donde \ddot{u}_g corresponde a un acelerograma, se emplean métodos numéricos paso a paso. En esta tesis se emplean la herramienta ODE15s de Matlab, no métodos conocidos como Nigam Jennings, o Newmark. ODE15s resuelve el sistema de ecuaciones mediante un proceso de convergencia, especificando las tolerancias adecuadas. Las tolerancias empleadas en esta tesis toman de referencia a los trabajos de evaluación y optimización de aisladores de Weber et al (2016 y 2017).

Una particularidad de ODE15s es el formato de ingreso de las ecuaciones: deben presentarse con diferenciales de primer grado. Como la ecuación de equilibrio dinámico es de segundo grado, se emplea un artificio donde se define la velocidad como derivada de la variable desplazamiento, y luego aceleración como la derivada de la variable velocidad.

Despejando las aceleraciones de cada bloque, de las ecuaciones (4.12) a (4.15):

$$\ddot{u}_4 = (-C_4(\dot{u}_4 - \dot{u}_3) - K_4(u_4 - u_3) - m_4 \ddot{u}_g)/m_4$$

$$\ddot{u}_3 = \left(-fh_2 - \frac{(m_3+m_4+s/c)g}{R_{eff2}}(u_3 - u_2) + C_4(\dot{u}_4 - \dot{u}_3) + K_4(u_4 - u_3) - m_3 \ddot{u}_g\right)/m_3$$

$$\ddot{u}_2 = \left(-fh_1 - \frac{(m_2+m_3+m_4+s/c)g}{R_{eff1}}(u_2 - u_1) - fr_1 + fh_2 + \frac{(m_3+m_4+s/c)g}{R_{eff2}}(u_3 - u_2) - m_2 \ddot{u}_g\right)/m_2$$

$$\ddot{u}_1 = \left(-C_1(\dot{u}_1) - K_1(u_1) + fh_1 + \frac{(m_2+m_3+m_4+s/c)g}{R_{eff1}}(u_2 - u_1) + fr_1 - m_1 \ddot{u}_g\right)/m_1$$

Donde fr_1 describe la fuerza de reacción del tope de la pieza 1 (Fenz & Constantinou, 2007), que es asumida como una fuerza de rigidez lineal cuando se juntan las piezas 1 y 2, y cero cuando no se juntan las piezas 1 y 2:

$$fr_1 = kr_1 (|u_2 - u_1| - d_1) \operatorname{sgn}(u_2 - u_1), \text{ si } |u_2 - u_1| \geq d_1$$

$$fr_1 = 0, \text{ si } |u_2 - u_1| < d_1$$

Donde kr_1 representa el coeficiente de rigidez del tope de la pieza 1, y puede ser asumida en dos órdenes de magnitud mayor que el cociente del peso sobre el radio efectivo de la pieza 1 (Weber et al, 2016):

$$kr_1 = 100 \frac{(m_2 + m_3 + m_4 + s/c)g}{R_{eff1}}$$

Donde fh_1 y fh_2 describen la fuerza de fricción de la superficie de deslizamiento de las piezas 1 y 2, mediante un modelo de fuerza de fricción histerética (Al-Bender, Lampaert & Swevers, 2005, y Weber et al, 2017), aproximada con la función tangente hiperbólica a fin de reducir el tiempo de procesamiento computacional:

$$fh = (\text{Carga Normal}) \tanh(k_{\tanh} \times \text{velocidad})$$

El parámetro k_{\tanh} se asume como 10000 para amplificar la velocidad de la fricción de tal manera que el deslizamiento se produzca a velocidades muy pequeñas. Con esto se

suaviza ligeramente el salto de la fuerza de fricción a velocidades muy cercanas a cero, y la simulación se ejecuta rápidamente.

$$fh_1 = \mu_1(m_2 + m_3 + m_4 + s/c)g \tanh(10000(\dot{u}_2 - \dot{u}_1))$$

$$fh_2 = \mu_2(m_3 + m_4 + s/c)g \tanh(10000(\dot{u}_3 - \dot{u}_2))$$

En el Anexo 2 se muestran las ecuaciones a ingresar en Matlab, que se resuelven con la herramienta ODE15s.

4.5 OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DINÁMICOS DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO

Se evalúa la influencia de 5 variables del sistema de aislamiento sobre la aceleración y desplazamiento de respuesta, para dos acelerogramas:

- Iteración en la rigidez k
- Iteración en la masa m de la estructura
- Iteración en el coeficiente de rugosidad μ de los apoyos cóncavos
- Iteración en el radio efectivo $Reff$ de la base cóncava
- Iteración 3D entre el radio efectivo y la rugosidad

Tabla 4. 4: Valores utilizados en la optimización de los parámetros dinámicos

Variable		K_1 y K_4	m_4	u_2	u_1	$Reff_1$
K_1 y K_4	kg/m	1Ei, i = 3:10@1	85000	85000	85000	85000
m_4	kg	250	[100:500@50, 750, 1000, 1500]	250	250	250
u_2	-	5%	5%	[1, 2, 2.5, 5, 7.5, 10, 15, 25] %	5%	5%
u_1	-	2.50%	2.50%	2.50%	[1:5@0.5, 7.5, 10]%	2.50%
$Reff_1$	m	3.50	3.50	3.50	3.50	1.50:4.00@0.25
m_1	kg	17				
m_2	kg	22				
m_3	kg	14				
sC	kg	50				
$Reff_2$	m	0.05				
d	m	0.50				
K_2 y K_3	kg/m	0				
c_1 y c_4	kg.s/m	150				
c_2 y c_3	kg.s/m	0				

El primer acelerograma utilizado es el de MOQ001_20010623153300.txt, medido en la estación “César Vizcarra Vargas”, en Moquegua. Corresponde al sismo de Arequipa, ocurrido el 23 de junio del 2001, a las 15:33. Presenta el registro de aceleraciones EW (en adelante x), NS (en adelante y), y UD (en adelante z), es decir en las tres direcciones de movimiento. Se registró cada 0.01 segundos.

El segundo acelerograma utilizado es el de CAL001_20070815184058.txt, medido en la estación “Dirección de Hidrografía y Navegación”, en La Punta, Callao. Corresponde al sismo de Pisco, ocurrido el 15 de agosto del 2007, a las 18:41. Presenta el registro de aceleraciones EW (en adelante x), NS (en adelante y), y UD (en adelante z), es decir en las tres direcciones de movimiento. Se registró cada 0.005 segundos.

Luego de realizar la corrección de base y filtro pasa banda de los acelerogramas, con el programa SeismoMatch, y escalar las señales a PGA: 2.5m/s^2 , 5.0m/s^2 , y 7.5m/s^2 , se procede a realizar el código de Matlab.

Se resuelve a partir de tres archivos, con el fin de obtener resultados parciales que optimicen el procesamiento. En el Anexo 3 se detallan los códigos Matlab. **Base_ode.m** es el que código que se debe ejecutar primero. Este código llama a la función **plataformaAislamiento.m** que contiene las fórmulas del equilibrio dinámico. Finalmente, para la generación de figuras se ejecuta el código: **readResult.m**

En la [Figura 4.34](#) se observa que la aceleración máxima de respuesta varía en función de la rigidez del sistema. Su respuesta más baja ocurre para rigideces menores a 10^8 kg/m. Por otra parte, se observa que el desplazamiento máximo de respuesta también varía. Su respuesta más baja ocurre para rigideces mayores a 10^5 kg/m. Por lo tanto, se recomienda un sistema de aislamiento con rigideces en el orden de magnitud entre 10^5 y 10^8 kg/m.

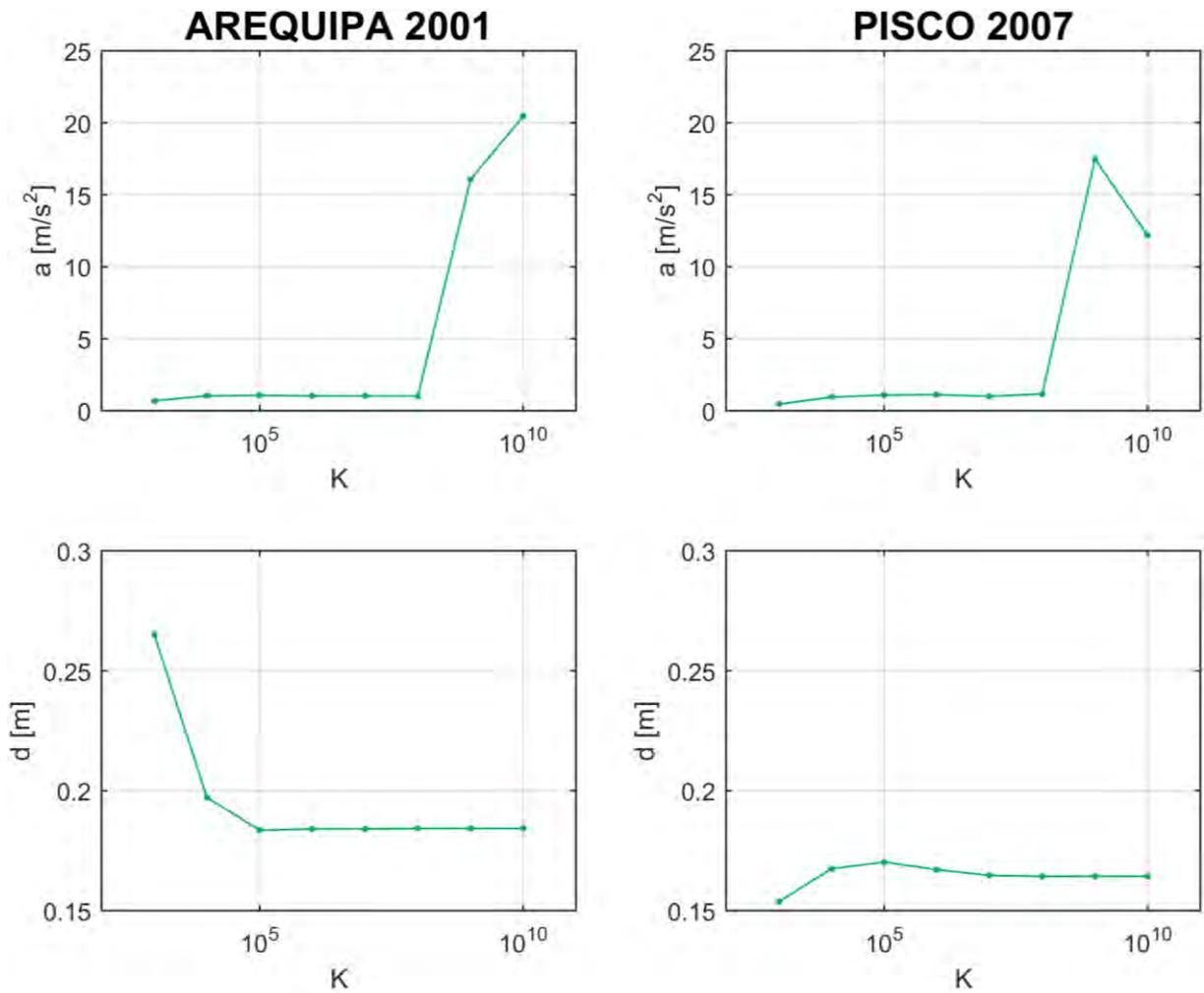


Figura 4. 34: Influencia de la rigidez K [kg/m] en la respuesta

En la [Figura 4.35](#) se observa que la aceleración máxima de respuesta varía en función de la masa de la estructura. Su respuesta más baja ocurre a partir de una masa de 400 kg. Por otra parte, se observa que el desplazamiento máximo de respuesta también varía, pero dentro de un rango muy pequeño de dos centímetros, y siendo óptima para una masa entre 200 kg y 300 kg. Por lo tanto, se recomienda un sistema de aislamiento para una estructura unitaria de 0.25 m² cuya masa sea entre 300 kg y 400 kg.

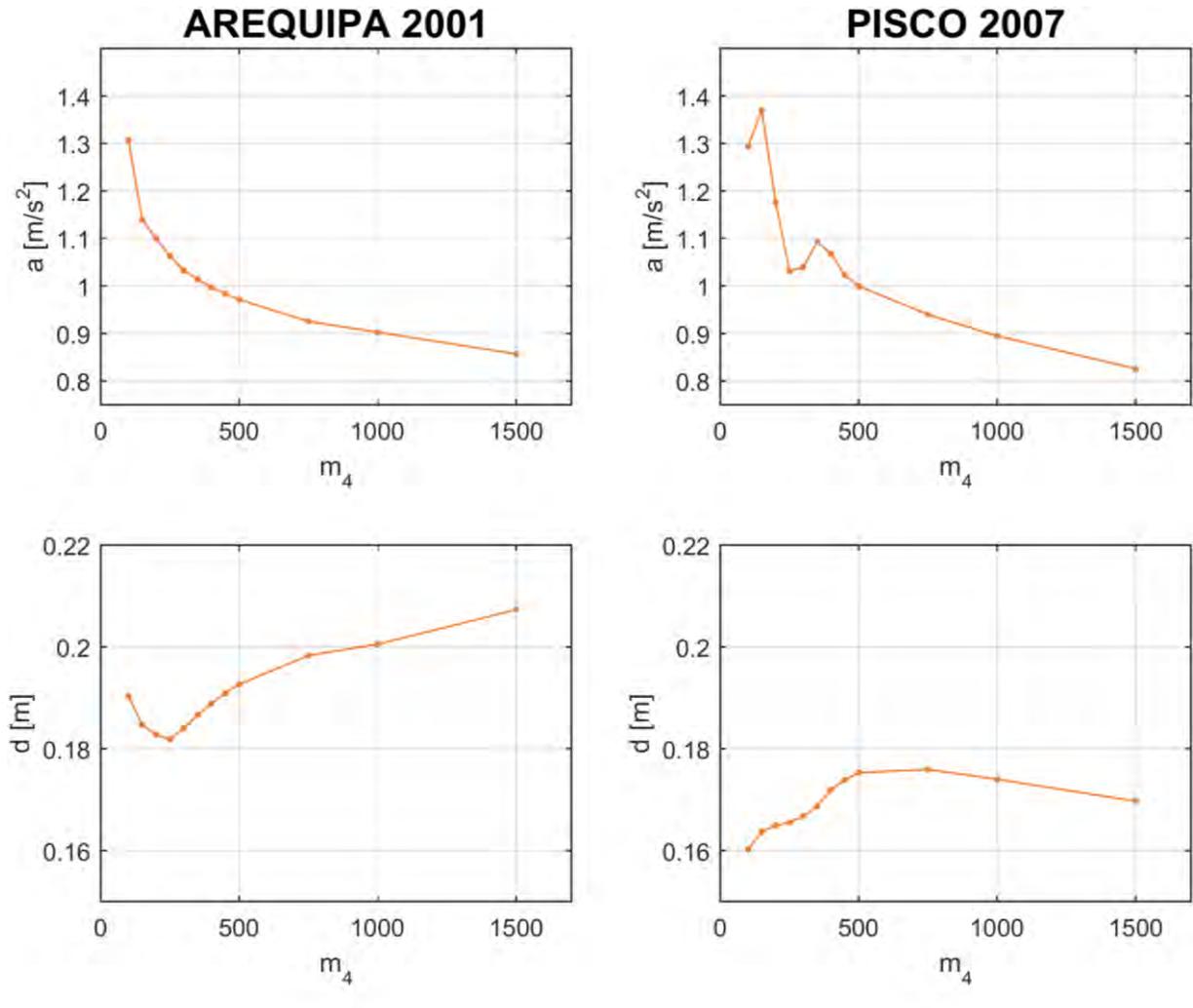


Figura 4. 35: Influencia de la masa [kg] en la respuesta

En la [Figura 4.36](#) se observa que la aceleración máxima de respuesta varía en función al coeficiente de rugosidad μ_2 sobre la base cóncava. Sus respuestas más bajas ocurren para un coeficiente menor a 7.5% de rugosidad. Por otra parte, se observa que el desplazamiento máximo de respuesta también varía. Su respuesta más baja ocurre a partir del 5%. Por lo tanto, se recomienda un sistema de aislamiento con un coeficiente de rugosidad μ_2 del orden de 5%.

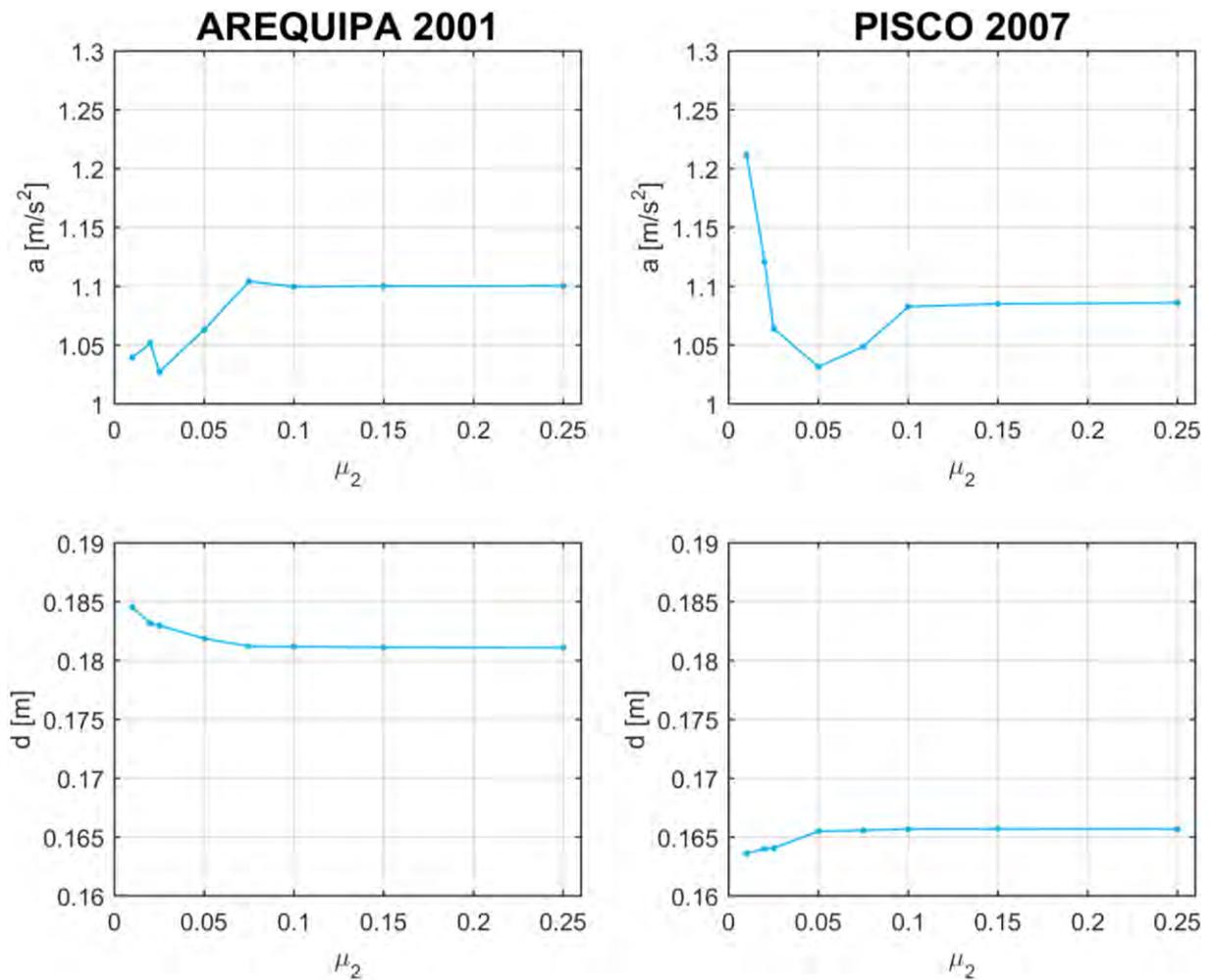


Figura 4. 36: Influencia del coeficiente de rugosidad μ_2 en la respuesta

En la [Figura 4.37](#) se observa que la aceleración máxima de respuesta varía en función al coeficiente de rugosidad μ_1 sobre la base cóncava. Su respuesta más baja está entre el 1% y el 3% de rugosidad. Por otra parte, se observa que el desplazamiento máximo de respuesta también varía. Su respuesta más baja ocurre para 2.5%. Por lo tanto, se recomienda un sistema de aislamiento con un coeficiente de rugosidad μ_1 del orden de 2.5%.

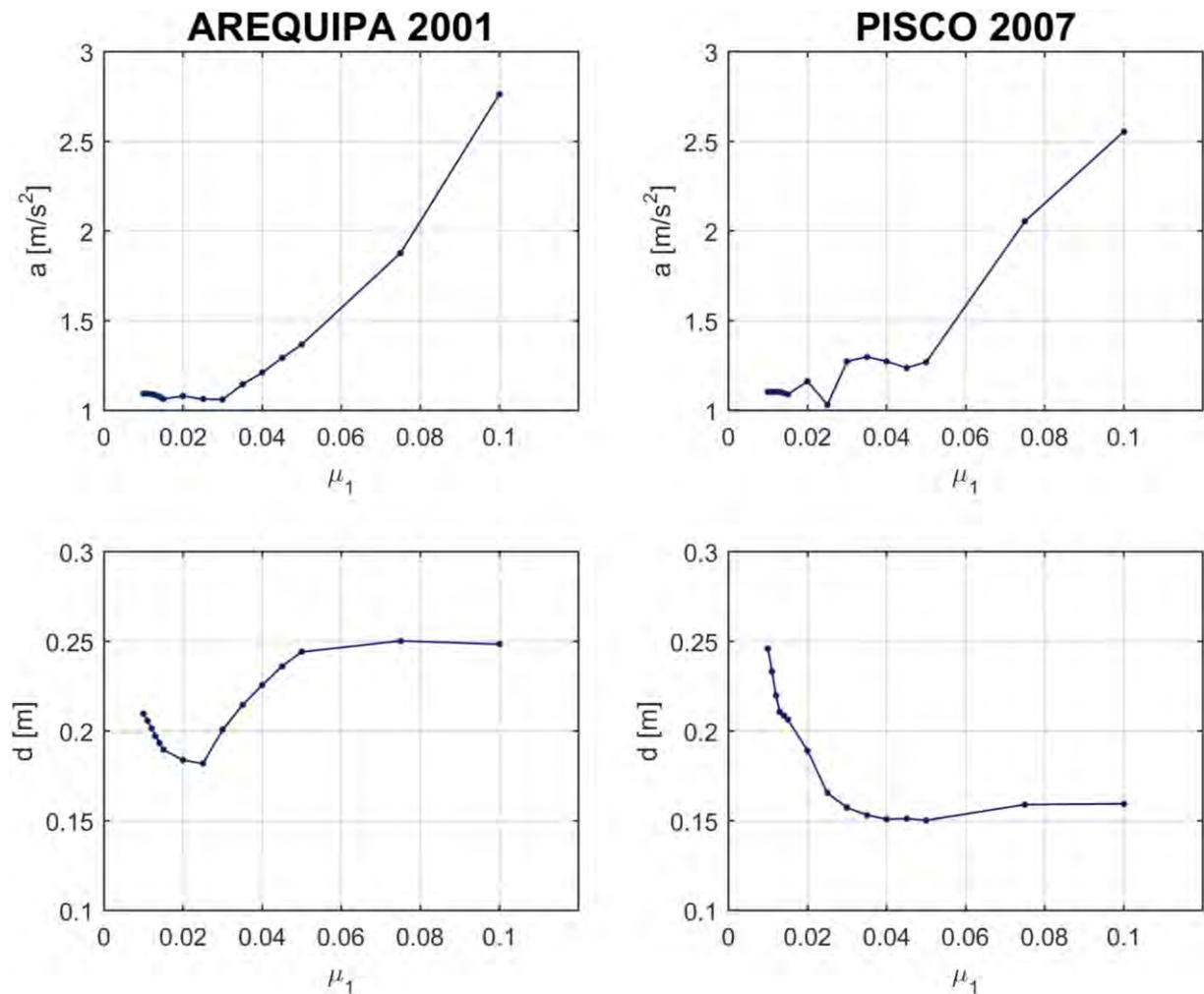


Figura 4. 37: Influencia del coeficiente de rugosidad μ_1 en la respuesta

En la [Figura 4.38](#) se observa que la aceleración máxima de respuesta varía en función al radio de influencia en la base cóncava. Su respuesta decrece a partir de un radio de 3.5m, tal como ya se recomendaba en Weber (2016). Por otra parte, se observa que el desplazamiento máximo de respuesta también varía. Su respuesta más baja ocurre a partir de un radio de 3.0 m. Por lo tanto, se recomienda un sistema de aislamiento con un radio efectivo cercano a 3.5 metros.

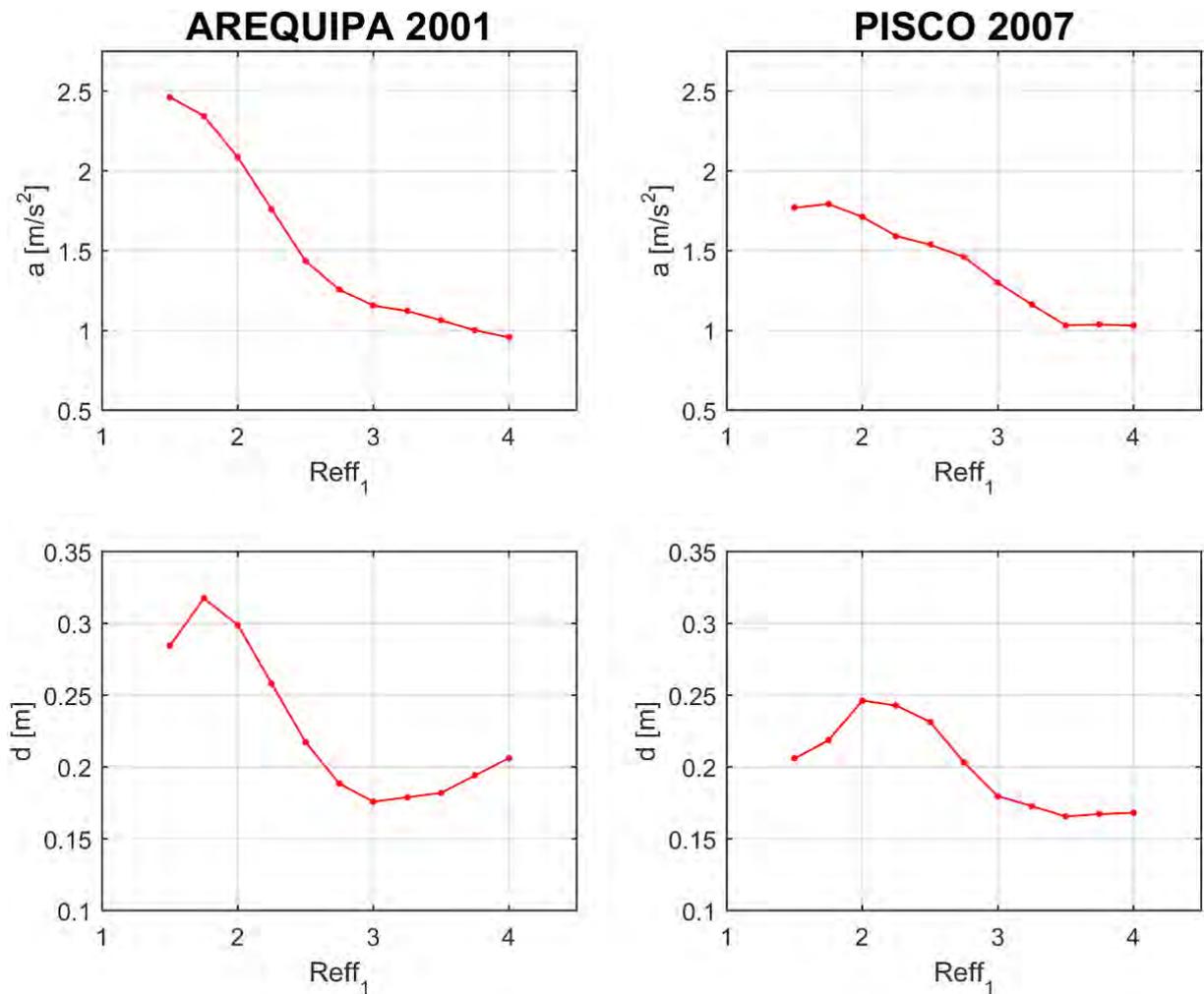


Figura 4. 38: Influencia del radio efectivo [m] en la respuesta

Dado que los parámetros más sensibles en la variación de la respuesta del sistema de aislamiento son el radio efectivo de la base (pieza 1), y la rugosidad μ_1 , se realiza una optimización de las respuestas de aceleración y desplazamiento máximos, para las dos señales sísmicas elegidas.

En el caso de la señal de Arequipa 2001, en la [Figura 4.39](#) se observa que la relación óptima, que genera una menor respuesta de aceleraciones, ocurre para un radio efectivo de 3.75 m y una rugosidad menor al 1%.

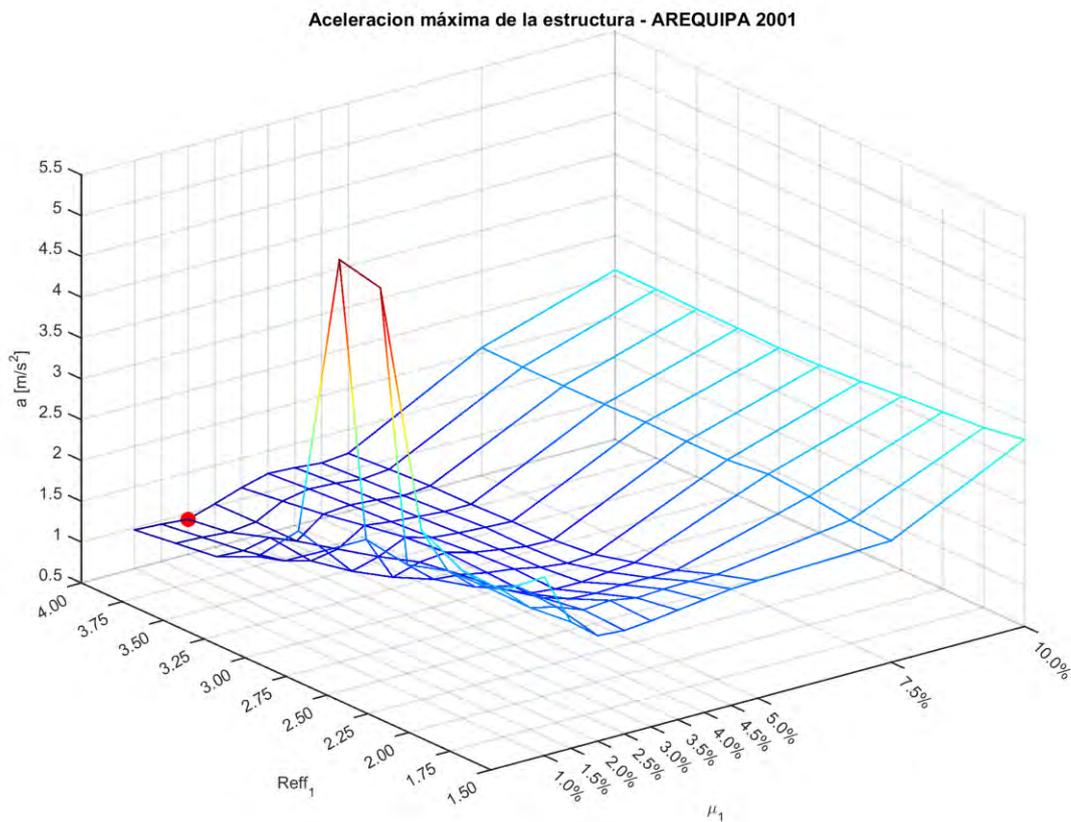


Figura 4. 39: Influencia del radio efectivo [m] y coeficiente de rugosidad μ_1 [%] en la respuesta de aceleraciones

En el caso de la señal de Arequipa 2001, en la [Figura 4.40](#) se observa que la relación óptima, que genera una menor respuesta de desplazamientos, ocurre para un radio efectivo de 4m y un coeficiente de rugosidad de 5%.

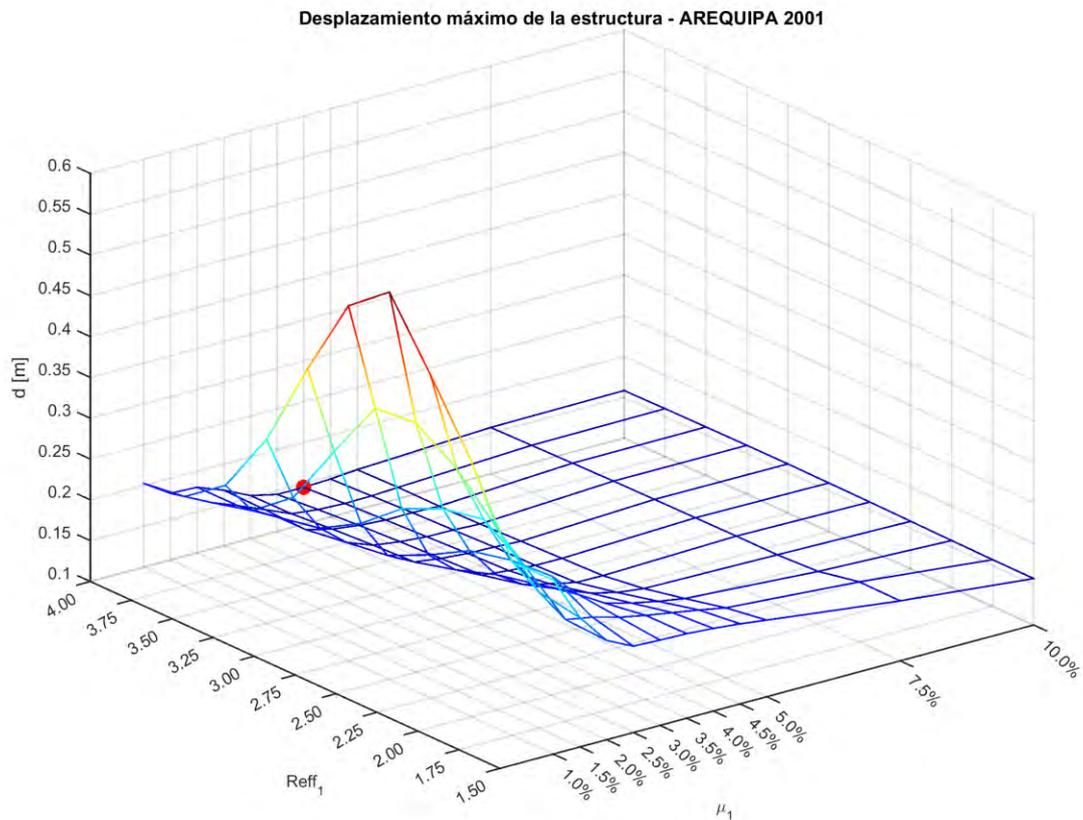


Figura 4. 40: Influencia del radio efectivo [m] y coeficiente de rugosidad μ_1 [%] en la respuesta de desplazamientos

En el caso de la señal de Psico 2007, en la [Figura 4.41](#) se observa que la relación óptima, que genera una menor respuesta de aceleraciones, ocurre para un radio efectivo de 3.75 m y una rugosidad menor al 1%.

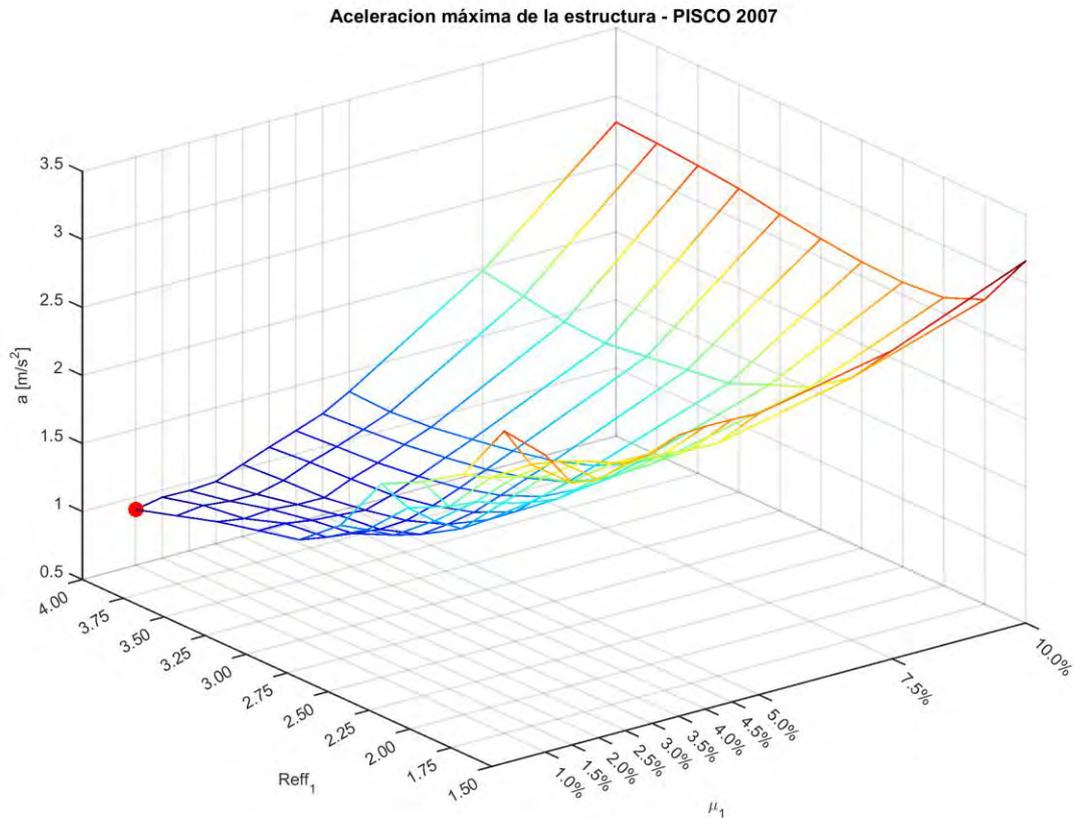


Figura 4. 41: Influencia del radio efectivo [m] y coeficiente de rugosidad μ_1 [%] en la respuesta de aceleraciones

En el caso de la señal de Pisco 2007, en la [Figura 4.42](#) se observa que la relación óptima, que genera una menor respuesta de desplazamientos, ocurre para un radio efectivo de 3m y un coeficiente de rugosidad de 2.5%.

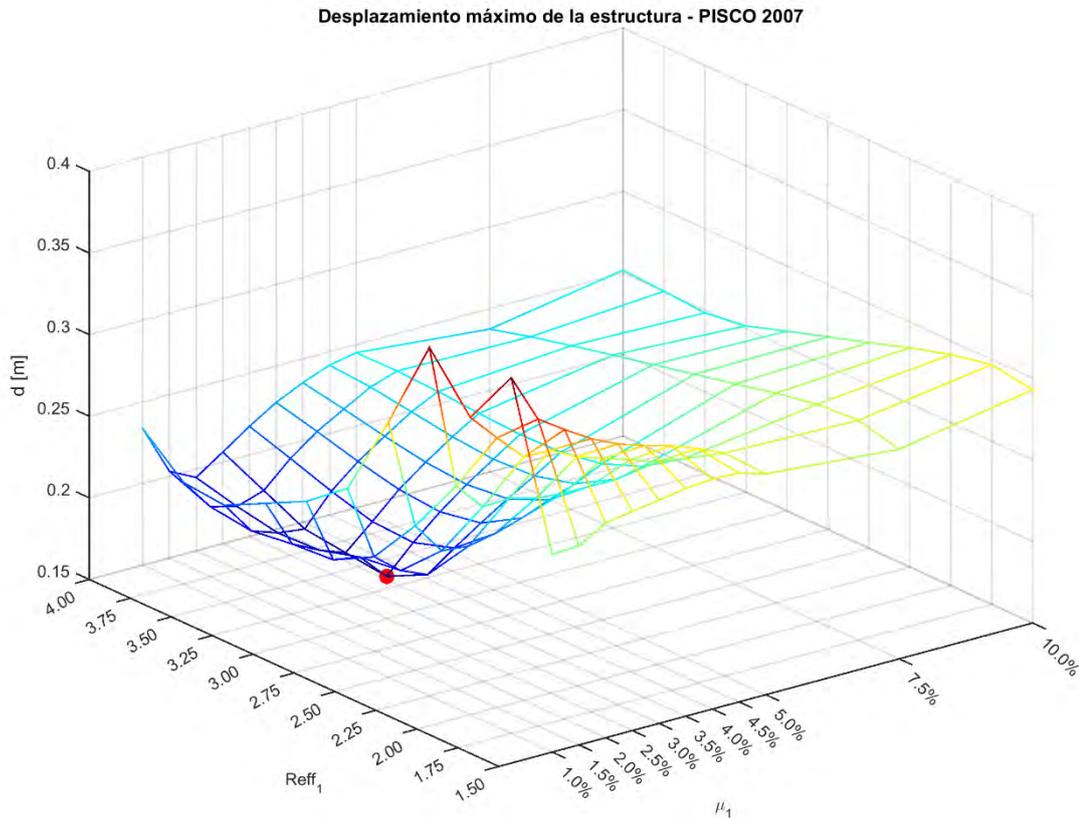


Figura 4. 42: Influencia del radio efectivo [m] y coeficiente de rugosidad μ_1 [%] en la respuesta de desplazamientos

En función a los parámetros optimizados, se elige los valores más adecuados para el diseño de un sistema de aislamiento que funcione adecuadamente ante las señales sísmicas elegidas:

$$\mu_1 = 0.025 = 2.5\%$$

$$\mu_2 = 0.050 = 5.0\%$$

$$k = 85\,000 \text{ kg/m}$$

$$m_4 = 250 \text{ kg}$$

$$R_{eff1} = 3.50 \text{ m}$$

4.6 SIMULACIÓN EN MATLAB DE LA RESPUESTA DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO A UN SISMO

Luego de definir los parámetros óptimos, se vuelve a ejecutar el programa de Matlab, para generar los gráficos de respuesta en el tiempo, de aceleración y desplazamiento. Se grafica para sismo leve, moderado, y severo, tanto para el sismo de Arequipa 2001 como para Pisco 2007.

Luego de ejecutar los códigos para sismo leve, moderado, y severo, para Arequipa 2001, los resultados de reducción de aceleración, y el comportamiento de los desplazamientos se muestran en la [Figura 4.43](#) para el sismo leve Arequipa, [Figura 4.44](#) para el sismo moderado Arequipa, y [Figura 4.45](#) para el sismo severo Arequipa. En los tres casos, el PGA en la plataforma se reduce en comparación al PGA en el suelo, siendo en más de siete veces en el caso del sismo severo (Ver [Tabla 4.5](#)).

Luego de ejecutar los códigos para sismo leve, moderado, y severo, para Pisco 2007, los resultados de reducción de aceleración, y el comportamiento de los desplazamientos se muestran en la [Figura 4.46](#) para el sismo leve Pisco, [Figura 4.47](#) para el sismo moderado Pisco, y [Figura 4.48](#) para el sismo severo Pisco. En los tres casos, el PGA en la plataforma se reduce en comparación al PGA en el suelo, siendo en más de siete veces en el caso del sismo severo (Ver [Tabla 4.5](#)).

Tabla 4. 5: Respuestas máximas de aceleración de la plataforma optimizada

Sismo	PGA (m/s ²)	$\ddot{u}_s + \ddot{u}_g$ (m/s ²)
Arequipa 2001	2.50	0.71
	5.00	0.87
	7.50	1.05
Pisco 2007	2.50	0.61
	5.00	0.76
	7.50	1.01

Sobre los desplazamientos, se puede observar que habrá amplitud de movimiento, pero con un periodo mucho mayor, incluso en el caso del sismo severo.

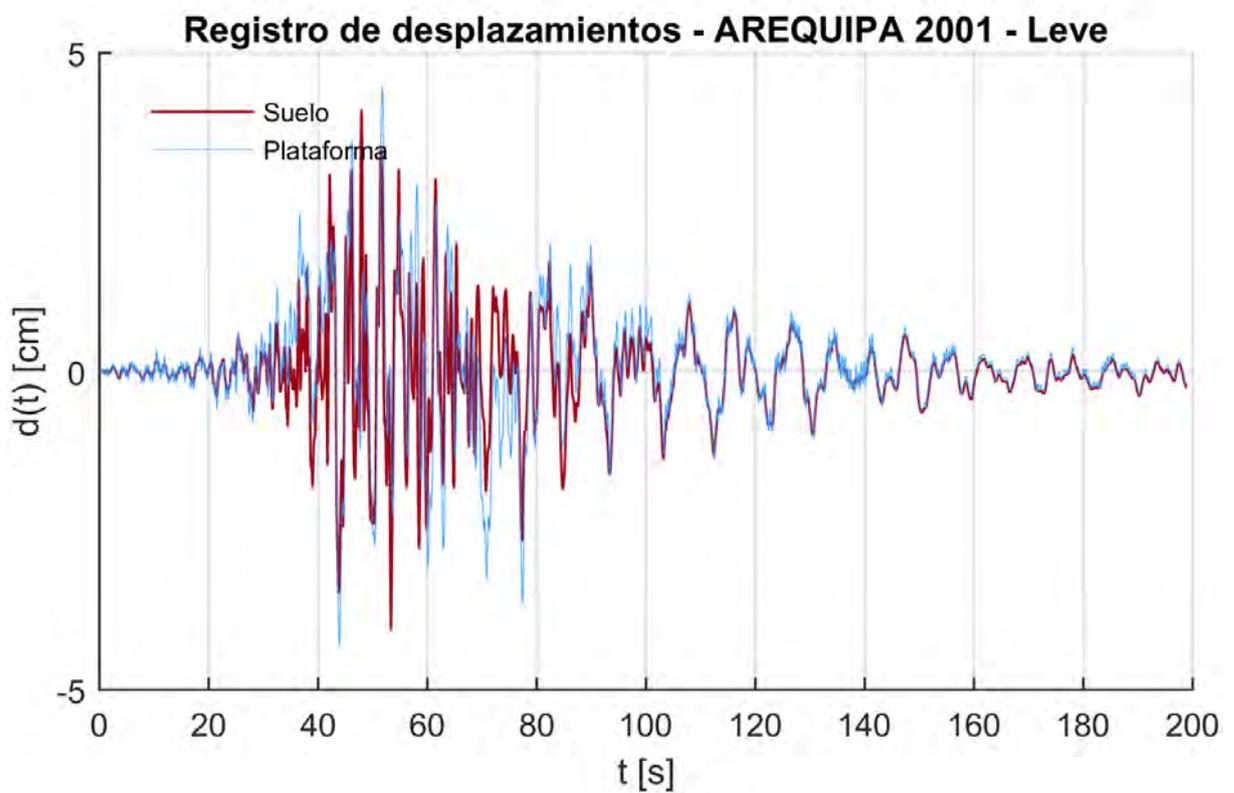
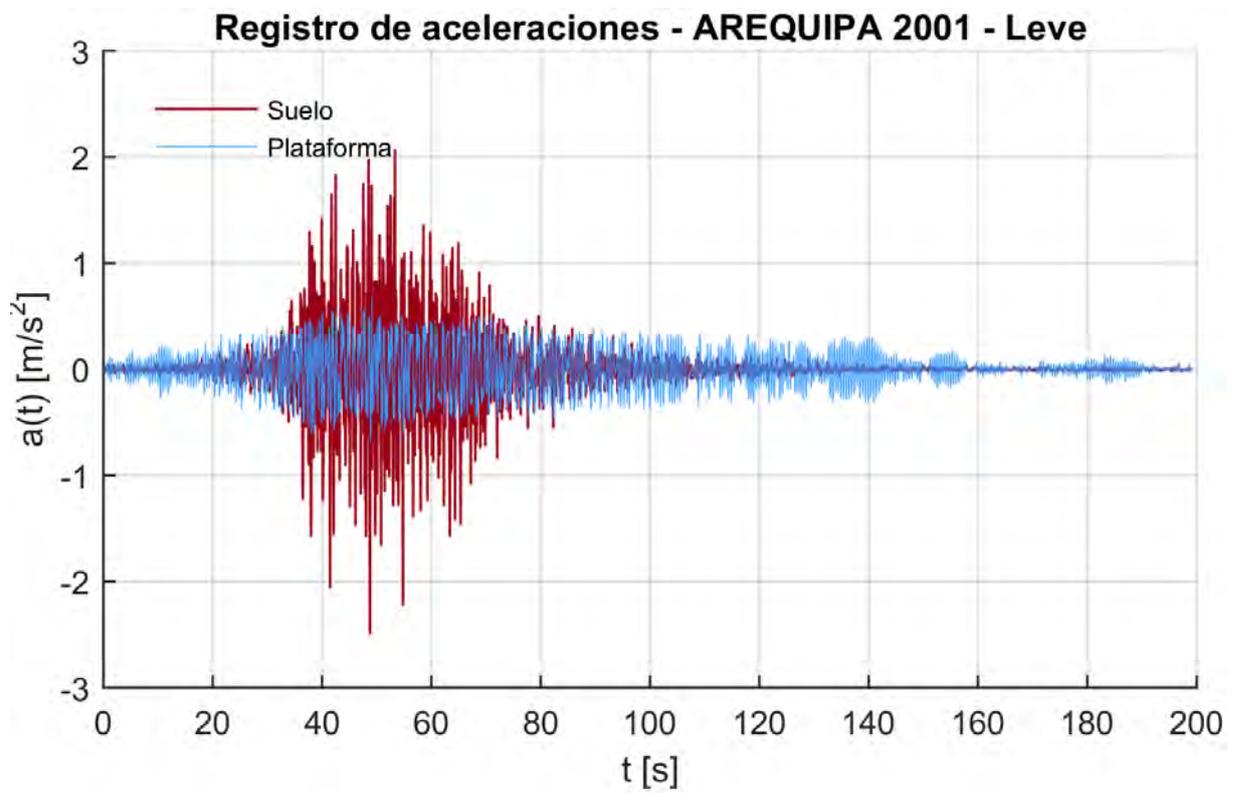


Figura 4. 43: Gráfico de respuesta a sismo leve Arequipa 2001

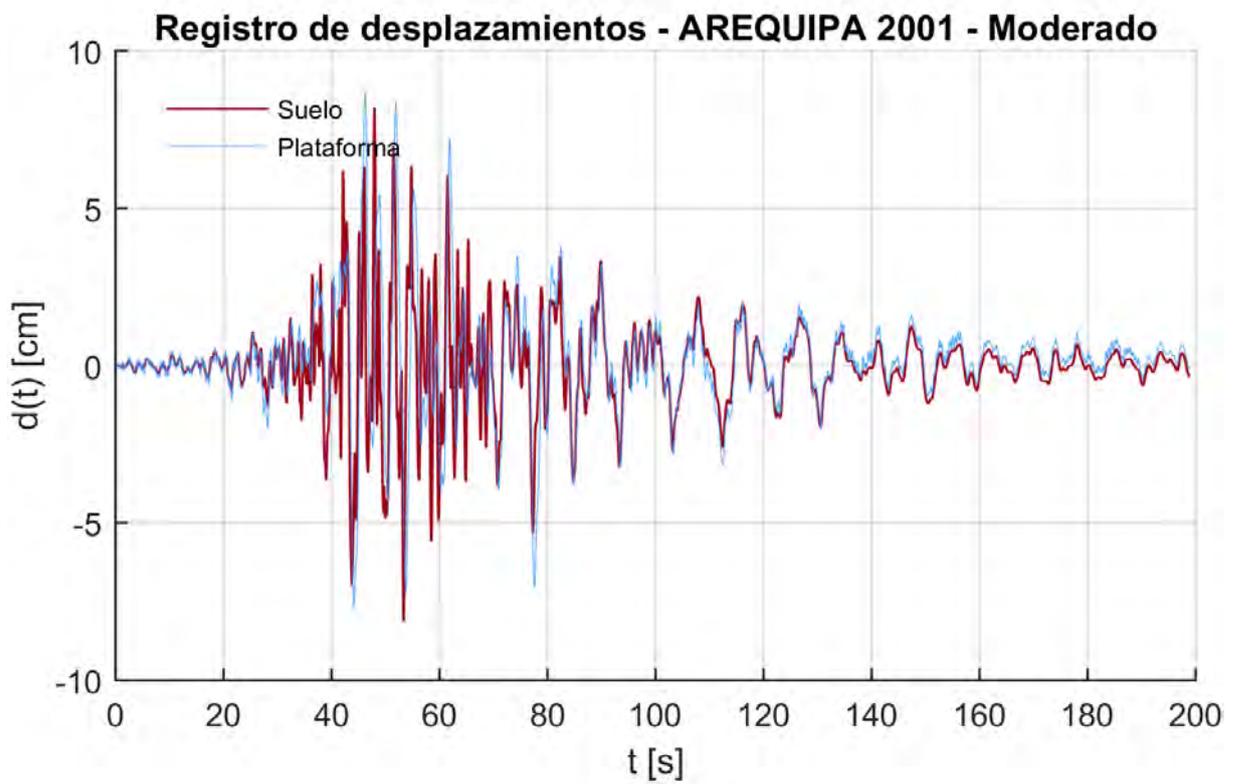
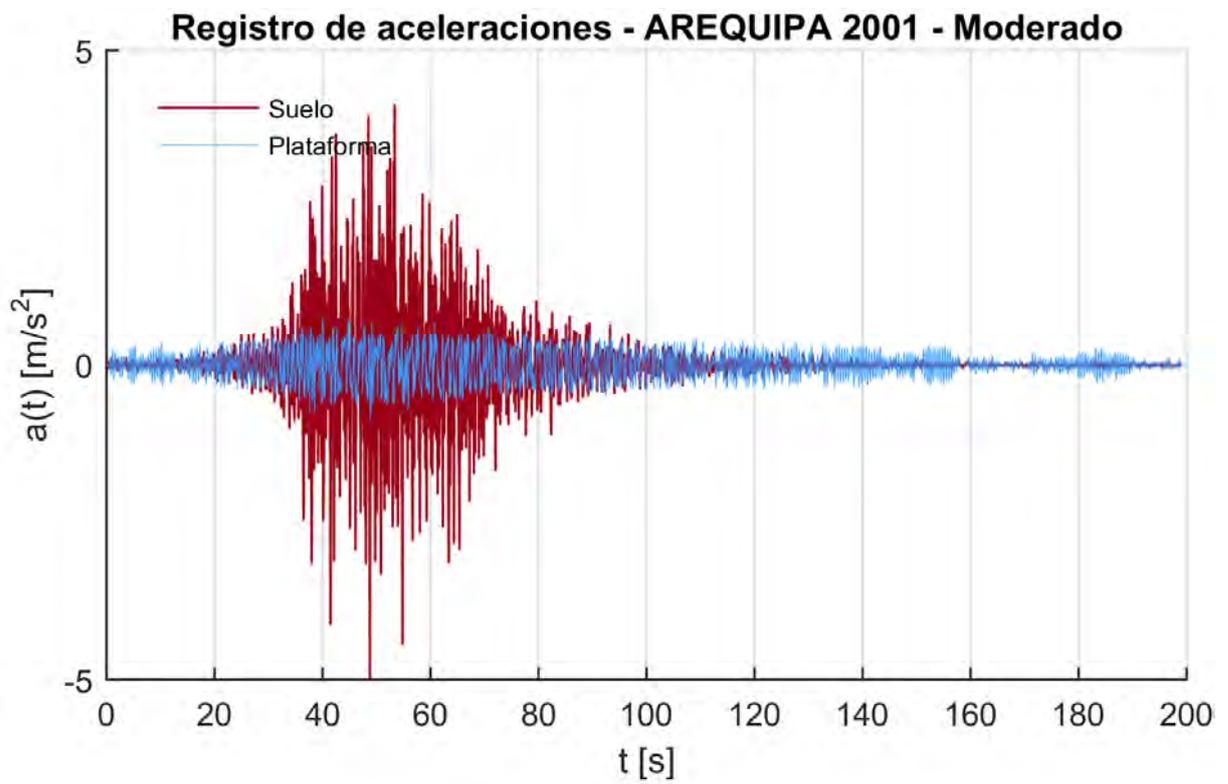


Figura 4. 44: Gráfico de respuesta a sismo moderado Arequipa 2001

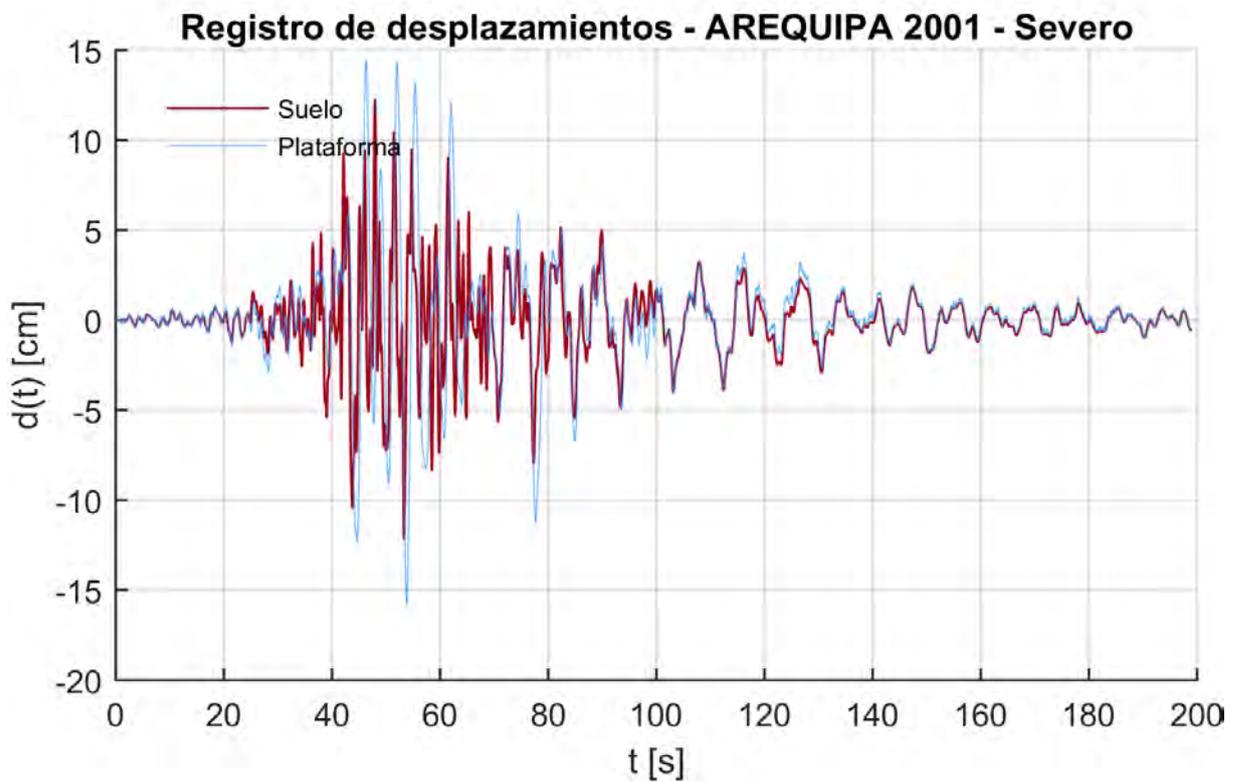
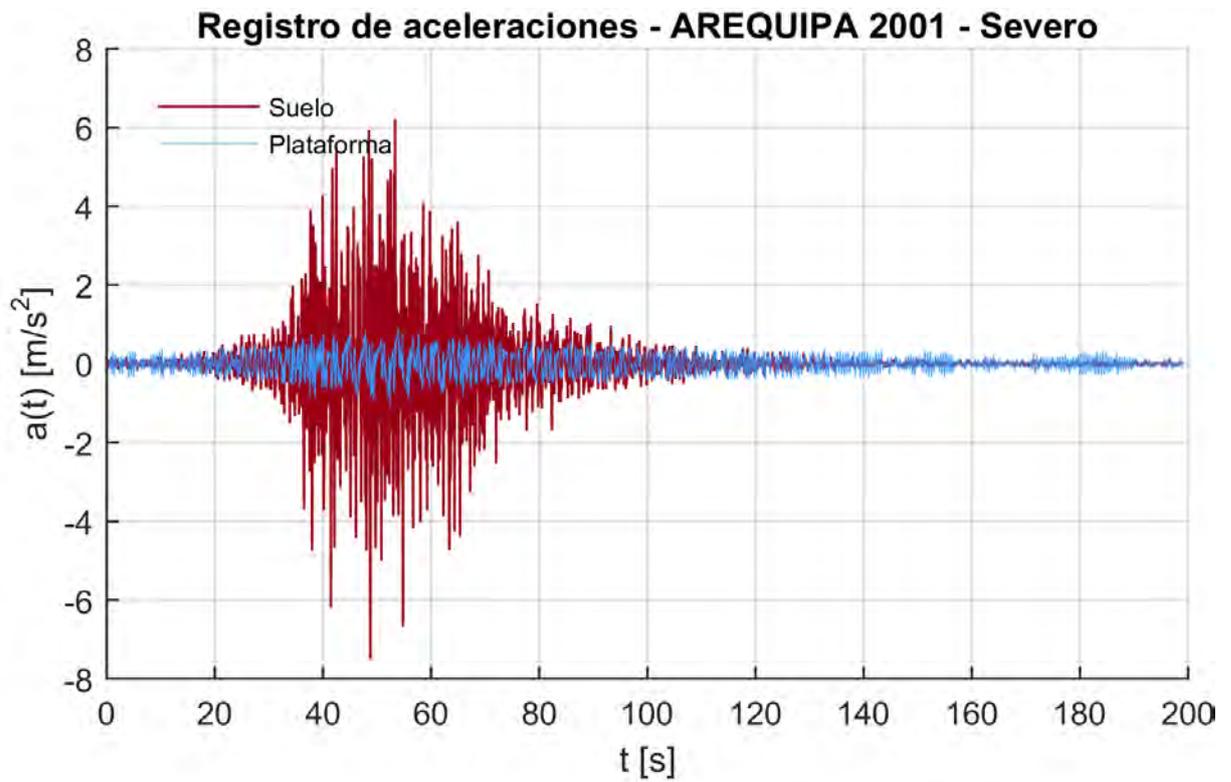


Figura 4. 45: Gráfico de respuesta a sismo severo Arequipa 2001

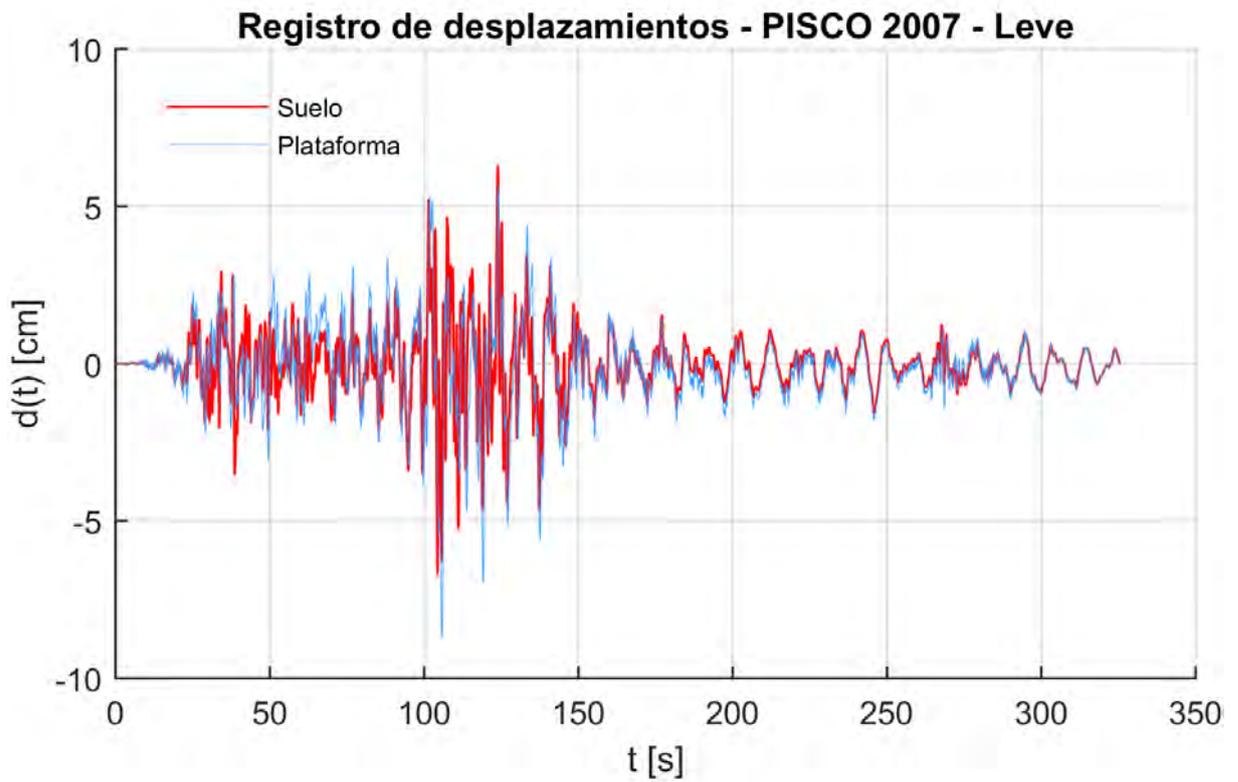
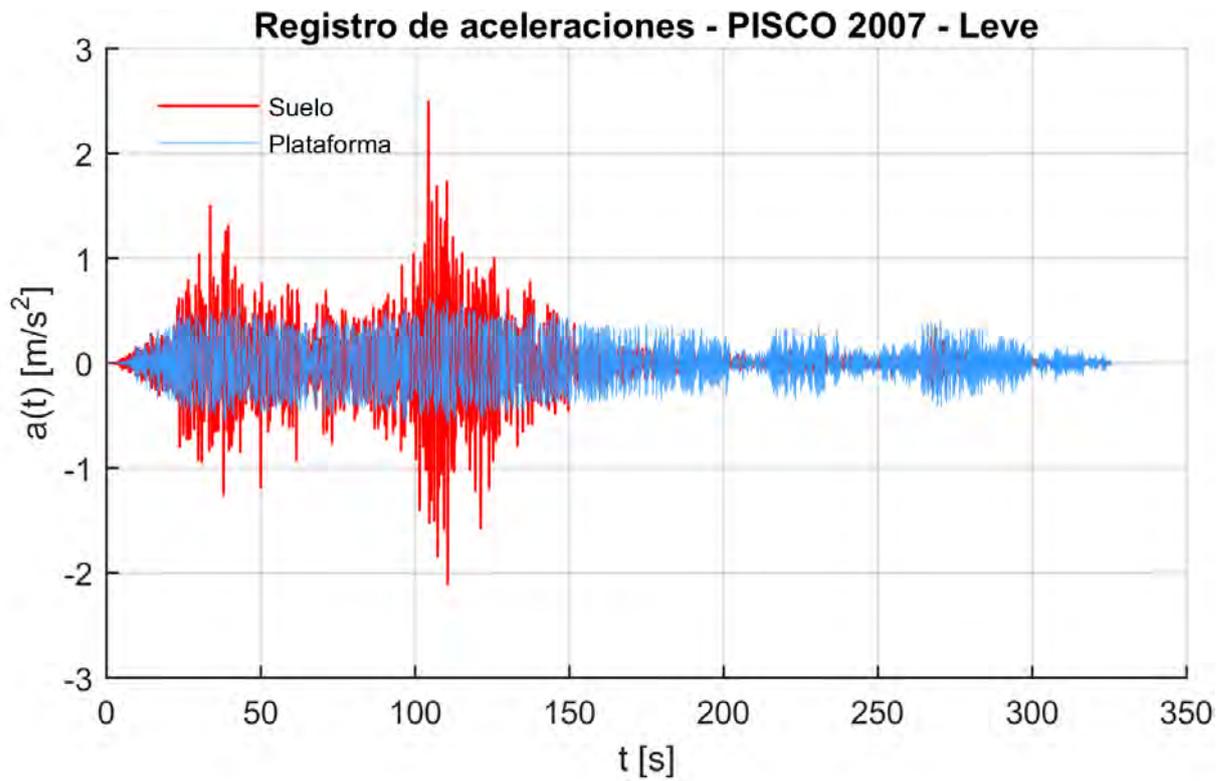


Figura 4. 46: Gráfico de respuesta a sismo leve Pisco 2007

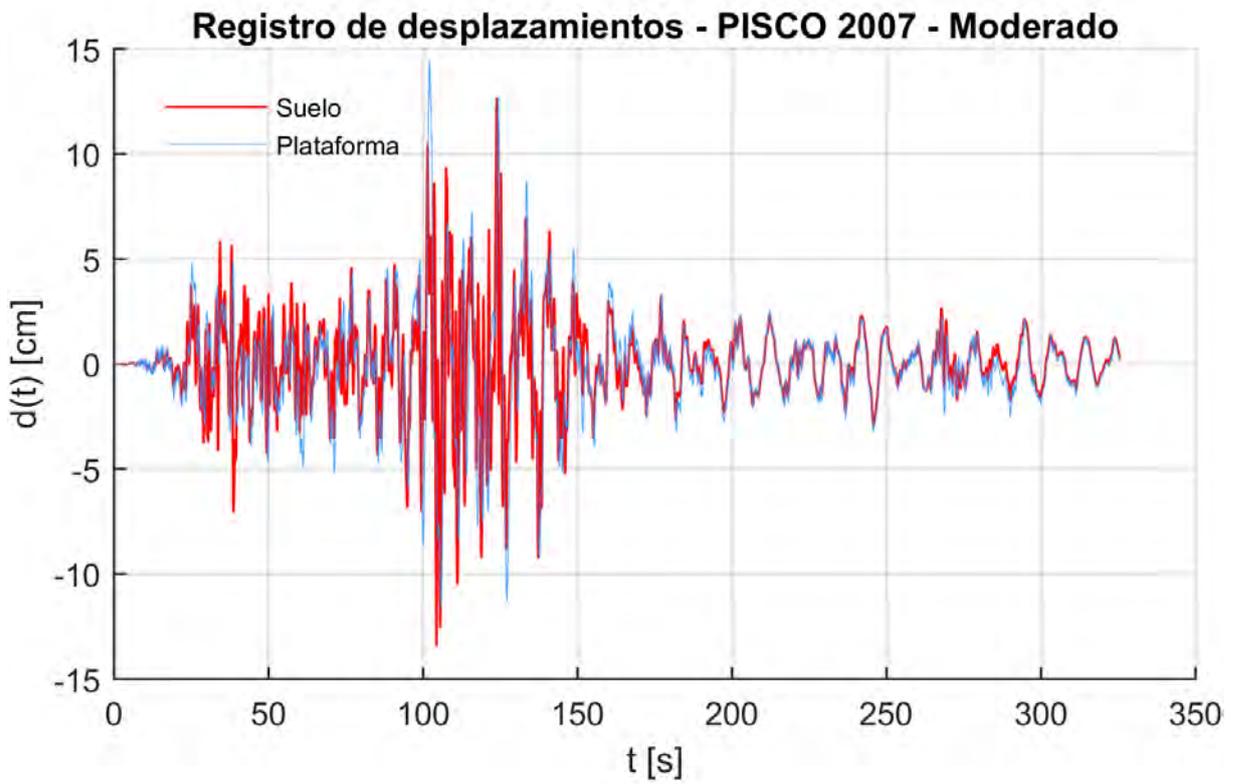
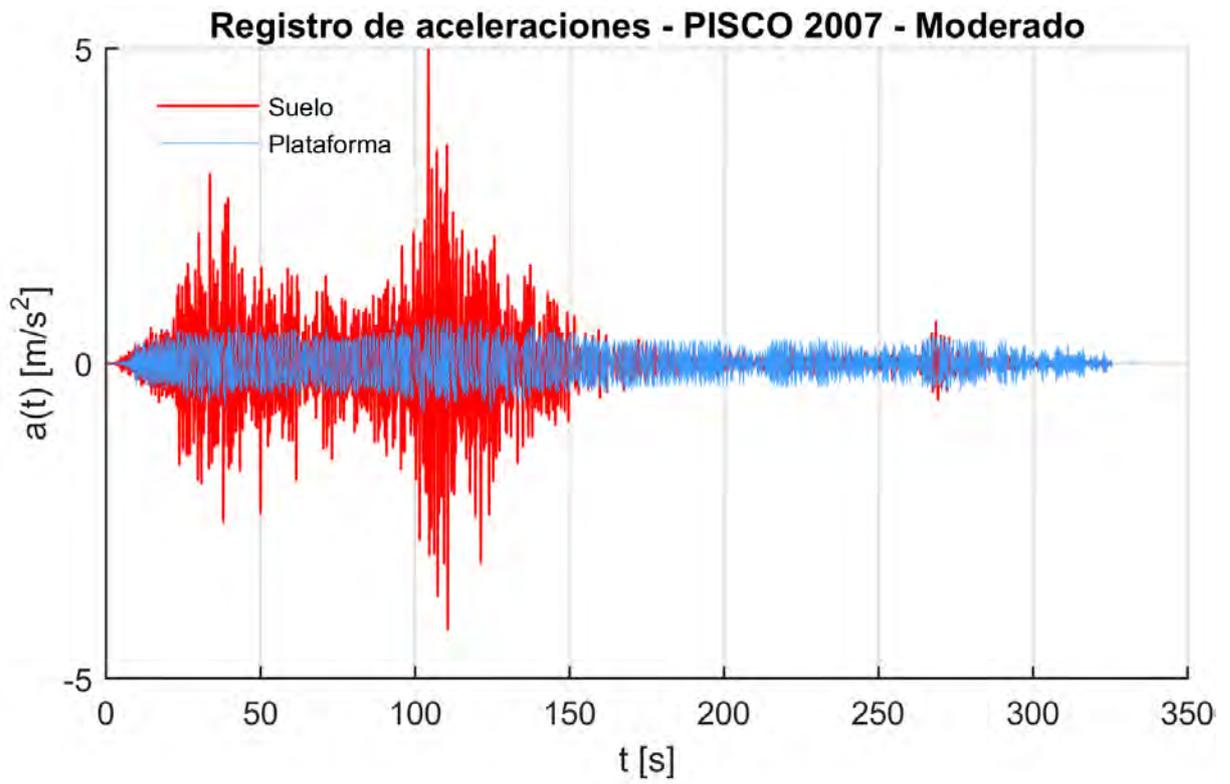


Figura 4. 47: Gráfico de respuesta a sismo moderado Pisco 2007

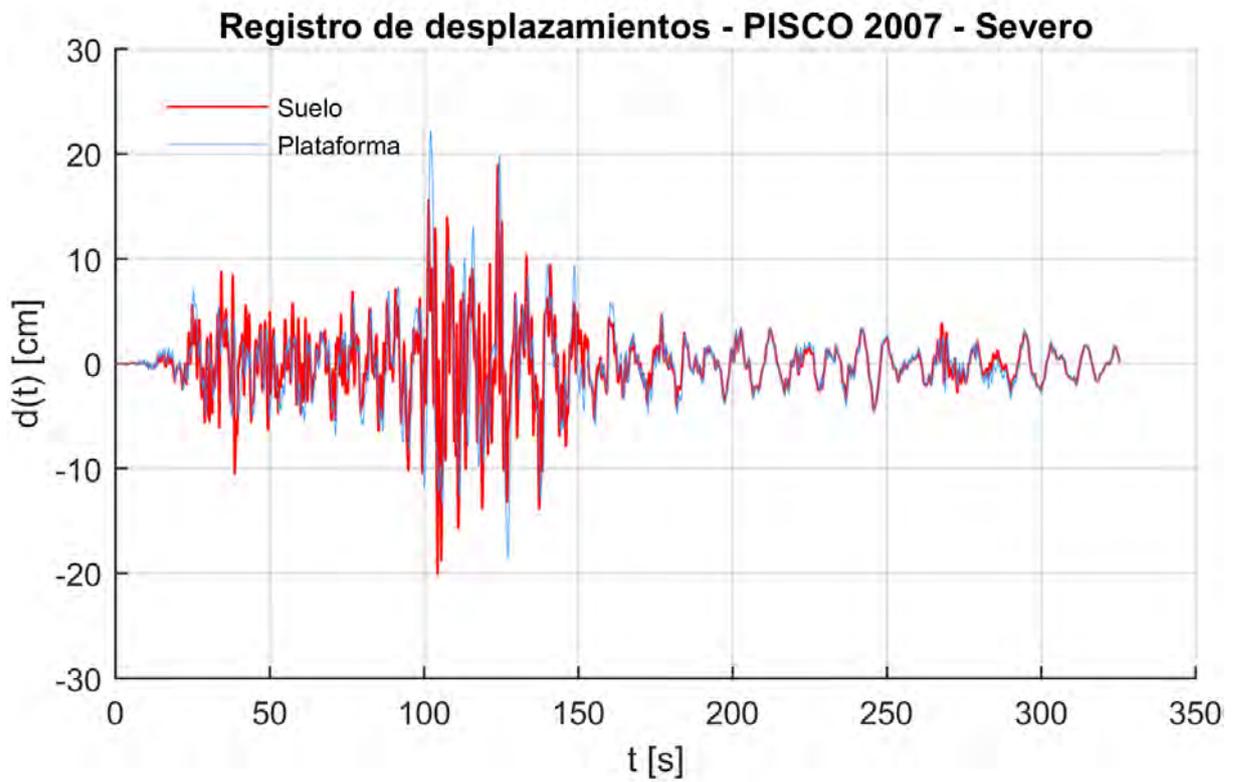
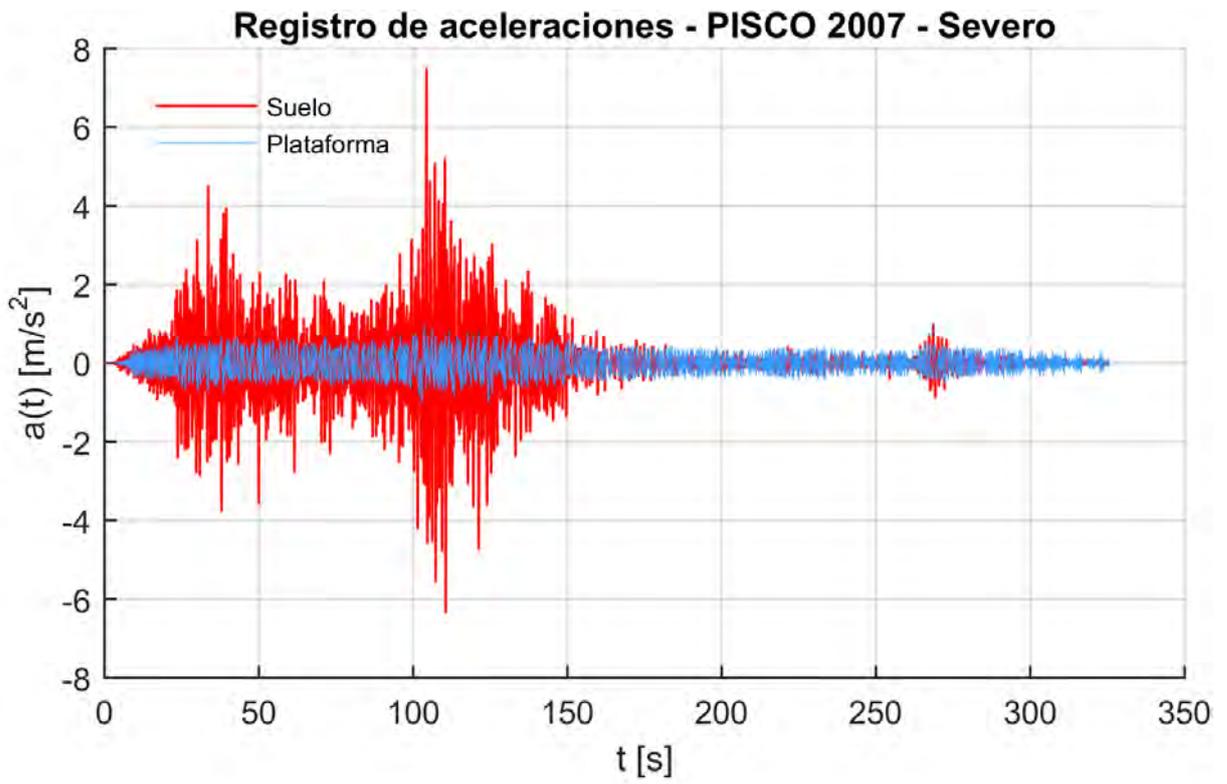


Figura 4. 48: Gráfico de respuesta a sismo severo Pisco 2007

4.7 MODELO NUMÉRICO DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO

El modelo numérico considera la geometría, peso, y demás parámetros más aproximados a la realidad de la plataforma de protección. Se modela dentro del programa ANSYS Workbench 2019 R1 Academic.

4.7.1 Primer modelo del sistema de aislamiento

Se modela una plataforma unitaria de 1.00 m x 1.00 m. Se compone de 6 bloques rígidos, de acero, y un conector resorte-amortiguador (Ver [Figura 4.49](#)). Las superficies de contacto se consideraron lisas o sin fricción, excepto entre la bola y la base (Ver [Figura 4.50](#)), donde se consideró deslizamiento friccional de 2%

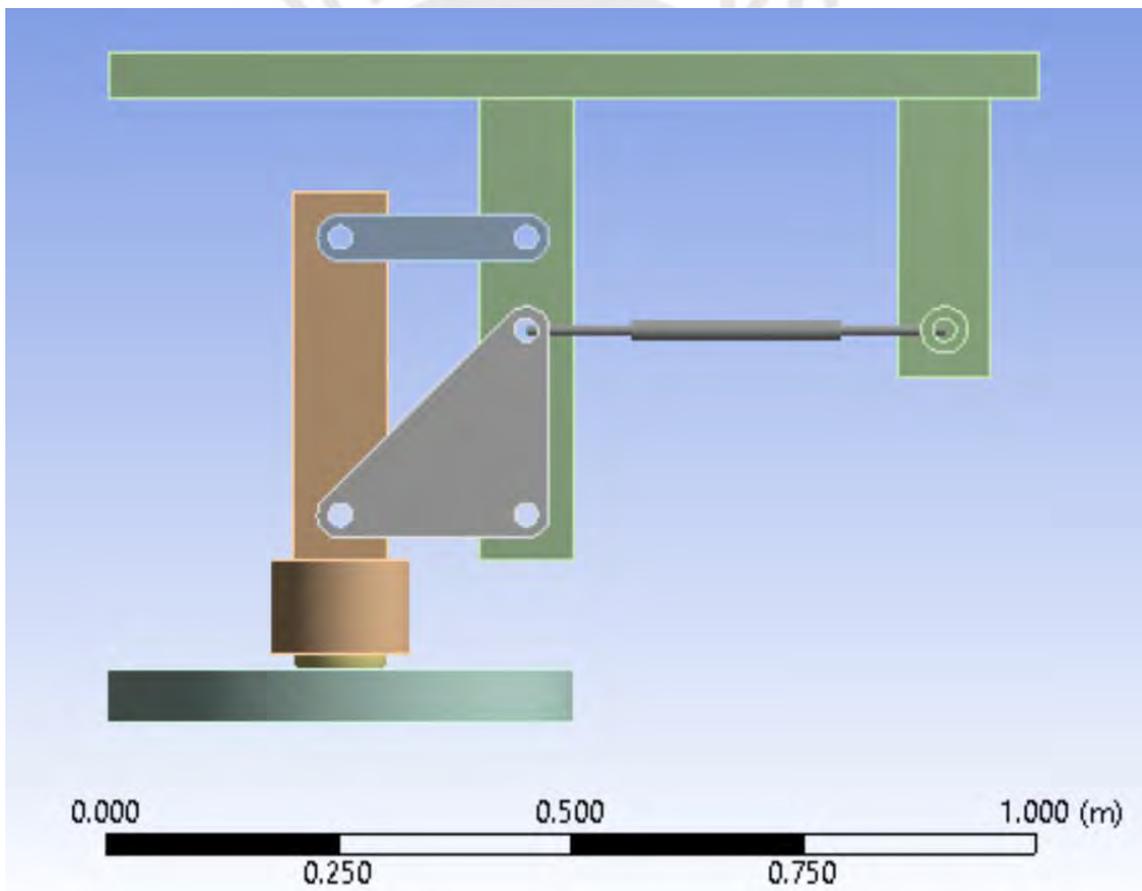


Figura 4. 49: Modelo 1 de la plataforma en Ansys

La geometría principal utilizada en este caso comprende el radio de la base cóncava de 2.00 m y el radio de la bola de acero de 0.05 m, con lo que la relación $R-r$ es de 1.95 m.

Para la suspensión se utilizó un conector tipo spring de 200000 N/m de rigidez, y 2000 N.s/m de amortiguamiento.

Las conexiones entre los elementos fueron:

Joints

- Translational - Ground To base
- Spherical - bola To apoyo
- Revolute - conector To apoyo
- Revolute - triangulo To apoyo
- Revolute - conector To plataforma
- Revolute - triangulo To plataforma
- General - Ground To plataforma

Contacts

- Forced Frictional Sliding - bola To base
- Longitudinal - triangulo To plataforma

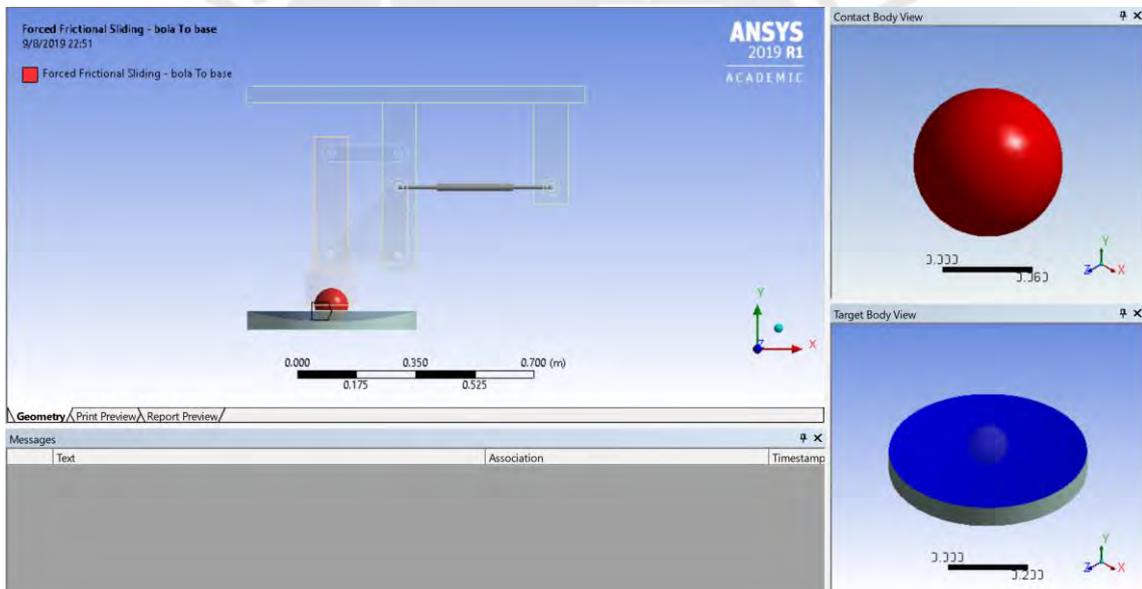


Figura 4. 50: Modelo 1: Contacto bola - base

La conexión que permite evaluar la plataforma unitaria, sin que se caiga por inestabilidad, es General – Ground To plataforma. Esta conexión general se configuró para permitir el desplazamiento en las tres direcciones (UX, UY, UZ), pero restringir los tres giros.

Las propiedades de los seis elementos que forman el modelo 1 del sistema de aislamiento se muestran en la [Tabla 4.6](#).

Tabla 4. 6: Resumen de propiedades de los componentes del Modelo 1

Object Name	triangulo	conector	plataforma	apoyo	base	bola
State	Meshed					
Graphics Properties						
Visible	Yes					
Transparency	1					
Definition						
Suppressed	No					
Stiffness Behavior	Rigid					
Reference Temperature	By Environment					
Material						
Assignment	Structural Steel					
Bounding Box						
Length X	0.25 m		1. m	0.15 m	0.5 m	0.1 m
Length Y	0.25 m	5. e-002 m	0.55 m	0.5 m	5.6754e-002 m	1.e-001 m
Length Z	2.5e-002 m		1. m	0.15 m	0.5 m	1.e-001 m
Properties						
Volume	9.3905e-004 m³	2.7454e-004 m³	5.3963e-002 m³	3.4563e-003 m³	8.0094e-003 m³	5.236e-004 m³
Mass	7.3715 kg	2.1552 kg	423.61 kg	27.132 kg	62.874 kg	4.1103 kg
Centroid X	0.13106 m	1. e-001 m	0.25914 m	4.9812e-012 m	1.3142e-005 m	-6.0309e-011 m
Centroid Y	0.29394 m	0.525 m	0.68263 m	0.2687 m	2.1535e-002 m	7.5e-002 m
Centroid Z	-3.75e-002 m		-0.30661 m	-7.5e-002 m	-7.5009e-002 m	-7.5e-002 m
Moment of Inertia Ip1	4.1407e-002 kg·m²	5.732e-004 kg·m²	35.876 kg·m²	0.62932 kg·m²	1.1208 kg·m²	4.0482e-003 kg·m²
Moment of Inertia Ip2	1.5728e-002 kg·m²	9.4344e-003 kg·m²	69.296 kg·m²	5.2872e-002 kg·m²	2.219 kg·m²	4.0403e-003 kg·m²
Moment of Inertia Ip3	5.6367e-002 kg·m²	9.7832e-003 kg·m²	37.733 kg·m²	0.6392 kg·m²	1.1211 kg·m²	4.0482e-003 kg·m²

El modelo en Ansys también se puede utilizar para deducir sus parámetros como el coeficiente de amortiguamiento, a partir de la medición de decremento logarítmico para el caso de caída libre. ξ es igual a 10%.

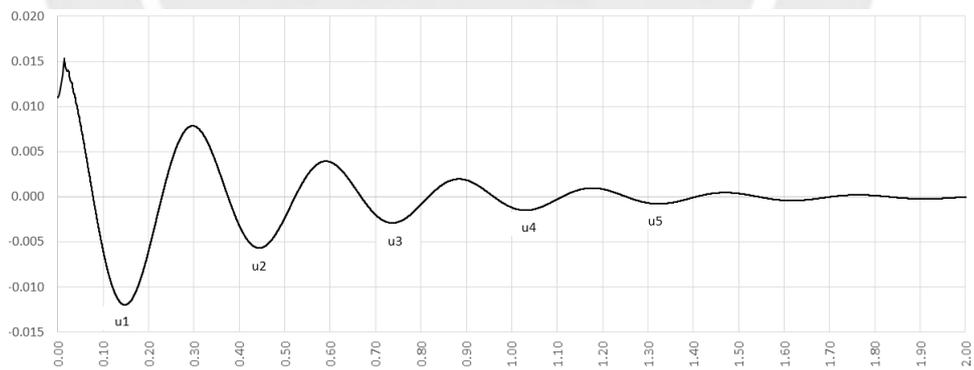


Figura 4. 51: Desplazamiento en función al tiempo, por caída libre, registrado en Ansys

4.7.2 Segundo modelo del sistema de aislamiento

En este caso se modelaron dos plataformas unitarias de 0.50 m x 0.50 m. Cada una se compone de 4 bloques rígidos, de acero (Ver [Figura 4.52](#)). Las superficies de contacto se consideraron lisas o sin fricción. La diferencia entre estas dos plataformas es el radio de la base. Una tiene radio de 3.00 m y la otra tiene radio de 2.00 m.

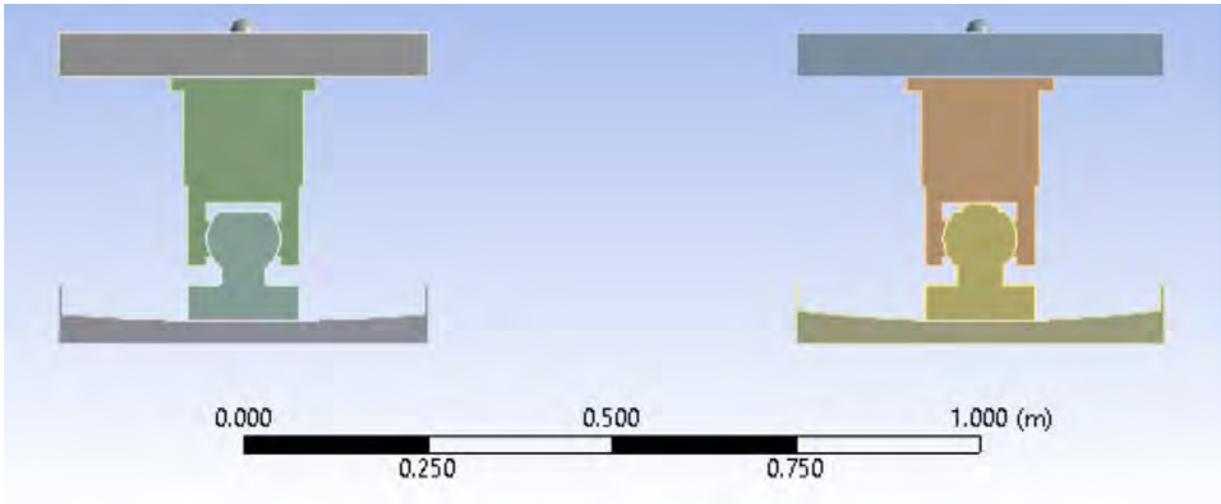


Figura 4. 52: Modelo 2 de la plataforma en Ansys: a) Ref 3.00m, b) Ref 2.00m

Las conexiones entre los elementos fueron:

Joints plataforma 3

- Fixed – sujeta 3 To plataforma 3
- Revolute – sujeta 3 To rotula 3
- Revolute – plato 3 T rotula 3
- General - Ground To plataforma 3
- Translacional – Ground To plato 3

Joints plataforma 2

- Fixed – sujeta 2 To plataforma 2
- Revolute – sujeta 2 To rotula 2
- Revolute – plato 2 T rotula 2
- General - Ground To plataforma 2
- Translacional – Ground To plato 2

La conexión entre la rótula y la base (o plato) es Revolute (Ver [Figura 4.53](#)). Permite el giro o deslizamiento entre ambas superficies que tienen el mismo radio.

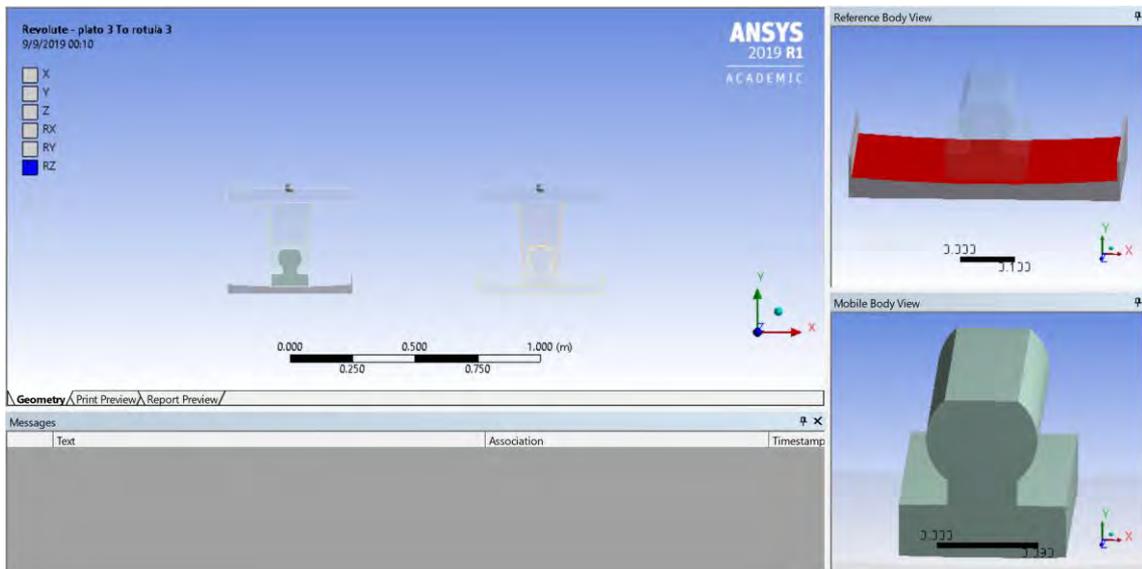


Figura 4. 53: Modelo 2: Contacto rotula - plato

Las propiedades de los dos casos del modelo 2 del sistema de aislamiento se muestran en la [Tabla 4.7](#).

Tabla 4. 7: Resumen de propiedades de los componentes del Modelo 2

Object Name	plataforma 3	plataforma 2	sujeta 3	sujeta 2	rotula 3	rotula 2	plato 3	plato 2
State	Meshed							
Graphics Properties								
Visible	Yes							
Transparency	1							
Definition								
Suppressed	No							
Stiffness Behavior	Rigid							
Reference Temperature	By Environment							
Material								
Assignment	Structural Steel							
Bounding Box								
Length X	0.5 m		0.2 m		0.15 m		0.5 m	
Length Y	6.e-002 m		0.26 m		0.15 m	0.1625 m	8.e-002 m	
Length Z	0.5 m		0.1 m		0.2 m		0.25 m	
Properties								
Volume	1.5e-002 m ³		3.3108e-003 m ³		3.1472e-003 m ³	3.2459e-003 m ³	4.2839e-003 m ³	4.4891e-003 m ³
Mass	117.75 kg		25.989 kg		24.706 kg	25.48 kg	33.629 kg	35.24 kg
Centroid X	-1.024e-017 m	1. m	-4.2137e-011 m	1. m	1.3698e-006 m	1. m	-1.0652e-004 m	0.99994 m
Centroid Y	0.365 m		0.23297 m		6.6199e-002 m	6.917e-002 m	-1.1995e-002 m	-1.1093e-002 m
Centroid Z	-7.228e-018 m	-9.6374e-018 m	6.8203e-019 m	7.5023e-018 m	1.5285e-018 m	-2.0952e-017 m	8.3707e-018 m	9.9864e-018 m
Moment of Inertia Ip1	2.4885 kg·m ²		0.13562 kg·m ²		0.13134 kg·m ²	0.13968 kg·m ²	0.18134 kg·m ²	0.1904 kg·m ²
Moment of Inertia Ip2	4.9063 kg·m ²		8.7672e-002 kg·m ²		0.112 kg·m ²	0.11442 kg·m ²	0.97033 kg·m ²	1.0372 kg·m ²
Moment of Inertia Ip3	2.4885 kg·m ²		0.17996 kg·m ²		7.8998e-002 kg·m ²	8.4847e-002 kg·m ²	0.79863 kg·m ²	0.85767 kg·m ²
Statistics								
Nodes	1							
Elements	1							
Mesh Metric	None							

Asimismo, la carga adicional, como la sobre carga de 50 kg y el peso óptimo de la unidad, se colocaron como masa puntual en el centro de la plataforma (esfera visible en la [Figura 4.52](#)).

4.7.3 Tercer modelo del sistema de aislamiento

Se modela una plataforma unitaria de 0.50 m x 0.50 m. Se compone de 6 bloques rígidos de acero y 2 flexibles de neopreno (Ver [Figura 4.54](#)). Las superficies de contacto se consideraron lisas o sin fricción, excepto entre la rótula y la base (Ver [Figura 4.55](#)), donde se consideró deslizamiento friccional de 2%.

La base (o plato) y la rótula son de superficie esférica de radio 3.50m. Para la suspensión se utilizó un conector tipo spring de 50000 N/m de rigidez, y 1000 N.s/m de amortiguamiento.

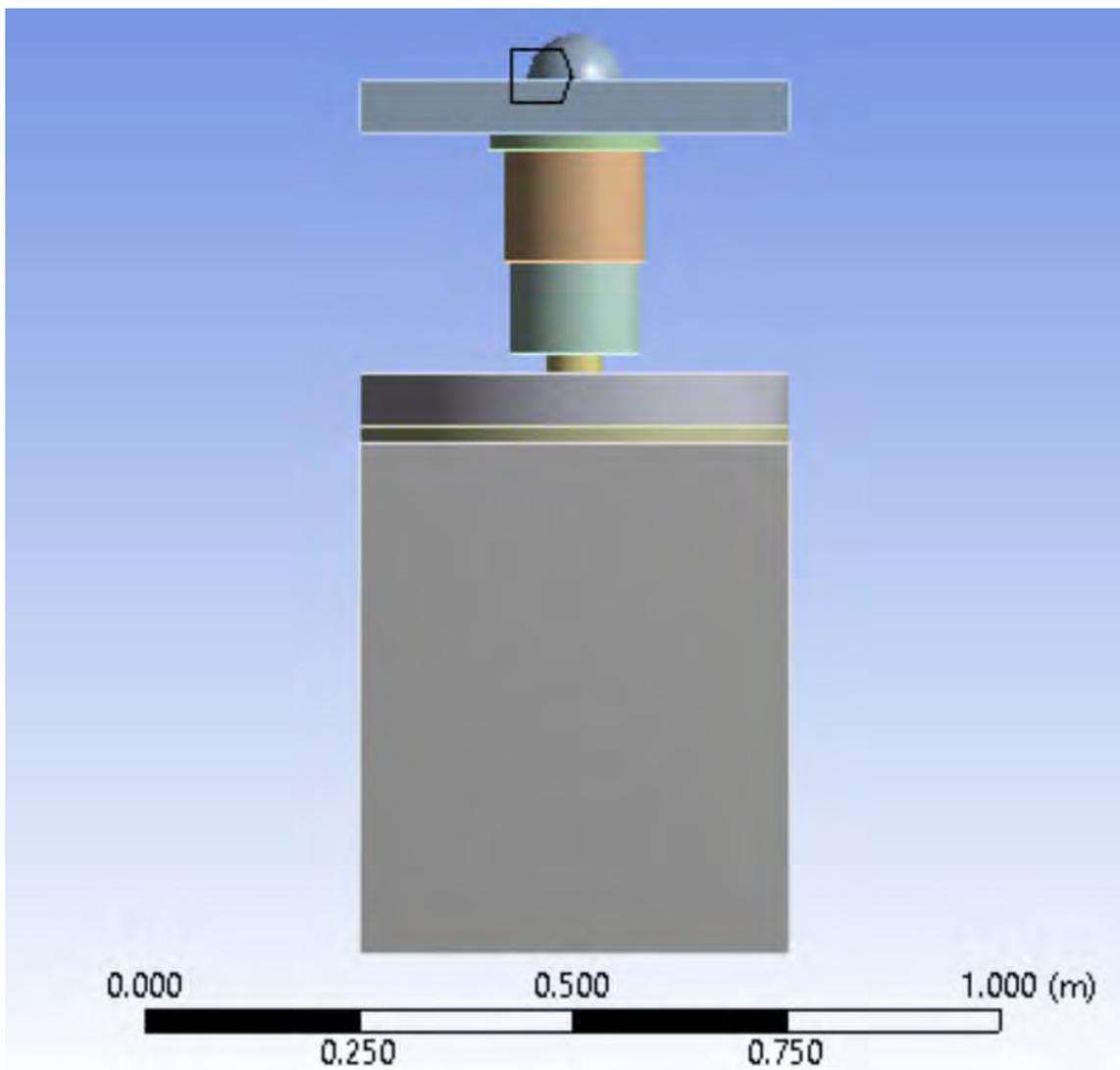


Figura 4. 54: Modelo 3 de la plataforma en Ansys

Asimismo, la sobre carga de 50 kg y el peso óptimo de la unidad, se colocaron como masa puntual en el centro de la plataforma (esfera visible en la [Figura 4.54](#))

Las conexiones entre los elementos fueron:

Joints

- Fixed – neo sup To plataforma
- Fixed – suspension To neo sup
- Fixed – sujetador To suspension
- Spherical – rotula To sujetador
- Fixed – neo inf To plato
- Fixed – cimentacion To neo inf
- Translational – Ground To cimentacion
- General – Ground To plataforma

Contacts

- Forced Frictional Sliding - rotula To plato
- Longitudinal – sujetador To suspension

Las conexiones sujetador – rótula – base se muestran en la [Figura 4.55](#).

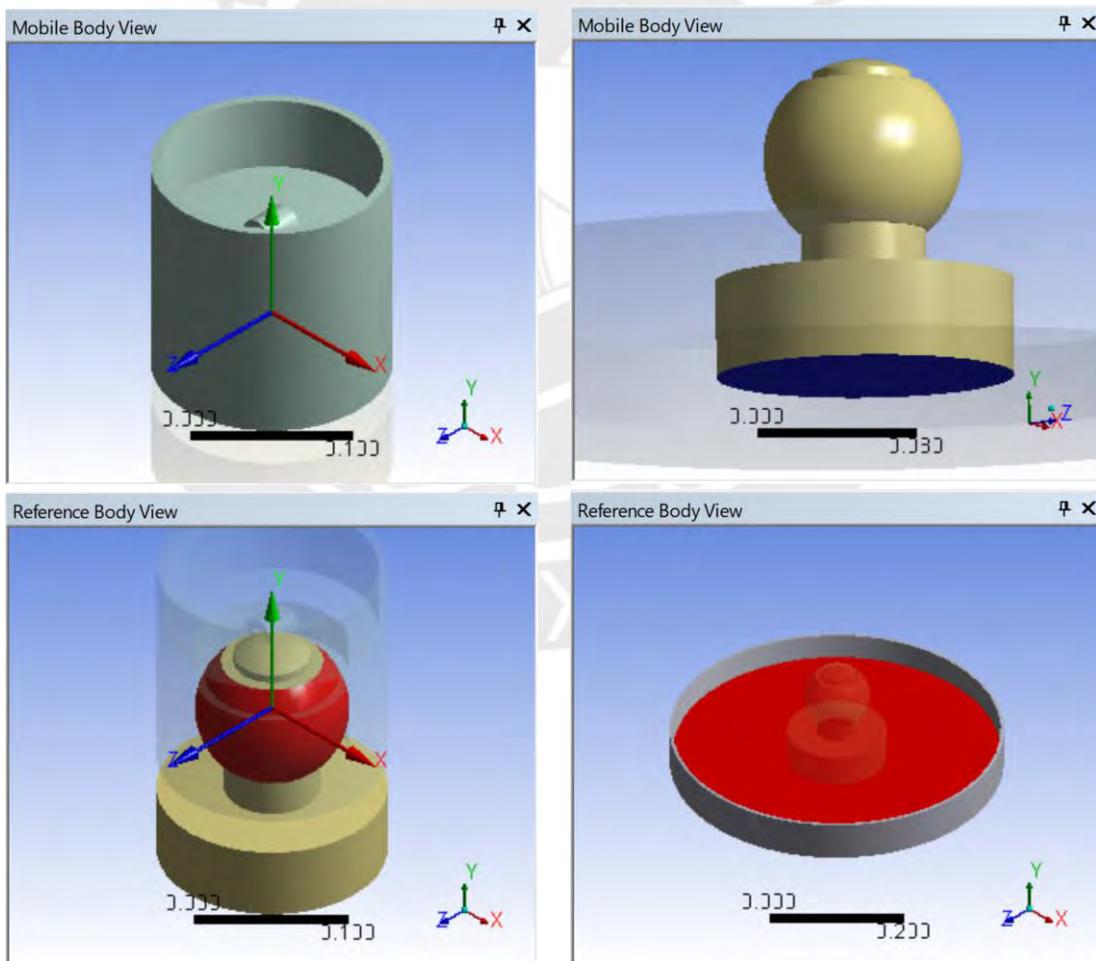


Figura 4. 55: Conexiones sujetador - rótula - base del Modelo 3

Las propiedades de los elementos del modelo 3 del sistema de aislamiento se muestran en la [Tabla 4.8](#).

Tabla 4. 8: Resumen de propiedades de los componentes del Modelo 3

Object Name	cimentacion	plataforma	neo sup	suspension	sujetador	rotula	plato	neo inf
State	Meshed							
Graphics Properties								
Visible	Yes							
Transparency	1							
Definition								
Suppressed	No							
Stiffness Behavior	Rigid							
Reference Temperature	By Environment							
Material								
Assignment	Structural Steel							
Bounding Box								
Length X	0.5 m		0.2 m	0.1625 m		0.15 m		0.5 m
Length Y	0.6 m	6.e-002 m	2.e-002 m	0.13125 m		0.15 m	0.1625 m	6.e-002 m 2.0008e-002 m
Length Z	0.5 m		0.2 m	0.1625 m		0.15 m		0.5 m
Properties								
Volume	0.15 m ³	1.5e-002 m ³	6.2832e-004 m ³	5.1772e-004 m ³	1.2584e-003 m ³	1.4484e-003 m ³	3.296e-003 m ³	3.9266e-003 m ³
Mass	1177.5 kg	117.75 kg	4.9323 kg	4.0641 kg	9.8786 kg	11.37 kg	25.873 kg	30.824 kg
Centroid X	-8.9407e-008 m		4.0466e-006 m	-9.3576e-008 m	-9.2979e-008 m	2.1352e-008 m	1.9667e-006 m	-2.5175e-007 m
Centroid Y	-0.33 m	0.365 m	0.325 m	0.26318 m	0.13668 m	5.7614e-002 m	1.0537e-003 m	-1.9997e-002 m
Centroid Z	0. m		-4.3985e-018 m	-1.9398e-016 m	9.2918e-011 m	-1.9493e-007 m	-2.6478e-006 m	-1.246e-010 m
Moment of Inertia Ip1	59.856 kg·m ²	2.4885 kg·m ²	1.2407e-002 kg·m ²	1.7991e-002 kg·m ²	3.2321e-002 kg·m ²	3.415e-002 kg·m ²	0.48827 kg·m ²	0.48016 kg·m ²
Moment of Inertia Ip2	49.062 kg·m ²	4.9063 kg·m ²	2.4489e-002 kg·m ²	2.1546e-002 kg·m ²	3.8234e-002 kg·m ²	2.3277e-002 kg·m ²	0.96984 kg·m ²	0.95828 kg·m ²
Moment of Inertia Ip3	59.856 kg·m ²	2.4885 kg·m ²	1.2409e-002 kg·m ²	1.7991e-002 kg·m ²	3.2328e-002 kg·m ²	3.4141e-002 kg·m ²	0.48807 kg·m ²	0.48016 kg·m ²
Statistics								
Nodes	1							
Elements	1							
Mesh Metric	None							

Finalmente, luego de evaluar el tercer modelo con una sobrecarga como masa puntual, también se evalúan 4 módulos juntos (para formar un piso de 1m²). Sobre la base de 1m² se coloca un modelo de persona vulnerable.

En la [Figura 4.56](#) se observa el caso de un modelo de persona en silla de ruedas, solo esquemáticamente, para verificar que no se cae de la plataforma durante la simulación. El modelo de silla de ruedas tiene una masa de 20 kg. El modelo de persona sentada en la silla de ruedas tiene una masa de 70 kg. Este modelo debe ser muy sencillo para poder procesarlo.



Figura 4. 56: Modelo 3 + persona en silla de ruedas

4.8 SIMULACIÓN EN ANSYS WORKBENCH DE LA RESPUESTA DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO A UN SISMO

Se analizaron los modelos para tres tipos de señales:

- 1) Desplazamiento sinusoidal. Se analiza para amplitudes como 0.050m, 0.075m, y 0.100m. Se analiza para frecuencias naturales como 0.667Hz, 0.778Hz, 1.000Hz, y 1.500Hz. Al ser una señal cíclica, se considera suficiente una duración de 20 segundos.

$$d = \text{amplitud} * \sin(\text{tiempo} * 2\pi * \text{frecuencia} * 180/\pi)$$

- 2) Aceleración sinusoidal, de amplitud 5.0 m/s², y frecuencia natural de 1 Hz, corregida por base y filtro pasa banda. Se corrige con SeismoSignal para que la posición y velocidad final sean cero. La duración es de 20 segundos.

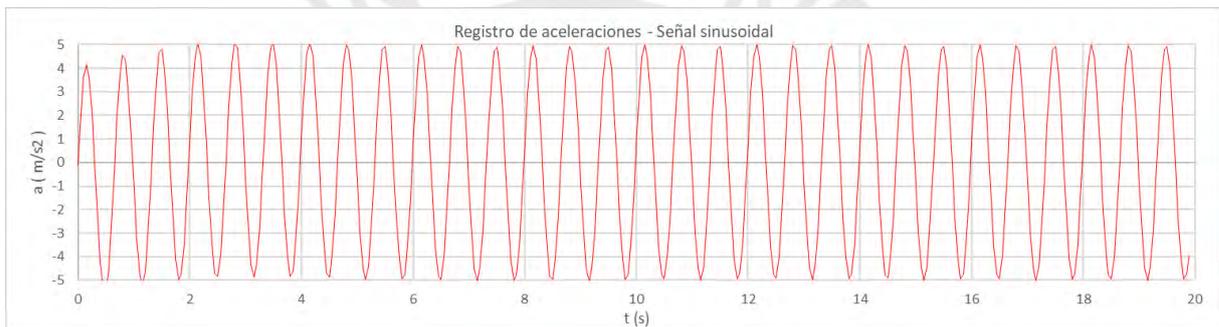


Figura 4. 57: Acelerograma sinusoidal corregido.

- 3) Acelerograma PISCO 2007 Norte-Sur, en los 60 segundos de mayor amplitud.



Figura 4. 58: Acelerograma Pisco 2007 N-S 60 segundos

A continuación, se muestran algunos ejemplos de las respuestas de aceleración y desplazamientos del Modelo 2 y Modelo 3:

4.8.1 MODELO 2:

Se analiza la respuesta de dos sistemas de aislamiento del tipo *Modelo 2*. Uno cuyo radio entre rótula y base es 3.00m, y otro cuyo radio entre rótula y base es 2.00m. Se probó la respuesta para varias combinaciones de amplitud y frecuencia.

Ejemplo 1: Amplitud de desplazamientos de 0.100 m y frecuencia de 1.000 Hz. Todas las superficies son sin fricción.

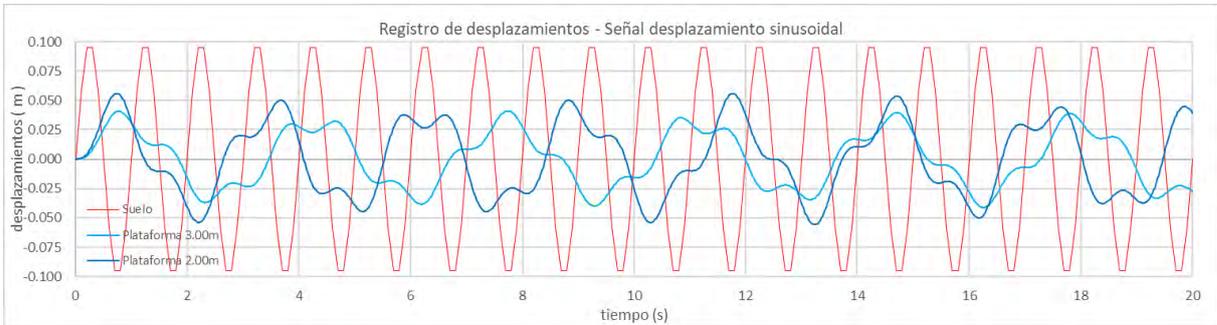


Figura 4. 59: Comparativo de respuesta de desplazamientos Ejemplo 1

desplazamiento máximo (Reff 3.00m) = 0.041 m

desplazamiento máximo (Reff 2.00m) = 0.056 m

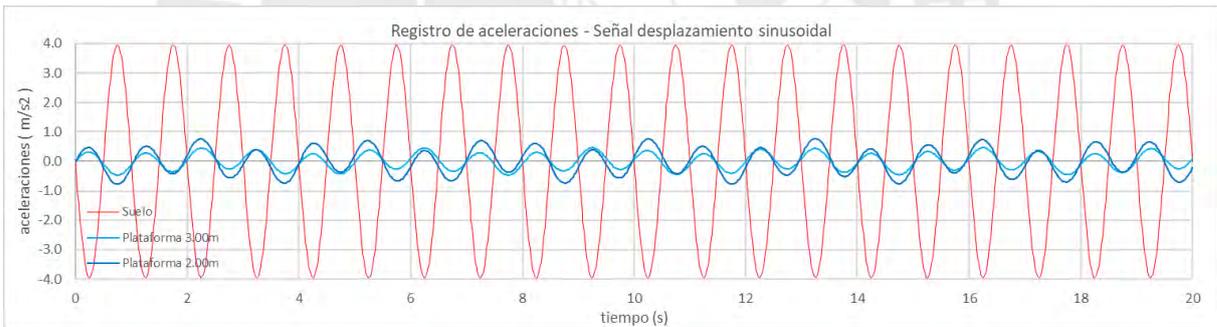


Figura 4. 60: Comparativo de respuesta de aceleraciones Ejemplo 1

Pseudo aceleración máxima (Reff 3.00m) = 0.46 m/s²

Pseudo aceleración máxima (Reff 2.00m) = 0.77 m/s²

Aceleración máxima en el suelo = 3.95 m/s²

Se observa que el caso con radio efectivo de 3m tiene menores amplitudes de respuesta que el caso con radio efectivo de 2m. En comparación a la aceleración máxima en el suelo, el caso de Reff = 3m reduce la respuesta en más de 8 veces, y el caso de Reff = 2m reduce la respuesta en más de 5 veces.

Ejemplo 2: Amplitud de desplazamientos de 0.100 m y 1.500 Hz. Todas las superficies son sin fricción.

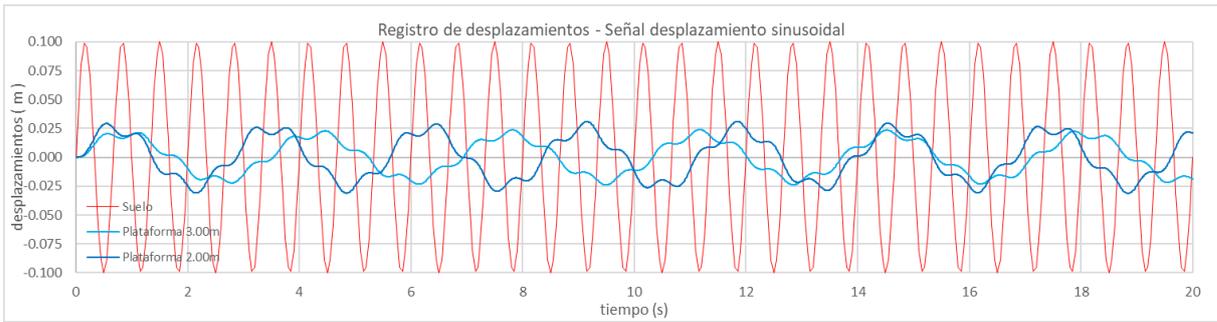


Figura 4. 61: Comparativo de respuesta de desplazamientos Ejemplo 2

desplazamiento máximo (Reff 3.00m) = 0.024 m

desplazamiento máximo (Reff 2.00m) = 0.031 m

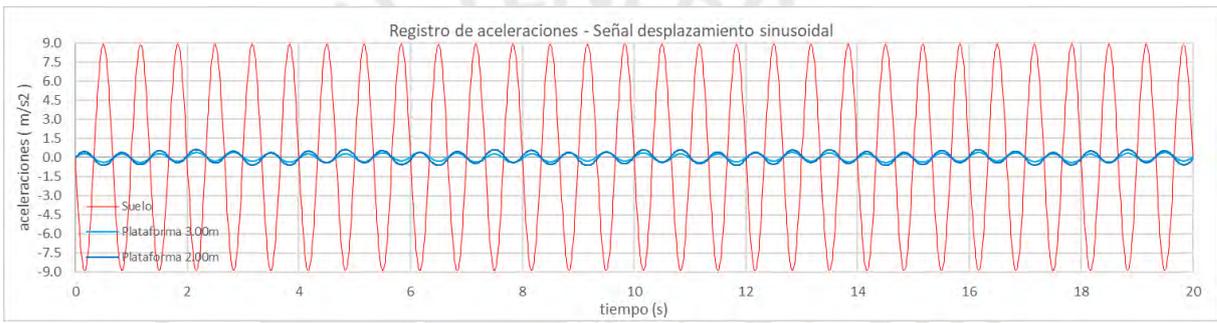


Figura 4. 62: Comparativo de respuesta de aceleraciones Ejemplo 2

Pseudo aceleración máxima (Reff 3.00m) = 0.39 m/s²

Pseudo aceleración máxima (Reff 2.00m) = 0.62 m/s²

Aceleración máxima en el suelo = 8.88m/s²

Se observa que el caso con radio efectivo de 3m tiene menores amplitudes de respuesta que el caso con radio efectivo de 2m. Asimismo, ambos casos reducen la respuesta comparada a la aceleración máxima en el suelo, mucho más que en el Ejemplo 1. Sin embargo, se debe recordar que los ejemplos 1 y 2 no incluyen fricción. Además, el ejemplo 2 correspondería a un caso menos real, porque la frecuencia del movimiento se aleja de 1Hz, que es la frecuencia que predomina en las señales sísmicas de los casos peruanos analizados.

Ejemplo 3: Amplitud de desplazamientos de 0.075 m y frecuencia de 0.667 Hz. En este ejemplo se asigna los coeficientes de fricción en el contacto base–rótula (5%) y en el contacto rótula–sujetador (2.5%).

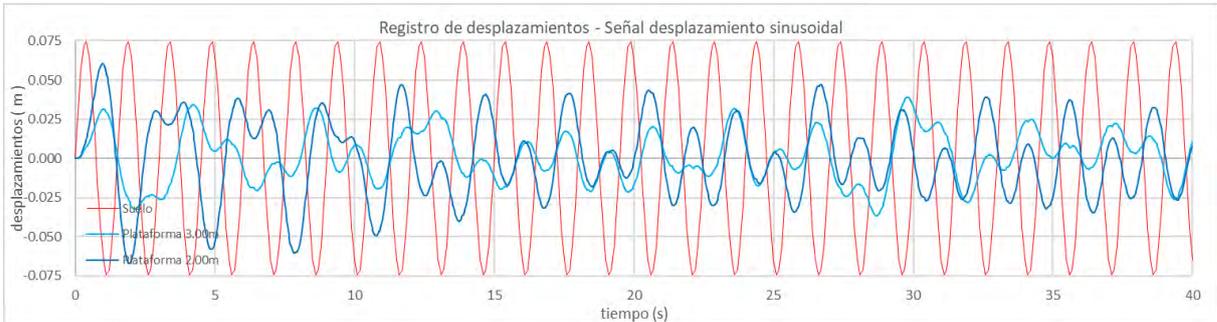


Figura 4. 63: Comparativo de respuesta de desplazamientos Ejemplo 3

desplazamiento máximo (Reff 3.00m) = 0.039 m
 desplazamiento máximo (Reff 2.00m) = 0.067 m

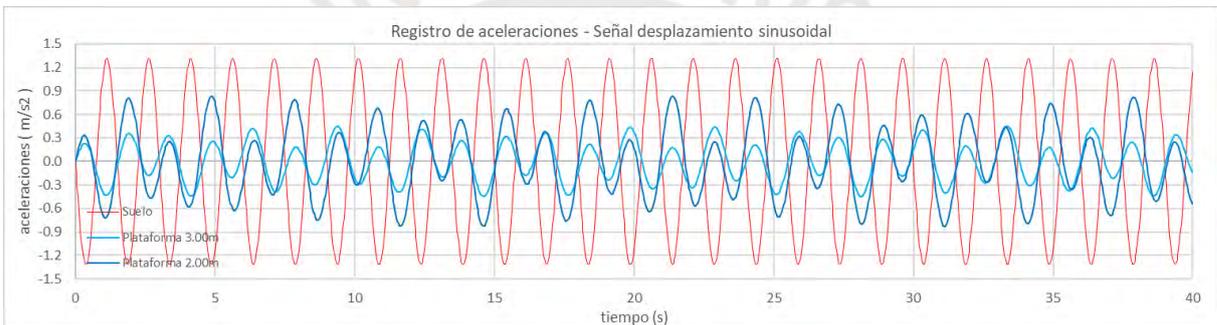


Figura 4. 64: Comparativo de respuesta de aceleraciones Ejemplo 3

Pseudo aceleración máxima (Reff 3.00m) = 0.45 m/s²
 Pseudo aceleración máxima (Reff 2.00m) = 0.83 m/s²
 Aceleración máxima en el suelo = 1.32 m/s²

Se observa que el caso con radio efectivo de 3m tiene menores amplitudes de respuesta que el caso con radio efectivo de 2m. Sin embargo, ambos casos reducen menos la respuesta comparada a la aceleración máxima en el suelo, en comparación a la reducción que se logra en los ejemplos 1 y 2 (donde no se consideró fricción).

Ejemplo 4: Amplitud de desplazamientos de 0.050 m y frecuencia de 0.778 Hz. En este ejemplo se asigna los coeficientes de fricción en el contacto base–rótula (5%) y en el contacto rótula–sujetador (2.5%).

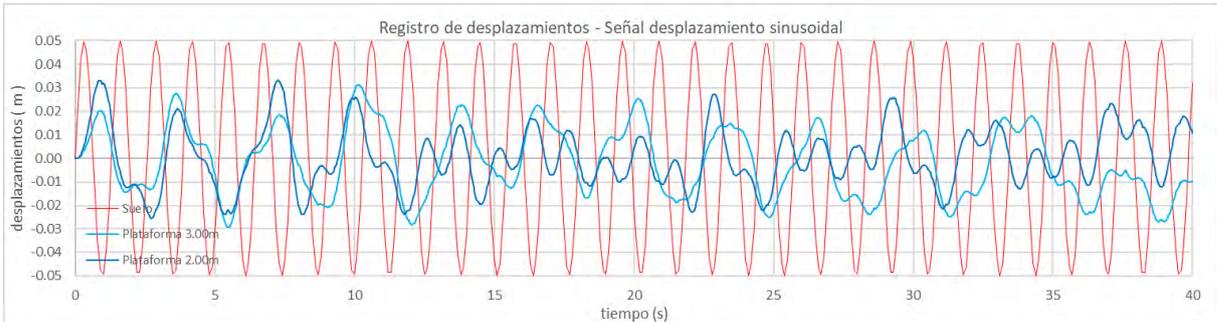


Figura 4. 65: Comparativo de respuesta de desplazamientos Ejemplo 4

desplazamiento máximo (Reff 3.00m) = 0.031 m

desplazamiento máximo (Reff 2.00m) = 0.033 m

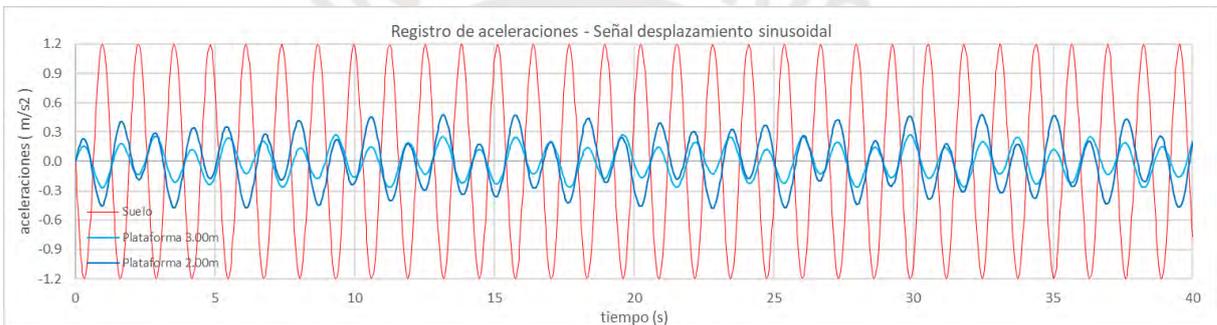


Figura 4. 66: Comparativo de respuesta de aceleraciones Ejemplo 4

Pseudo aceleración máxima (Reff 3.00m) = 0.27 m/s²

Pseudo aceleración máxima (Reff 2.00m) = 0.48 m/s²

Aceleración máxima en el suelo = 1.19 m/s²

Se observa que el caso con radio efectivo de 3m tiene menores amplitudes de respuesta que el caso con radio efectivo de 2m. Sin embargo, ambos casos reducen menos la respuesta comparada a la aceleración máxima en el suelo, en comparación a la reducción que se logra en los ejemplos 1 y 2 (donde no se consideró fricción).

En conclusión, en todos los ejemplos presentados para el Modelo 2, se observa que las respuestas de desplazamientos y aceleraciones disminuyen. Asimismo, el modelo con radio efectivo de 3 metros generalmente logra mejores resultados que el modelo con radio efectivo de 2 metros.

4.8.2 MODELO 3

Se analiza la respuesta del *Modelo 3*, para un radio efectivo entre rótula y base de 3.50m. Se probó la respuesta para varias combinaciones de amplitud y frecuencia.

Ejemplo 1: Amplitud de desplazamientos de 0.100 m y frecuencia de 1.000 Hz. Todas las superficies son sin fricción.



Figura 4. 67: Comparativo de respuesta de desplazamientos Ejemplo 1

desplazamiento máximo plataforma = 0.041 m

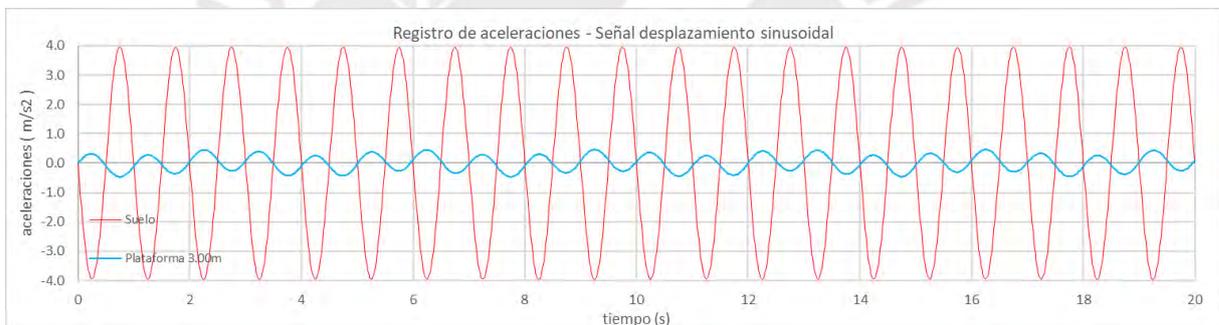


Figura 4. 68: Comparativo de respuesta de aceleraciones caso 1

Pseudo aceleración máxima plataforma = 0.47 m/s²

Aceleración máxima en el suelo = 3.95 m/s²

En este ejemplo, el Modelo 3 tiene una respuesta de aceleración máxima menor a la aceleración máxima en el suelo en más de 8 veces.

Ejemplo 2: Amplitud de desplazamientos de 0.100 m y 1.500 Hz. Todas las superficies son sin fricción.

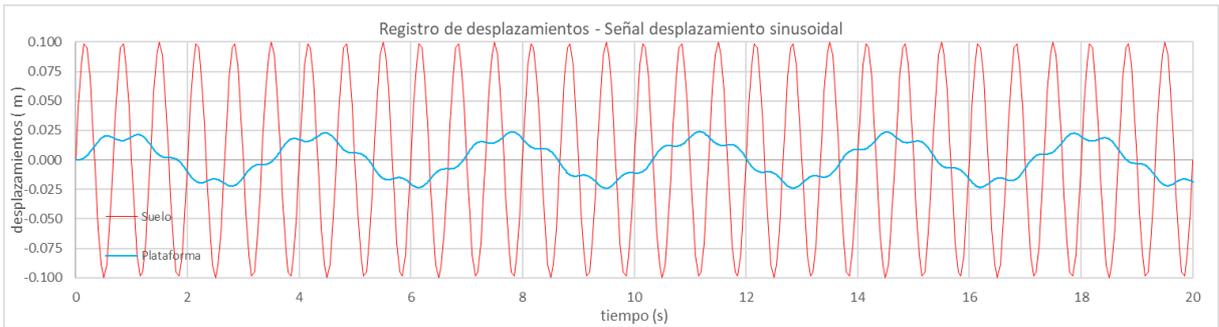


Figura 4. 69: Comparativo de respuesta de desplazamientos caso 2

desplazamiento máximo (Reff 3.00m) = 0.024 m

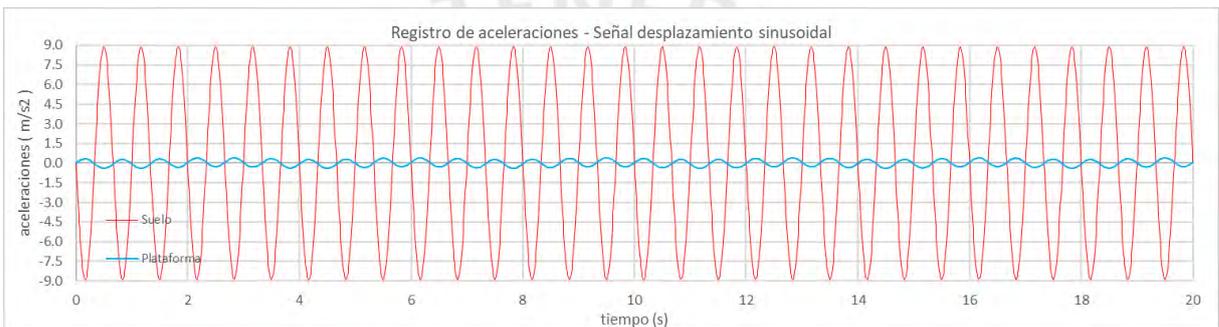


Figura 4. 70: Comparativo de respuesta de aceleraciones caso 2

Pseudo aceleración máxima plataforma = 0.39 m/s²

Aceleración máxima en el suelo = 8.88m/s²

En este ejemplo, el Modelo 3 tiene una respuesta de aceleración máxima mucho menor a la aceleración máxima en el suelo.

CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 MODELO TEÓRICO

El modelo teórico simplifica la respuesta para un acelerograma en una dirección. Para la componente East-West, y luego para North-South.

5.1.1 Respuesta del aislador en Matlab/Simulink

Las respuestas obtenidas en Matlab, para los sismos de Arequipa 2001 y Pisco 2007, con el uso del comando ODE15s indican en el caso de:

- sismo leve, que la reducción del PGA es de una cuarta parte. Sin embargo, las aceleraciones de respuesta decrecen lentamente, por lo que en las fases donde el sismo ya casi está desapareciendo, la plataforma continúa manteniendo las aceleraciones. Este efecto poco efectivo para sismos leves era el esperado porque la plataforma de protección es del tipo péndulo de fricción.
- sismo moderado, que la reducción del PGA es de una sexta parte, pero el promedio de aceleraciones disminuye lentamente por lo que en la fase final del sismo la plataforma continúa moviéndose con una amplitud de aceleración un poco mayor a la que ocurre en el suelo, pero ambas ya son pequeñas.
- sismo severo, que la reducción del PGA es de unas siete veces. En la parte final del sismo, las amplitudes de las aceleraciones de la plataforma y de suelo son similares, pero ya son pequeñas.

5.2 MODELO NUMÉRICO

El modelo numérico considera propiedades más aproximadas a la realidad y a la vez sencillas de generar. Las respuestas solo son para un acelerograma en una dirección, la componente East-West, y luego la North-South. Se puede incluir los acelerogramas de las tres direcciones, pero el procesamiento computacional demandaría demasiado tiempo.

5.2.1 Respuesta del aislador en Ansys Workbench

Las respuestas obtenidas en Ansys, para señales sinusoidales, indican siempre una reducción de la amplitud máxima de las aceleraciones de respuesta. Los desplazamientos de respuesta disminuyen, pero en general solo a la mitad. El lado positivo es que estos movimientos, a pesar de seguir siendo amplios, tienen un periodo mucho mayor a lo que siente el suelo, por lo que sí hay una mejora significativa. Las respuestas obtenidas en Ansys, para señal sísmica también tienen mejoría tanto en aceleración como desplazamientos.

5.3 PARÁMETROS DE OPTIMIZACIÓN DE LA PLATAFORMA DE PROTECCIÓN

Las variables más influyentes encontradas en el modelo teórico son el radio efectivo y el coeficiente de rugosidad de las superficies deslizantes. Al utilizar los valores óptimos del modelo teórico en el modelo analítico, se verifica que las respuestas se reducen significativamente.

5.4 COMPARACIÓN DE RESPUESTAS DE LA PLATAFORMA DE PROTECCIÓN

Los resultados del modelo teórico en Matlab con el modelo analítico en Ansys son muy similares, por lo que se puede decir que el método y modelo teórico utilizado es correcto.

Por ejemplo, para el acelerograma sinusoidal corregido, la respuesta de aceleraciones en Matlab es:

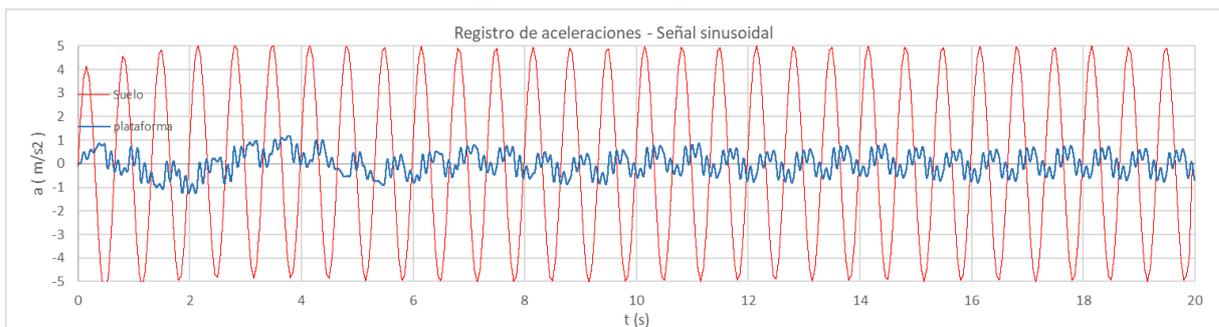


Figura 5. 1: Comparativo de respuesta de aceleraciones del Modelo 3 en Matlab

La respuesta de aceleraciones en Ansys es:

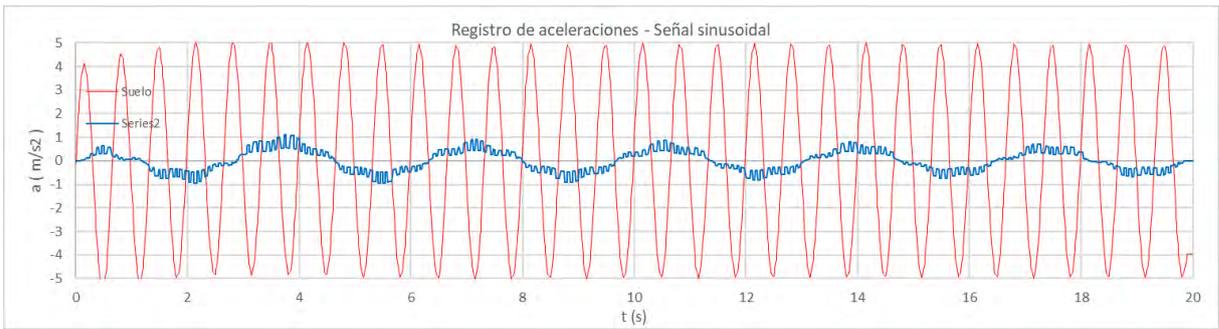


Figura 5. 2: Comparativo de respuesta de aceleraciones del Modelo 3 en Ansys

La respuesta de desplazamientos en Matlab es:

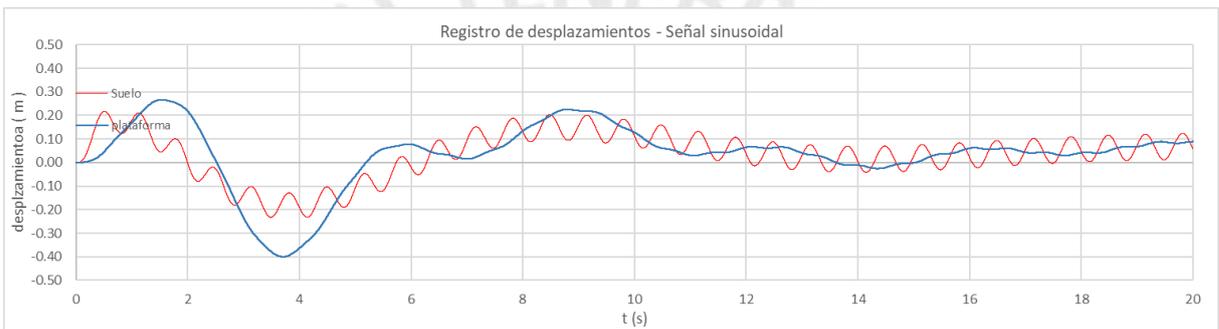


Figura 5. 3: Comparativo de respuesta de desplazamientos del Modelo 3 en Matlab

La respuesta de desplazamientos en Ansys es:

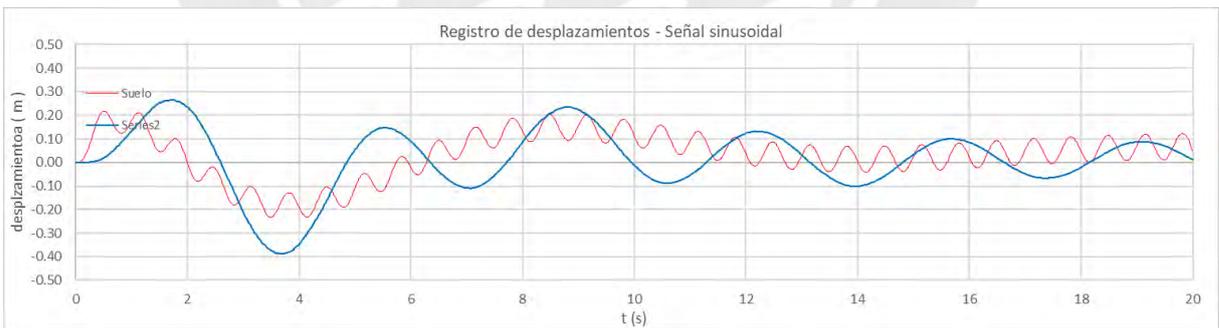


Figura 5. 4: Comparativo de respuesta de desplazamientos del Modelo 3 en Ansys

Finalmente, además de verificar que la plataforma de protección sí reduce los efectos sísmicos, se debe indicar un factor importante en el diseño de la plataforma que es el confort de las personas ante las vibraciones. Allen y Murray (1993) proponen un rango de frecuencias de confort según el tipo de actividad que se realice en un espacio:

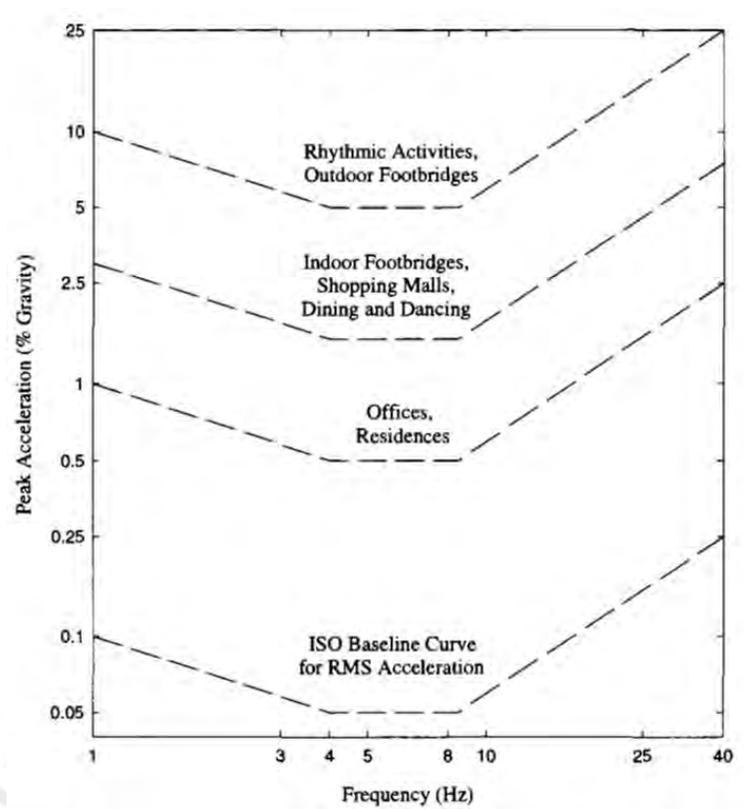


Figura 5. 5: Frecuencias de confort ante vibraciones.

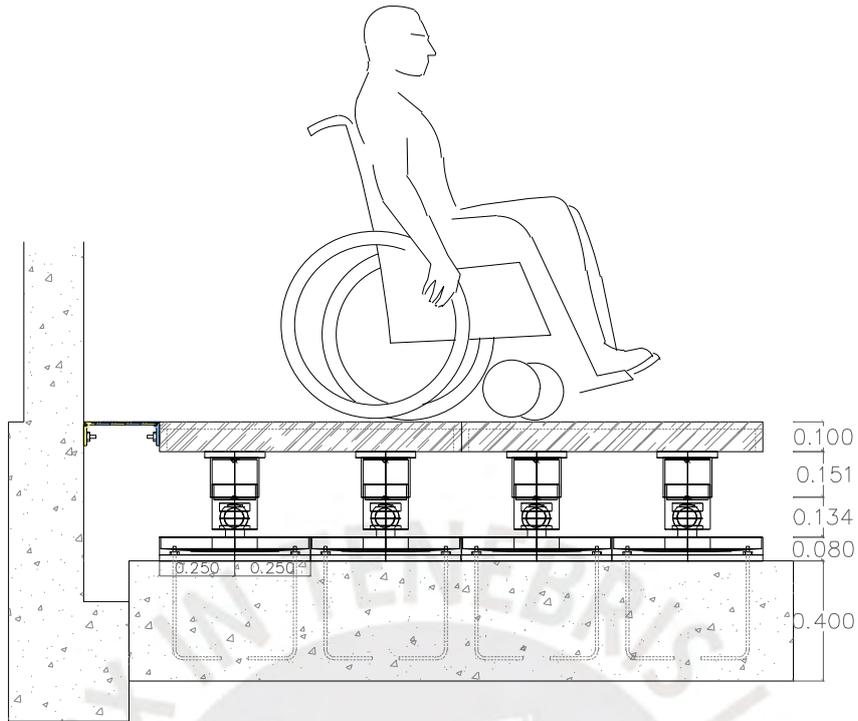
Fuente: Allen y Murray, 1993

Se observa que el confort de las personas se logra para picos de aceleraciones por debajo de $0.025\text{ g} = 0.25\text{ m/s}^2$. La plataforma en todos los casos y modelos responde con una aceleración pico menor a 0.50 m/s^2 .

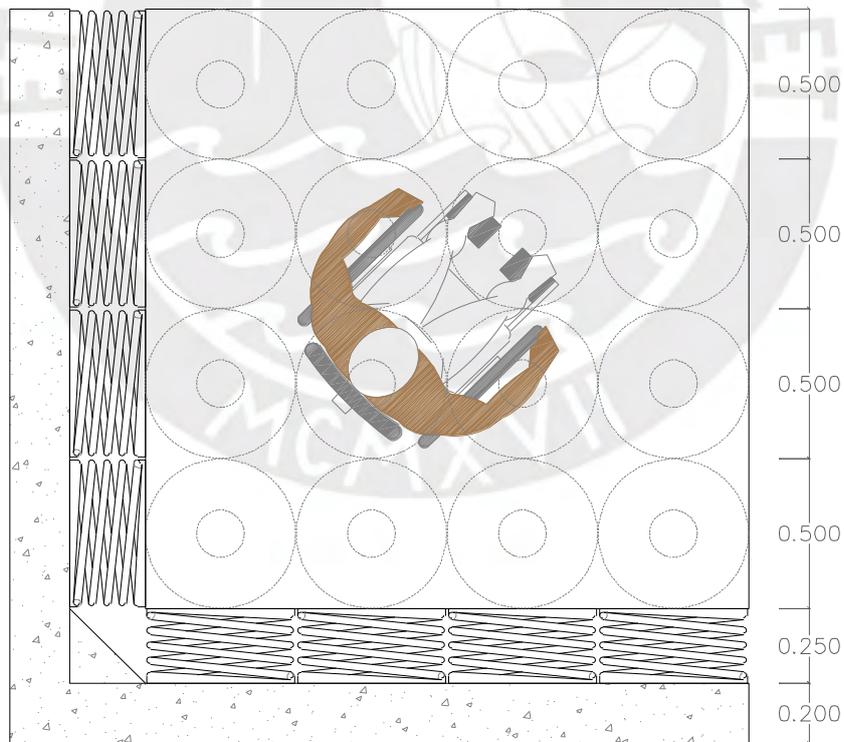
5.5 PLANOS DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO SÍSMICO MODULAR

A continuación, se muestra una elevación y planta del sistema de aislamiento, en un área de 2m^2 (Ver [Figura 5.6](#)), que se coloca en un ambiente del primer nivel de una edificación. Para que la plataforma quede al nivel del piso terminado, se debe excavar entre 80cm y 100cm: 40cm para el sistema, y entre 40cm y 60cm más para la cimentación.

En la [Figura 5.7](#) se muestra el detalle de una unidad o módulo del sistema de aislamiento sísmico, de planta cuadrada de 50 cm x 50 cm.



Elev.
esc: 1/25



Planta
esc: 1/25

Figura 5. 6: Elevación y planta de una plataforma de 2.0 m x 2.0 m

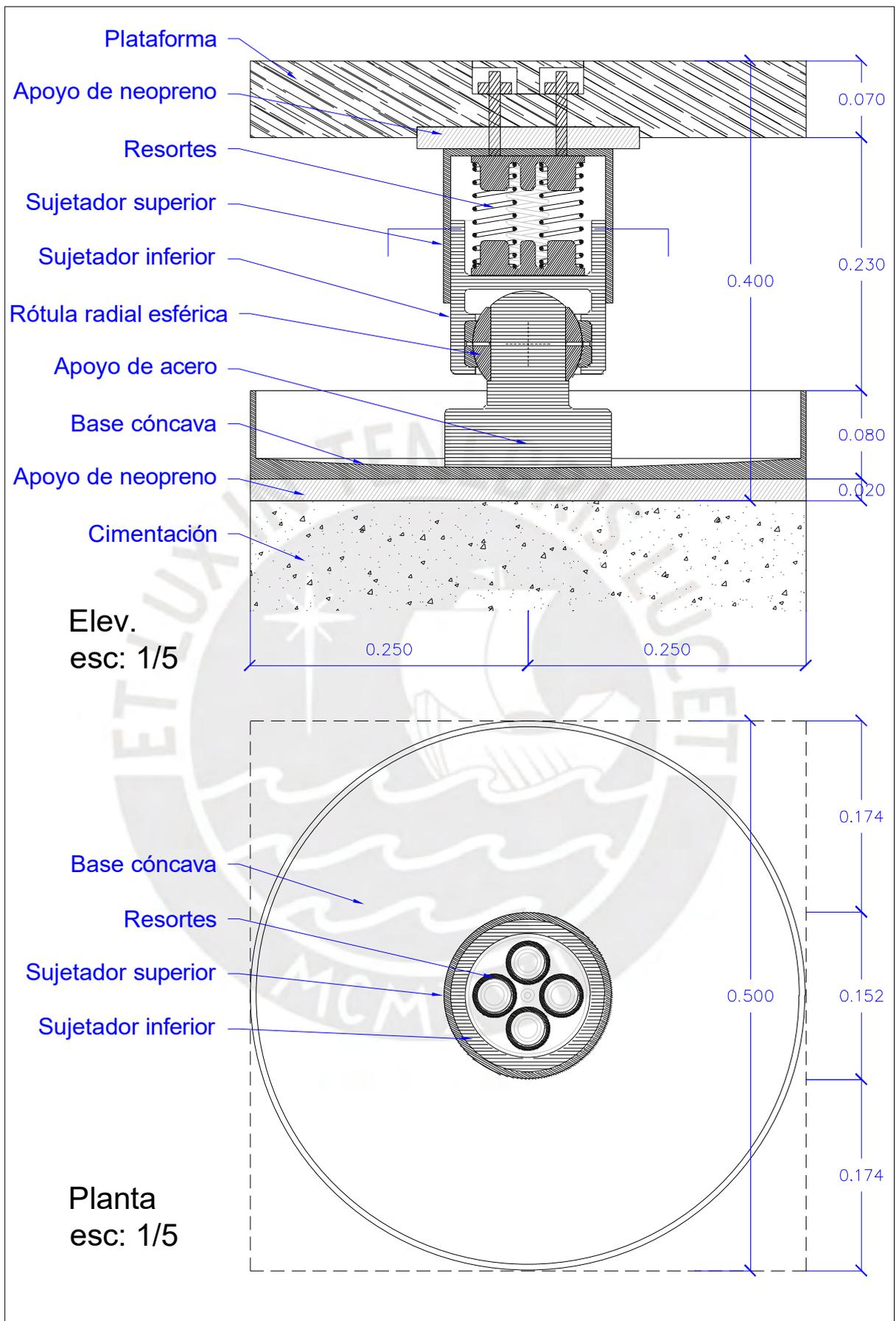


Figura 5. 7: Corte y planta de la plataforma unitaria

Los elementos necesarios para un módulo del sistema de aislamiento sísmico son:

- Una plataforma cuadrada de 500mm x500mm, de 70mm de espesor.
- Dos apoyos cuadrados, de neopreno, de 20mm de espesor. Un apoyo mide 500mm x 500mm, y el otro 200mm x 200mm.
- Dos sujetadores cilíndricos, de acero. Su sección se detalla en la [Figura 5.7](#).
- Cuatro resortes de compresión. La longitud inicial es de 150mm, longitud final de 100mm, diámetro externo de 40mm, diámetro del resorte de 4mm.
- Una rótula radial esférica, de 67mm de diámetro libre interno, 114mm de diámetro total, 67mm de altura de la pieza interna, y 42mm de altura de la pieza externa.
- Un apoyo cilíndrico, de sección tipo T invertida (Ver [Figura 5.7](#)). La parte superior tiene un diámetro de 67mm, para encajar con la rótula radial esférica. La parte inferior es de forma esférica, de radio 3.5m.
- Una base circular, de 0.25m de radio, concavidad de 3.50m, y coeficiente de fricción de 2.5%. La base tiene un borde de 60mm de altura, para contener al apoyo tipo T invertida.
- Pernos de anclaje.
- Una cimentación de concreto, de altura entre 0.40m y 0.60m.

La mayoría de las piezas se pueden comprar en el Perú, o exportar de China. Solo dos piezas deberán ser fabricadas: el apoyo tipo T invertida, y la base cóncava.

Asimismo, se ha estimado el costo referencial de un módulo. El precio varía significativamente en función a la cantidad requerida. Por ahora, el costo sería de aproximadamente s/. 700.

- Plataforma cuadrada	s/. 100
- Apoyos de neopreno	s/. 80
- Sujetadores	s/. 100
- Resortes	s/. 50
- Rótula radial esférica	s/. 30
- Apoyo tipo T invertida	s/. 80
- Base cóncava de acero	s/. 190
- Pernos	s/. 30
- Concreto	s/. 40

5.6 EJEMPLOS DE APLICACIÓN

La razón de tener un sistema de aislamiento modular, cada 0.25m^2 de área en planta, es que se pueda adaptar en el interior de diferentes ambientes de estructuras ya existentes. A continuación, se presentan los planos de ubicación del sistema modular, dentro de un ambiente del primer piso de:

- una vivienda donde reside una persona en silla de ruedas. Podría aislarse la habitación y servicios de la persona vulnerable. La plataforma debe separarse 25cm de los muros de la estructura existente. Los espacios para el desplazamiento deben ser de 1.00m como mínimo y 1.50m si se desea que la persona pueda girar los 360° . En la [Figura 5.9](#) se presenta la vista en planta de la habitación, con un enfoque en la accesibilidad: puertas corredizas, lavatorio giratorio y que permite el acercamiento de una persona en silla de ruedas, ducha con pendiente y sin sardinel, entre otros.
- el área de emergencias de un hospital. Por ejemplo, se podría aislar el ambiente donde esperan los pacientes con suero, en silla de ruedas, pacientes en camillas, entre otros. En la [Figura 5.10](#) se observa que dentro del perímetro de la plataforma se tienen barandas, para mantener distancia a los muros, y también una estructura que permite el colgado de suero.
- un edificio pequeño con contenidos delicados y/o costosos. Por ejemplo, el centro de cómputo de alguna empresa. El área es libre. En la [Figura 5.11](#) se observa el caso de una plataforma de aislamiento de $3.00\text{m} \times 4.00\text{m}$.

Se debe indicar que, en todos los casos, las plataformas deben alejarse de la estructura existente en 25cm. La junta debe permitir el paso a nivel de las personas, un tema que aún no está bien resuelto por las juntas existentes en el mercado. No es parte de los alcances de esta tesis, pero en la [Figura 5.8](#) se propone una junta tipo tijera, que permita su expansión y contracción hasta 20cm. Sobre esta iría un material elástico como cobertura.



Figura 5. 8: Junta entre el aislador y la estructura existente

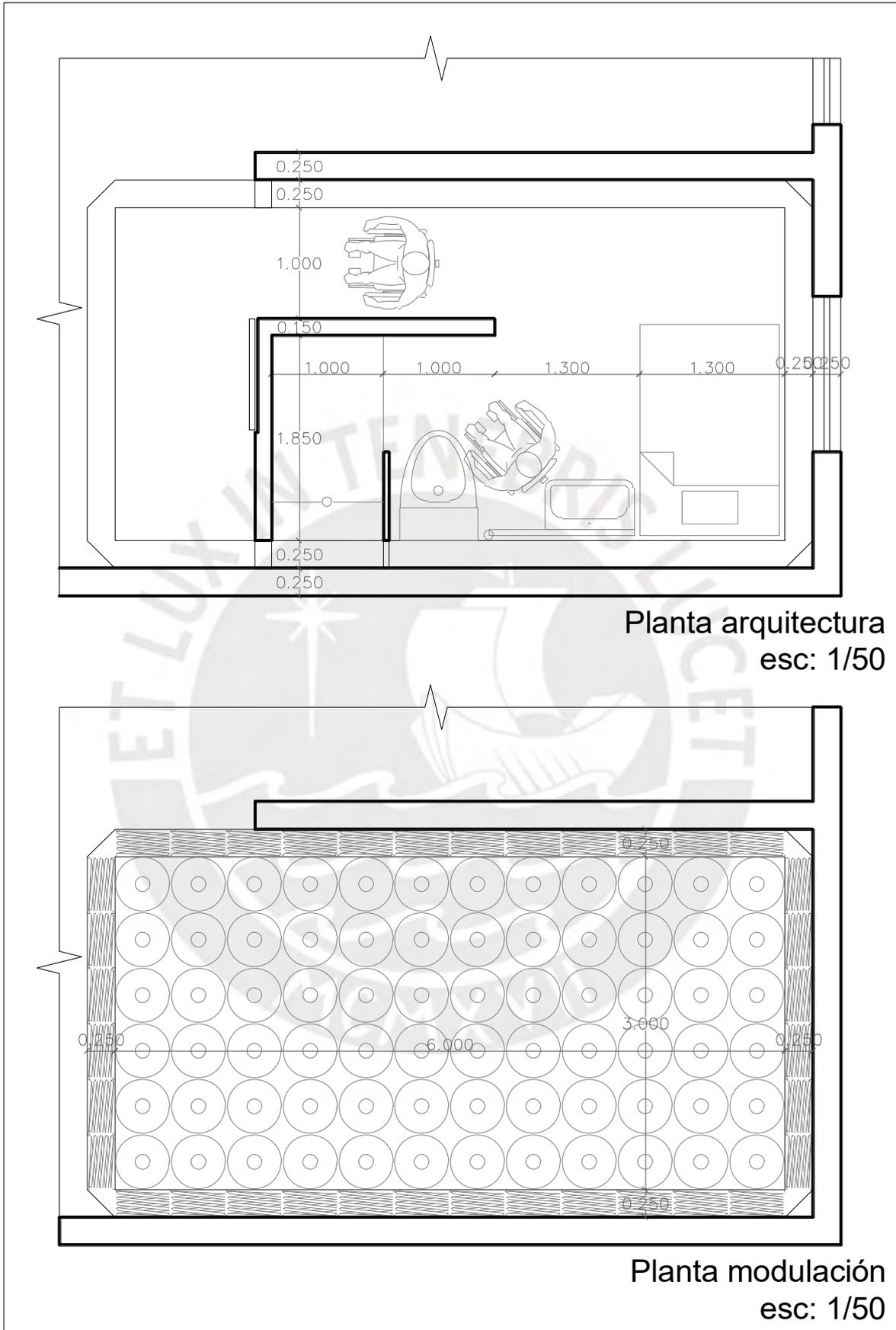
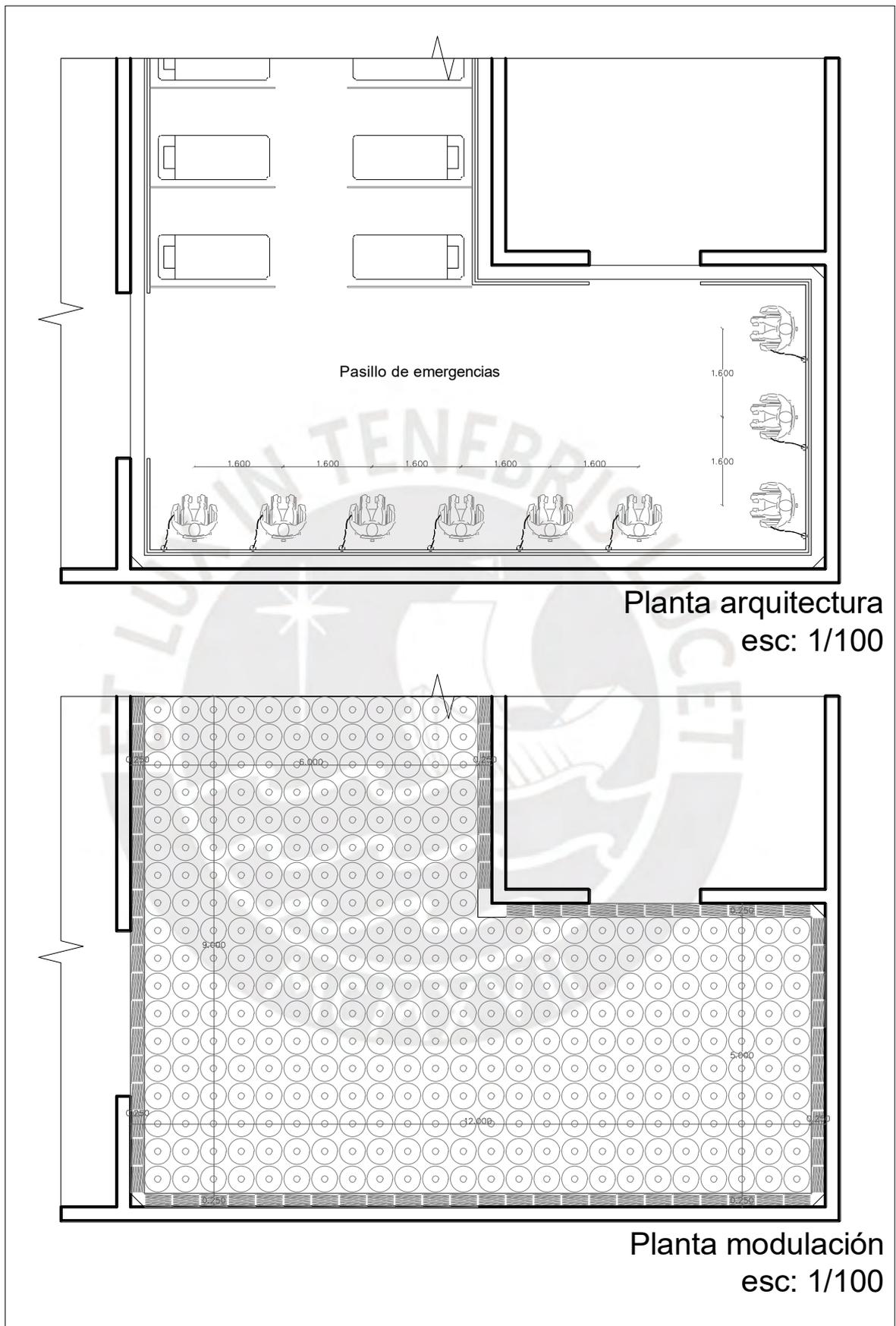


Figura 5. 9: Planta de una habitación sobre la plataforma de aislamiento



Planta arquitectura
esc: 1/100

Planta modulación
esc: 1/100

Figura 5. 10: Planta de un ambiente de hospital sobre la plataforma de aislamiento

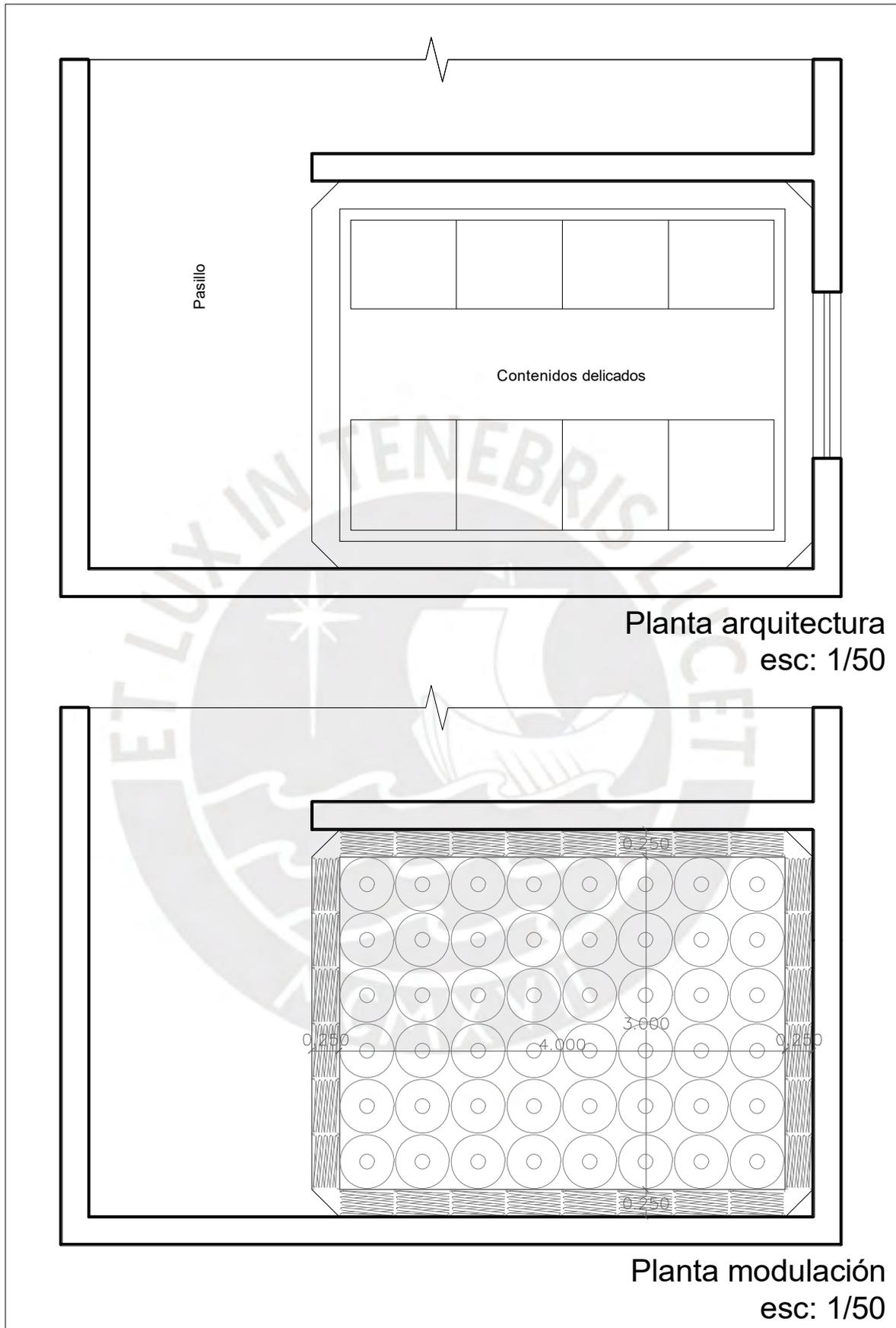


Figura 5. 11: Planta de un sector con contenidos delicados

CONCLUSIONES

Del estudio enfocado en el primer objetivo específico se concluye que se pudo representar la respuesta de un sistema de aislamiento sísmico modular ante solicitaciones sísmicas. Primero, se plantearon distintas propuestas, y se evaluaron preliminarmente con fórmulas sencillas de la dinámica de estructuras. Una vez seleccionada la mejor propuesta, se definió un modelo matemático. El modelo se simplifica en 4 elementos denominados: Base cóncava, Rótula, Sujetador, y Plataforma. Estos elementos cumplen con las condiciones del equilibrio dinámico, equilibrio que se resuelve con ayuda del código ODE15s del programa Matlab. Asimismo, se define un modelo numérico que considera la geometría y propiedades mecánicas de los elementos del sistema. La respuesta de aceleraciones y desplazamientos, de los distintos elementos, se obtiene con ayuda del programa Ansys Workbench.

Del estudio enfocado en el segundo objetivo específico se concluye que, para optimizar los parámetros dinámicos, se evaluó la influencia de cinco variables sobre la aceleración y el desplazamiento de respuesta, para dos de los acelerogramas que representan al sismo más fuerte en Perú (Arequipa 2001 y Pisco 2007). Se iteró para distintos valores de rigidez (k), distintos valores de masa (m), distintos valores de coeficiente de rugosidad de los apoyos cóncavos (u), distintos valores de radio efectivo de la base cóncava (R_{eff}), y finalmente una iteración en simultáneo del radio efectivo y la rugosidad de la superficie cóncava principal. De esta manera, también se concluyó que el radio efectivo de la base cóncava principal y su rugosidad, controlan la respuesta del sistema de aislamiento sísmico modular. Ambas variables, reflejan el incremento del periodo natural de la estructura.

Del estudio enfocado en el tercer objetivo específico se concluye que el parámetro dinámico principal es el periodo natural del sistema, que debe ser mucho mayor que el periodo en el suelo. Para el caso del sistema de aislamiento modular propuesto en base a apoyo deslizante, el periodo se logra incrementar al aumentar el radio de la base cóncava y reducir el coeficiente de fricción. Se determinó que el radio efectivo para el sistema debe ser cercano a 3.5m, y que el coeficiente de fricción entre la base cóncava y rótula debe ser cercano a 2.5%. Se evaluó que el amortiguamiento no influye mucho, pero debe mantenerse entre 2.5% y 5%.

Del estudio enfocado en el cuarto objetivo específico se concluye que los parámetros dinámicos del modelo teórico están validados con la simulación sísmica en Ansys Workbench 2019 R1. En el programa Ansys se considera la mayor cantidad de propiedades que tendría una plataforma de protección real, construida y ensayada en una mesa vibradora. También se puede mencionar que el modelo teórico de esta tesis se basó en

artículos que analizan modelos teóricos de sistemas de aislamiento de edificios, que sí tuvieron una validación con ensayos experimentales en laboratorio. Para el desarrollo de la tesis primero se replicó los estudios de esos artículos, para verificar que el código de ODE15s en Matlab generado, daba los mismos resultados que los estudios de esos artículos. A partir de esto, se pudo modificar el código para que resuelva el modelo propuesto en esta tesis. Tanto para el caso del modelo en Matlab como el modelo en Ansys, se concluye que las respuestas de aceleraciones disminuyen considerablemente, y los desplazamientos se realizan en periodos más largos. Para las dos señales sísmicas utilizadas y escaladas a sismo severo, se logró una reducción de la aceleración máxima en la plataforma del orden del 85% menos que la aceleración máxima en el suelo. Con este resultado, se da respuesta afirmativa a la hipótesis de esta tesis: El modelo de sistema de aislamiento modular propuesto en la tesis disminuye la aceleración, en la plataforma sobre la que se encontrarían personas vulnerables y/o contenidos delicados, y genera un movimiento suave cuando es simulado ante un acelerograma de un sismo severo de la costa peruana.

Del estudio enfocado en el quinto objetivo específico se concluye que se pudo diseñar o rediseñar un ambiente en el primer piso de una vivienda donde habite una persona vulnerable, el ambiente de emergencias en el primer piso de un hospital existente, y un ambiente con contenidos delicados de una empresa. En estos tres ejemplos, se requiere de una excavación total de 0.80m a 1.00m de profundidad, para colocar la cimentación de concreto de 0.40m a 0.60m y el sistema de aislamiento de 0.40m de altura. De este modo, la plataforma queda a ras del piso. El costo aproximado de 1m² de plataforma (4 módulos) es de 2000 soles, pero se considera que, al masificarse este diseño, el costo bajará considerablemente. La recomendación estructural es que se debe verificar el comportamiento de los contenidos dentro de la estructura durante un sismo, y no solamente verificar la operatividad de la infraestructura. La recomendación arquitectónica es que se diseñen espacios amplios, sin desniveles (un centímetro de desnivel ya se considera demasiado), que consideren que una persona vulnerable que se desplaza en su vivienda requiere un ancho efectivo de mínimo 1.00 m. Esto deberá asegurarse en los pasillos, puertas (incluidas las puertas de servicios higiénicos), y el mobiliario (por ejemplo, el espacio entre la cama y la pared). Por otra parte, si se adapta la propuesta en ambientes de emergencias de un hospital existente, la plataforma debe tener un retiro de al menos 20cm de los muros de la estructura existente. También es necesario proponer una junta estructural que sea deformable en su plano y permita continuidad en el piso existente y la plataforma de aislamiento. Asimismo, en el caso del ambiente con contenidos delicados, se deberá adaptar los demás sistemas e instalaciones dentro de la plataforma. Finalmente, dada la masa necesaria para optimizar el funcionamiento del sistema, se puede implementar la

propuesta hasta en edificaciones de dos pisos. Sus ambientes deben ser rectangulares y con un ancho mínimo de 3.00 m.

También, del estudio enfocado en el quinto objetivo específico se concluye que las respuestas del modelo se reducen lo suficiente como para tener una vibración adecuada. Se cumple con los rangos permisibles según Allen y Murray (1993), y la norma ISO 2631: Vibración en el cuerpo humano.

Sobre el método teórico, se pudo representar correctamente el equilibrio dinámico (horizontal) con el código ODE15s de Matlab/Simulink. El método de convergencia, definida una tolerancia, es una herramienta potente que permite analizar fácilmente la respuesta de una estructura a una señal sísmica real. La evaluación para cada juego de datos tomó un promedio de 10 minutos, un tiempo relativamente pequeño que permitió probar diferentes parámetros. Algunos parámetros destacados son el radio de la base cóncava y esférica. El radio debe ser al menos de 3 metros. El modelo más eficiente tiene un radio de 3.50 metros. En cuanto a los coeficientes de rugosidad, conviene que sean lo más pequeños posibles. En los gráficos comparativos de aceleración del suelo y aceleración en la superficie de la plataforma se observó siempre una reducción de la aceleración, así como una variación menos brusca. La reducción se aprecia más ante sismo severo, luego ante sismo moderado, y se aprecia poco en un sismo leve. El caso del sismo leve no estaría mal ya que a priori no hay inconvenientes en un sismo leve y aun así el sistema reduce su efecto a la mitad. En los gráficos comparativos de desplazamientos en el suelo y en la plataforma se observa un comportamiento pausado, aunque las amplitudes máximas son similares entre la plataforma y el suelo, por lo que será más cómodo que en el suelo.

Sobre el método numérico, se pudo representar el prototipo con el software Ansys Workbench, aún con licencia estudiantil. Primero se analizó un modelo simplificado para respuesta en una sola dirección. Los resultados fueron igualmente alentadores como en el caso del método teórico. Primero se probó con señales sinusoidales de desplazamientos. La exploración fue para amplitudes entre 5cm y 15cm, así como para frecuencias entre 1hz y 3hz. Se observó mejores comportamientos para frecuencias de 2 a 3hz, sin embargo, estas frecuencias no son las que predominan en los sismos peruanos.

No se tiene un solo modelo de sistema de aislamiento sísmico modular para cualquier lugar, ya que su comportamiento depende de muchos factores como la caracterización del sismo local, el radio de la base cóncava, el coeficiente de rugosidad, los máximos desplazamientos que definen el tamaño de la base cóncava, entre otros.

La geometría de la plataforma se optimiza básicamente al aumentar el radio de la base cóncava. El desempeño de la plataforma se optimiza al reducir el coeficiente de rugosidad de la base cóncava. Los valores de rigidez y amortiguamiento de la suspensión para el eje vertical estabilizan el sistema y lo acomodan a las variaciones verticales que podría haber entre apoyos.

Sobre la viabilidad constructiva del sistema, se concluye que sería posible, ya que se utilizan componentes existentes, o fáciles de fabricar. El punto crítico será la fabricación de la base cóncava de radio de 3.5m, y rugosidad de 2.5%.

RECOMENDACIONES

Esta tesis explora sistemas de protección sísmica que se puedan implementar en ambientes pequeños, para contenidos de poca masa, en el primer piso de edificaciones existentes. Esto debido a que las personas más vulnerables no necesariamente se encontrarán en un hospital con aisladores sísmicos sino muy probablemente en sus casas. Por otra parte, existen contenidos delicados y de mucho valor, que se encuentran en edificaciones pequeñas o antiguas, y no tienen aislamiento sísmico.

En este primer paso se consideró solo el estudio del piso, como un dispositivo que se pueda adaptar en edificaciones existentes de 1 o 2 niveles. Se ubicaría en el primer piso, por ser el lugar lógico donde se encuentran los adultos mayores, y las personas con discapacidad física en general, y porque se podrá excavar el espacio suficiente para colocar el sistema y que la plataforma quede a nivel del primer piso. Un siguiente paso en la investigación es el diseño de un techo, sujeto a la plataforma, que evite que la estructura existente sobre dicho sistema pueda caer sobre sus ocupantes. Este objetivo es relativamente fácil de alcanzar dado que en la optimización de parámetros se observó que se necesita más masa para estabilizar la plataforma, que la que corresponde a un solo piso o plataforma. En la optimización de parámetros se encontró que la masa óptima del sistema de protección es de 1000 kg/m². Actualmente entre el sistema de apoyos y la plataforma se tiene unos 500kg/m². Por lo tanto, se tiene un margen suficiente para incluir el techo, y hasta un segundo nivel.

Se puede optimizar el diseño para habitar hasta en 2 niveles. Se considera que más allá de esto ya no sería una opción viable frente a sistemas de aislamiento y amortiguamiento existentes. Asimismo, desde el punto de vista de la accesibilidad, no tiene sentido tener viviendas de varios niveles. Esto se debe a que todos sus habitantes, en algún momento

serán adultos mayores, y les sería difícil acceder a los pisos superiores. Cabe recordar, que el uso de ascensores no es una opción viable. Por ejemplo, durante un sismo, no se pueden utilizar.

Otro siguiente paso es representar también la respuesta del cuerpo de la persona, o del contenido delicado. Por ejemplo, se podría modelar el conjunto persona-silla de ruedas. Dados los actuales avances de otras disciplinas, modelar el cuerpo humano como un sistema de "n" grados de libertad será posible dentro de poco tiempo. Asimismo, se podría utilizar programas de otras disciplinas, como OpenSim que modela el cuerpo humano y mide los esfuerzos sobre este ante una caminata, un salto, etc. Esto deberá ir de la mano con una evaluación médica en la persona ya que el objetivo en el futuro es que no solo se evite una caída, sino que la persona no entre en pánico, y esto ocurrirá mucho antes de llegar al extremo de caerse.

La herramienta ODE15s es una herramienta potente para resolver sistemas de ecuaciones, a partir de registros como acelerogramas.

El software Ansys Workbench también resultó de mucha utilidad, y su uso es relativamente sencillo. Sin embargo, previamente se debe dominar el diseño en tres dimensiones, y sobre mecánica de materiales.

Un siguiente estudio sería verificar los resultados en un ensayo real en mesa vibradora donde además se pueda monitorear la reacción de las personas.

En esta tesis se considera que el sistema de aislamiento sísmico modular no es solo una cuestión de solidaridad con las personas vulnerables, sino que, en algún momento todos seremos adultos mayores, por lo tanto, todos seremos personas vulnerables.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Al-Bender, F., Lampaert, V., & Swevers, J. (2005). The generalized Maxwell-slip model: A novel model for friction simulation and compensation. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 50 (11), 1883-1887. DOI: 10.1109/tac.2005.858676

Alva, H. J. & Escalaya, M. (2003). "Actualización de los Parámetros Sismológicos en la Evaluación del Peligro Sísmico en el Perú", XIX Simposio Internacional del CISMID: Últimos Avances en la Ingeniería Sísmica y Gestión del Riesgo de los Desastres.

Applied Technology Council (2011). Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage – A Practical Guide. Federal Emergency Management Agency (FEMA) E-74.

Araya, R. & Saragoni, G.R. (1984). Earthquake acelerogram destructiveness potential factor.

Arias, A. (1969). A measure of earthquake intensity. Seminar on Seismic Design of Nuclear Power Plant. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA.

Balandin, D., Bolotnik, N., Pilkey, W., Purtsezov, S. & Shaw, G. (2007). Concept of platform-based impact isolation system for protection of wheelchair occupants from injuries in vehicle crashes. *Medical Engineering and Physics*, 30, 258-267. DOI: 10.1016/j.medengphy.2007.03.004

Bertocci, G., Ha, D., Van Roosmalen, L, Karg, P. & Deemer, E. (2000). Evaluation of wheelchair drop seat crashworthiness. University of Pittsburgh: Department of Rehabilitation Science and Technology. *Medical Engineering and Physics*, 23, 249-257.

Booth, E. (2006). *Earthquake design practice for buildings*. London: Thomas Telford

Bo Yu, Lu Feng Yang & Bing Li. (2015). P-D Effect on Probabilistic Ductility Demand and Cumulative Dissipated Energy of Hysteretic System under Bidirectional Seismic Excitations. *Journal of Engineering Mechanics*. Vol 141 Issue 4

Casimiro, S. (2012). *Desempeño sísmico de edificaciones bajo el sismo de nivel ocasional*. Lima: Versión electrónica.

Chopra, A. K. (2014). *Dinámica de estructuras (Vol. IV)*. Mexico: Pearson.

Chopra, A. K. (1995). Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering. NJ: Prentice Hall.

Civil Digital (2019). Base Isolation System: An outline on principles, types, advantages & applications. Revisado en <https://civildigital.com/base-isolation-system-outline-on-principles-types-advantages-applications/>

Congreso de la República (2012). Ley general de la Persona con Discapacidad y su reglamento: Ley N° 29973.

Congreso de la República (1998). Ley general de la Persona con Discapacidad y su reglamento: Ley N° 27050.

Del Águila, L. (Comp.), & Urtecho, M. (Coord.) (2009). Compendio de normas nacionales e internacionales sobre discapacidad en el Perú. Lima: Kinkos Impresores S. A. C.

Desai, R., Guha, A., & Seshu, P. (2018). Multibody Biomechanical Modelling of Human Body Response to Direct and Cross Axis Vibration. International Conference on Robotics and Smart Manufacturing.

Fenz, D. M., & Constantinou, M. C. (2007). Spherical sliding isolation bearings with adaptative behavior: Theory. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 37 (2), 163-183. DOI: 10.1002/eqe.751

Genatios, C. y Lafuente, M. (2016). Introducción al uso de aisladores y disipadores en estructuras. Caracas: Corporación Andina de Fomento.

Gioncu, V. (2000). Framed structures. Ductility and seismic response: General Report. Journal of Constructional Steel Research, Vol 55, 125-154. Romania.

Ha, D., Bertocci, G., Karg, E., & Deemer, E. (2002). Evaluation of wheelchair sling seat and sling back crashworthiness. University of Pittsburgh: Department of Rehabilitation Science and Technology. Medical Engineering and Physics, 24, 441-448.

Hassan, E., & Mahmoud, H. (2019). Full functionality and recovery assessment framework for a hospital subjected to a scenario earthquake event. Journal of Engineering Structures, 188, 165-177. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.03.008

Hube, M. (2012). Caracterización del movimiento sísmico en ingeniería. Apuntes de clase de maestría. Pontificia Universidad Católica de Chile.

Huerta, J. (2006). Discapacidad y accesibilidad: la dimensión desconocida. (1ra Ed.). Lima: Fondo Editorial del Congreso de la República

Huerta, J. (2007). Discapacidad y diseño accesible: Diseño urbano y arquitectónico para personas con discapacidad. (1ra Ed.). Lima.

Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) (2017). Manual de gestión inclusiva del riesgo de desastres. (1ra Ed.). Lima.

Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) (2015). Perú Características de la población con discapacidad

Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) (2017). Perfil sociodemográfico de la población con discapacidad, 2017.

Instituto Nacional de Normalización de Chile (2009). Norma chilena oficial: NCh 433.Of1996 Modificada en 2009. Diseño sísmico de edificios.

Järvinen, T., Sievänen, H., Khan, K., Heinonen, A., & Kannus, P. (2008). Shifting the focus in fracture prevention from osteoporosis to falls. *BJM*, 336(7636), 124-126. DOI: 10.1136/bmj.39428.470752.AD

Joint Research Centre – European Commission (2012). Eurocode 8: Seismic Design of Buildings.

Kasper, D., et al (2015). *Harrison's Principles of Internal Medicine 19th Edition*. Mc Graw Hill Education

Kelly, J. M., & Konstantinidis, D. (2011). *Mechanics of Rubber Bearings for Seismic and Vibration Isolation*. Chichester, West Sussex, U.K.: Wiley. Retrieved from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsebk&AN=391288&lang=es&site=eds-live&scope=site>

Liang, Y., Cheng, J., Ruzek, J., & Liu, Z. (2018). *Posttraumatic stress disorder following the 2008 Wenchuan earthquake: A 10-years systematic review among highly exposed*

populations in China. Journal of Affective Disorders, 243, 327-339. DOI: 10.1016/j.jad.2018.09.047

Mathworks (2019). *Choose an ODE Solver*. The Mathworks, Inc. Revisado en <https://la.mathworks.com/help/matlab/math/choose-an-ode-solver.html?lang=en>

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia (2010). Reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10.

Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda de Ecuador (2014). Norma ecuatoriana de la construcción (NEC). Peligro sísmico: Diseño sismo resistente.

Ministerio de Infraestructura de Venezuela (2001). Norma venezolana COVENIN 1756-1:2001: Edificaciones sismorresistentes.

Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios de Argentina (2013). Reglamento argentino para construcciones sismorresistentes: INPRES-CIRSOC 103.

Ministerio de Salud del Perú (MINSA) (2019). Plan de simulacro de sismo y tsunami del hospital nacional Hipólito Unanue.

Ministerio de Salud del Perú (2014). Planeamiento hospitalario ante desastres: Guía para el diseño de planes.

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2006). Reglamento Nacional de Edificaciones. Norma Técnica Peruana E.020 Cargas.

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2016). Reglamento Nacional de Edificaciones. Norma Técnica Peruana E.030 Diseño Sismorresistente.

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2018). Reglamento Nacional de Edificaciones. Norma Técnica Peruana E.031 Aislamiento Sísmico.

Mahmoudi, M. (2009). Determining the Maximum Lateral Displacement Due to Server Earthquakes without Using Nonlinear Analysis. World Academy of Science, Engineering and Technology.

Naemin, F. y Kelly, J. (1999). Design of seismic isolated structures: From theory to practice. John Wiley & Sons, Inc.

Naderzadeh, A. (2009). Historical Aspects of Seismic Base Isolation Application. Iranian Society of Structural Engineers.

Organización Mundial de la Salud (OMS) (2008). Pautas para el suministro de sillas de ruedas manuales en entornos de menores recursos.

Organización Mundial de la Salud (2001). Clasificador Internacional del Funcionamiento, de la Discapacidad y de la Salud.

Palacios, A. (2008). El modelo social de discapacidad: orígenes, caracterización y plasmación en la Convención Internacional sobre los Derechos de las Personas con Discapacidad. Madrid: CERMI.

Park, E., Yoon, D., & Choi, Y. (2019). Leave no one behind: Experiences of persons with disability after the 2017 Pohang earthquake in South Korea. International journal of disaster risk reduction. DOI: 10.1016/j.ijdr.2019.101261

Parker, K., Adderson, J., Arseneau, M., & O'Connell, C. (2015). Experience of People With Disabilities in Haiti Before and After the 2010 Earthquake: WHODAS 2.0 Documentation. Archives of physical medicine and rehabilitation. DOI: 10.1016/j.apmr.2015.05.008

Phibbs, S., Good, G., Severinsen, C., Woodbury, E. & Williamson, K. (2014). What about us? Reported experiences of disabled people related to the Christchurch earthquakes. 4th International Conference on Buildings Resilience, Building Resilience 2014, 8-10 September 2014, Salford Quays, United Kingdom. DOI: 10.1016/S2212-5671(14)00930-7

Riddell, R., Hidalgo, P., & Cruz, E. (1989). Response modification factors for earthquake resistant design of short period buildings. Earthquake Spectra, Vol 5, N°3.

Riddell, R. & Newmark, N. M. (1979), "Statistical Analysis of the Response of Nonlinear Systems Subjected to Earthquakes", Civil Engineering Studies, Structural Research Series N°478, University of Illinois, Urbana.

Salas, E. (2012). Análisis de acelerogramas y determinación de espectros de respuesta en la ciudad de Moquegua. Lima: Versión electrónica.

Saragoni, R. (2012). Implicaciones y nuevos desafíos de diseño sísmico de los acelerogramas del terremoto del 2010. Universidad de Chile

Si Youcef, Y. & Chemrouk, M. (2012). Curvature Ductility Factor of Rectangular Sections Reinforced Concrete Beams. *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*. Vol:6.

Smith, D. & Notaro, S. (2009). Personal emergency preparedness for people with disabilities from the 2006-2007 Behavioral Risk Factor Surveillance System. USA. *Journal of Disability and Health*, 2, 86-94. DOI: 10.1016/j.dhjo.2009.01.001

Sorace, S., Terenzi, G., Bitossi, C. & Mori, E. (2016). Mutual seismic assessment and isolation of different art objects. *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 85, 91-102. DOI: 10.1016/j.soildyn.2016.03.014

Structural Engineers Association of California (SEAOC) (1995), "Vision 2000: Performance-based seismic engineering of buildings", Structural Engineers Association of California, Sacramento, CA.

Taghavi, S. & Miranda, E. (2003). Response Assessment of Nonstructural Building Elements. Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) 2003/05.

Takagi, J. & Wada, A. (2017). Recent earthquakes and need for a new philosophy for earthquake-resistant design. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 119, 449-507. DOI: 10.1016/j.soildyn.2017.11.024

Tatsuki, S. (2012). Challenges in Counter-disaster Measures for People with Functional Needs in Time of Disaster Following the Great East Japan Earthquake. *International Journal of Japanese Sociology*, 21. DOI: 10.1111/j.1475-6781.2012.01158.x

Tomata, Y., et al (2014). Impact of the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami on functional disability among older people: a longitudinal comparison of disability prevalence among Japanese municipalities. *J Epidemiol Community Health*, 68, 530-533. DOI: 10.1136/jech-2013-203541

Trifunac, M. D. & Brady, A. G. (1975). A study on the duration of strong earthquake ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 65 (3), 581-626.

Tuohy, R., Stephens, C., & Johnston, D. (2014). Older adults' disaster preparedness in the context of the September 2010-December 2012 Canterbury. New Zealand. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 9, 194-203. DOI: 10.1016/j.ijdr.2014.05.010

Vargas, J., Sosa, C., & Montoya, J. (2019) Stone Bags Seismic Isolation for Vernacular Earth and Stone Construction. In: Aguilar R., Torrealva D., Moreira S., Pando M.A., Ramos L.F. (eds) *Structural Analysis of Historical Constructions*. RILEM Bookseries, vol 18. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-99441-3_164

Vargas, J., Iwaki, C., y Rubiños, A. (2012). Sismo Resistencia en las Entrañas de Caral. XI International Conference on the Study and Conservation of the Earthen Architecture Heritage, Lima, Peru.

Weber, F., Distl, H., & Braun, C. (2017). Isolation performance assessment of adaptative behavior of triple friction pendulum. *Journal of Civil Engineering research*. 7 (1), 17-33. DOI: 10.5923/j.jce.20170701.03

Weber, F., Distl, H., & Braun, C. (2016). Isolation performance of optimized triple friction pendulum. *International refereed journal of engineering and science (IRJES)*. 5, 55-69.

Wittich, C. & Hutchinson, T. (2016). Experimental modal analysis and seismic mitigation of statue-pedestal systems. *Journal of Cultural Heritage*. DOI: 10.1016/j.culher.2016.02.001

Zayas, V. (14 de octubre del 2016). Diseño sísmico para hospitales por el código peruano E 030 para minimizar el daño y mantener la funcionalidad continua. Charla llevada a cabo en la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

Zayas, V. et al (2013). Patente US N° 8,484,911 B2. Washington, DC: Oficina de Patentes y Marcas de E.U.A.

Zheng, G., Qiu, Y., & Griffin, M. (2018). Fore-and-aft and dual-axis vibration of the seated human body: Nonlinearity, cross-axis coupling, and associations between resonances in the transmissibility and apparent mass. *International Journal of Industrial Ergonomics*.

Zhou, X., et al (2015) Risk factors of severity of post-traumatic stress disorder among survivors with physical disabilities one year after the Wenchuan earthquake. China. *Psychiatry Research*, 228, 468-474. DOI: 10.1016/j.psychres.2015.05.062

ANEXOS

1. PROGRAMA EN MATLAB: COMPARACIÓN DE SISMOS PERUANOS



Figura 6.1. Pantalla inicial del programa.

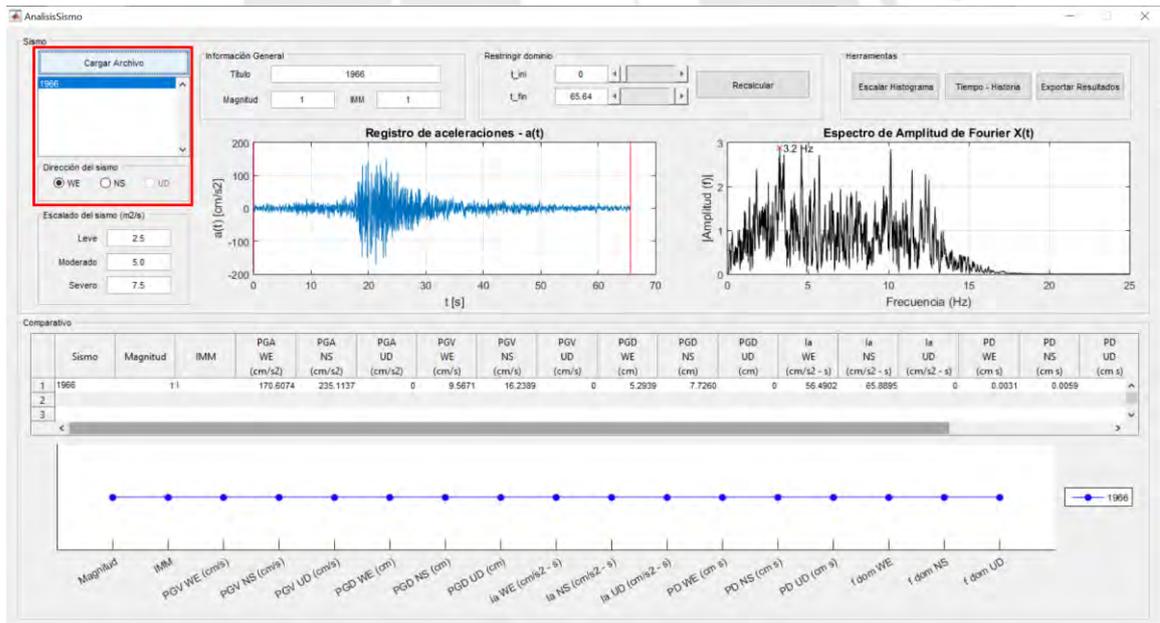


Figura 6.2. Se cargan los registros de acelerogramas, desde un archivo de texto, el cual puede incluir registros en 3 dimensiones.

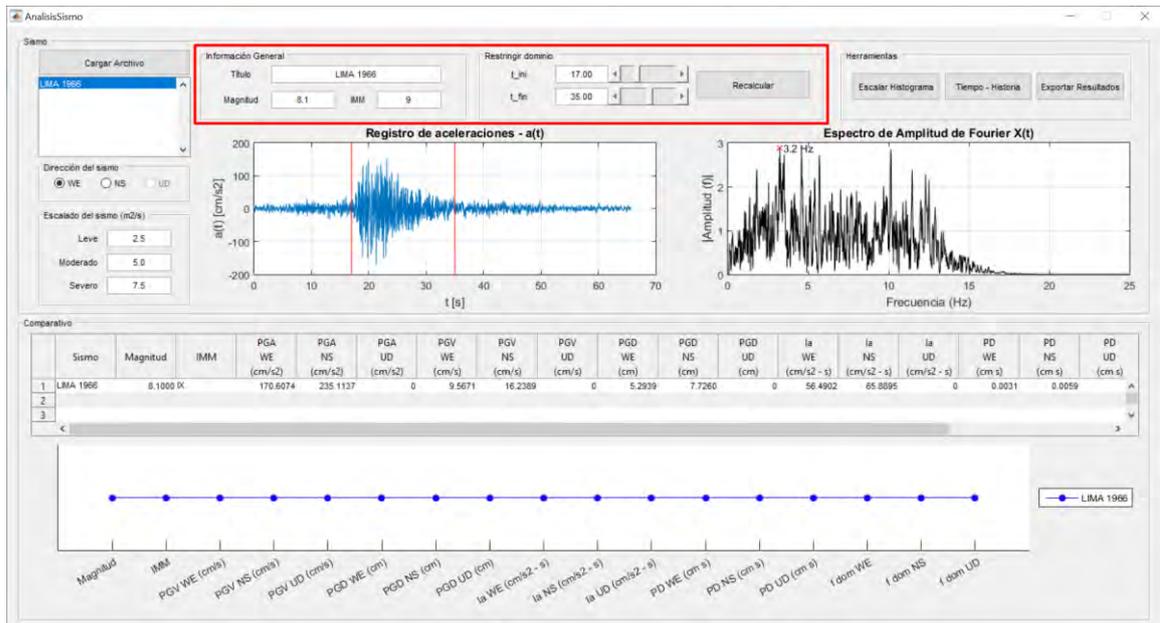


Figura 6.3. Se ingresa la magnitud y escala del sismo y se identifica el rango de tiempo a analizar.

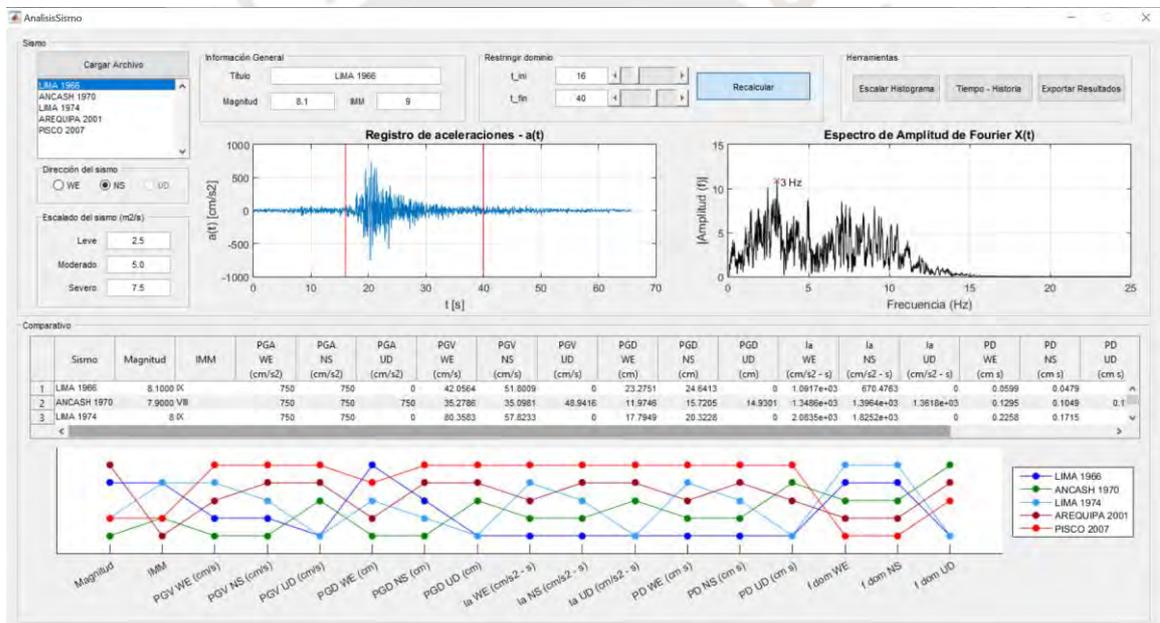


Figura 6.4. Tras cargar varios registros es posible comparar distintos parámetros como PGV, PGA, Intensidad de Arias y Poder destructivo, en las dimensiones disponibles.

2. ECUACIONES DE EQUILIBRIO DINÁMICO EN MATLAB

Planteamiento en Matlab, para ODE15s:

$$\begin{aligned}u_1 &= u(1) \\ \dot{u}_1 &= u(2) \\ u_2 &= u(3) \\ \dot{u}_2 &= u(4) \\ u_3 &= u(5) \\ \dot{u}_3 &= u(6) \\ u_4 &= u(7) \\ \dot{u}_4 &= u(8)\end{aligned}$$

Por lo tanto, las ecuaciones a ingresar a Matlab son:

$$dudt(1) = u(2)$$

$$dudt(2)$$

$$= \left(-C_1(u(2)) - K_1(u(1)) + fh_1 + \frac{(m_2 + m_3 + m_4 + s/c)g}{R_{eff1}}(u(3) - u(1)) + fr_1 - m_1 \ddot{u}_g \right) / m_1$$

$$dudt(3) = u(4)$$

$$dudt(4)$$

$$= \left(-fh_1 - \frac{(m_2 + m_3 + m_4 + s/c)g}{R_{eff1}}(u(3) - u(1)) - fr_1 + fh_2 + \frac{(m_3 + m_4 + s/c)g}{R_{eff2}}(u(5) - u(3)) - m_2 \ddot{u}_g \right) / m_2$$

$$dudt(5) = u(6)$$

$$dudt(6)$$

$$= \left(-fh_2 - \frac{(m_3 + m_4 + s/c)g}{R_{eff2}}(u(5) - u(3)) + C_4(u(8) - u(6)) + K_4(u(7) - u(5)) - m_3 \ddot{u}_g \right) / m_3$$

$$dudt(7) = u(8)$$

$$dudt(8) = (-C_4(u(8) - u(6)) - K_4(u(7) - u(5)) - m_4 \ddot{u}_g) / m_4$$

Donde:

$$fr_1 = kr_1 (|u(3) - u(1)| - d_1) \operatorname{sgn}(u(3) - u(1)), \text{ si } |u(3) - u(1)| \geq d_1$$

$$fr_1 = 0, \text{ si } |u(3) - u(1)| < d_1$$

$$kr_1 = 100 \frac{(m_2 + m_3 + m_4 + s/c)g}{R_{eff1}}$$

$$fh_1 = \mu_1(m_2 + m_3 + m_4 + s/c)g \tanh(10000(u(4) - u(2)))$$

$$fh_2 = \mu_2(m_3 + m_4 + s/c)g \tanh(10000(u(6) - u(4)))$$

3. CÓDIGOS MATLAB DE OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DINÁMICOS DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO

base_ode.m

```
data = dlmread('2001_LMS.csv','',1,0);

tt = data(:,1);
a = data(:,2); % 2:leve 3:moderado 4:severo

tspan = [0 max(tt)];

y0=zeros(8,1); % vector del estado inicial, todo en reposo

opts = odeset('Stats','on','RelTol', 1e-3, 'MaxStep', 1/(2e4));
tic; [t,y]=ode15s(@(t,y) plataformaAislamiento(t, y, a, tt),tspan,y0,opts);
toc; % tic y toc son comandos para medir el tiempo de ejecución en Matlab

save('ode15s_leve_d_50_m4_100');
```

plataformaAislamiento.m

```
function yp = plataformaAislamiento(t, y, ug_t, t_t, u_b)

% Interpolación de la aceleración a tiempo t
% ug_t: acelerograma para AREQUIPA 2001 / PISCO 2007
ug = interp1(t_t, ug_t, t);

% Constantes

m = [17 22 14 m4]; % kg
sc = 50; % kg
mu = [ u1 u2 ]; % adimensional
Reff = [Reff1 0.05]; % m
d = [0.50]; % m
k = [K1 0 0 K4]; % kg/m
c = [150 0 0 150]; %kg.s/m
g = 9.81; %m/s2

% Sliding

ktanh = 1e4;
fh = zeros(2,1);
fh(1) = mu(1) * (m(2) + m(3) + m(4) + sc) * g * tanh( ktanh * (y(4) - y(2)));
fh(2) = mu(2) * (m(3) + m(4) + sc) * g * tanh( ktanh * (y(6) - y(4)));

fr = [0];
kr = 100 * (m(2) + m(3) + m(4) + sc) * (g / Reff(1));
if ( abs(y(3) - y(1)) >= d(1) )
    fr(1) = kr * ( abs( y(3) - y(1) ) - d(1) ) * sign( y(3) - y(1) );
end

yp = zeros(8,1);
yp(1) = y(2);
yp(2) = (-c(1) * y(2) - k(1) * (y(1)) + fh(1) + ...
```

```

        ( m(2) + m(3) + m(4) + sc ) * ( g / Reff(1) ) * ( y(3) - y(1) )
...
        + fr(1) - m(1) * ug)/m(1);
    yp(3) = y(4);
    yp(4) = ( - fh(1) - ( m(2) + m(3) + m(4) + sc ) * ( g / Reff(1) ) * ( y(3)
- y(1) ) ...
        - fr(1) + fh(2) + ( m(3) + m(4) + sc ) * ( g / Reff(2) ) * ( y(5)
- y(3) ) ...
        - m(2) * ug)/m(2);
    yp(5) = y(6);
    yp(6) = ( - fh(2) - ( m(3) + m(4) + sc ) * ( g / Reff(2) ) * ( y(5) - y(3) )
...
        + c(4) * ( y(8) - y(6) ) + k(4) * ( y(7) - y(5) ) - m(3)*ug)/m(3);
    yp(7) = y(8);
    yp(8) = ( - c(4) * ( y(8) - y(6) ) - k(4) * ( y(7) - y(5) ) - m(4)*ug)/m(4);

```

readResult.m

```

load('ode15s_leve_d_50_m4_100')

x = t';
u = y(:,8)';

[n,~] = size(t);
xd = diff([x(3),x,x(n-2)]); % <-- Corrected
ud = diff([u(3),u,u(n-2)]); % <-- Corrected
a_s = (ud(1:end-1)./xd(1:end-1).*xd(2:end) ...
        + ud(2:end)./xd(2:end).*xd(1:end-1)) ...
        ./ (xd(2:end)+xd(1:end-1));

% plot(x,y(:,1));
figure;

% plot(tt, a); % acelerograma
a_g = interp1(tt,a,x);

subplot(2,1,1);
hold on;
plot(x,a_g); % acel piso
% plot(x,a_s); % acel piso
plot(x,a_s+a_g); % acel estructura
legend({'Acelerograma', 'Aceleracion estructura'});
grid on;
max(abs(a_s+a_g))

subplot(2,1,2);

hold on;
v_g = cumtrapz(x, a_g);
d_g = cumtrapz(x, v_g);
plot(x, d_g);
plot(x, d_g+y(:,7)');
grid on;
legend({'Suelo', 'Estructura'});
% plot(x, a_s - a_g);

```

4. CÓDIGOS MATLAB DE RESPUESTA EN EL TIEMPO, DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO, PARA ACELERACIÓN Y DESPLAZAMIENTOS.

base_ode.m

```
data = dlmread('2001_LMS.csv',' ',1,0);

tt = data(:,1);
a = data(:,2); % 2:leve 3:moderado 4:severo

tspan = [0 max(tt)];

y0=zeros(8,1); % vector del estado inicial, todo en reposo

opts = odeset('Stats','on','RelTol', 1e-3, 'MaxStep', 1/(2e4));
tic; [t,y]=ode15s(@(t,y) plataformaAislamiento(t, y, a, tt),tspan,y0,opts);
toc; % tic y toc son comandos para medir el tiempo de ejecución en Matlab

save('ode15s_leve_d_50_m4_250');
```

plataformaAislamiento.m

```
function yp = plataformaAislamiento(t, y, ug_t, t_t)

% t

% Interpolate the data set (ft,f) at time t
ug = interp1(t_t, ug_t, t);

% Constantes

m = [17 22 14 250]; % kg
sc = 50; % kg
mu = [ 0.025 0.05 ]; % adimensional
Reff = [3.50 0.05]; % m
d = [0.50]; % m
k = [85000 0 0 85000]; % kg/m
c = [150 0 0 150]; %kg.s/m
g = 9.81; %m/s2

% Sliding

ktanh = 1e4;
fh = zeros(2,1);
fh(1) = mu(1) * (m(2) + m(3) + m(4) + sc) * g * tanh( ktanh * (y(4) -
y(2)));
fh(2) = mu(2) * (m(3) + m(4) + sc) * g * tanh( ktanh * (y(6) - y(4)));

fr = [0];

kr = 100 * (m(2) + m(3) + m(4) + sc) * (g / Reff(1));

if ( abs(y(3) - y(1)) >= d(1) )
    fr(1) = kr * ( abs( y(3) - y(1) ) - d(1) ) * sign( y(3) - y(1) );
end
```

```

yp = zeros(8,1);
yp(1) = y(2);
yp(2) = (-c(1) * y(2) - k(1) * (y(1)) + fh(1) + ...
        ( m(2) + m(3) + m(4) + sc ) * (g / Reff(1)) * (y(3) - y(1))
...
        + fr(1) - m(1) * ug)/m(1);
yp(3) = y(4);
yp(4) = (- fh(1) - ( m(2) + m(3) + m(4) + sc ) * (g / Reff(1)) * (y(3)
- y(1)) ...
        - fr(1) + fh(2) + ( m(3) + m(4) + sc ) * (g / Reff(2)) * (y(5)
- y(3)) ...
        - m(2) * ug)/m(2);
yp(5) = y(6);
yp(6) = (- fh(2) - ( m(3) + m(4) + sc ) * (g / Reff(2)) * (y(5) - y(3))
...
        + c(4) * (y(8) - y(6)) + k(4) * (y(7) - y(5)) - m(3)*ug)/m(3);
yp(7) = y(8);
yp(8) = (- c(4) * (y(8) - y(6)) - k(4) * (y(7) - y(5)) - m(4)*ug)/m(4);

```

readResult.m

```

load('ode15s_leve_d_50_m4_250')

x = t';
u = y(:,8)';

[n,~] = size(t);
xd = diff([x(3),x,x(n-2)]); % <-- Corrected
ud = diff([u(3),u,u(n-2)]); % <-- Corrected
a_s = (ud(1:end-1)./xd(1:end-1).*xd(2:end) ...
        + ud(2:end)./xd(2:end).*xd(1:end-1)) ...
        ./ (xd(2:end)+xd(1:end-1));

% plot(x,y(:,1));
figure;

% plot(tt, a); % acelerograma
a_g = interp1(tt,a,x);

subplot(2,1,1);
hold on;
plot(x,a_g); % acel piso
% plot(x,a_s); % acel piso
plot(x,a_s+a_g); % acel estructura
legend({'Acelerograma', 'Aceleracion estructura'});
grid on;
max(abs(a_s+a_g))

subplot(2,1,2);

hold on;
v_g = cumtrapz(x, a_g);
d_g = cumtrapz(x, v_g);
plot(x, d_g);
plot(x, d_g+y(:,7)');
grid on;
legend({'Suelo', 'Estructura'});
% plot(x, a_s - a_g);

```