

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATÓLICA DEL PERÚ**

Escuela de Posgrado



Evaluación del desempeño de un hospital aislado con dispositivos de goma (LRB) y de péndulo friccional (FPS)

Tesis para obtener el grado académico de Maestro en Ingeniería Civil que presenta:

Froilan Carlos Barrientos Castilla

Asesor:

Juan Alejandro Muñoz Pelaez

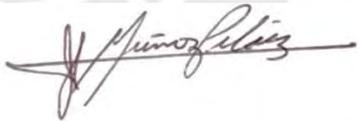
Lima, 2024

Informe de Similitud

Yo, Juan Alejandro Muñoz Peláez, docente de la Escuela de Posgrado de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la Tesis titulada "*Evaluación del desempeño de un hospital aislado con dispositivos de goma (LRB) y de péndulo friccional (FPS)*" del autor Froilan Carlos Barrientos Castilla, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 19 %. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 05/09/2024
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lima 20 de setiembre de 2024

Apellidos y Nombres del asesor: Muñoz Peláez, Juan Alejandro	
DNI : 09857570	
ORCID: 0000-0002-3719-4721	
Firma:	

AGRADECIMIENTO

Expreso mi gratitud a Dios, a mis padres, Froilán y Nicolasa, a mi hermana Ángela, y a mi asesor de tesis, el ingeniero Muñoz, por su apoyo, orientación y motivación incondicionales a lo largo de la realización de este trabajo.



RESUMEN

Los hospitales deben seguir operando durante y después de un terremoto con la finalidad de asegurar la continuidad de los servicios. Para ello se usa el aislamiento sísmico. Esta tesis evalúa el desempeño de un hospital peruano en la ciudad de Moquegua, ubicado en la zona de mayor sismicidad peruana y suelo intermedio (Z4 y S2 según la NTE E.030). Se utilizan dos tipos de aisladores: elastoméricos y péndulos friccionales. Se desarrolla el análisis del desempeño empleando el Análisis Dinámico Incremental (IDA) con un modelo no lineal del edificio aislado.

Los resultados del desempeño estructural muestran que para un PGA de 0.7g (sismo con periodo de retorno de 2500 años) las derivas máximas promedio con dispositivos de goma y de péndulo friccional son de 5.8‰ y 5.5‰, respectivamente. Además, las rotaciones inelásticas máximas promedio de columnas y vigas resultaron ser una fracción del límite de Ocupación Inmediata: de 0.55 y 0.54 para goma, y 0.40 y 0.52 para péndulo friccional.

En cuanto al desempeño no estructural, las aceleraciones máximas promedio de piso son de 0.40g con goma y 0.50g con péndulos friccionales. Según HAZUS el umbral de daño leve en elementos no estructurales es 0.45g.

Se concluye que con ambas opciones la estructura quedaría en estado de ocupación inmediata. En cuanto a los elementos no estructurales sensibles a aceleraciones, el sistema con goma si lograría dar la protección necesaria (90% del límite de HAZUS). En cambio, con aisladores friccionales no se lograría la protección necesaria (110% del límite de HAZUS).

ÍNDICE

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo General, objetivos específicos y alcance.....	1
CAPITULO 2. ANTECEDENTES.....	3
2.1 Necesidad de proteger la infraestructura hospitalaria.....	3
2.2 Categorización de la infraestructura hospitalaria en Perú.....	3
2.3 Normativa de aislamiento sísmico según E.031 y ASCE 7-16	3
2.4 Aspectos históricos del aislamiento sísmico.....	5
2.4.1 Aislamiento sísmico en hospitales.....	5
2.5 Organización del documento	6
CAPITULO 3. AISLAMIENTO SÍSMICO	7
3.1 Teoría y objetivos del aislamiento sísmico	7
3.1.1 Tipos de aislamiento pasivo	8
3.2 Aisladores elastoméricos	8
3.2.1 Modelo para aisladores elastoméricos.....	9
3.3 Aisladores de péndulo friccional	11
3.3.1 Modelos para aisladores de péndulo friccional	11
CAPITULO 4. EVALUACION Y DESEMPEÑO DE LA ESTRUCTURA	14
4.1 Criterios de desempeño según SEAOC y FEMA.....	14
4.1.1 Comité Visión 2000 - SEAOC	14
4.1.2 FEMA.....	15
4.2 Métodos de análisis para calcular la respuesta estructural	16
4.2.1 Análisis Esático no lineal (Pushover).....	17
4.2.2 Análisis Dinámico Incremental (IDA)	20
CAPITULO 5. ANÁLISIS Y DISEÑO DE UNA EDIFICACIONHOSPITALARIA - CASO	

DE ESTUDIO	23
5.1 Características del hospital.....	23
5.2 Análisis y Diseño de la estructura con dispositivos de goma.....	24
5.2.1 Análisis de la estructura de base fija	25
5.2.2 Predimensionamiento del sistema de aislamiento con dispositivos de goma	26
5.2.3 Diseño preliminar del sistema de aislamiento con dispositivos de goma.....	26
5.2.4 Diseño final del sistema de aislamiento con dispositivos de goma	31
5.2.5 Diseño de elementos estructurales.....	42
5.3 Análisis y diseño con dispositivos de péndulo friccional	44
5.3.1 Predimensionamiento del sistema de aislamiento con dispositivos de péndulo friccional	44
5.3.2 Diseño preliminar del sistema de aislamiento con dispositivos de péndulo friccional	44
5.3.3 Diseño final del sistema de aislamiento con dispositivos de péndulo	47
5.3.4 Diseño de elementos estructurales.....	56
5.4 Comparación entre goma y péndulo.....	58
 CAPITULO 6. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LA ESTRUCTURA AISLADA CON GOMA Y PÉNDULO	 61
6.1 Características de los modelos.....	61
6.1.1 Modelo de los dispositivos de aislamiento.....	61
6.1.2 Modelo de la estructura	61
6.2 Análisis Dinámico Incremental	66
6.2.1 Análisis Dinámico Incremental de la estructura aislada con dispositivos de goma	67
6.2.2 Análisis Dinámico Incremental de la estructura aislada con dispositivos de péndulo	73
6.3 CALIFICACIÓN DEL DESEMPEÑO.....	78
6.3.1 Calificación del desempeño de los componentes estructurales	79
Rotaciones Inelásticas en goma.....	82
Rotaciones Inelásticas en péndulo.....	86
6.3.2 Evaluación del desempeño de los componentes no estructurales.....	89
CAPITULO 7. CONCLUSIONES.....	99



INDICE TABLAS

Tabla 2.1 Categorías de los hospitales según MINSA (MINSA, 2020).....	3
Tabla 2.2 Factores de modificación lambda máximo para fabricantes calificados E.031 (E.031, 2019).....	4
Tabla 2.3 Factores de modificación lambda mínimo para fabricantes calificados E.031 (E.031, 2019).....	4
Tabla 4.1 Nivel de Desempeño – Intensidad Sísmica según SEAOC (SEAOC,2000)	15
Tabla 4.2 Desempeño según FEMA 356 (FEMA 356,2000)	16
Tabla 5.1 Cargas Norma E.020 (E.020, 2018)	24
Tabla 5.2 Parámetros sísmicos para base fija	25
Tabla 5.3 Análisis modal de la estructura con base fija.....	26
<i>Tabla 5.4 Masa de la estructura de base fija</i>	<i>26</i>
Tabla 5.5 Masa de la estructura aislada.....	27
Tabla 5.6 Parámetros de aislamiento para dispositivos de goma	27
Tabla 5.7 Características dinámicas del edificio con base aislada con dispositivos de goma	28
Tabla 5.8 Factores de variabilidad para dispositivos de goma según NTE E.031	29
Tabla 5.9 Análisis preliminar del sistema de aislamiento con dispositivos de goma	29
Tabla 5.10 Propiedades lineales dispositivos de goma.....	29
Tabla 5.11 Propiedades lineales deslizador plano	30
Tabla 5.12 Rigidez y Amortiguamiento efectivos de los dispositivos de goma afectados por λ máximo	30
Tabla 5.13 Resumen de derivas máximas.....	30
Tabla 5.14 Modelo constitutivo de los dispositivos de goma.....	31
Tabla 5.15 Modelo constitutivo del deslizador.....	32
Tabla 5.16 Parámetros de rigidez y amortiguamiento promedio obtenidos del FNA para sistema aislado con goma	36
Tabla 5.17 Fuerza cortante reducida, derivas y desplazamientos para sistema aislado con goma	36
Tabla 5.18 Periodos y derivas obtenidos del análisis estático para el sistema aislado con goma	37
Tabla 5.19 Rigidez efectiva y amortiguamiento equivalente de cada tipo de dispositivo	42
Tabla 5.20 Fuerza cortante de diseño para la superestructura (estructura aislada con goma)	43

Tabla 5.21 Fuerza cortante de diseño para la subestructura (estructura aislada con goma)..	43
Tabla 5.22 Parámetros de aislamiento para dispositivos de péndulo	44
Tabla 5.23 Características dinámicas del edificio con base aislada con dispositivos de péndulo	45
Tabla 5.24 Factores de variabilidad para dispositivos de goma y péndulo según NTE E.031	45
Tabla 5.25 Análisis preliminar del sistema de aislamiento con dispositivos de péndulo	46
Tabla 5.26 Propiedades lineales dispositivos de péndulo.....	46
Tabla 5.27 Resumen propiedades lineales de los dispositivos de péndulo afectados por λ máximo	46
Tabla 5.28 Resumen de derivas máximas.....	47
Tabla 5.29 Propiedades no lineales de los dispositivos de péndulo friccional	47
Tabla 5.30 Parámetros de rigidez y amortiguamiento promedio obtenidos del FNA para sistema aislado con péndulo	50
Tabla 5.31 Fuerza cortante reducida, derivas y desplazamientos para sistema aislado con péndulo	50
Tabla 5.32 Periodos y derivas obtenidos del análisis estático para sistema aislado con péndulo	51
Tabla 5.33 Rigidez efectiva y amortiguamiento equivalente de cada tipo de dispositivo	56
Tabla 5.34 Fuerza cortante de diseño en la superestructura	57
Tabla 5.35 Fuerza cortante de diseño para la sub estructura	57
Tabla 6.1 Estados de daño en elementos estructurales (HAZUS, 2020)	79
Tabla 6.2 Estados de daño para componentes no estructurales susceptibles a aceleraciones (HAZUS, 2020)	90
Tabla 6.3 Estados de daño en componentes no estructurales susceptibles a desplazamientos (HAZUS, 2020)	95

INDICE FIGURAS

Figura 3.1 Disminución de la demanda sísmica y de las respuestas sísmicas (Skinner R., 1992)	7
Figura 3.2 Aisladores de goma: HDBR (a la izquierda) y LDB (a la derecha) (FIP Industriales, 2015)	9
Figura 3.3 Gráfico de histéresis para aisladores HDRB, LDBR, LDR (FEMA 356, 2000)	9
Figura 3.4 Representación no lineal para aisladores de goma (FEMA 356,2000)	10
Figura 3.5 Diagrama de cuerpo libre del cojinete del aislador (Muñoz A., 2018)	11
Figura 3.6 Modelo de diagrama fuerza-desplazamiento para FPS (FEMA 356,2000)	12
Figura 3.7 Deslizador Plano (Imagen BRIDGESTONE)	13
Figura 3.8 Diagrama de fuerza desplazamiento de un deslizador plano	13
Figura 4.1 Espectro de demanda y curva de capacidad (Yucra Ayala, 2018)	17
Figura 4.2 Curvas IDA que relacionan Aceleración espectral vs Máxima deriva (Yucra Ayala, 2018)	17
Figura 4.3 Curva de Capacidad (Rahul Leslie,2011)	18
Figura 4.4 Niveles de desempeño (FEMA 356,2000)	19
Figura 4.5 Curvas IDA Aceleración vs Deriva máxima de entrepiso (Yucra Ayala, 2018)	21
Figura 4.6 Varias Curvas IDA Aceleración vs Deriva máxima de entrepiso (Vamvatsikos, 2002)	21
Figura 4.7 Percentiles 16 y 84 de varias curvas IDA (Vamvatsikos, 2002)	22
Figura 5.1 Fachada Hospital Regional de Moquegua (Imagen MINSA)	23
Figura 5.2 Plano de encofrado del Bloque 4 (Caso de estudio)	24
Figura 5.3 Modelo base fija en ETABS del pabellón 4 (Caso de estudio)	25
Figura 5.4 Modelo de un grado de libertad (Muñoz, 2019)	26
Figura 5.5 Modo 1 y 2 en traslación del edificio aislado	28
Figura 5.6 Máximos desplazamientos en los diafragmas	28
Figura 5.7 Curva histerética para aislador Tipo1	30
Figura 5.8 Curva histerética para deslizador	30
Figura 5.9 Derivas máximas con el caso de λ máximo	31
Figura 5.10 Ubicación de los aisladores de goma y deslizadores	32
Figura 5.11 Acelerogramas y espectros de respuesta para el sismo de Lima de 1966	33
Figura 5.12 Espectros SRSS de los acelero gramas	34
Figura 5.13 Lazos históricos para goma; a) λ inferior, b) λ nominal, c) λ superior	35

Figura 5.14 Promedio de curvas histeréticas para goma afectados para λ inferior, nominal y superior.....	36
Figura 5.15 Derivas máximas Tiempo Historia goma; a) λ inferior, b) λ nominal, c) λ superior	38
Figura 5.16 Derivas máximas promedio TH - goma (λ inferior, λ nominal y λ superior).....	39
Figura 5.17 Comparativa de derivas máximas por piso para el caso espectral y FNA para λ superior - goma.....	39
Figura 5.18 Aceleraciones máximas Tiempo Historia - goma; a) λ inferior, b) λ nominal, c) λ superior.....	41
Figura 5.19 Aceleraciones máximas TH - goma (λ inferior, λ nominal y λ superior).....	41
Figura 5.20 Comparativa de aceleraciones máximas por piso para el caso espectral y FNA para λ superior - goma.....	42
Figura 5.21 Espectro de diseño (estructura aislada con goma).....	43
Figura 5.22 Máximos desplazamientos de los diafragmas con péndulo.....	45
Figura 5.23 Curva histerética de un aislador de péndulo friccional	46
Figura 5.24 Derivas máximas en las direcciones X e Y	47
Figura 5.25 Ubicación de los aisladores de péndulo friccional	48
Figura 5.26 Lazos históricos péndulo; a) λ inferior, b) λ nominal, c) λ superior.....	49
Figura 5.27 Promedio de curvas histeréticas para péndulo afectados para λ inferior, nominal y superior.....	50
Figura 5.28 Derivas máximas Tiempo Historia péndulo; a) λ inferior, b) λ nominal, c) λ superior.....	52
Figura 5.29 Derivas máximas TH - péndulo (λ inferior, λ nominal y λ superior).....	53
Figura 5.30 Comparativa de derivas máximas por piso para el caso espectral y FNA para λ superior - péndulo.....	53
Figura 5.31 Aceleraciones máximas Tiempo Historia péndulo; a) λ inferior, b) λ nominal, c) λ superior.....	55
Figura 5.32 Aceleraciones máximas TH – péndulo (λ inferior, λ nominal y λ superior).....	55
Figura 5.33 Comparativa de aceleraciones máximas por piso para el caso espectral y FNA para λ superior - péndulo.....	56
Figura 5.34 Espectro de diseño (estructura aislada con péndulo).....	57
Figura 5.35 Secciones típicas de columnas y vigas de la superestructura.....	58
Figura 5.36 Aceleraciones promedio TH FNA para goma y péndulo en X (λ inferior, λ nominal y λ superior).....	59

Figura 5.37 Aceleraciones promedio TH FNA para goma y péndulo en Y (λ inferior, λ nominal y λ superior).....	59
Figura 5.38 Derivas promedio TH FNA para goma y péndulo en X (λ inferior, λ nominal y λ superior).....	60
Figura 5.39 Derivas promedio TH FNA para goma y péndulo en Y (λ inferior, λ nominal y λ superior).....	60
Figura 6.1 Diagrama momento-rotación para momento positivo (anti-horario)	62
Figura 6.2 Variación del amortiguamiento con el periodo para análisis lineal (PERFORM 3D,2007).....	63
Figura 6.3 Significado físico del amortiguamiento de Rayleigh (PERFORM 3D,2007)	63
Figura 6.4 Comparación entre FNA con $\xi=5\%$ y NLDI con $\xi=0\%$ (Anajafi, et al., 2020) ..	64
Figura 6.5 Disposición de los amortiguadores viscosos en altura (Anajafi, et al., 2020).....	65
Figura 6.6 Comparación entre FNA con $\xi=5\%$, NLDI con $\xi=0\%$ y NLDI con amortiguadores (Anajafi, et al., 2020).....	65
Figura 6.7 Modelo estructural en PERFORM-3D.....	66
Figura 6.8 Curvas IDA de aceleración para dispositivos de goma; a) λ inferior, b) λ nominal, c) λ superior.....	68
Figura 6.9) Curvas IDA de derivas para dispositivos de goma; a) λ inferior, b) λ nominal, c) λ superior	70
Figura 6.10 Rotación/Rotación Limite IO (Moscoso J., 2019)	71
Figura 6.11 Relación entre rotación y rotación limite IO de vigas para aceleración de 0.71G (goma λ máximo)	71
Figura 6.12 Relación entre rotación y rotación limite IO de columnas para aceleración de 0.71G (goma λ máximo).....	72
Figura 6.13 Curvas IDA de Relación entre rotación y rotación limite IO VS PGA (goma λ máximo).....	72
Figura 6.14 Curvas IDA de aceleración para dispositivos de péndulo; a) λ inferior, b) λ nominal, c) λ superior.....	74
Figura 6.15 Curvas IDA de derivas para dispositivos de péndulo; a) λ inferior, b) λ nominal, c) λ superior.....	76
Figura 6.16 Relación entre rotación y rotación limite IO de vigas para aceleración de 0.71G (péndulo λ máximo)	77
Figura 6.17 Relación entre rotación y rotación limite IO de columnas para aceleración de 0.71G (péndulo λ máximo).....	77

Figura 6.18 Curvas IDA de Relación entre rotación y rotación limite IO VS PGA (péndulo λ máximo).....	78
Figura 6.19 Percentiles 16% y 84% en Curvas IDA de derivas para goma; a) λ inferior, b) λ nominal, c) λ superior.....	81
Figura 6.20 Curvas IDA de derivas promedio para goma- elementos no estructurales (λ inferior, λ nominal y λ superior).....	82
Figura 6.21 Curvas IDA de relación rotación/rotación limite en vigas: media, percentil 16% y percentil 84% para goma (λ superior).....	83
Figura 6.22 Media, Percentiles 16% y 84% en Curvas IDA de derivas para péndulo; a) λ inferior, b) λ nominal, c) λ superior.....	85
Figura 6.23 Curvas IDA de derivas promedio para péndulo - elementos estructurales (λ inferior, λ nominal y λ superior).....	86
Figura 6.24 Curvas IDA de relación rotación/rotación limite en vigas: media, percentil 16% y percentil 84% para péndulo (λ superior)	87
Figura 6.25 Comparación de curvas IDA de derivas entre curvas medias, de percentil 16% y percentil 84% para dispositivos de goma y péndulo (λ máximo dirección X).....	88
Figura 6.26 Comparación de curvas IDA de derivas entre curvas medias, de percentil 16% y percentil 84% para dispositivos de goma y péndulo (λ máximo dirección Y).....	88
Figura 6.27 Comparación de curvas IDA de relación de rotaciones de vigas entre curvas medias, de percentil 16% y percentil 84% para dispositivos de goma y péndulo (λ máximo)	89
Figura 6.28 Comparación de relación de rotaciones de vigas para SMC (sismo de 2500 años) para dispositivos de goma y péndulo (λ máximo).....	89
Figura 6.29 Media, Percentiles 16% y 84% en Curvas IDA de aceleraciones para goma; a) λ inferior, b) λ nominal, c) λ superior.....	92
Figura 6.30 Curvas IDA de aceleraciones promedio para goma (λ inferior, λ nominal y λ máximo).....	92
Figura 6.31 Media, Percentiles 16% y 84% en Curvas IDA de aceleraciones para péndulo; a) λ inferior, b) λ nominal, c) λ superior.....	94
Figura 6.32 Curvas IDA de aceleraciones promedio para péndulo (λ min, λ nominal y λ máx.)	94
Figura 6.33 Curvas IDA de derivas promedio para goma- elementos no estructurales (λ inferior, λ nominal y λ máximo).....	96
Figura 6.34 Curvas IDA de derivas promedio para péndulo- elementos no estructurales (λ inferior, λ nominal y λ máximo).....	97

Figura 6.35 Comparación entre curvas IDA para aceleraciones medias, percentil 16% y percentil 84% para dispositivos de goma y péndulo (λ máximo dirección X)98

Figura 6.36 Comparación entre curvas IDA para aceleraciones medias, percentil 16% y percentil 84% para dispositivos de goma y péndulo (λ máximo dirección Y)98



CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

Los hospitales son clasificados como esenciales tanto por la norma peruana (E.030) como por las normas internacionales (ASCE-7 2016, NCH 433) ya que deben de permanecer operativos ante eventos naturales como es el caso de los terremotos. Para lograr dicho objetivo es indispensable el uso de algún sistema de protección sísmica, en el caso de esta tesis los sistemas pasivos de aislamiento sísmico.

La implementación del aislamiento sísmico en la base de una estructura reduce significativamente el daño ocasionado por terremotos raros y muy raros. La aplicación adecuada de este sistema mejora el comportamiento estructural de la estructura, como destacaron Kelly y Naeim en su estudio de 1999. Además, el funcionamiento óptimo de los dispositivos del sistema de aislamiento depende de los siguientes factores: análisis y diseño; instalación y mantenimiento a lo largo de su vida útil. Los códigos actuales, como el ASCE 7-16 y el E.031 definen los requisitos mínimos para lograr dichos objetivos.

Con la finalidad de contribuir al conocimiento acerca de la protección sísmica de instalaciones hospitalarias en el contexto peruano. En la sección inicial de este documento se lleva a cabo el análisis y diseño tanto de la subestructura como de la superestructura del hospital, para ambos dispositivos. La segunda sección se centra en la evaluación detallada del desempeño del hospital ante 10 pares de registros sísmicos con ambos dispositivos mediante el Análisis Dinámico Incremental. Por último, se realiza una comparativa en cuanto al desempeño de la estructura con cada tipo de dispositivo mediante criterios simples como mediciones de derivas, aceleraciones, y rotaciones inelásticas de los elementos estructurales.

1.1 Objetivo General, objetivos específicos y alcance

El propósito de esta investigación es de contribuir al conocimiento de las edificaciones hospitalarias aisladas.

Objetivos Específicos:

El primer objetivo es diseñar un hospital con los códigos actuales para ambos tipos de aisladores (cuando se aísla con goma o péndulo).

El segundo objetivo específico es realizar un análisis no lineal dinámico incremental (IDA) de la estructura para ambos tipos de aisladores.

El tercer objetivo implica evaluar del desempeño estructural del hospital para ambos tipos de aisladores.

El último objetivo específico es contrastar los resultados obtenidos para los diferentes tipos de aisladores.

El alcance de la presente tesis es que la edificación a considerar es únicamente un pabellón de un hospital típico peruano en la ciudad de Moquegua (mismo caso de estudio utilizado en la tesis de la Mgtr. Madeleine Yucra), ubicado en la zona de mayor sismicidad peruana y con suelo intermedio (Z4 y S2 según la NTE E.030). Se emplean 10 registros sísmicos espectro compatibles con la forma espectral de la Norma peruana de aislamiento sísmico, seis peruanas y cuatro chilenas de similar sismicidad. Se obtienen curvas IDA para derivas, aceleraciones y deformaciones en rótulas plásticas. Se califica el desempeño de la estructura usando como medida de daño estructural criterios de derivas y deformaciones inelásticas en vigas y columnas. Por último, se evalúa el desempeño de los elementos no estructurales.



CAPITULO 2. ANTECEDENTES

2.1 Necesidad de proteger la infraestructura hospitalaria

Durante mucho tiempo el diseño de edificaciones estuvo orientado a proteger la estructura de eventos sísmicos que pudieran dañarla, para lo cual se le dotaba con la rigidez y resistencia suficiente para que pueda resistir estas acciones; sin embargo, para sismos importantes esta medida no es suficiente debido a que las derivas de entre piso y las aceleraciones excesivas producen daños tanto la estructura como en el contenido. Como indican, Filiatrault y Sullivan (2014), los componentes no estructurales han adquirido relevancia entre la comunidad ingenieril ya que un buen comportamiento ante un evento sísmico puede asegurar la continuidad de servicios de un hospital.

2.2 Categorización de la infraestructura hospitalaria en Perú

En Perú los hospitales se clasifican en tres niveles de atención, donde cada nivel se subdivide en categorías que a su vez dependen del nivel de complejidad (a mayor nivel de complejidad mayor categoría). En la Tabla 2.1 se muestra dicha clasificación.

Tabla 2.1 Categorías de los hospitales según MINSA (MINSA, 2020)

NIVEL DE ATENCIÓN	CATEGORIAS DEL SECTOR SALUD
I	I - 1
	I - 2
	I - 3
	I - 4
II	II - 1, II - 2
	II - E
III	III - 1
	III - E, III - 2

2.3 Normativa de aislamiento sísmico según E.031 y ASCE 7-16

Conforme a lo establecido por la normativa peruana E.030 (2018), se requiere que los hospitales catalogados en el segundo y tercer nivel de acuerdo con la clasificación del Ministerio de Salud, y que estén ubicados en las zonas sísmicas 3 (Z3) y 4 (Z4) del mapa sísmico de Perú, implementen necesariamente sistemas de aislamiento sísmico.

La Norma E.031 sirve para desarrollar el análisis y diseño del sistema de aislamiento, la subestructura y la superestructura.

La Norma ASCE 7-16 cambió en algunos aspectos respecto a su versión del 2010, estos cambios se enfocan principalmente en dos y son: 1) la máxima aceleración de diseño que corresponde a un sismo de 2500 años; y 2) la variación de las propiedades de los aisladores en el tiempo debido a factores como envejecimiento y condiciones ambientales, variación de fabricación, histéresis y efectos de carga.

Las propiedades para los límites superiores e inferiores, para fabricantes calificados, para aisladores de goma se muestran en la Tabla 2.2 y 2.3 extraídos de la Norma E.031 de Aislamiento Sísmico.

Tabla 2.2 Factores de modificación lambda máximo para fabricantes calificados E.031 (E.031, 2019)

VALORES MÍNIMOS DE LOS FACTORES DE MODIFICACIÓN MÁXIMO PARA FABRICANTES CALIFICADOS				
VALOR MÍNIMO PARA:	Aislador de con Núcleo de Plomo		Aislador de Alto Amortiguamiento	
	Kd	Qd	Kd	Qd
Factor Máximo para Envejecimiento y Efectos Ambientales ($\lambda_{ae,max}$)	1.1	1	1.2	1.2
Factor Máximo para variaciones por temperatura, velocidad de carga, scragging ($\lambda_{tvs,max}$)	1.03	1.3	1.5	1.3
Factor Máximo para verificar los ensayos de aisladores de obra- variaciones de fabricación ($\lambda_{fab,max}$)	1.15	1.15	1.15	1.15
Factor de Modificación Máximo Límite Superior: $\lambda_{max} = [1 + 0.75(\lambda_{ae,max} - 1)] * \lambda_{tvs,max} * \lambda_{fab,max}$	1.3	1.5	2	1.7

Tabla 2.3 Factores de modificación lambda mínimo para fabricantes calificados E.031 (E.031, 2019)

VALORES MÍNIMOS DE LOS FACTORES DE MODIFICACIÓN MÍNIMO PARA FABRICANTES CALIFICADOS			
VALOR MÍNIMO PARA:	Aislador de con Núcleo de Plomo		Ais
	Kd	Q	
Factor Máximo para Envejecimiento y Efectos Ambientales ($\lambda_{ae,max}$)	1		
Factor Máximo para variaciones por temperatura, velocidad de carga, scragging ($\lambda_{tvs,max}$)			
Factor Máximo para verificar los en aisladores de obra- variacion (λ_{fa})			
Factor de Modi $\lambda_{min} =$			

2.4 Aspectos históricos del aislamiento sísmico

El primer caso de aislamiento con péndulo friccional se dio en un tanque aislado en la ciudad de California, donde los mecanicismos de superficie de movimiento y recentrado fueron integrados, y en el que dicha superficie de contacto tuvo una forma esférica (Zayas et al. 1987). En los últimos años esta tecnología fue más aceptada por los ingenieros alrededor del mundo para proteger distintas obras civiles como estadios, teatros, etc. En dichos proyectos se vio un buen desempeño frente a terremotos de gran escala.

Actualmente, en Perú se utiliza más comúnmente aisladores elastoméricos de caucho como es el caso del aula PUCP, el cual cuenta con 39 aisladores de goma debajo del techo del primer sótano y 20 deslizadores de fricción, en la zona de ascensores colocados en la cimentación.

2.4.1 Aislamiento sísmico en hospitales

El uso de dispositivos pasivos en edificaciones es mundialmente aceptado como un sistema de protección antisísmica frente a sismos importantes (M. Kelly & Naeim, 1999). Por ejemplo, el hospital de la Universidad del Sur de California (USC), aislado con dispositivos de goma, en el terremoto de 1994 tuvo un buen desempeño y la aislación fue efectiva ya que se redujo el daño (Nagarajaiah and Xiaohong, 2000). Como este hay varios casos de hospitales alrededor del mundo que tuvieron un buen desempeño frente a sismos importantes.

Vilca et al. (2017) en su trabajo de investigación presentan la evaluación del desempeño de un hospital aislado con dos tipos de dispositivos, de goma con núcleo de plomo (LRB) y con aisladores de triple péndulo friccional (TFP). Este hospital está ubicado en el norte de la ciudad de Piura en una zona altamente sísmica. Se llevó a cabo el análisis tiempo historia no lineal, en el cual se consideraron siete pares de registros sísmicos del extranjero. Los resultados más importantes que encontraron fue que el sistema con LRB redujo la aceleración media de piso respecto al TFP cuando se utilizaron las propiedades lambda inferiores (para el sismo de Loma Prieta que para el caso de LRB fue de 1g, mientras que para el sistema TFP fue de 1.07g), mientras que la aceleración media resultó menor para TFP respecto a LRB cuando se utilizaron las propiedades superiores de los dispositivos (para el terremoto de Kobe, en el caso de LRB la aceleración máxima fue de 0.23g, mientras que para TFP fue de 0.19g).

Çabuk et al. 2020 realizó el estudio la aplicabilidad de un edificio aislado sísmicamente con dispositivos de goma de alto amortiguamiento (HDRB) que previamente había sido aislado

con dispositivos de péndulo friccional simple (FPS) y diseñado con el código sísmico de Turquía del 2007. En el estudio se realizó principalmente el análisis modal no lineal tiempo historia para evaluar el desempeño de ambos modelos. Se encontró que ambos sistemas de aislamiento (HDRB y FPS) tuvieron un desempeño similar en cuanto a derivas de entrepiso. Además, el modelo con HDRB mostro aceleraciones de piso relativamente menores a las del modelo con FPS, ambos sistemas tuvieron un desempeño aceptable con aceleración máxima menor a 0.3g. Por lo tanto, se concluyó que no hubo una superioridad en el desempeño entre los dos tipos de aisladores para el hospital analizado.

2.5 Organización del documento

El capítulo III, Aislamiento Sísmico, ofrece una revisión exhaustiva del estado actual del arte en cuanto al sistema de aislamiento sísmico. También, describe las principales características de los dispositivos de goma, deslizadores planos, y aisladores de péndulo friccional.

El capítulo IV, Evaluación y Desempeño de la Estructura, proporciona una visión general acerca del desempeño sísmico de las estructuras; muestra y explica de manera breve dos métodos para conocer el desempeño de una estructura. Se revisan las metodologías Pushover y Análisis Dinámico Incremental con curvas IDA.

En el capítulo V, Análisis y Diseño de una Edificación Hospitalaria - Caso de Estudio, se estudia un hospital representativo de nuestro país. Se describe el procedimiento para el análisis y diseño tanto de la subestructura como de la superestructura, ello para ambos dispositivos de aislamiento.

Por último, en el capítulo VI, Evaluación del Desempeño de la Estructura Aislada con Goma y Péndulo, se evalúa el desempeño de la estructura cuando se aísla con goma o péndulo; además, se realizan las comparaciones y se presentan las conclusiones.

CAPITULO 3. AISLAMIENTO SÍSMICO

El concepto de aislamiento fue acuñado por ingenieros e investigadores a principios del año 1923, posteriormente se desarrollaron distintos métodos de aislamiento para proteger las edificaciones (S.J & G.R, 2012). El uso de dispositivos de aislación en el mundo fue aceptado en varios continentes, en países como Japón, Nueva Zelanda y otros. En Perú, se utilizó por primera vez dispositivos de caucho el año 2012 en la facultad de Ingeniería Civil de la UNI. A día de hoy existen varios tipos de edificaciones que implementaron aisladores como es el caso de edificaciones hospitalarias.

3.1 Teoría y objetivos del aislamiento sísmico

En el enfoque clásico del diseño sismo resistente se busca asegurar que la capacidad de la estructura sea mayor a la fuerza impuesta por un sismo. Esto significa dotar a la estructura con una resistencia elevada, lo cual tiene un gran impacto económico, por lo cual las normas a nivel mundial permiten que las estructuras puedan deformarse más allá del rango elástico, a lo cual nace el concepto de ductilidad.

El objetivo principal es reducir la energía que entra a la superestructura, esto es posible con la instalación de aisladores que desacoplan la estructura del sismo. Este comportamiento se logra al aumentar la flexibilidad de la estructura y proporcionar un nivel de adecuado de amortiguamiento (Gordon P. & Keri L, 2012).

En términos prácticos, en el contexto peruano, el uso de aislamiento en la base de la estructura incrementa el periodo de la estructura, pasando de periodos cortos asociados a estructuras rígidas a periodos más largos característicos de estructuras flexibles, lo cual disminuye la demanda sísmica. Este fenómeno se muestra en la Figura 3.1

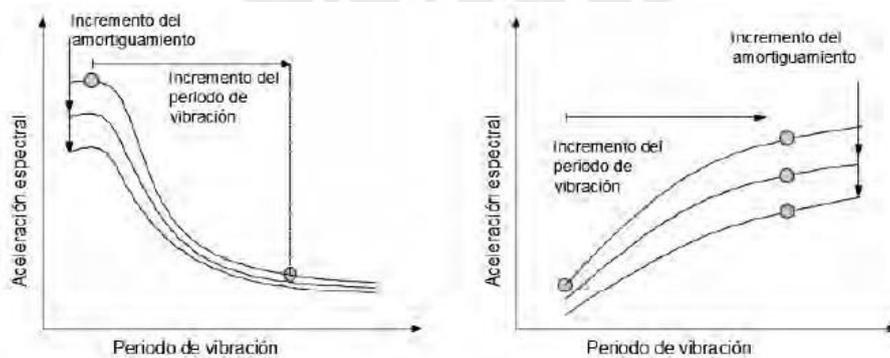


Figura 3.1 Disminución de la demanda sísmica y de las respuestas sísmicas (Skinner R., 1992)

De tal manera este sistema mejora significativamente el comportamiento y el desempeño de la estructura frente a eventos sísmicos (M. Kelly & Naeim, 1999). Además, la mayor deformación se concentra en el sistema de aislamiento, ya que este actúa como un piso de gran flexibilidad lateral; mientras que las derivas en la superestructura se reducen, así como también las demandas (aceleraciones y fuerzas cortantes).

3.1.1 Tipos de aislamiento pasivo

Los sistemas pasivos se clasifican en: aisladores de goma (elastoméricos) y aisladores de péndulo friccional.

3.2 Aisladores elastoméricos

Los dispositivos de goma constan de láminas de caucho intercaladas entre láminas de acero, las cuales están envueltas en un revestimiento y se encuentran limitadas en su parte superior e inferior por placas de acero. El caucho es un material muy deformable el cual logra grandes elongaciones antes de la rotura y es incompresible. Estos dispositivos tienen una gran flexibilidad lateral y rigidez alta en su dirección axial.

Existen tres tipos de aisladores, los de bajo amortiguamiento LDRB con amortiguamientos menores a 5%, alto amortiguamiento HDRB con amortiguamientos entre 7% y 14% y los de núcleo de plomo LRB con amortiguamientos entre 15 y 25% (M. Kelly & Naeim, 1999).

Los aisladores de goma de bajo amortiguamiento LDRB están compuestos de caucho natural; mientras que los HDRB presentan mayor amortiguamiento debido a que en su fabricación se aumenta químicamente esta propiedad debido a que se incorporan bloques de carbono y/o resinas. Los LDB se fabrican igual que los HDRB, solo que se le adiciona un cilindro de plomo en su núcleo. El núcleo de plomo incrementa la rigidez de los dispositivos, así como a la disipación de energía.

La variabilidad en la relación entre la deformación lateral y el espesor del caucho es un factor determinado por los fabricantes; sin embargo, los valores comúnmente observados incluyen 100% para los LDRB, entre 200% a 350% para los HDRB, y entre 125% a 200% para los LRB, según se informa en el estudio realizado por Aguilar et al. en 2008.



Figura 3.2 Aisladores de goma: HDBR (a la izquierda) y LDB (a la derecha) (FIP Industriales, 2015)

3.2.1 Modelo para aisladores elastoméricos

Las curvas de histéresis en los dispositivos de goma (diagramas de fuerza-desplazamiento) representan su comportamiento bajo cargas axiales constantes y cargas laterales sinusoidales. El área que encierran los lazos histeréticos es igual a la energía disipada por cada ciclo. Como se ilustra en la Figura 3.3 la respuesta de los dispositivos con núcleo de plomo tiene un área mayor que los dispositivos de bajo y alto amortiguamiento; por lo tanto, se disipa mayor energía (Gordon P. & Keri L, 2012).

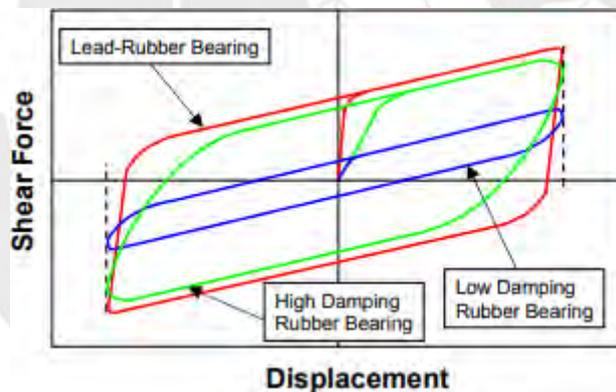


Figura 3.3 Gráfico de histéresis para aisladores HDRB, LDBR, LDR (FEMA 356, 2000)

La representación normativa a nivel global del comportamiento de los aisladores de goma se realiza mediante análisis de carácter lineal-elástico; es decir los dispositivos se representan con un modelo lineal equivalente. Para ello se utiliza un elemento tipo “spring” con rigidez efectiva “ K_{eff} ” y amortiguador viscoso con “ C ” efectivo. La determinación de este modelo se basa en el desplazamiento de diseño y el período fundamental de la estructura (Symans, 2009).

El comportamiento de los aisladores de goma también puede ser representado mediante modelos no lineales, que tienen en cuenta su comportamiento en el rango inelástico en

presencia de desplazamientos considerables. El modelo más comúnmente utilizado es el modelo bilineal como se muestra la Figura 3.4. Se muestran algunos parámetros importantes como: “Q” (fuerza en el punto de desplazamiento cero), “K1” (rigidez inicial), “K2” (rigidez post-fluencia).

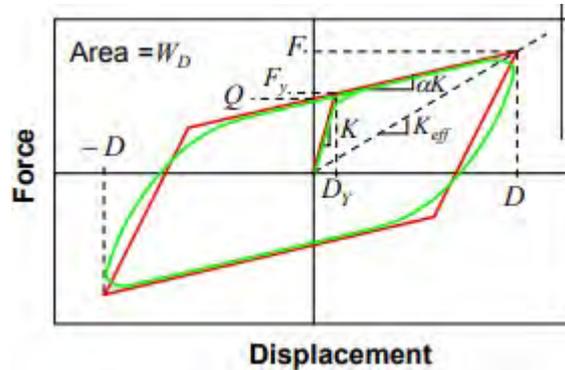


Figura 3.4 Representación no lineal para aisladores de goma (FEMA 356,2000)

A partir del gráfico anterior se obtienen las siguientes relaciones para las rigideces K1, K2 y Keff.

$$K_1 = \frac{F_y}{D_y} \quad (1)$$

$$K_2 = \frac{F_y - Q}{D_y} \quad (2)$$

$$K_{eff} = \frac{F}{D} \quad (3)$$

La rigidez efectiva, Keff, se relaciona con la máxima fuerza, F, y el máximo desplazamiento, D. La relación entre K1 y K2 se expresan en términos de un valor α .

Al igualar la energía disipada por ciclo (Ed) con el área del lazo histerético se obtiene el amortiguamiento efectivo ξ_{eff} .

$$\xi_{eff} = \frac{4Q(D - D_y)}{2\pi K_{eff}D^2} \quad (4)$$

La transformación del modelo lineal del aislador a su modelo no lineal se puede realizar mediante utilizando como datos ξ_{eff} , Keff, D y α . En primer lugar, se calcula Dy, luego se calcula K2 y K1. Por último, se obtiene Q.

$$2\pi\xi_{eff}D = \frac{4D_y(\alpha-1)(D-D_y)}{D+(\alpha-1)D_y} \quad (5)$$

$$K_2 = \frac{K_{eff}D}{D+(\alpha-1)D_y} \quad (6)$$

$$K_1 = \alpha K_2 \quad (7)$$

$$Q = D_y K_2 (\alpha - 1) \quad (8)$$

3.3 Aisladores de péndulo friccional

3.3.1 Modelos para aisladores de péndulo friccional

De igual manera que para los aisladores de goma, los friccionales también se representan con un modelo lineal elástico. En el diagrama de la Figura 3.5 se muestra las fuerzas que actúan sobre el cojinete del dispositivo. De este análisis se puede calcular la rigidez efectiva asumiendo $\mu < 0,2$ R y el $\cos \theta \approx 1$.

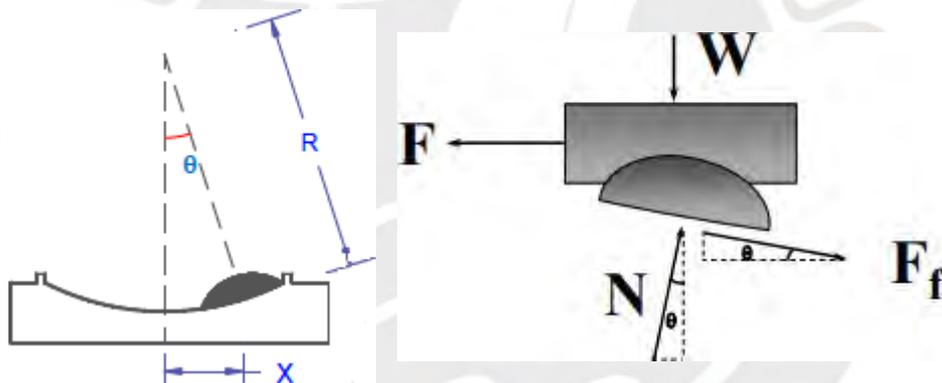


Figura 3.5 Diagrama de cuerpo libre del cojinete del aislador (Muñoz A., 2018)

Del diagrama de cuerpo libre se puede deducir las siguientes expresiones:

$$N = P \cos(\theta) \quad (9)$$

$$F_{FR} = \mu N \quad (10)$$

Cuando el peso P se desplaza una longitud "x", el cojinete se inclina un ángulo "θ", en consecuencia, aparece la fuerza restitutiva F_R

$$F_R = P \sen(\theta) \quad (11)$$

La fuerza horizontal total del aislador será la suma de la fuerza restitutiva y la fuerza de fricción. Al sumar y sustituir las ecuaciones se obtiene:

$$F = P \operatorname{sen}(\theta) + \mu P \cos(\theta) \quad (12)$$

$$F = \frac{P}{R} D + \mu P \quad (13)$$

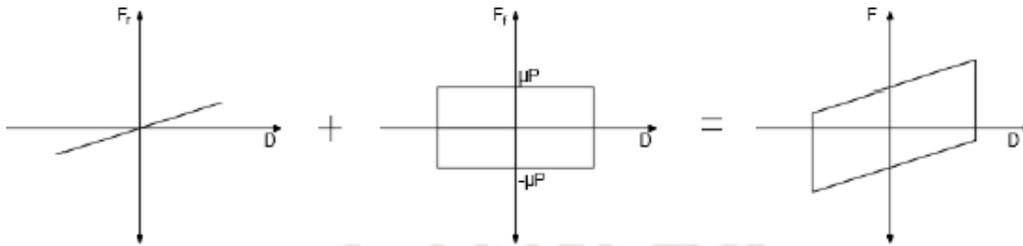


Figura 3.6 Modelo de diagrama fuerza-desplazamiento para FPS (FEMA 356,2000)

Dentro de esta categoría de dispositivos se encuentran los deslizadores planos. Estos deslizadores no tienen fuerza restitutiva, debido a que su superficie de contacto (plato) es plano; es decir tiene un radio de curvatura que tiende a infinito. Por lo tanto, la rigidez efectiva es:

$$K_{eff} = \mu \frac{P}{D} \quad (14)$$

De igual manera que para los aisladores de goma se iguala el área de la curva histéretica con la energía disipada en un ciclo para obtener el amortiguamiento efectivo.

$$\xi_{eff} = \frac{A_H}{2\pi K_{eff} D^2} = \frac{2}{\pi} \left(\frac{\mu}{\mu + \frac{D}{R}} \right) \quad (15)$$

$$\xi_{eff} = \frac{2}{\pi} \quad (15)$$

Los Aisladores Deslizantes Planos (FSB) son una forma sencilla de aislador. Presentan un bajo coeficiente de fricción que les permite realizar movimientos horizontales y, al mismo tiempo, soportar cargas verticales.

Estos aisladores son los más económicos y se usan en conjunto con los aisladores del tipo HDRB, lo cual se traduce, por lo general, en un ahorro considerable en el costo del sistema de aislamiento. En la Figura 2.8 se muestra el modelo simplificado de su curva de histéresis.

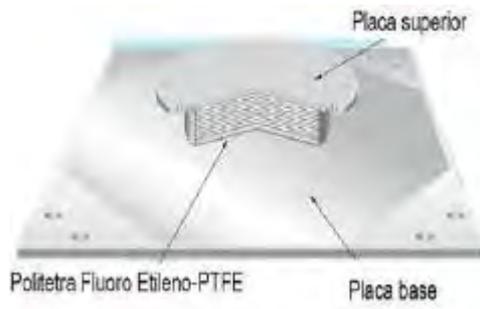


Figura 3.7 Deslizador Plano (Imagen BRIDGESTONE)

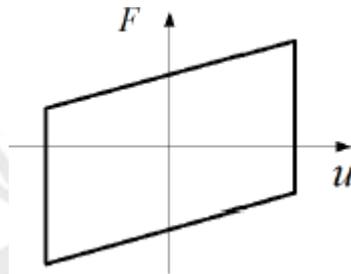
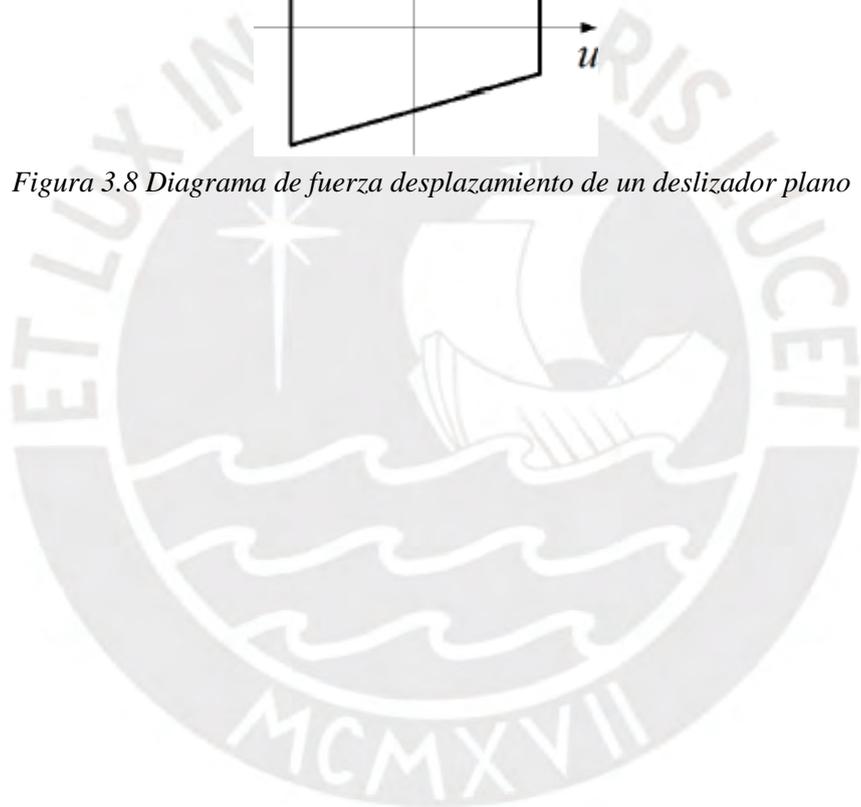


Figura 3.8 Diagrama de fuerza desplazamiento de un deslizador plano



CAPITULO 4. EVALUACION Y DESEMPEÑO DE LA ESTRUCTURA

En la práctica de la ingeniería estructural moderna, es importante verificar el desempeño tanto de la estructura completa, así como de los componentes estructurales o no estructurales que la conforman. El comportamiento de la estructura estará sujeto al nivel de intensidad del sismo; y se podrá determinar si los elementos sufrirán daño o no.

A continuación, se examinan los criterios y objetivos de desempeño que son establecidos, por ejemplo, por la Asociación de Ingenieros Estructurales de California (SEAOC) y la Agencia Federal del Manejo de Emergencias (FEMA), los cuales determinan el nivel de daño que puede sufrir una estructura en función de la demanda producida por terremotos. Además, se estudian las metodologías de Análisis estático no lineal (Pushover) y Análisis Dinámico Incremental (IDA), como herramientas para evaluar el desempeño de una estructura.

4.1 Criterios de desempeño según SEAOC y FEMA

4.1.1 Comité Visión 2000 - SEAOC

SEAOC cuenta con una matriz de desempeño que permite evaluar el desempeño de una estructura en función de diferentes niveles de sismo y desempeño. A su vez cada nivel de desempeño se relaciona al daño que puede sufrir la estructura. Estos niveles se clasifican y relacionan de la siguiente manera: Completamente Operacional - daño despreciable, Operacional - daño leve, Resguardo de Vida - daño moderado, Cerca al colapso - daño severo y Colapso - daño completo.

En la evaluación del desempeño sísmico, se han establecido diferentes categorías para describir el estado de daño que puede sufrir una estructura ante un evento sísmico. Si se encuentra en un estado de "daño despreciable", esto significa que la estructura mantiene su comportamiento elástico y no presenta daño aparente. Por otro lado, en el estado de "daño leve", se pueden presentar daños mínimos o ningún daño en elementos estructurales y no estructurales, pero aún es posible su recuperación sin la necesidad de reparaciones. En el estado de "daño moderado", se encuentran daños tanto en la estructura como en el contenido y es necesario reparar para su recuperación. En el estado de "daño severo", los daños son graves a nivel estructural y no estructural, presentando un riesgo significativo a la seguridad

de vida, y se espera que las pérdidas económicas sean completas. Finalmente, cuando la estructura ha superado su capacidad de resistencia, el colapso se vuelve inminente.

El peligro sísmico se basa en la probabilidad de que se produzcan terremotos de una determinada magnitud (típicamente aceleraciones) en un período de tiempo determinado, o se expresa en términos de intervalos de recurrencia que indican el tiempo transcurrido entre dos sismos de magnitud similar. El SEAOC lo categoriza en: sismos Frecuentes ($Tr=45$ años), Ocasionales ($Tr=75$ años), Raros ($Tr=475$ años) y Muy Raros ($Tr=970$ años).

La matriz de desempeño se presenta en la Figura 4.1. Esta establece una correlación entre el nivel de desempeño y el nivel de peligro sísmico. Asimismo, se consideran los objetivos de desempeño en función de la importancia de la estructura, clasificándose como críticas, esenciales o básicas. Es importante destacar que no se acepta una estructura que esté cercana al colapso en el caso de sismos frecuentes, ocasionales o raros, pero sí se acepta en el caso de sismos muy raros.

Tabla 4.1 Nivel de Desempeño – Intensidad Sísmica según SEAOC (SEAOC,2000)

Intensidad sísmica	Nivel de desempeño			
	Completamente operacional	Operacional	Resguardo de vida	Cerca al colapso
Frecuente (45 años)				
Ocasional (75 años)				
Raro (475 años)				
Muy raro (970 años)				

4.1.2 FEMA

El desempeño propuesto por FEMA es muy similar al desempeño presentado por el comité del SEAOC.

El desempeño de la normativa FEMA 356 (Norma preliminar y comentario para la rehabilitación sísmica de edificios), muestra la relación entre cuatro categorías de desempeño estructural, cuatro categorías de peligro sísmico y objetivos de desempeño. Las categorías de desempeño son: Operacional, Ocupación Inmediata, Seguridad de Vida, y Prevención del colapso; las categorías de peligro sísmico se basan en la probabilidad de excedencia de sismos con intervalos de retorno de $Tr = 75$ años (2%), $Tr = 225$ años (10%), $Tr = 475$ años (20%), y

$T_r = 2475$ años (50%) en un período de 50 años. En cuanto a los objetivos de desempeño se clasifican en: Objetivos Básicos, Objetivos Limitados y Objetivos superiores.

A continuación, se ilustra la matriz de desempeño de FEMA (ver Figura 4.2).

Tabla 4.2 Desempeño según FEMA 356 (FEMA 356,2000)

Intensidad sísmica	Nivel de desempeño			
	Operacional	Ocupación inmediata	Seguridad de vida	Prevención del colapso
$T_r = 45$ años	a	b	c	d
$T_r = 225$ años	e	f	g	h
$T_r = 475$ años	i	j	k	l
$T_r = 2475$ años	m	n	o	p

k,p= Objetivos básicos de seguridad.

k,p,c,d,g,h,l = Objetivos limitados.

m,n,o= Objetivos superiores.

4.2 Métodos de análisis para calcular la respuesta estructural

Existen algunos métodos de análisis que pueden ayudar a conocer el comportamiento de una estructura frente a terremotos de diferentes magnitudes, entre los más conocidos tenemos el espectro de capacidad y el método de análisis dinámico incremental (IDA).

La Figura 4.1 presenta el espectro de capacidad, una técnica simple que evalúa el desempeño estructural. A través de un proceso iterativo se determina el punto de desempeño, este punto se obtiene de intersectar la curva de capacidad del Pushover y un espectro de demanda o espectro de Norma.

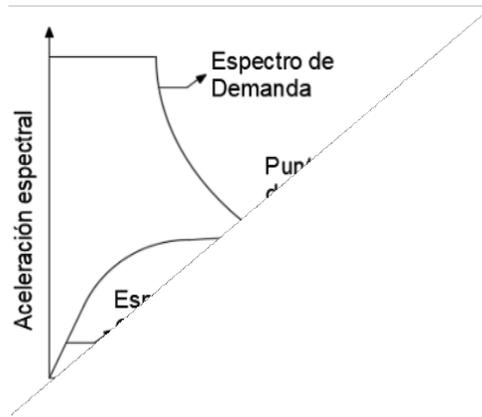


Figura 4.1 Espectro de demanda y curva de capacidad (Yucra Ayala, 2018)

Por otro lado, el análisis IDA es un método más “preciso”, ya que calcula la respuesta con análisis dinámicos tiempo historia. La estructura se somete a registros sísmicos con diferentes magnitudes. Los resultados se grafican en curvas (ver Figura 4.2), por ejemplo, derivas - aceleración del suelo.

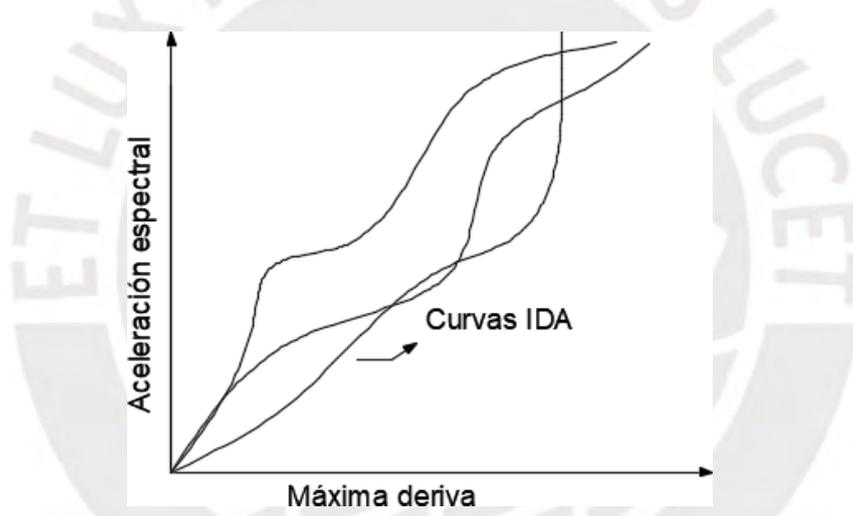


Figura 4.2 Curvas IDA que relacionan Aceleración espectral vs Máxima deriva (Yucra Ayala, 2018)

4.2.1 Análisis Esático no lineal (Pushover)

El método de análisis estático no lineal, conocido como Pushover, es empleado para calcular la capacidad estructural. Este proceso involucra la aplicación incremental de una carga lateral a la estructura según un patrón determinado. Con la magnificación de la carga, se pueden identificar las conexiones débiles y los modos de falla de la estructura. La carga es monótona y modificada, lo que permite determinar los puntos en los que la estructura fallará antes, considerando la disminución de la resistencia de los elementos que han cedido.

La curva de capacidad es una representación de la respuesta estructural del primer modo de la estructura. La simplificación de considerar solo el primer modo se basa en el hecho de que, en estructuras regulares con periodos inferiores a un segundo, este es el modo con mayor influencia en la respuesta estructural. Sin embargo, en estructuras con periodos mayores, es necesario calcular la respuesta teniendo en cuenta también los modos superiores.

4.2.1.1 Conceptos

La base de este método es calcular la curva resistencia- deformación de una estructura. La magnitud de la carga se aumenta hasta que la estructura agote su resistencia, permitiendo así identificar la formación de rotulas plásticas en los elementos estructurales. En consecuencia, se puede conocer que componentes que fallaran primero y cuál sería su estado ante un determinado sismo.

Es importante tener en cuenta que la forma en que se aplican las fuerzas (constantes, lineales, etc.) afecta la estimación de la curva de capacidad. Por lo tanto, no existe un solo patrón de cargas, y se recomienda realizar al menos dos combinaciones para calcular la curva de Pushover como la envolvente de ambas distribuciones.

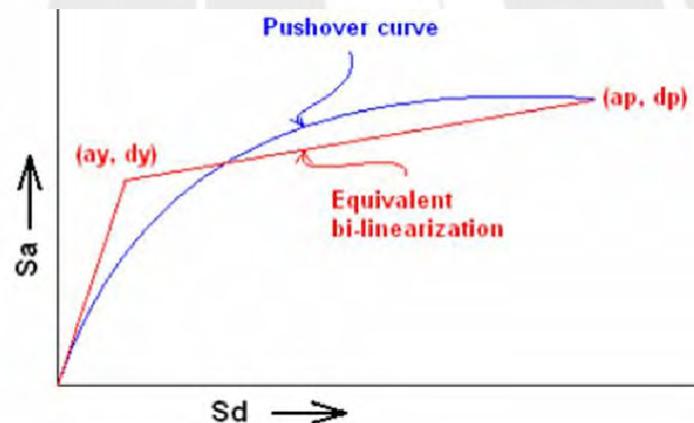


Figura 4.3 Curva de Capacidad (Rahul Leslie, 2011)

El método en cuestión presenta algunos problemas cuando se trata de evaluar la incursión de las estructuras en el rango no lineal, y estos deben ser tenidos en cuenta al momento de interpretar los resultados obtenidos. Algunas de estas limitaciones incluyen:

No se toma en cuenta los efectos de disipación de energía de los componentes estructurales, como la fisuración, que se asume dependen solo de la deformación lateral de la estructura, lo cual puede no ser correcto para estructuras de gran ductilidad.

El enfoque en la energía de deformación de la estructura, lo cual descarta la energía cinética y las componentes de fuerzas asociadas, limitando su capacidad para un análisis dinámico completo.

La torsión, que puede ser importante para considerar en la evaluación de la estructura, es ignorada.

La componente vertical del sismo se desprecia, ya que el análisis se realiza solo para cargas horizontales.

No se considera las variaciones en las propiedades de los elementos estructurales cuando hay una degradación de la rigidez.

Debido a estas limitaciones, se decidió utilizar el Análisis Dinámico Incremental, que permite una representación más acertada del comportamiento de las estructuras ante fuerzas sísmicas.

4.2.1.2 Procedimiento de análisis

El Código FEMA-273 ha establecido métodos de modelado y estándares de aceptación para la curva Pushover. La Figura 4.4 del FEMA 356 identifica los puntos A, B, C, D y E, que relaciona la fuerza a una determinada deformación que ocurre en los nodos. En la figura también se identifican los puntos de Ocupación Inmediata (IO), Seguridad de Vida (LS) y Prevención de Colapso (CP) que sirven para medir la aceptación de las rotulas.

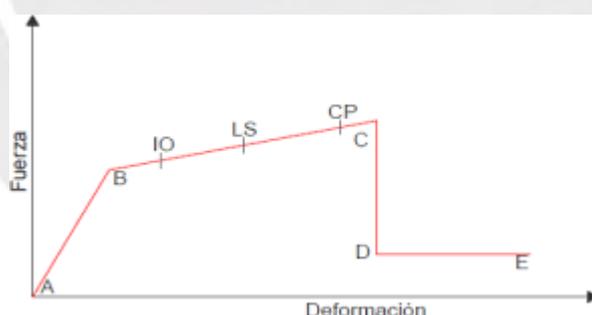


Figura 4.4 Niveles de desempeño (FEMA 356,2000)

Los niveles de desempeño se representan con letras como se observa en la figura anterior. Cuando la primera articulación aparece, se tiene el punto B, cuando se encuentra en C la estructura deja de resistir cargas.

En la Figura 4.4 se observa un comportamiento trilineal de A – C, con una caída súbita hasta llegar al punto D para la misma deformación de C. A partir de ese punto, la rotula sigue

deformándose hasta llegar a E sin un incremento en la resistencia. La curva descrita es típica para curvas de fuerza-deformación en un análisis Pushover.

4.2.2 Análisis Dinámico Incremental (IDA)

Este método es el de mayor confiabilidad para evaluar el desempeño estructural ya que se basa en el análisis dinámico no lineal.

El Análisis Dinámico Incremental permite entender la variación en la respuesta estructural cuando se somete a distintas intensidades de sismo, y por ende una mejor comprensión del comportamiento estructural para niveles de por ejemplo sismos severos. Con este análisis, para una aceleración de suelo, se obtiene la variación de deformaciones y degradaciones tanto de resistencia como de rigidez. También, se puede conocer la estabilidad de la estructura ante la exposición de diferentes registros sísmicos que tienen igual intensidad (Vamvatsikos, 2002).

4.2.2.1 Conceptos

El Análisis Dinámico Incremental está muy ligado a la generación de curvas IDA, para ello la metodología indica que se deben realizar múltiples análisis dinámicos no lineales en el tiempo. A continuación, se describe el procedimiento de análisis y como se generan las curvas IDA.

4.2.2.2 Procedimiento de análisis

El procedimiento se basa en la integración numérica directa en cada punto de tiempo para la estructura sometida a una excitación sísmica. Es importante señalar que para obtener resultados más confiables se debe contar con más de un registro sísmico, en el caso de esta tesis se usan 10 pares de registros sísmicos.

4.2.2.3 Curvas IDA

Una curva IDA representa la relación entre la magnitud de intensidad y la magnitud de daño (Vamvatsikos, 2002). Se elabora registrando la respuesta estructural obtenida del análisis dinámico no lineal aplicado mediante un registro sísmico escalado o un registro espectro compatible con un espectro de diseño de norma a diferentes intensidades.

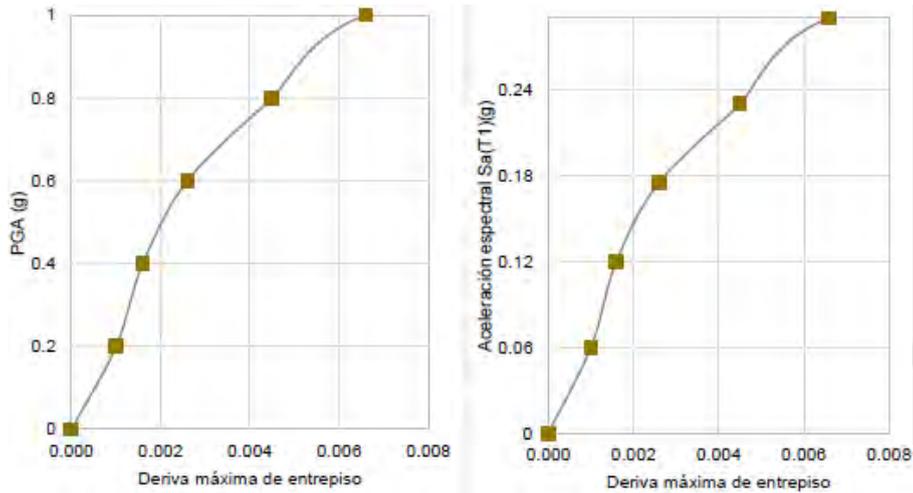


Figura 4.5 Curvas IDA Aceleración vs Deriva máxima de entrepiso (Yucra Ayala, 2018)

Cabe resaltar que para lograr una mayor exactitud y logra un mejor entendimiento de la respuesta de la estructura es necesario contar con varias curvas IDA.

En la Figura 4.6 se observan varias curvas IDA (de catorce registros) las cuales relacionan la deriva de entrepiso y Las aceleraciones espectrales que sufre la estructura.

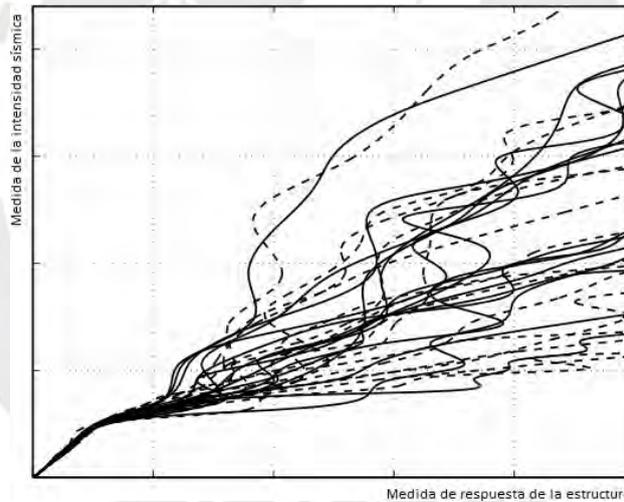


Figura 4.6 Varias Curvas IDA Aceleración vs Deriva máxima de entrepiso (Vamvatsikos, 2002)

Para condensar la información de las curvas IDA se podrá usar medidas de dispersión de acuerdo a ciertos percentiles como el de 50%. Este indica que un conjunto de datos de la muestra es menor que ese porcentaje; mientras que el resto es mayor a ese valor.

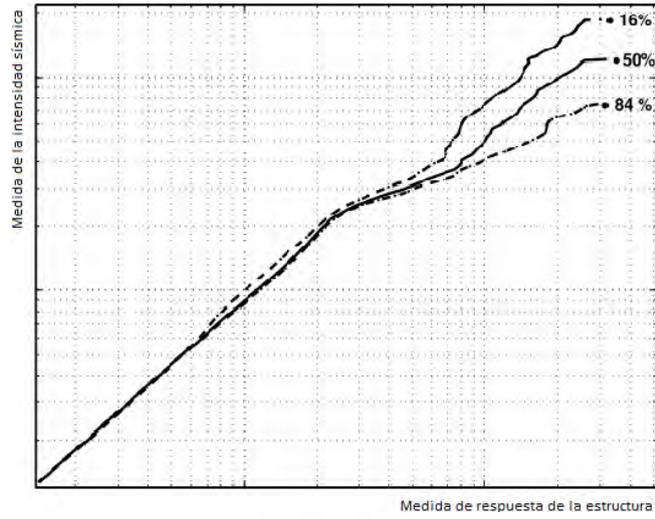


Figura 4.7 Percentiles 16 y 84 de varias curvas IDA (Vamvatsikos, 2002)



CAPITULO 5. ANÁLISIS Y DISEÑO DE UNA EDIFICACION HOSPITALARIA - CASO DE ESTUDIO

5.1 Características del hospital

En este capítulo se presenta como caso de estudio uno de los bloques del Hospital Regional de Moquegua, situado en el departamento de Moquegua. Según la clasificación del Ministerio de Salud (MINSA), este hospital es de Categoría III (tercer nivel de atención). La Figura 5.1 presenta una foto de la fachada.



Figura 5.1 Fachada Hospital Regional de Moquegua (Imagen MINSA)

Este caso de estudio consiste en uno de los diez bloques del hospital (Bloque 4). Cabe aclarar que el año 2013 comenzó la construcción de estos bloques, por lo que ya se encuentra en funcionamiento. El bloque fue concebido para propósitos de diagnóstico, patología y hospitalización, y cuenta con tres pisos más azotea sin sótanos.

En la Figura 5.2 se presenta el plano de encofrados del bloque:

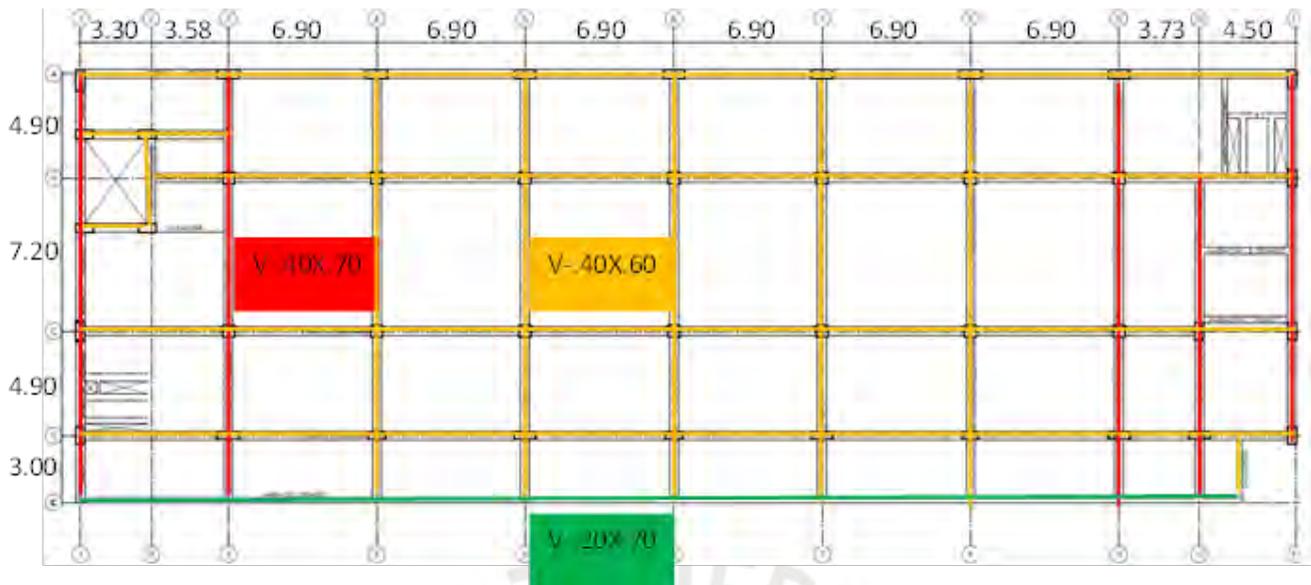


Figura 5.2 Plano de encofrado del Bloque 4 (Caso de estudio)

Para el diseño, se tiene en cuenta:

- Resistencia del concreto a los 28 días, $f'c = 210 \text{ Kg/cm}^2$ para todos los elementos estructurales.
- Esfuerzo de fluencia del acero $f_y = 4200 \text{ Kg/cm}^2$ (Acero ASTM A-615).

Además, del siguiente cuadro de cargas obtenidos de la Norma E.020 Cargas

Tabla 5.1 Cargas Norma E.020 (E.020, 2018)

CARGAS		
CARGA MUERTA	Losa maciza $h=0.20\text{m}$	480 kgf/m ²
	Piso Terminado	100 kgf/m ²
	Tabiques	270 kgf/m ²
CARGA VIVA	Corredores y escaleras	400 kgf/m ²
	Ambientes destinados a salas de operación, laboratorios	300 kgf/m ²
	Ambientes destinados habitaciones	200 kgf/m ²
	Azotea	100 kgf/m ²

5.2 Análisis y Diseño de la estructura con dispositivos de goma

El análisis y diseño de la estructura se realiza para ambos casos de aislamiento. En primer lugar, se diseña la estructura aislada con dispositivos de goma. Por último, se diseña la estructura con dispositivos friccionales.

5.2.1 Análisis de la estructura de base fija

La representación matemática de la estructura se hace mediante el uso del software ETABS. Las cargas de gravedad que se colocan en el modelo se indican en la Tabla 5.1, además se usan los parámetros sísmicos indicados en la Tabla 5.2 generar los casos de carga de sismo estático y dinámico lineal. El metrado de cargas también se obtiene del programa (ver Tabla 5.3).

Tabla 5.2 Parámetros sísmicos para base fija

PARAMETROS SISMICOS BASE FIJA		
Simbolo	Cantidad	Unidad
Z	0.45	g
U	1.5	-
C	2.5	-
S	1.05	-
Tp	0.6	s
TL	2	s
R	8	-

Para estudiar las propiedades dinámicas de la estructura el modelo de base fija se construye considerando que por cada nivel hay tres grados de libertad (dos traslacionales y uno torsional). Como condición de borde se restringe en la base los tres grados de libertad traslacionales. Como consideración adicional no hay asimetría de masa en los pisos, ello para comparar el periodo fundamental de la estructura con base fija y aislada.

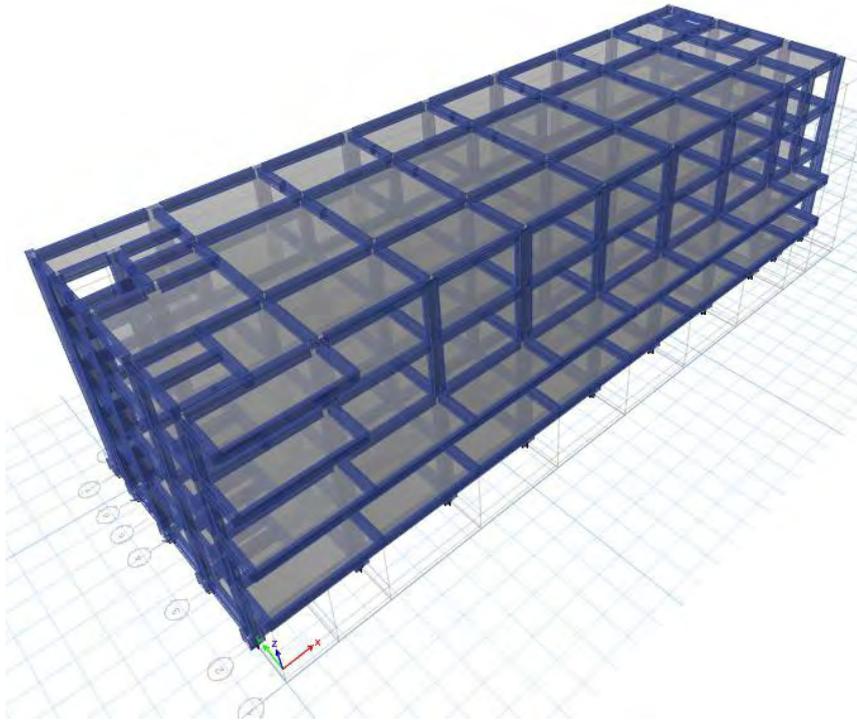


Figura 5.3 Modelo base fija en ETABS del pabellón 4 (Caso de estudio)

A continuación, se muestra los periodos de vibración de los tres primeros modos. Como se observa el modo 1 tiene un periodo fundamental de 0.81 segundos al cual le corresponde una masa de participación de 76% en la dirección Y, y el tercer modo con 0.68 segundos de periodo y un porcentaje de masa participativa de 84% en la dirección X, lo cual nos muestra la gran influencia que tiene cada modo en esa respectiva dirección.

Tabla 5.3 Análisis modal de la estructura con base fija

ANALISIS 3GDL			
Modo	1	2	3
Periodo (s)	0.81	0.71	0.68
% Masa Participante X-X	0%	0%	84%
% Masa Participante Y-Y	76%	8%	0%

Tabla 5.4 Masa de la estructura de base fija

Nivel	Masa (tonfs ² /m)
Piso 4	107
Piso 3	148
Piso 2	164
Piso 1	165
Masa total	584

5.2.2 Predimensionamiento del sistema de aislamiento con dispositivos de goma

Para el predimensionamiento de la estructura aislada se utiliza un modelo de un grado de libertad con periodo objetivo inicial $T_b=3.5s$ que es mayor al periodo de base fija. Cabe resaltar que este análisis se realiza en el rango elástico.

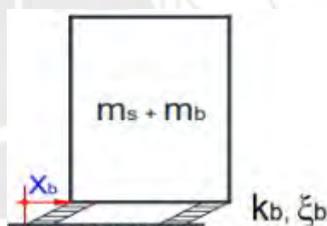


Figura 5.4 Modelo de un grado de libertad (Muñoz, 2019)

En una primera evaluación, se supone que la rigidez de todo el sistema se divide de manera uniforme entre los 41 dispositivos disponibles (uno debajo de cada columna). Las rigidez de cada dispositivo tiene un valor de 60.71 ton/m, que se puede encontrar fácilmente en el mercado (https://www.bridgestone.com/products/diversified/antiseismic_rubber/). Además, se ha asumido un valor inicial de 15% para el amortiguamiento equivalente del sistema de aislamiento.

5.2.3 Diseño preliminar del sistema de aislamiento con dispositivos de goma

El diseño inicial del sistema de aislamiento que utiliza dispositivos de goma se lleva a cabo mediante el uso de un modelo elástico y un análisis espectral modal del edificio aislado. La estructura se trata como un modelo con un solo grado de libertad y de masa concentrada. La masa total de la estructura se determina sumando la masa de la superestructura y la

subestructura, y considerando el peso muerto total y el 50% de la carga viva según lo establecido por la NTP E.030, para edificaciones esenciales. Se asumen valores de rigidez efectiva y amortiguamiento para el sistema de aislamiento, de esta manera se define la flexibilidad necesaria del sistema para cumplir con los objetivos establecidos. En la Tabla 5.6 se especifica el factor de amortiguamiento y se calcula el desplazamiento de diseño.

Tabla 5.5 Masa de la estructura aislada

Nivel	Masa (tonf*s2/m)
Piso 4	107
Piso 3	148
Piso 2	164
Piso 1	165
Sistema de Aislamiento	188
Masa Total	772

Tabla 5.6 Parámetros de aislamiento para dispositivos de goma

Parámetro	Símbolo	Cantidad	Unidad
Masa total	Mt	772.32	tonf*s/m2
Razon de amortiguamiento	β_D	15	%
Periodo objetivo	TD	3.5	s
Rigidez del sistema	Kb	2489	tonf/m
Desplazamiento máximo (2500 años)	SD	0.53	m
Factor de amplificacion	BD	1.35	-
Desplazamiento máximo/ Factor	SD/B	0.39	m

En la Tabla 5.7 se muestra el análisis modal, donde los tres primeros modos tienen masas participativas mayores al 90%. El modo fundamental en la dirección X tiene periodo de 3.55s, en la dirección Y un periodo de 3.53s. Además, en la Figura 5.5 se muestran los dos primeros modos (traslacionales).

Los desplazamientos máximos de los diafragmas en la superestructura muestran un valor máximo el de 40 cm en la azotea, valor que se aproxima al del obtenido en el modelo de un grado de libertad.

Tabla 5.7 Características dinámicas del edificio con base aislada con dispositivos de goma

Modo	Periodo (s)	Masa participativa UX %	Masa participativa UY %	Masa participativa RZ %	Masa participativa acumulada UX %	Masa participativa acumulada UY %	Masa participativa acumulada RZ %
1	3.55	1.8%	97.7%	0.5%	1.8%	97.7%	0.5%
2	3.53	96.3%	2.0%	1.7%	98.1%	99.7%	2.2%
3	3.24	1.9%	0.3%	97.7%	100.0%	99.9%	99.9%
4	0.50	0.0%	0.1%	0.0%	100.0%	100.0%	99.9%
5	0.44	0.0%	0.0%	0.1%	100.0%	100.0%	100.0%
6	0.42	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	100.0%	100.0%
7	0.22	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	100.0%	100.0%
8	0.20	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	100.0%	100.0%
9	0.20	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	100.0%	100.0%
10	0.19	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	100.0%	100.0%
11	0.19	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	100.0%	100.0%
12	0.19	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	100.0%	100.0%

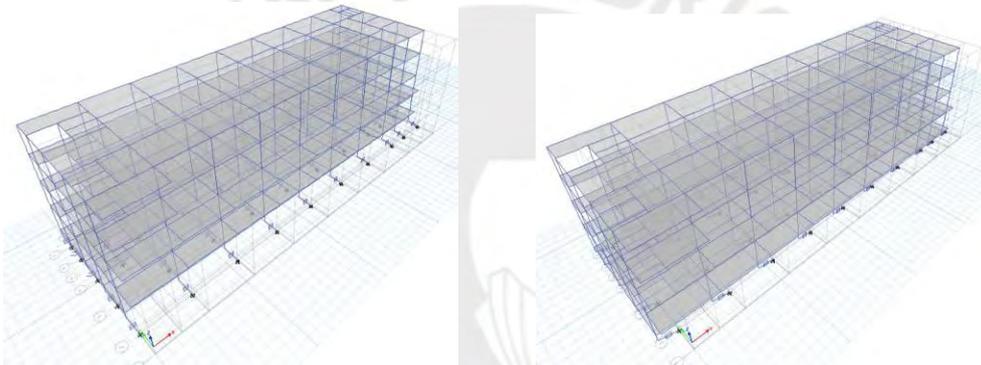


Figura 5.5 Modo 1 y 2 en traslación del edificio aislado

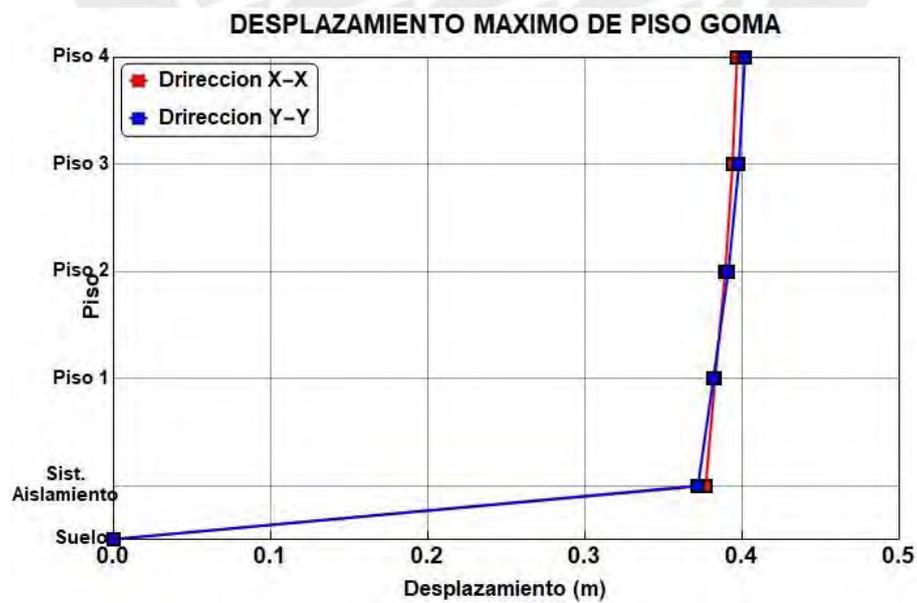


Figura 5.6 Máximos desplazamientos en los diafragmas

Además, se han realizado los análisis cuando los dispositivos sufren cambios en sus características; es decir para los límites superiores (λ max.) e inferiores (λ mín.), estos de acuerdo a los factores lambda establecidos por la norma NTE E.031, mencionados anteriormente. La variación en las propiedades de los dispositivos de goma se ha evaluado considerando los factores presentados en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8 Factores de variabilidad para dispositivos de goma según NTE E.031

Factores de Variabilidad	λQd	λKd
Nominal	1.0	1.0
Max	1.5	1.3
Min	0.8	0.8

En la Tabla 5.9 se muestra el análisis preliminar considerando las propiedades nominales, inferiores y superiores.

Tabla 5.9 Análisis preliminar del sistema de aislamiento con dispositivos de goma

Propiedades	Dy(m)	λQd	λKd	Q	K2	K1	alfa	TM	KM	βM
Nominal	0.0141	1.0	1.0	238	1881	18813	10	3.50	2489	15%
Superior	0.0218	1.5	1.3	357	2446	18813	8	3.00	3392	17%
Inferior	0.0110	0.8	0.8	190	1505	18813	13	3.91	1993	15%

El propósito del análisis es comprobar que las derivas sean inferiores a 3.5%, como lo indica la normativa NTE E.031 (para el caso espectral), y que las aceleraciones se encuentren debajo de 0.3g. Para cumplir con este objetivo, se usan los factores de variabilidad máximos de la NTE E.031.

Se utilizan la rigidez y amortiguamiento equivalente descritos en las Tablas 5.10 y 5.11, las cuales indican las propiedades lineales de los dispositivos.

Tabla 5.10 Propiedades lineales dispositivos de goma

	Aislador elastomérico		
	Tipo 1	Tipo 2	Unidad
Cantidad	17	20	-
Carga axial Promedio (P)	184	175	tonf
Rigidez efectiva (Keff)	70	64	tonf/m
Coefficiente de amortiguamiento (Ceff)	11	9	tonf*s/m
Razon de amortiguamiento (β_{eff})	15	12	%

Tabla 5.11 Propiedades lineales deslizador plano

	Deslizador Plano	
	Tipo 3	Unidad
Cantidad	4	-
Carga axial Promedio (P)	247	tonf
Coefficiente de fricción (μ)	0.01	-
Rigidez efectiva (K_{eff})	6	tonf/m
Razon de amortiguamiento (β_{eff})	63.66	%

En la Tabla 5.12 se muestra las propiedades lineales de los dispositivos afectados por el lambda máximo.

Tabla 5.12 Rigidez y Amortiguamiento efectivos de los dispositivos de goma afectados por λ máximo

Tipo	Cantidad	Masa (Tonxm/s)	DM (m)	K/aislador (Tonf/m)	β_{eff}
Tipo 1	17	19	0.38	95	16%
Tipo 2	20	18	0.38	86	14%
Tipo 3	4	25	0.38	15	64%

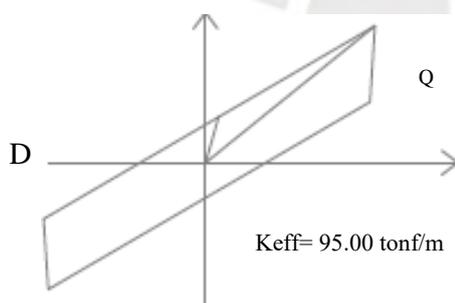


Figura 5.7 Curva histérica para aislador Tipo 1

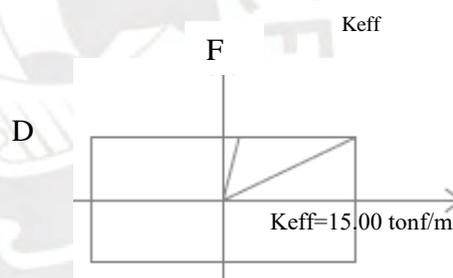


Figura 5.8 Curva histérica para deslizador

La deriva máxima de piso en la Figura 5.9 tiene un valor máximo de 2.10‰ en la dirección X, mientras que en la dirección Y tiene un valor de 3.48‰, derivas que son inferiores al límite de establecido en la Norma E031; mientras que la aceleración máxima obtenida en la azotea es de 0.22g.

Tabla 5.13 Resumen de derivas máximas

Nivel	Diafragma	Deriva ‰
Piso 4	D4	1.51
Piso 3	D3	2.54
Piso 2	D2	3.45
Piso 1	D1	3.27

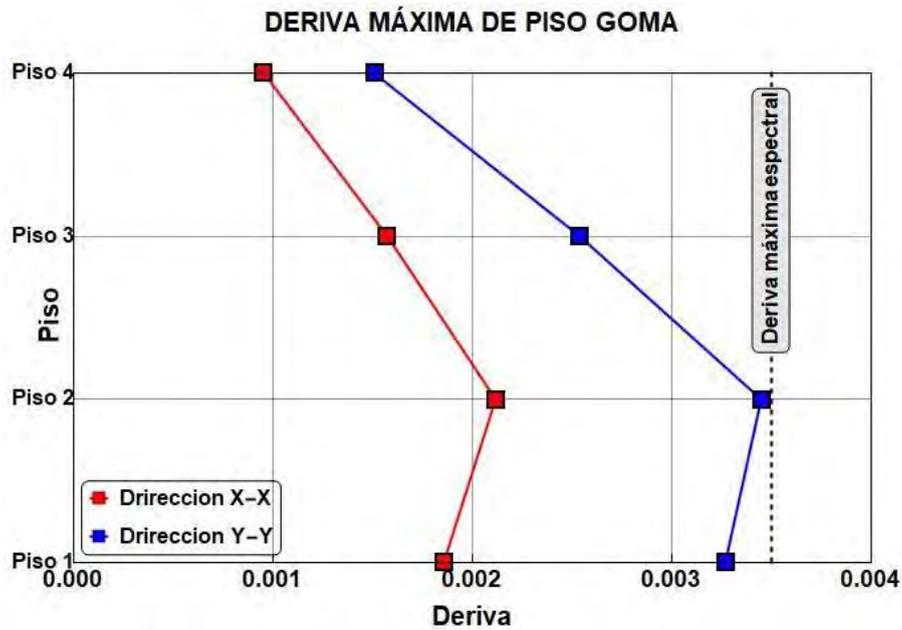


Figura 5.9 Derivas máximas con el caso de λ máximo

5.2.4 Diseño final del sistema de aislamiento con dispositivos de goma

El siguiente paso es determinar las propiedades específicas de cada uno de los aisladores y deslizadores que forman parte del sistema de aislamiento. Se presentan los resúmenes detallados de sus propiedades no lineales, su ubicación y cantidad.

En primer lugar, se muestran las características de los aisladores, estos se dividieron en dos grupos denominados Tipo-1 y Tipo-2, los cuales se diferencian en rigidez efectiva y amortiguamiento equivalente. Sus características no lineales se muestran a continuación.

Tabla 5.14 Modelo constitutivo de los dispositivos de goma

	Aislador elastomérico		
	Tipo 1	Tipo 2	Unidad
Relacion k_1/k_2	17	20	-
Desplazamiento de fluencia (D_y)	0.013	0.011	m
Rgidez post-fluencia (k_2)	53.49	50.82	tonf/m
Rigidez pre-fluencia (k_1)	534.87	508.22	tonf/m
Fuerza de fluencia (F_y)	7.18	5.60	tonf/m
Fuerza en desplazamiento cero (Q_d)	6.46	5.04	tonf/m

Se utilizará también un solo grupo de deslizadores, cuyas características están definidas por la carga axial que resisten. Los resultados de las propiedades lineales de dichos deslizadores se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 5.15 Modelo constitutivo del deslizador

	Deslizador Plano	
	Tipo 3	Unidad
Rigidez pre-fluencia (k1)	224.62	tonf/m
Rgidez post-fluencia (k2)	2246200	tonf/m
Coefficiente dinamico de friccion (μ)	0.01	-
Velocidad	100	mm/s

A continuación, se muestra la Figura 5.10 que indica la ubicación de los aisladores en el sistema de aislamiento.

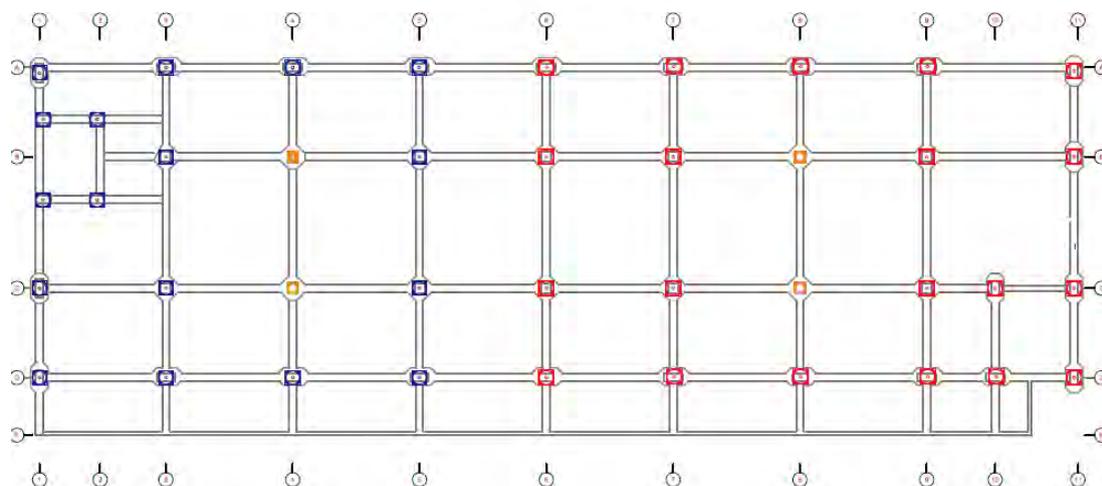


Figura 5.10 Ubicación de los aisladores de goma y deslizadores



17 unidades de aislador Tipo 1



20 unidades de aislador Tipo 2



4 unidades de deslizador

5.2.4.1 Verificación del sistema de aislamiento para dispositivos de goma mediante tiempo historia no lineal FNA

Para verificar el sistema de aislamiento se realiza un análisis no lineal FNA, para ello se modelaron los dispositivos como elementos tipo "Link" en ETABS. Estos elementos tienen grados de libertad restringidos en rotación (R1, R2, R3), mientras que en los demás grados

de libertad (traslacionales) se les asigna las propiedades de su modelo constitutivo, como los calculados en las Tablas 5.14 y 5.15. El analizar con FNA, implica considerar que toda la estructura se mantiene en el rango elástico mientras que los aisladores incursionan en el rango inelástico. Para considerar el comportamiento inelástico se usan las relaciones entre la rigidez pre y post fluencia, y la fuerza de fluencia.

5.2.4.2 Preparación del juego de registros sísmicos

En este estudio se escogieron diez pares de registros de terremotos de subducción. Estos son de estaciones que tienen suelo y zona sísmica que se asemejan al caso de estudio. Los registros se ajustan al espectro de diseño para el sismo máximo considerado establecido por la normativa NTE E.031 de Perú.

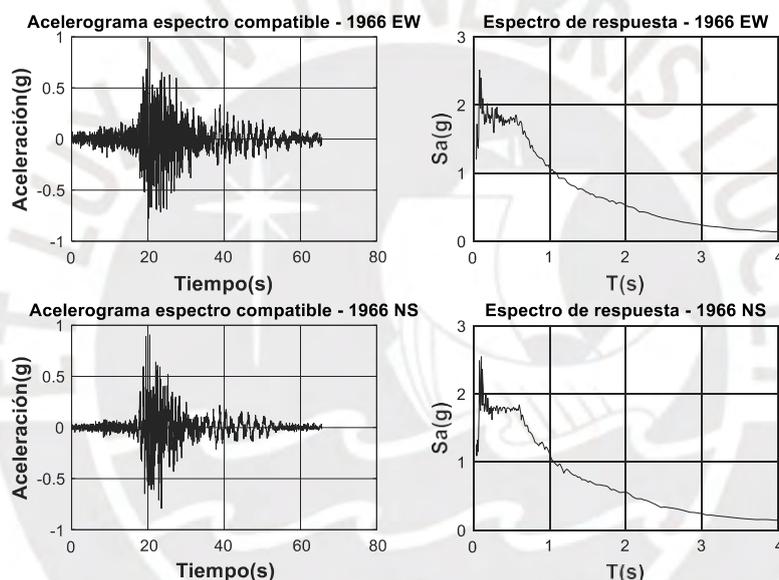


Figura 5.11 Acelerogramas y espectros de respuesta para el sismo de Lima de 1966

El escalado de las señales se realiza en una dirección específica mediante el método de las raíces cuadráticas de las amplitudes de las señales (SRSS) con factores de 0.92 para la dirección principal y 0.44 para la dirección ortogonal. Para este tratamiento de los registros se verifica que la media de los SRSS sea mayor al espectro del SMC en el rango de $0.2 T_M$ calculado con el límite superior y 1.5 veces T_M calculado con el límite inferior según la NTP E.031. La Figura 5.12 se presenta los espectros SRSS utilizados en el análisis.

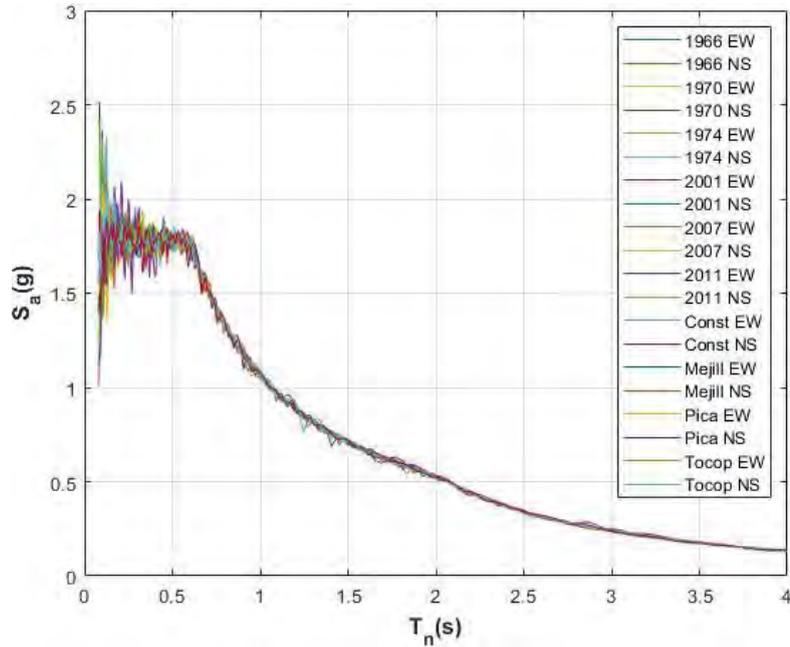
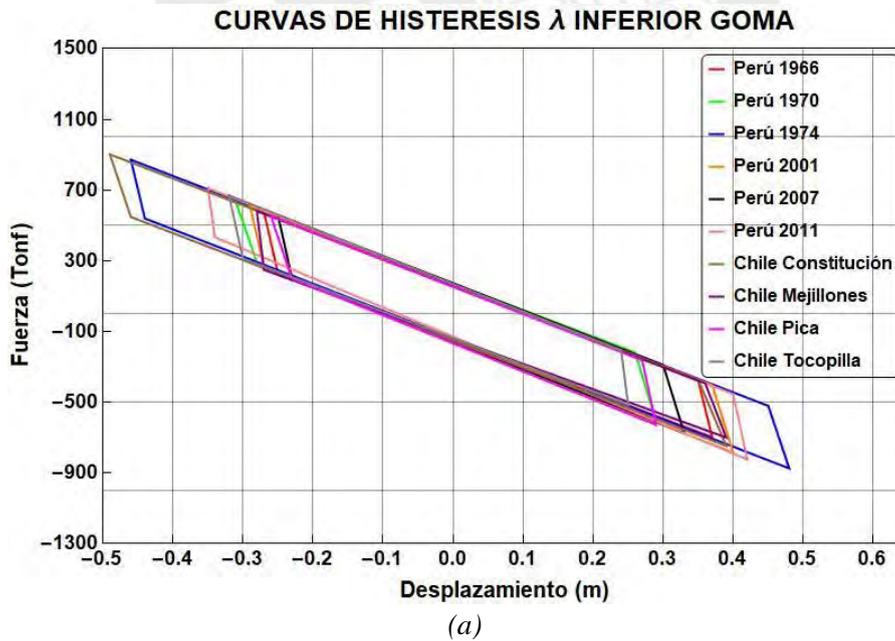


Figura 5.12 Espectros SRSS de los acelerogramas

5.2.4.3 Curvas de histéresis promedio del sistema aislado con péndulo friccional

Se desarrolla el FNA con los tres modelos descritos anteriormente, en las Figuras 5.13 se muestran las curvas de histéresis para los modelos afectados por λ inferior, λ nominal y λ superior respectivamente.



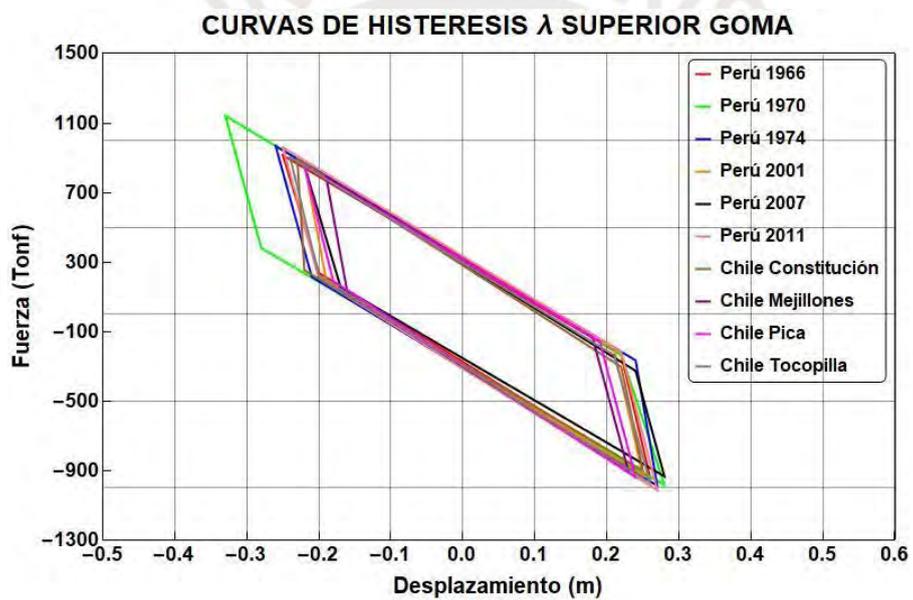
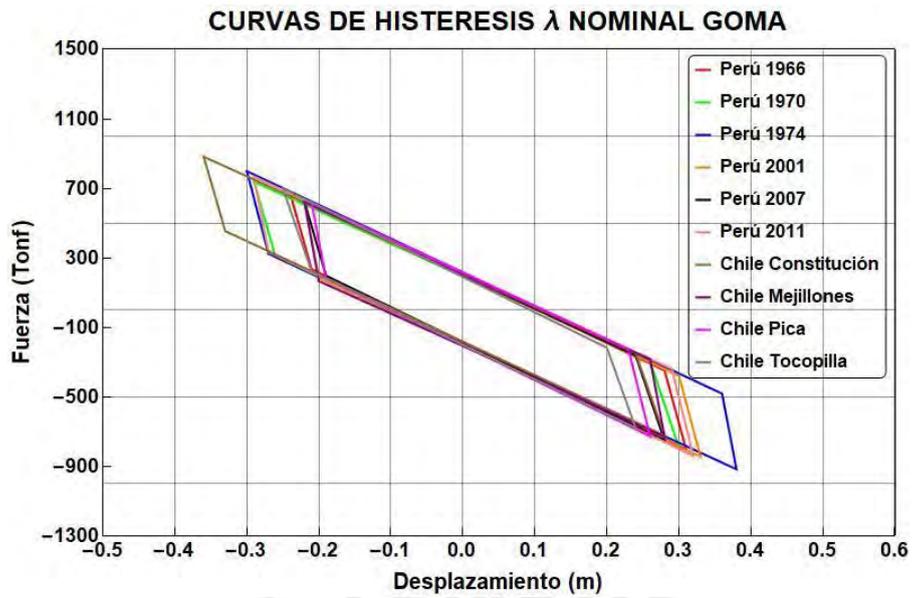


Figura 5.13 Lazos históricos para goma; a) λ inferior, b) λ nominal, c) λ superior

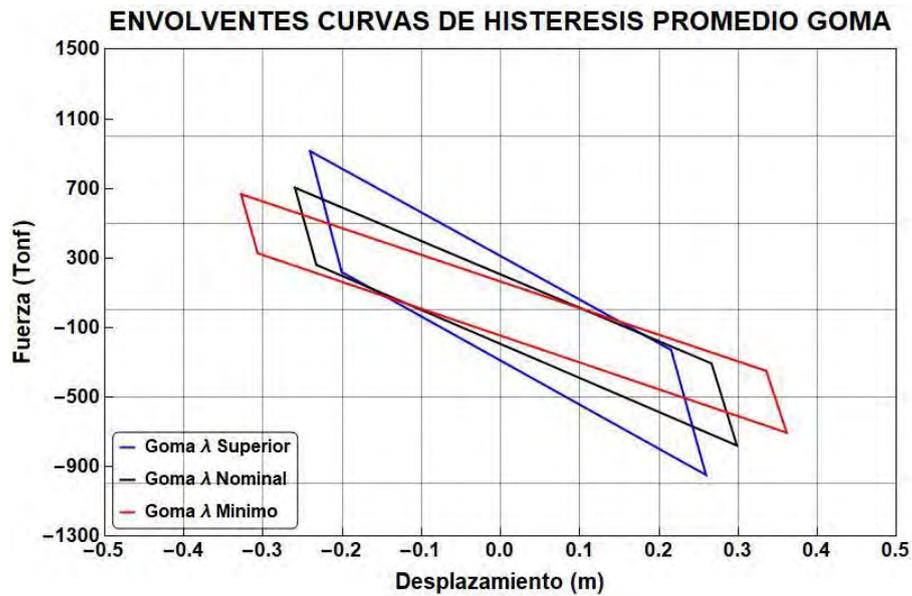


Figura 5.14 Promedio de curvas histeréticas para goma afectados para λ inferior, nominal y superior

Se determinan las propiedades del sistema de aislamiento con dispositivos de goma a partir de los promedios de histéresis; es decir su rigidez efectiva (K_{eff}) y amortiguamiento equivalente (β_{eff}). Dichas propiedades se presentan en la Figura 5.14 y resume en la Tabla 5.16.

Tabla 5.16 Parámetros de rigidez y amortiguamiento promedio obtenidos del FNA para sistema aislado con goma

Propiedades del sistema	Inferior	Nominal	Superior
Rigidez efectiva (tonf/m)	2008	2646	3742
Amortiguamiento equivalente (%)	16%	18%	21%

Además, se resumen los valores promedios de la fuerza máxima cortante y la máxima deriva, así como el promedio del desplazamiento máximo del sistema de aislamiento.

Tabla 5.17 Fuerza cortante reducida, derivas y desplazamientos para sistema aislado con goma

		Inferior	Nominal	Superior
Superestructura	Fuerza cortante (tonf)	279	308	379
	Deriva	0.0027	0.0030	0.0039
Losa de aislamiento	Desplazamiento (m)	0.46	0.36	0.29

Se notó un aumento significativo en la fuerza cortante al emplear las propiedades superiores (λ máxima), cerca de un 23% más que la cortante calculada para las propiedades nominales

(λ nominal), y un 36% más que la cortante calculada utilizando las propiedades mínimas (λ mínima).

Tabla 5.18 Periodos y derivas obtenidos del análisis estático para el sistema aislado con goma

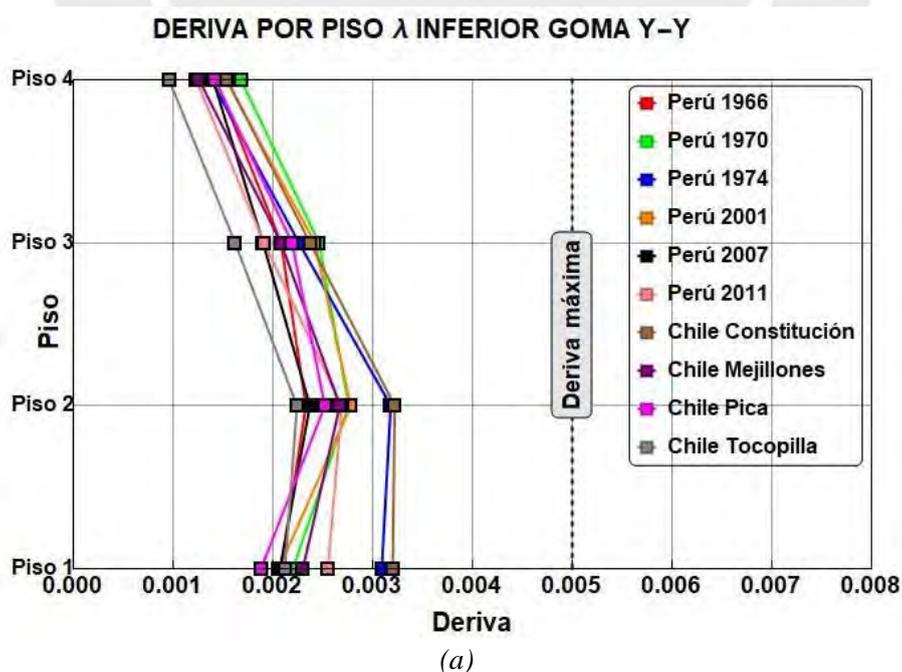
Parámetro	Inferior	Nominal	Superior
Tb (s)	3.9	3.4	2.9
Tb/Ts	4.58	3.99	3.36
ϵ	0.048	0.063	0.089
β	1.42	1.46	1.54
Δ losa aislamiento (m)	0.32	0.25	0.19
Δ azotea (m)	0.34	0.26	0.21
Deriva	0.0009	0.0009	0.0010

A partir de los resultados obtenidos con el FNA (K_{eff} y β_{eff}) se presenta la Tabla 5.18 que muestra los desplazamientos (en losa de aislamiento y azotea), y derivas determinadas con el análisis estático. Se puede notar que los factores lambda hicieron un cambio significativo en el período del edificio con aislamiento (T_b).

5.2.4.4 Respuesta del edificio aislado

5.2.4.4.1 Derivas

La deriva de entrepiso es una medida del daño estructural causado por los terremotos. En los edificios aislados, los límites máximos para las derivas son más estrictos (5‰ en análisis tiempo historia). La Figura 5.15 muestra las derivas máximas para los distintos casos de λ .



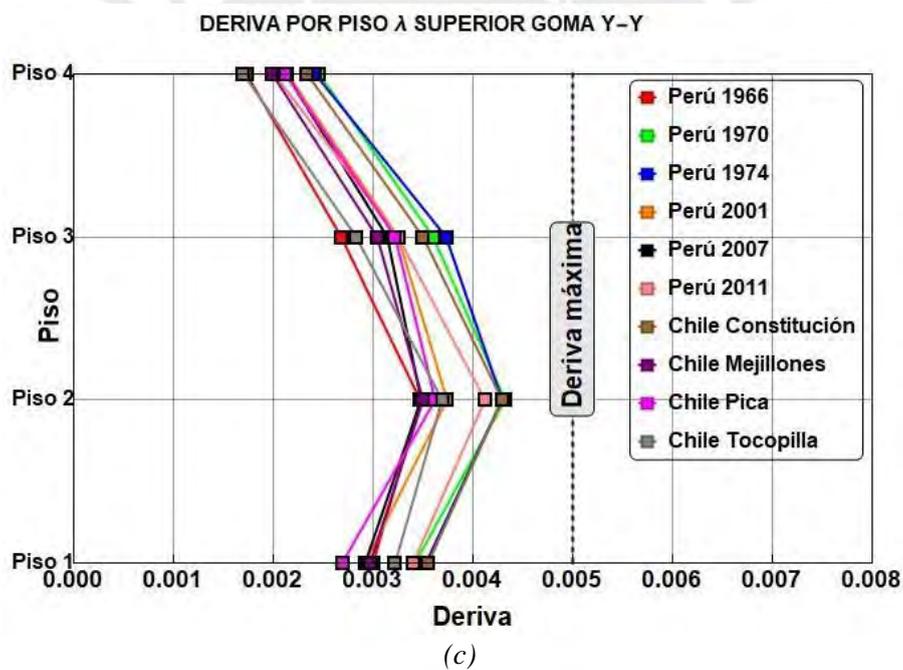
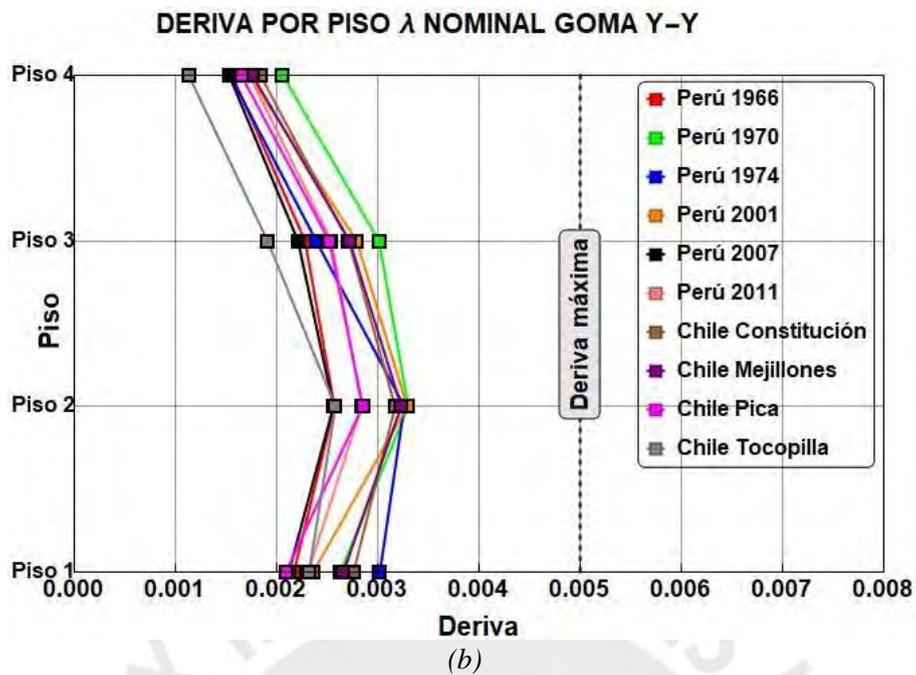


Figura 5.15 Derivas máximas Tiempo Historia goma; a) λ inferior, b) λ nominal, c) λ superior

Se contempla que, al aumentar las propiedades de los dispositivos de aislamiento a sus valores máximos, se experimenta un incremento significativo en las derivas del modelo. Estas derivas varían desde un mínimo de 2.6‰ (utilizando las propiedades inferiores) hasta un máximo de 3.9‰ (utilizando las propiedades superiores).

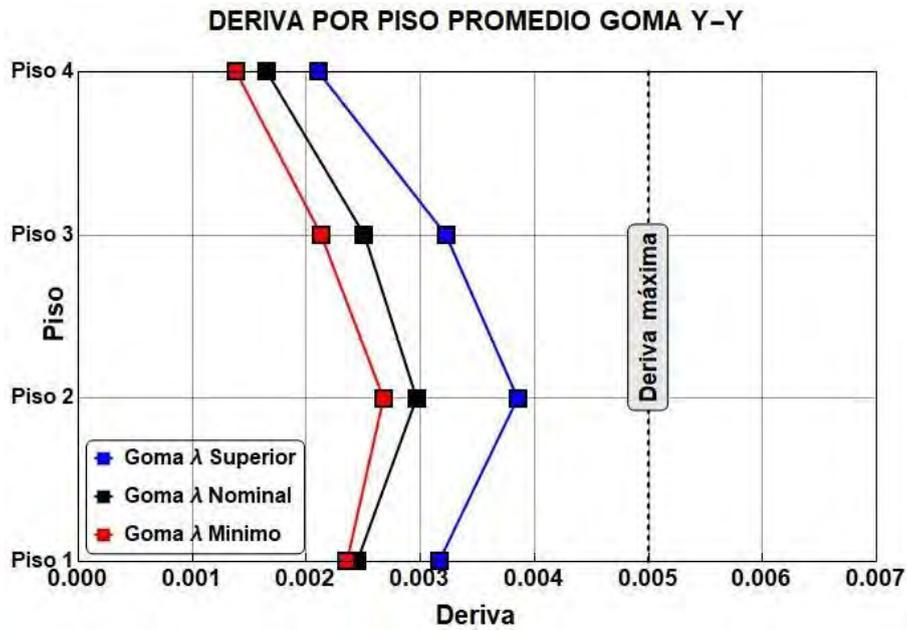


Figura 5.16 Derivas máximas promedio TH - goma (λ inferior, λ nominal y λ superior)

La Figura 5.17 muestra los resultados comparativos de las derivas máximas obtenidas tanto en el análisis no lineal Tiempo Historia (FNA) como en el análisis espectral, ambos con base en las propiedades máximas (λ máximas) de los dispositivos de aislamiento. Se puede notar que la deriva máxima obtenida a través del FNA es un 11% mayor en comparación con la deriva obtenida en el análisis espectral.

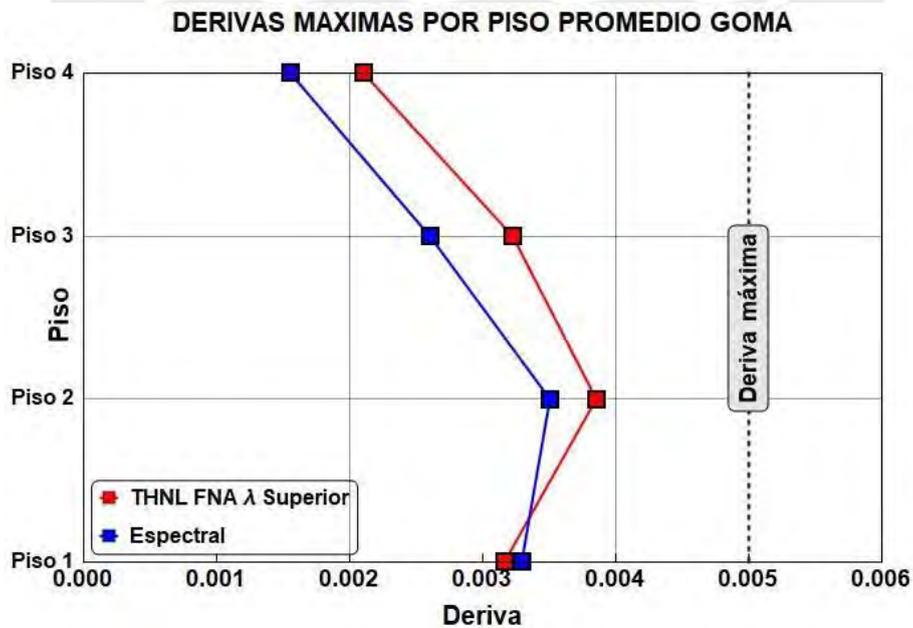
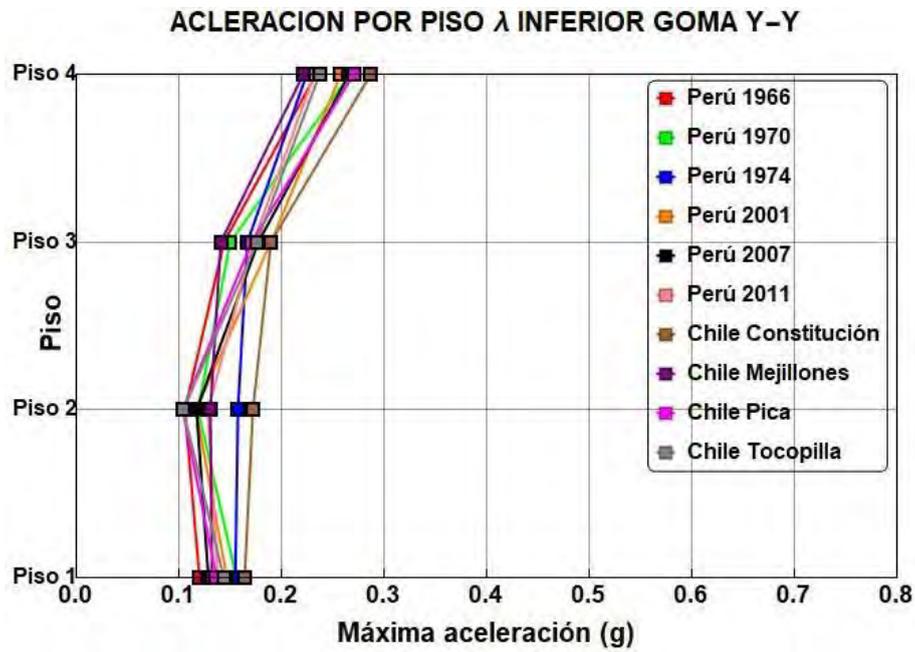


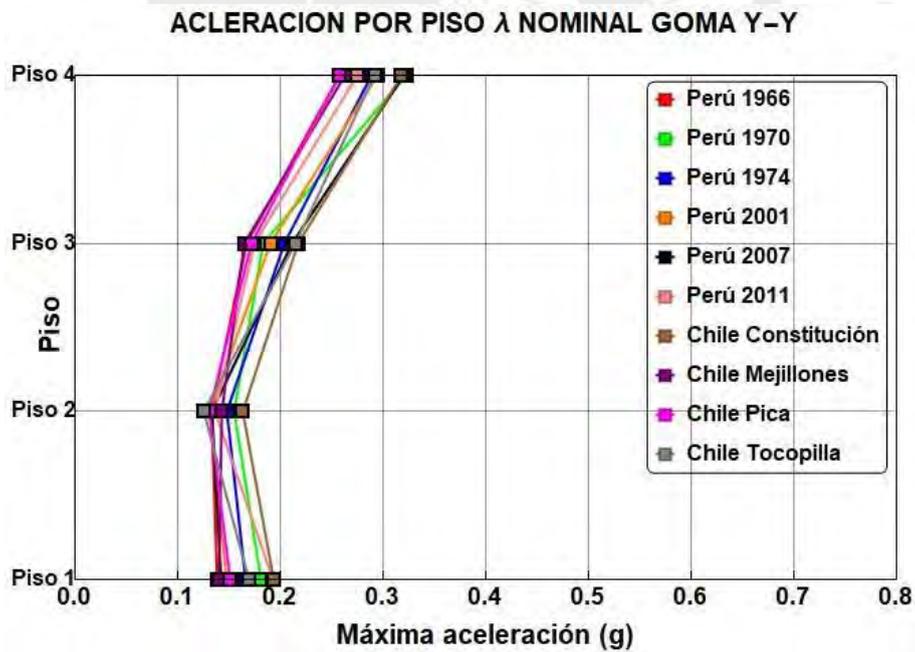
Figura 5.17 Comparativa de derivas máximas por piso para el caso espectral y FNA para λ superior - goma

5.2.4.4.2 Aceleraciones

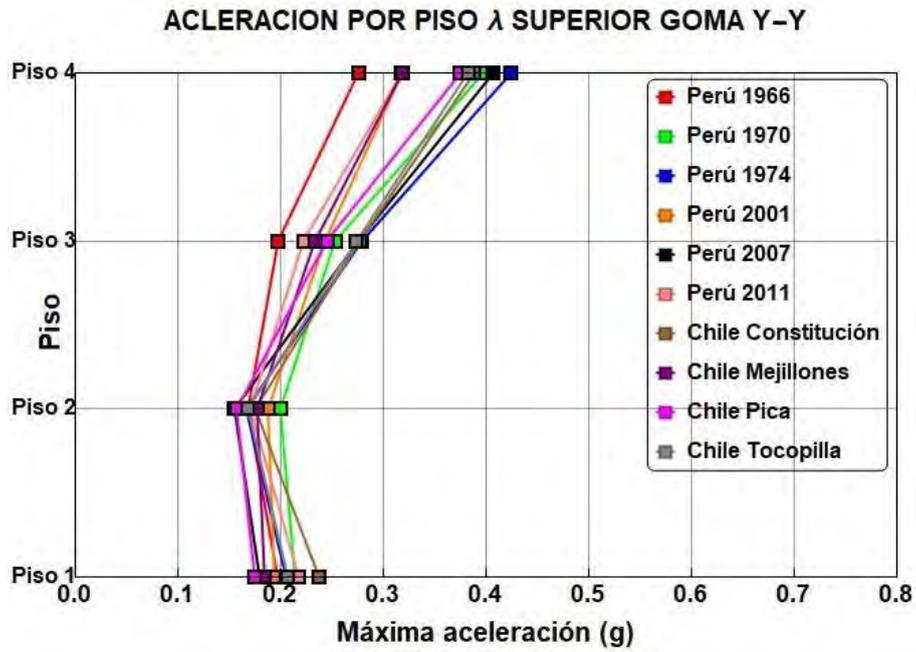
La Figura 5.18 presenta las aceleraciones más altas para los escenarios de lambda mínimo, nominal y máximo.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.18 Aceleraciones máximas Tiempo Historia - goma; a) λ inferior, b) λ nominal, c) λ superior

Se aprecia un aumento significativo en las aceleraciones utilizando las propiedades superiores en comparación con las propiedades nominales y mínimas. Las aceleraciones máximas fueron registradas en el techo y varían desde un mínimo de 0.25g (utilizando las propiedades mínimas) hasta un máximo de 0.36g (utilizando las propiedades máximas), tal como se ilustra en la Figura 5.19.

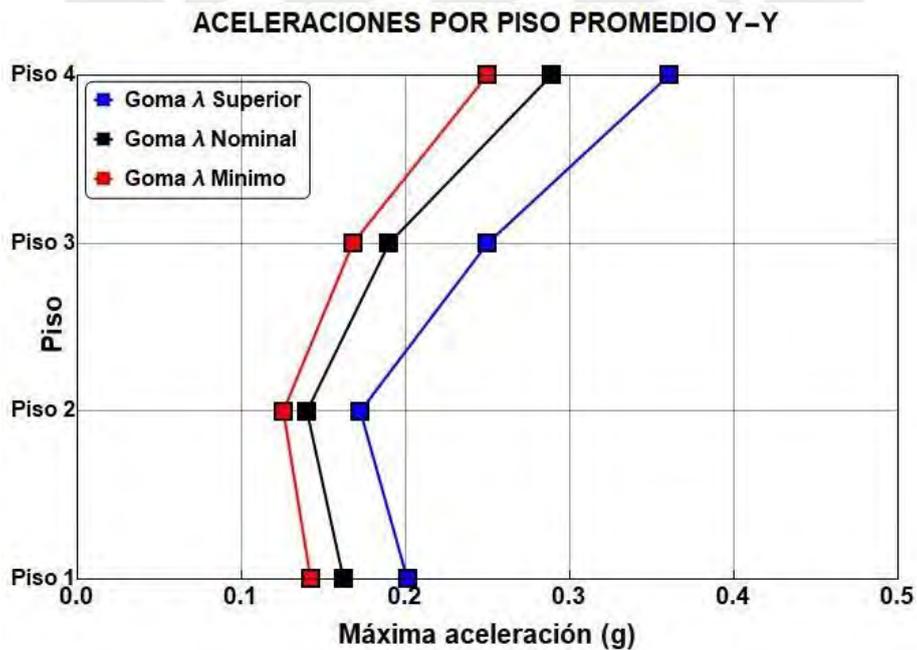


Figura 5.19 Aceleraciones máximas TH - goma (λ inferior, λ nominal y λ superior)

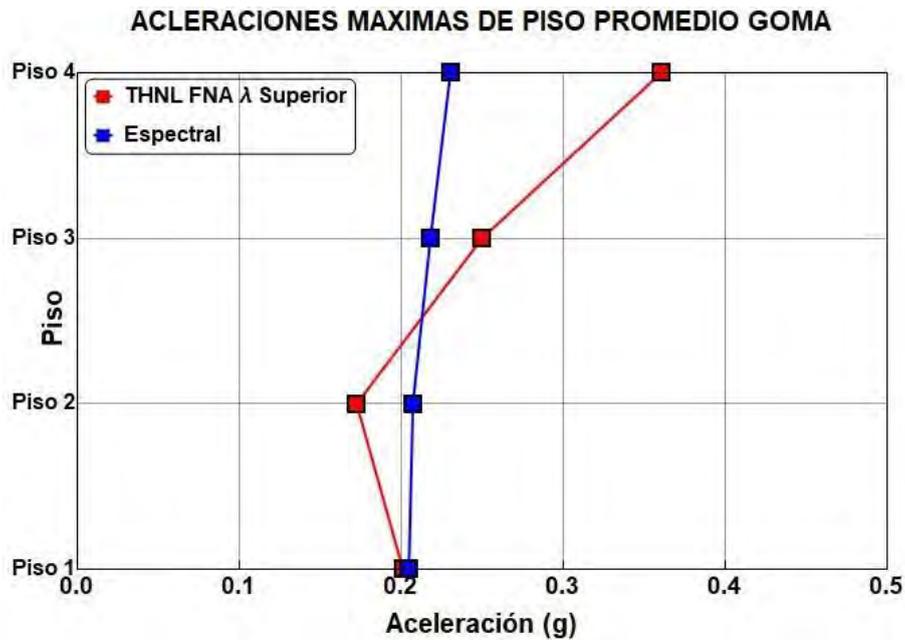


Figura 5.20 Comparativa de aceleraciones máximas por piso para el caso espectral y FNA para λ superior - goma

Las aceleraciones máximas promedio en la azotea obtenidas del FNA son mayores a las del análisis Modal Espectral como se observa en la Figura 5.20. Esta diferencia entre ambos valores es cerca del 60%.

5.2.5 Diseño de elementos estructurales

Se determinaron las propiedades lineales promedio de cada dispositivo a partir de los 10 registros. Estas propiedades se utilizaron para el diseño. En la Tabla 5.19 se presentan la rigidez y el amortiguamiento efectivo para caso de λ superior.

Tabla 5.19 Rigidez efectiva y amortiguamiento equivalente de cada tipo de dispositivo

Tipo	Cantidad	DM (m)	K/aislador (Tonf/m)	β_{eff}
Tipo 1	17	0.25	105	19%
Tipo 2	20	0.25	92	16%
Tipo 3	4	0.25	23	64%

5.2.5.1 Fuerza cortante de diseño

Se ha determinado que el cortante promedio máximo en la superestructura, obtenida a través del análisis THNL, es de 790 tonf. Al usar el coeficiente de reducción $R=2$, se obtiene una fuerza cortante de 395 tonf (6.9% W_{sup} . (peso superestructura)). Sin embargo, cuando se calcula la fuerza mínima mediante el método de fuerzas equivalentes establecido en la NTP

E. 1, la fuerza mínima de diseño para $R=2$ se obtiene 570 tonf (9.7% W_{sup}), que es mayor al calculado en el THNL. Por lo tanto, se utiliza la fuerza de 569 tonf como el valor de diseño. La Tabla 5.20 muestra un resumen del análisis.

Tabla 5.20 Fuerza cortante de diseño para la superestructura (estructura aislada con goma)

	Vs Dinamica	Vs Estatica	1.5Q	Vv Base Fija	Vs Diseño
X-X	395	570	506	447	570
Y-Y	379	570	506	447	570

En cuanto a la fuerza de diseño de la subestructura, se ha utilizado una fuerza cortante de 1040 tonf, según se detalla en la Tabla 5.21.

Tabla 5.21 Fuerza cortante de diseño para la subestructura (estructura aislada con goma)

	Vb Dinamica	Vb Estatica	0.8*Vb Estatica	Vb Diseño
X-X	972	1300	1040	1040
Y-Y	978	1300	1040	1040

En la práctica de la ingeniería estructural los elementos estructurales se diseñan con un espectro elástico de diseño. Este espectro es reducido tanto por el factor de reducción $R=2$ como por el factor de amortiguamiento $\beta=1.52$ (obtenido con λ máximo), además se considera un porcentaje de amortiguamiento de 5%. La “bajada” se da para los tres primeros modos (dos traslacionales y uno torsional). Según la NTP E.031 el factor β se relaciona a un amortiguamiento de 21%. La representación gráfica del espectro de diseño, con “bajada” en el periodo del tercer modo, se encuentra en la Figura 5.21.

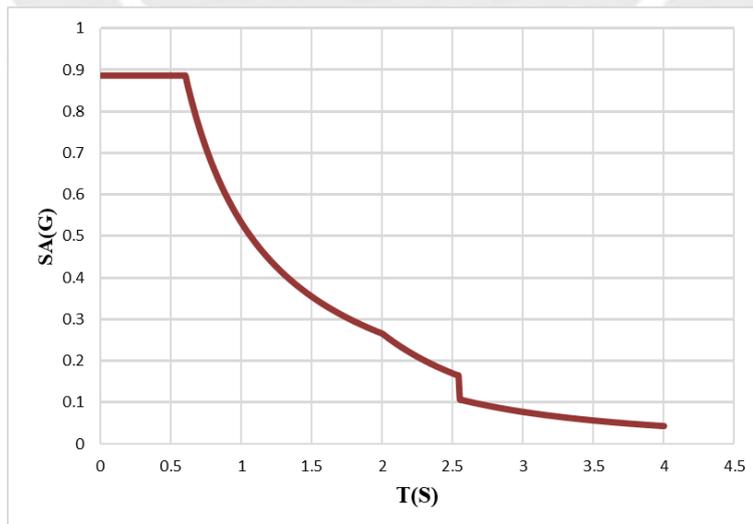


Figura 5.21 Espectro de diseño (estructura aislada con goma)

Como se indicó anteriormente se debe cumplir con la cortante mínima requerida de 570 tonf. Con esta fuerza se realizó el diseño de acuerdo a las especificaciones de la norma NTE E.060.

5.3 Análisis y diseño con dispositivos de péndulo friccional

5.3.1 Predimensionamiento del sistema de aislamiento con dispositivos de péndulo friccional

El predimensionamiento se realizó de igual manera a la que se hizo con la estructura aislada con dispositivos de goma. Se asume que la rigidez equivalente del sistema se reparte de uniformemente en los 41 dispositivos. Además, se calculó la rigidez y el amortiguamiento total de la estructura para un desplazamiento máximo de 40cm. Así como en el caso con goma el amortiguamiento de todo el sistema asumido es de 15%.

5.3.2 Diseño preliminar del sistema de aislamiento con dispositivos de péndulo friccional

El procedimiento de diseño inicial del sistema de aislamiento con péndulo friccional es el mismo que se describe en la sección 5.2. La Tabla 5.22 presenta el amortiguamiento y el valor del desplazamiento máximo de diseño.

En la Tabla 5.23 se muestra el análisis modal, donde los tres primeros modos tienen masas participativas mayores al 90%. El modo fundamental en la dirección X tiene periodo de 3.58s, en la dirección Y un periodo de 3.53s. Además, en la Figura 5.22 se muestran los dos primeros modos (traslacionales).

Tabla 5.22 Parámetros de aislamiento para dispositivos de péndulo

Parámetro	Símbolo	Cantidad	Unidad
Masa total	Mt	772.32	tonf*s/m2
Razon de amortiguamiento	βD	15	%
Periodo objetivo	TD	3.51	s
Rigidez del sistema	Kb	2475	tonf/m
Desplazamiento máximo (2500 años)	SD	0.53	m
Factor de amplificacion	BD	1.35	-
Desplazamiento máximo/ Factor	SD/B	0.39	m

Los desplazamientos máximos de los diafragmas en la superestructura muestran un valor máximo el de 40.5 cm en la azotea, valor que se aproxima al del obtenido en el modelo de un grado de libertad como se muestra en la Figura 5.22.

Tabla 5.23 Características dinámicas del edificio con base aislada con dispositivos de péndulo

Modo	Periodo (s)	Masa participativa UX %	Masa participativa UY %	Masa participativa RZ %	Masa participativa acumulada UX %	Masa participativa acumulada UY %	Masa participativa acumulada RZ %
1	3.54	1.9%	94.5%	3.6%	1.9%	94.5%	3.6%
2	3.53	98.0%	2.0%	0.0%	99.9%	96.5%	3.6%
3	3.45	0.1%	3.5%	96.4%	100.0%	100.0%	100.0%
4	0.43	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	100.0%	100.0%
5	0.42	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	100.0%	100.0%
6	0.36	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	100.0%	100.0%
7	0.20	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	100.0%	100.0%
8	0.19	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	100.0%	100.0%
9	0.19	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	100.0%	100.0%

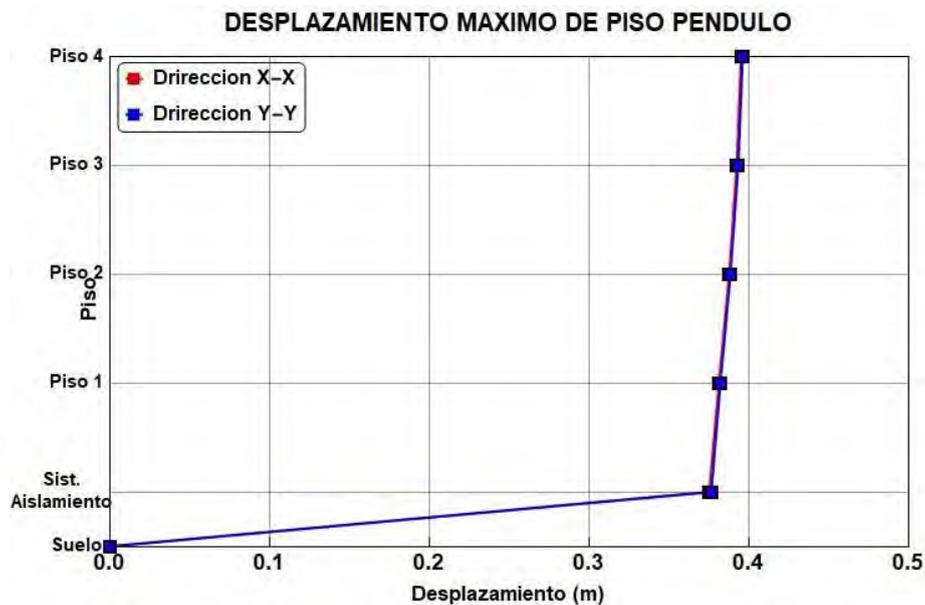


Figura 5.22 Máximos desplazamientos de los diafragmas con péndulo

Se consideran los factores lambda de la Tabla 5.24, factores que son para proveedores calificados.

Tabla 5.24 Factores de variabilidad para dispositivos de péndulo según NTE E.031

Factores de Variabilidad	μ	$\lambda\mu$
Nominal	0.03	0.030
Max	0.03	0.048
Min	0.03	0.024

En la Tabla 5.25 se muestra el análisis preliminar considerando las propiedades nominales, inferiores y superiores.

Tabla 5.25 Análisis preliminar del sistema de aislamiento con dispositivos de péndulo

Propiedades	Dy (m)	μ	μ_r	R (m)	DM (m)	TD (s)	KM (tonf/m ²)	β_M
Nominal	0.0141	0.03	0.03	4	0.391	3.51	2475	15%
Superior	0.0218	0.03	0.048	4	0.337	3.20	2973	23%
Inferior	0.0110	0.03	0.024	4	0.421	3.62	2326	12%

Se utilizan la rigidez y amortiguamiento equivalente descritos en la Tabla 5.26 las cuales indican las propiedades lineales de los dispositivos.

Tabla 5.26 Propiedades lineales dispositivos de péndulo

	Aislador de péndulo friccional		
	DFP 1-1	DFP 1-2	Unidad
Cantidad	17	24	-
Carga axial Promedio (P)	170	195	tonf
Rigidez efectiva (Keff)	56	64	tonf/m
Coefficiente de amortiguamiento (Ceff)	9	11	tonf*s/m
Razon de amortiguamiento (β_{eff})	15	15	%

En la Tabla 5.27 se resumen las propiedades lineales de los dispositivos afectados por λ máximo. Además, se muestra gráficamente la constitutiva del modelo bilineal de los dispositivos de péndulo friccional.

Tabla 5.27 Resumen propiedades lineales de los dispositivos de péndulo afectados por λ máximo

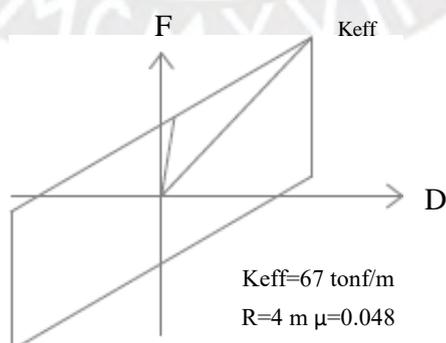


Figura 5.23 Curva histerética de un aislador de péndulo friccional

La deriva máxima de piso en la Figura 5.24 tiene un valor máximo de 2.55‰ en la dirección Y, deriva que es inferior al establecido en la NTP E031; mientras que la aceleración máxima obtenida en la azotea es de 0.20g.

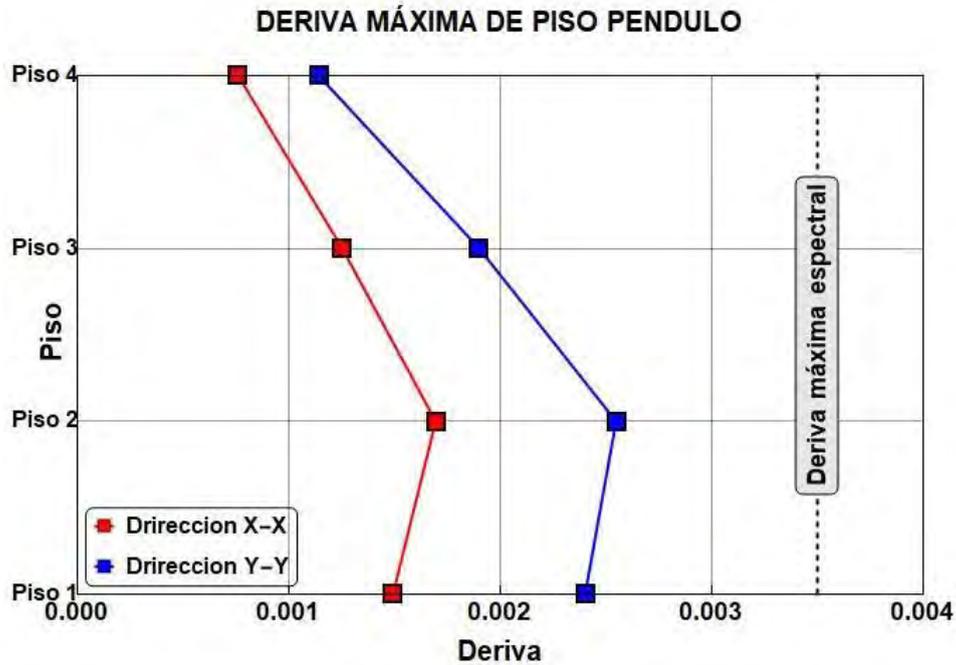


Figura 5.24 Derivas máximas en las direcciones X e Y

Tabla 5.28 Resumen de derivas máximas

Nivel	Diafragma	Deriva ‰
Piso 4	D4	1.14
Piso 3	D3	1.9
Piso 2	D2	2.55
Piso 1	D1	2.4

5.3.3 Diseño final del sistema de aislamiento con dispositivos de péndulo

Las propiedades de los dispositivos de péndulo friccional se presentan en la Tabla 5.29. Además, la ubicación de dichos dispositivos se aprecia en la Figura 5.25.

Tabla 5.29 Propiedades no lineales de los dispositivos de péndulo friccional

	Aislador de péndulo friccional	
	DFP	Unidad
Cantidad	41	-
Radio (R)	4	m
Coefficiente dinámico de fricción (μ)	0.03	-
Velocidad	50.00	mm/s

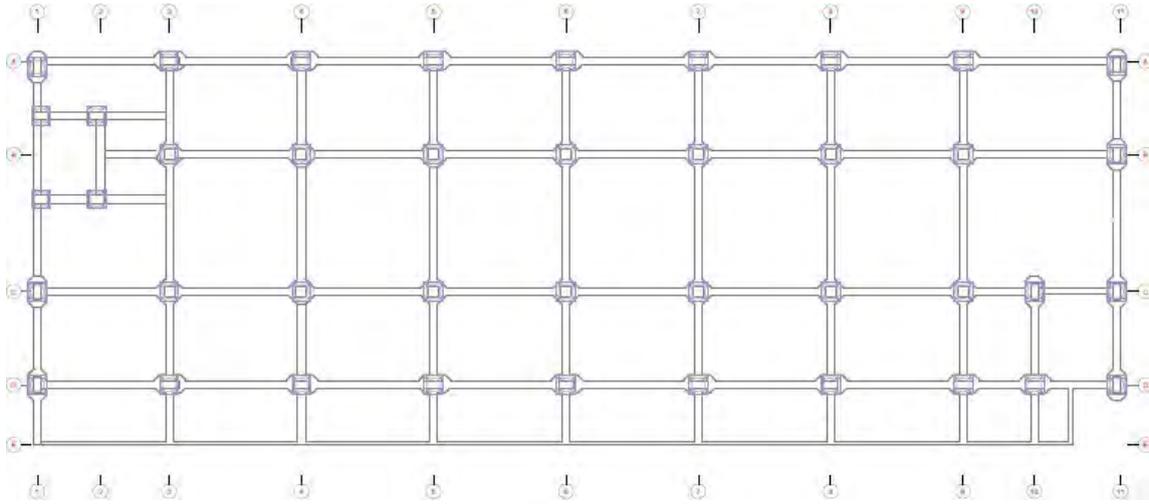


Figura 5.25 Ubicación de los aisladores de péndulo friccional

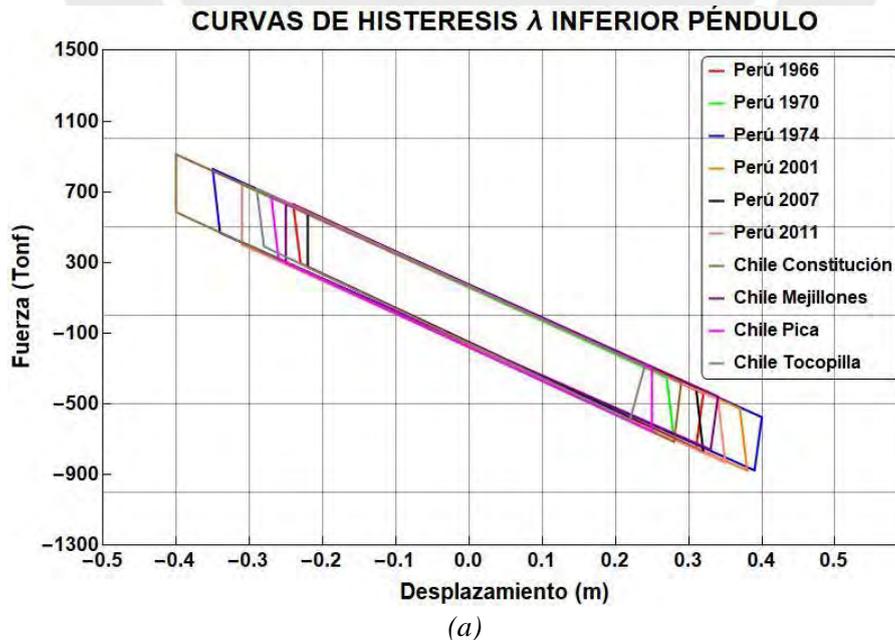


41 unidades de aislador de péndulo friccional

5.3.3.1 Verificación del sistema de aislamiento para dispositivos de péndulo mediante tiempo historia no lineal FNA

5.3.3.2 Curvas de histéresis promedio del sistema aislado con péndulo friccional

Se desarrolla el FNA con los tres modelos descritos anteriormente, en las Figuras 5.26 se muestran las curvas histeréticas para los modelos afectados por λ inferior, λ nominal y λ superior respectivamente.



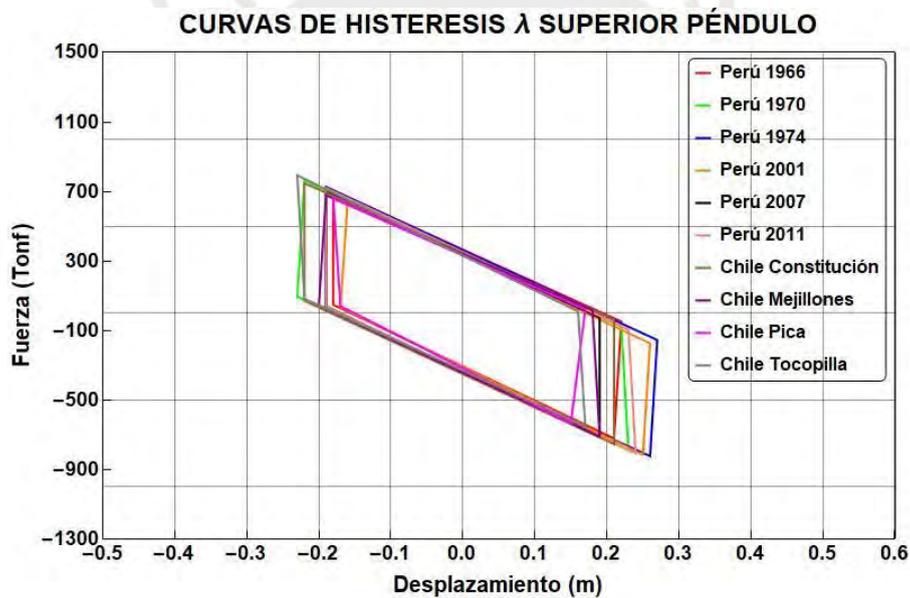
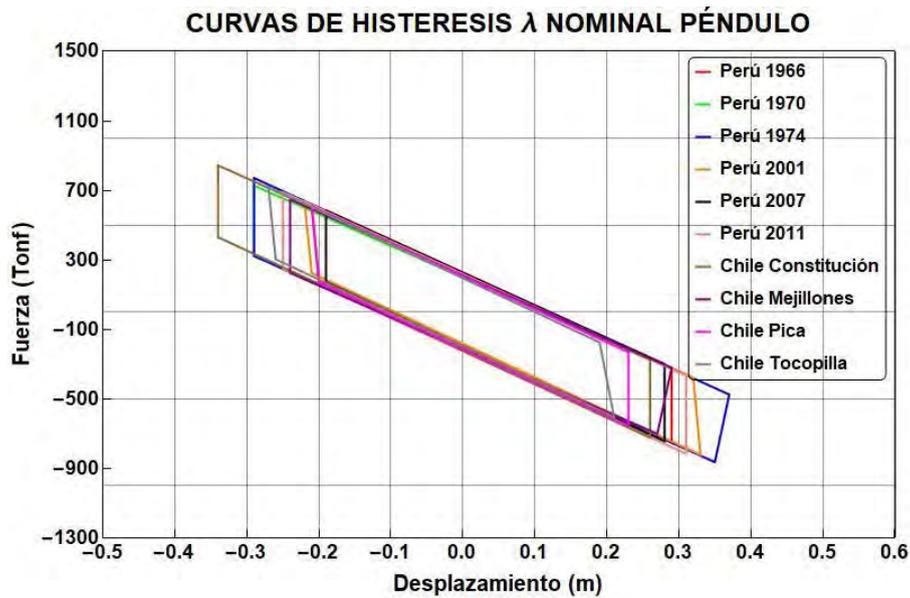


Figura 5.26 Lazos históricos péndulo; a) λ inferior, b) λ nominal, c) λ superior

Se determinan las propiedades del sistema de aislamiento con dispositivos de péndulo a partir de los promedios de histéresis; es decir su rigidez efectiva (K_{eff}) y amortiguamiento equivalente (β_{eff}). Dichas propiedades se presentan en la Figura 5.27 y resume en la Tabla 5.30.

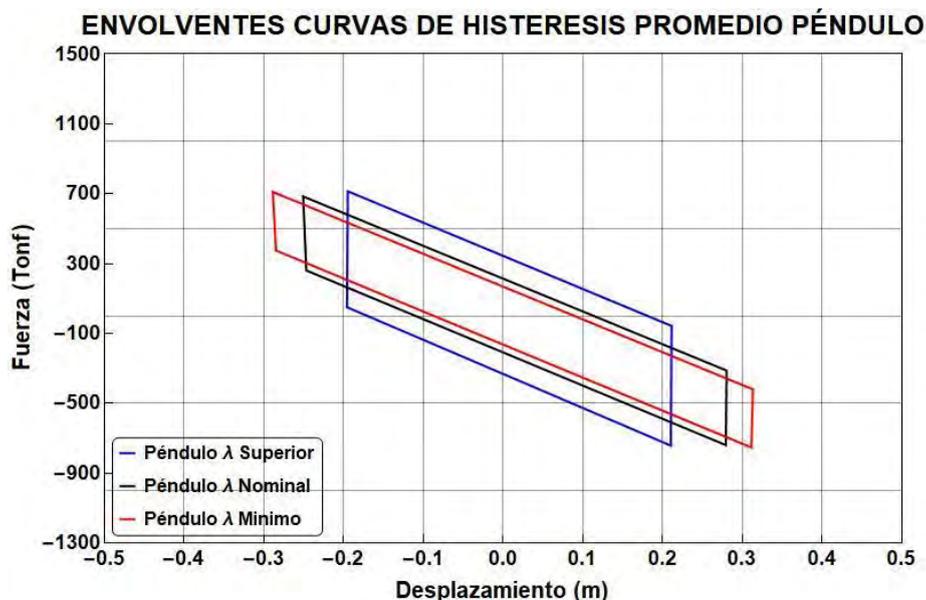


Figura 5.27 Promedio de curvas histeréticas para péndulo afectados para λ inferior, nominal y superior

Tabla 5.30 Parámetros de rigidez y amortiguamiento promedio obtenidos del FNA para sistema aislado con péndulo

Propiedades del sistema	Inferior	Nominal	Superior
Rigidez efectiva (tonf/m)	2445	2697	3608
Amortiguamiento equivalente (%)	16%	20%	31%

Además, se resumen los valores promedios de la fuerza máxima cortante y la máxima deriva, así como el promedio del desplazamiento máximo del sistema de aislamiento.

Tabla 5.31 Fuerza cortante reducida, derivas y desplazamientos para sistema aislado con péndulo

		Inferior	Nominal	Superior
Superestructura	Fuerza cortante (tonf)	299	300	354
	Deriva	0.0028	0.0030	0.0038
Losa de aislamiento	Desplazamiento (m)	0.42	0.36	0.27

Se notó un aumento significativo en la fuerza cortante al emplear las propiedades superiores (λ máxima), cerca de un 18% más que la fuerza cortante calculada utilizando las propiedades nominales (λ nominal) y las propiedades mínimas (λ mínima).

Tabla 5.32 Periodos y derivas obtenidos del análisis estático para sistema aislado con péndulo

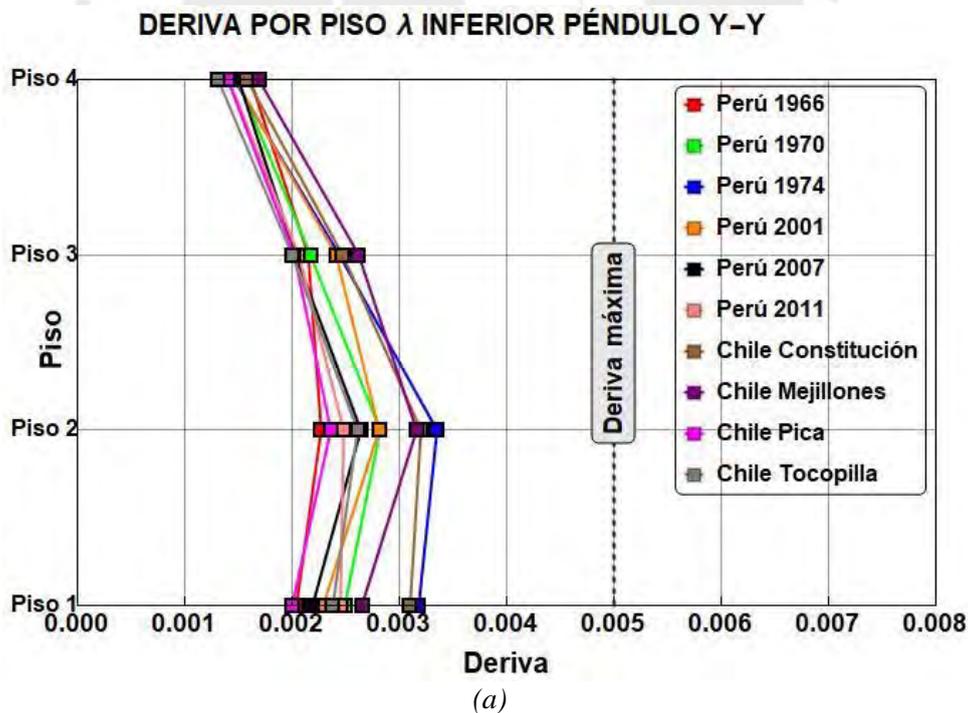
Parámetro	Inferior	Nominal	Superior
Tb (s)	3.5	3.4	2.9
Tb/Ts	4.15	3.96	3.42
ξ	0.058	0.064	0.085
β	1.40	1.42	1.72
Δ losa aislamiento (m)	0.30	0.26	0.16
Δ azotea (m)	0.32	0.27	0.17
Deriva	0.0011	0.0010	0.0008

A partir de los resultados obtenidos con el FNA (K_{eff} y β_{eff}) se presenta la Tabla 5.18 que muestra los desplazamientos (en losa de aislamiento y azotea), y derivas determinadas con el análisis estático. Se puede notar que los factores lambda hicieron un cambio significativo en el período del edificio con aislamiento (T_b).

5.3.3.3 Respuesta del edificio aislado

5.3.3.3.1 Derivas

A continuación, La Figura 5.28 muestra las derivas máximas para las propiedades nominales, máximas y mínimas.



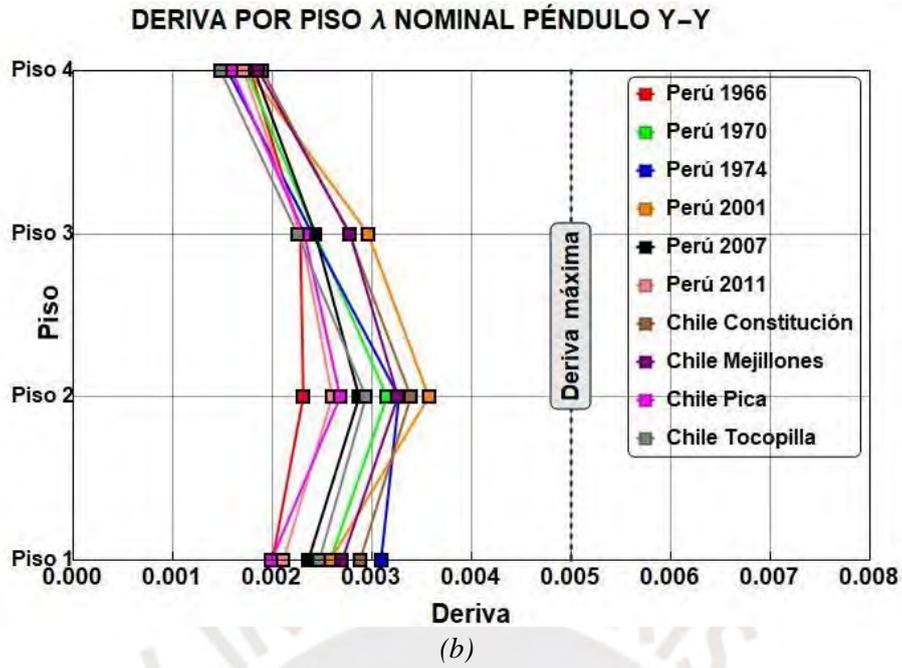


Figura 5.28 Derivas máximas Tiempo Historia péndulo; a) λ inferior, b) λ nominal, c) λ superior

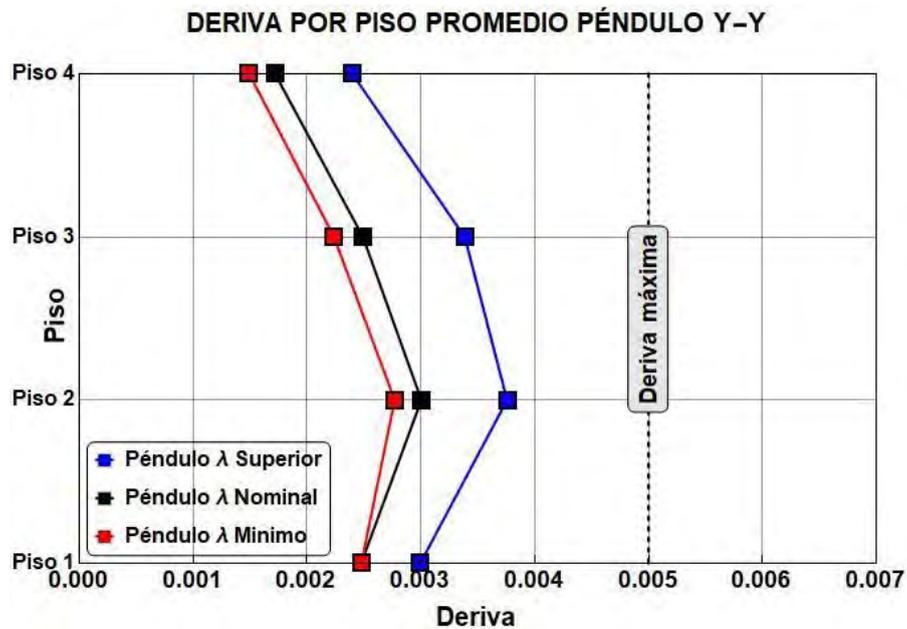


Figura 5.29 Derivas máximas TH - péndulo (λ inferior, λ nominal y λ superior)

Se contempla que, al aumentar las propiedades de los dispositivos de aislamiento a sus valores máximos, se experimenta un incremento significativo en las derivas del modelo. Estas derivas varían desde un mínimo de 2.8% (utilizando las propiedades inferiores) hasta un máximo de 3.9% (utilizando las propiedades superiores).

La Figura 5.30 muestra los resultados comparativos de las derivas máximas obtenidas tanto en el análisis no lineal Tiempo Historia (FNA) como en el análisis espectral para las propiedades máximas (λ máximas).

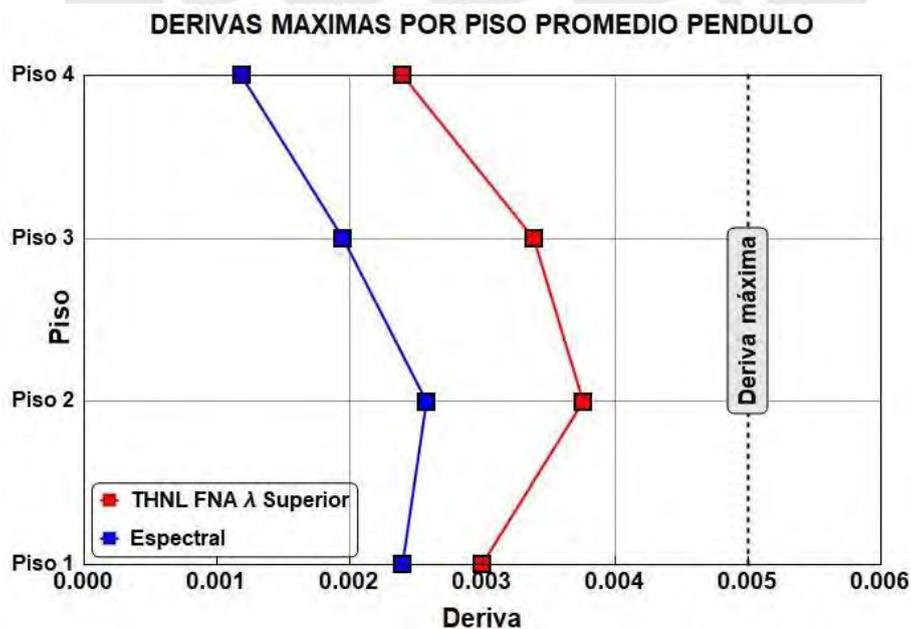
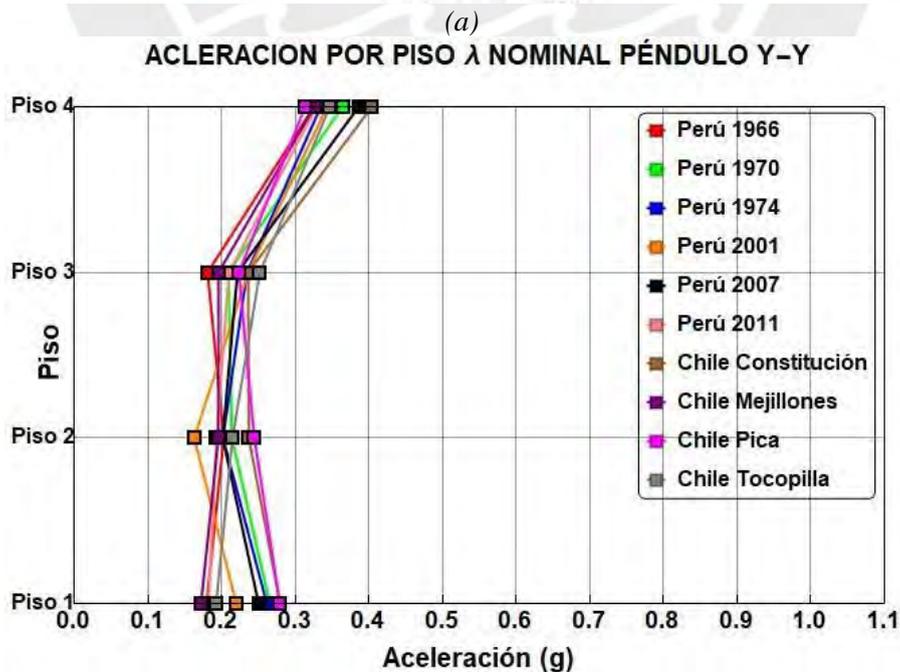
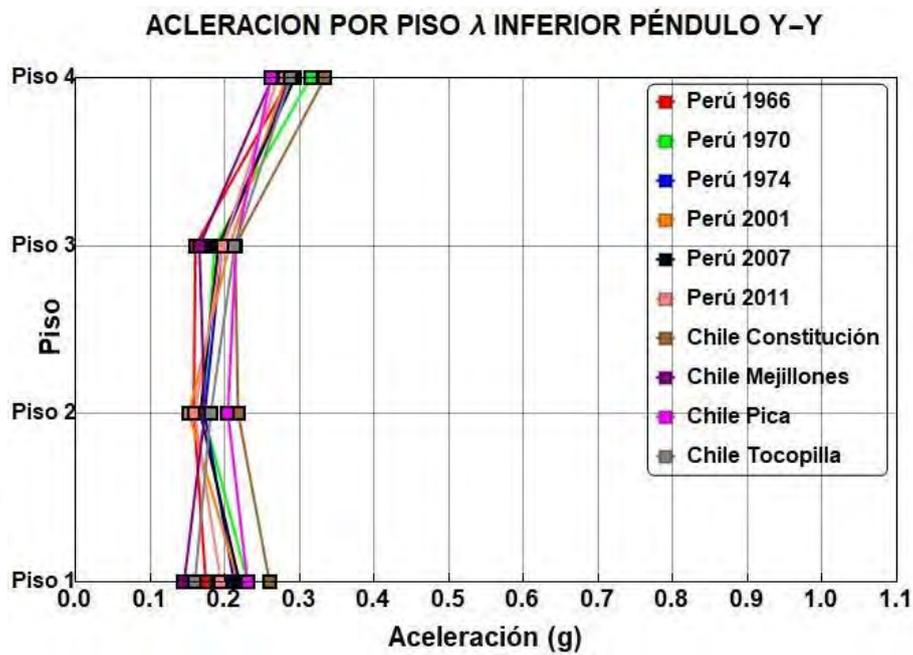


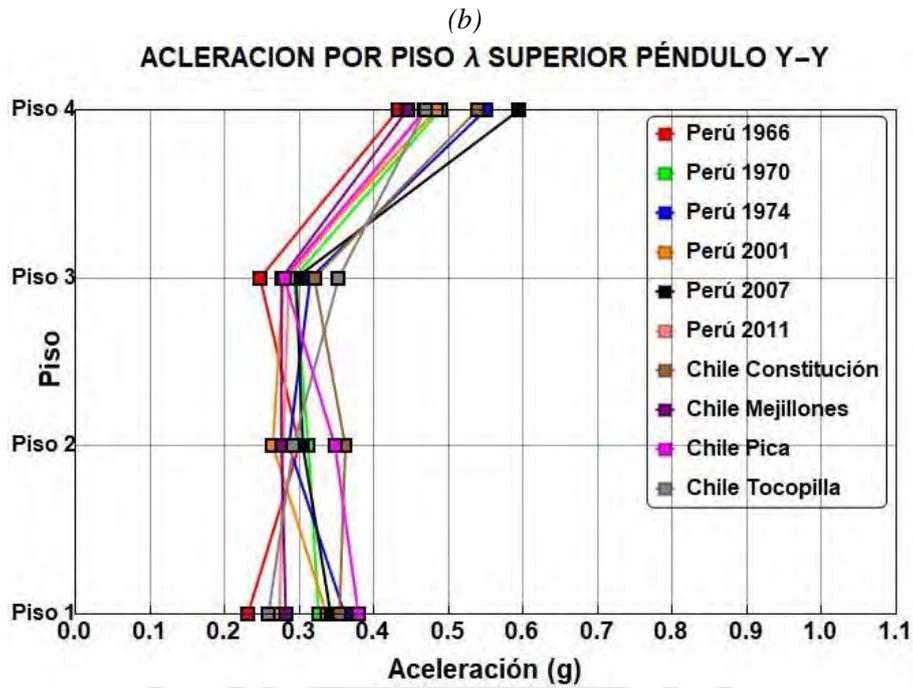
Figura 5.30 Comparativa de derivas máximas por piso para el caso espectral y FNA para λ superior - péndulo

5.3.3.3.2 Aceleraciones

La Figura 5.31 presenta las aceleraciones más altas para los escenarios de lambda mínimo, nominal y máximo.

Se aprecia un aumento significativo en las aceleraciones utilizando las propiedades superiores en comparación con las propiedades nominales y mínimas. Las aceleraciones máximas fueron registradas en el techo y varían desde un mínimo de 0.25g (utilizando las propiedades inferiores) hasta un máximo de 0.60g (utilizando las propiedades superiores) (Ver Figura 5.32.).





(c)

Figura 5.31 Aceleraciones máximas Tiempo Historia péndulo; a) λ inferior, b) λ nominal, c) λ superior

Las aceleraciones máximas promedio en la azotea obtenidas del FNA son mayores a las del análisis Modal Espectral como se observa en la Figura 5.33. Esta diferencia entre ambos valores es cerca del 150%.

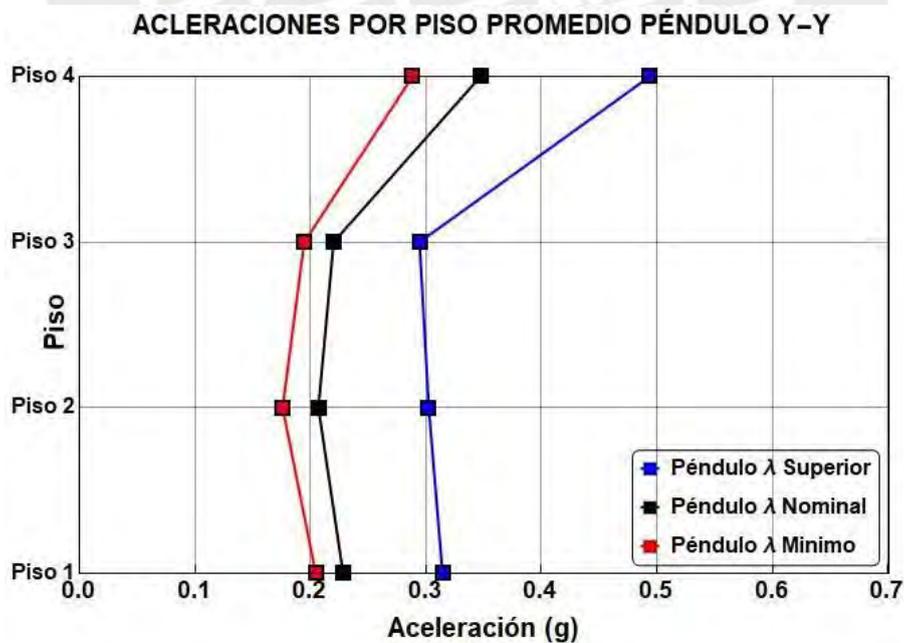


Figura 5.32 Aceleraciones máximas TH – péndulo (λ inferior, λ nominal y λ superior)

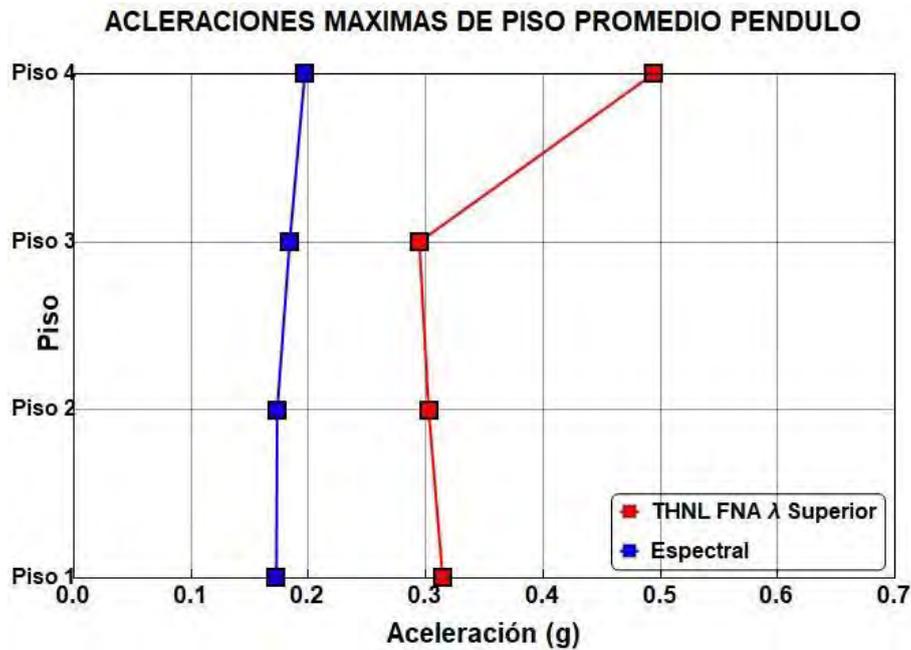


Figura 5.33 Comparativa de aceleraciones máximas por piso para el caso espectral y FNA para λ superior - péndulo

5.3.4 Diseño de elementos estructurales

Se determinaron las propiedades lineales promedio de cada dispositivo a partir de los 10 registros. Estas propiedades se utilizaron para el diseño. En la Tabla 5.33 se presentan la rigidez y el amortiguamiento efectivo para caso de λ superior.

Tabla 5.33 Rigidez efectiva y amortiguamiento equivalente de cada tipo de dispositivo

Tipo	Cantidad	DM (m)	K/aislador (Tonf/m)	β_{eff}
Tipo 1	17	0.20	81	31%
Tipo 2	20	0.20	93	31%

5.3.4.1 Fuerza cortante de diseño

Se ha determinado que el cortante promedio máximo en la superestructura, obtenida a través del análisis THNL, es de 770 tonf. Al usar el coeficiente de reducción $R=2$, se obtiene una fuerza cortante de 382 tonf (6.5% W_{sup}). Sin embargo, cuando se calcula la fuerza mínima mediante el método de fuerzas equivalentes establecido en la NTP E.031, la fuerza mínima de diseño para $R=2$ se obtiene 520 tonf (8.9% W_{sup}), que es mayor al calculado en el THNL. Por lo tanto, se utiliza la fuerza de 520 tonf como el valor de diseño. La Tabla 5.34 muestra un resumen del análisis.

Tabla 5.34 Fuerza cortante de diseño en la superestructura

	Vs Dinamica	Vs Estatica	1.5Q	Vv Base Fija	Vs Diseño
X-X	382	520	345	447	520
Y-Y	354	520	345	447	520

Mientras que la fuerza de diseño debajo del nivel de la plataforma de aislamiento se resume en el siguiente cuadro:

Tabla 5.35 Fuerza cortante de diseño para la sub estructura

En la práctica de la ingeniería estructural los elementos estructurales se diseñan con un espectro elástico de diseño. Este espectro es reducido tanto por el factor de reducción $R=2$ como por el factor de amortiguamiento $\beta=1.72$ (obtenido con λ máximo), además se considera un porcentaje de amortiguamiento de 5%. La “bajada” se da para los tres primeros modos (dos traslacionales y uno torsional). Según la NTP E.031 el factor β se relaciona a un amortiguamiento de 31%. La representación gráfica del espectro de diseño, con “bajada” en el periodo del tercer modo, se encuentra en la Figura 5.34.

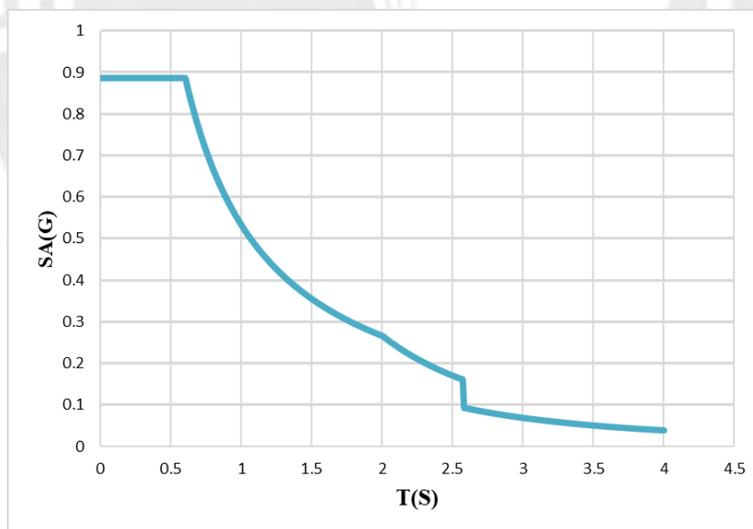


Figura 5.34 Espectro de diseño (estructura aislada con péndulo)

La Figura 5.35 muestra los armados de columnas y vigas correspondientes a la superestructura. Cabe resaltar que este armado es el mismo que para el caso de estructura aislada con dispositivos de goma.

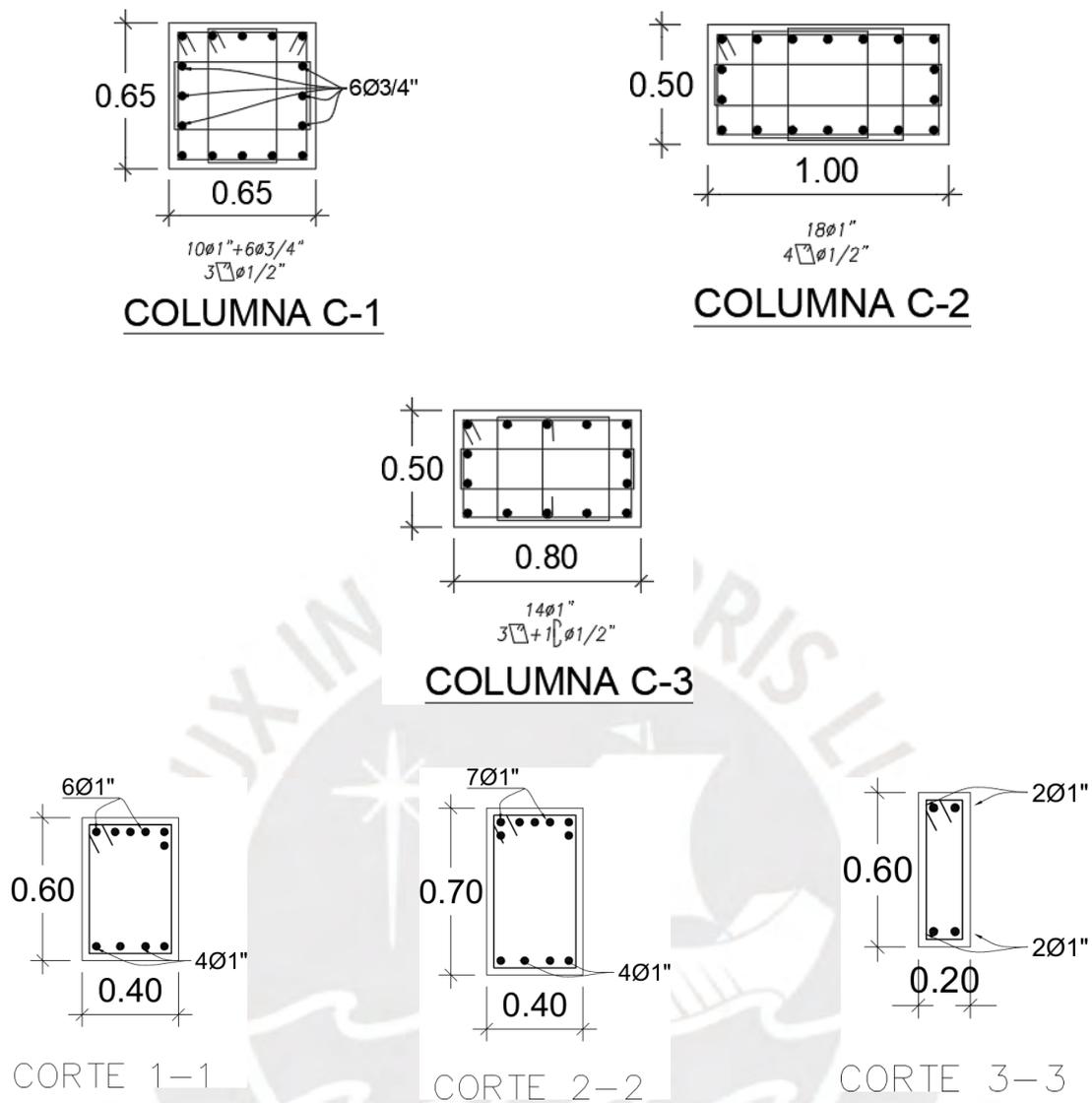


Figura 5.35 Secciones típicas de columnas y vigas de la superestructura

5.4 Comparación entre goma y péndulo

En las Figuras 5.36 y 5.37 se muestran gráficos unificados de las aceleraciones promedio en ambas direcciones principales (X e Y) para la estructura aislada con dispositivos de goma y péndulo. Se observa que para el caso de propiedades superiores tanto en X como en Y la aceleración en la azotea es mayor en un 40%.

En las Figuras 5.38 y 5.39 también se muestran las derivas. Para el caso de lambda superior, las derivas máximas son similares, por ejemplo, en la dirección Y no se tiene una diferencia de más del 10%.

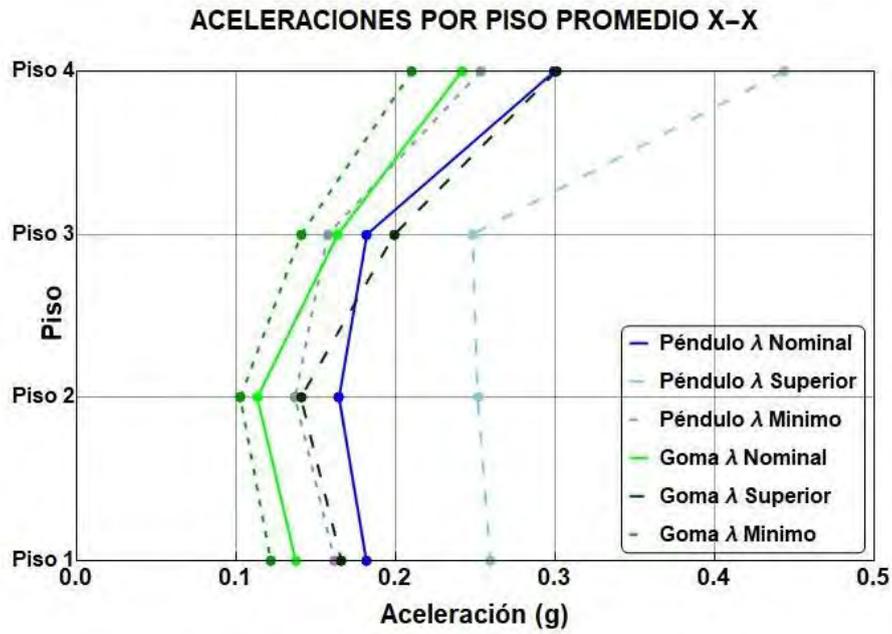


Figura 5.36 Aceleraciones promedio TH FNA para goma y péndulo en X (λ inferior, λ nominal y λ superior)

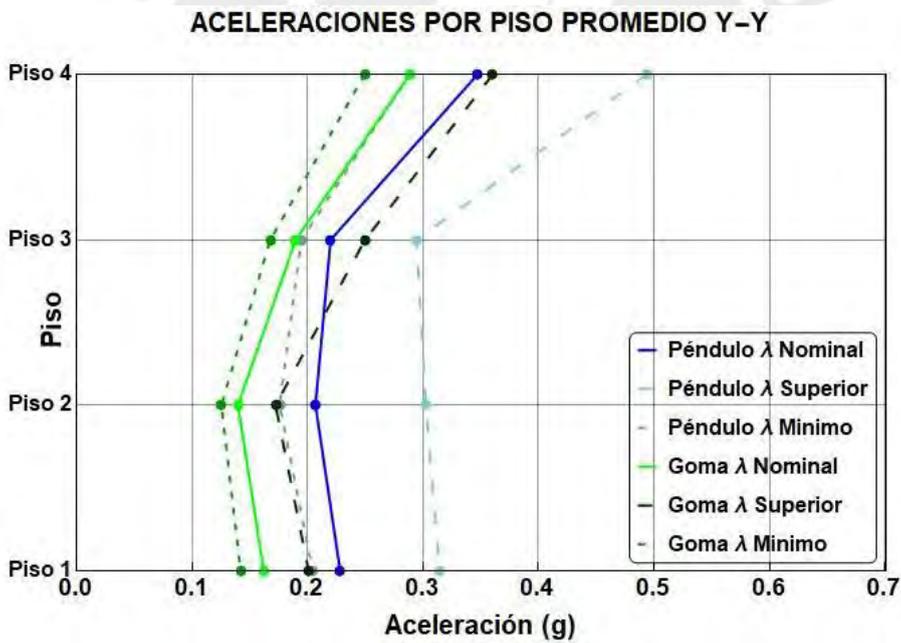


Figura 5.37 Aceleraciones promedio TH FNA para goma y péndulo en Y (λ inferior, λ nominal y λ superior)

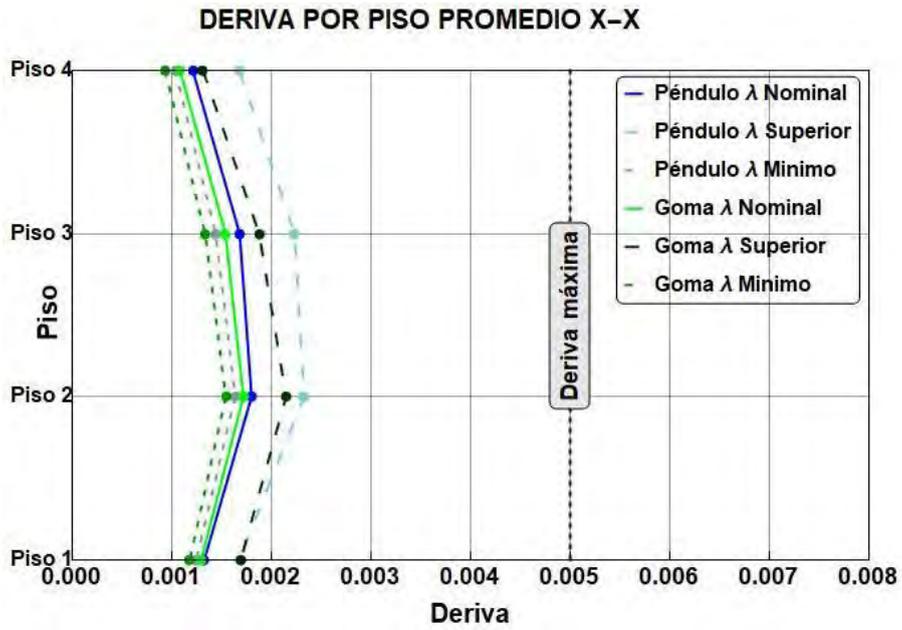


Figura 5.38 Derivas promedio TH FNA para goma y péndulo en X (λ inferior, λ nominal y λ superior)

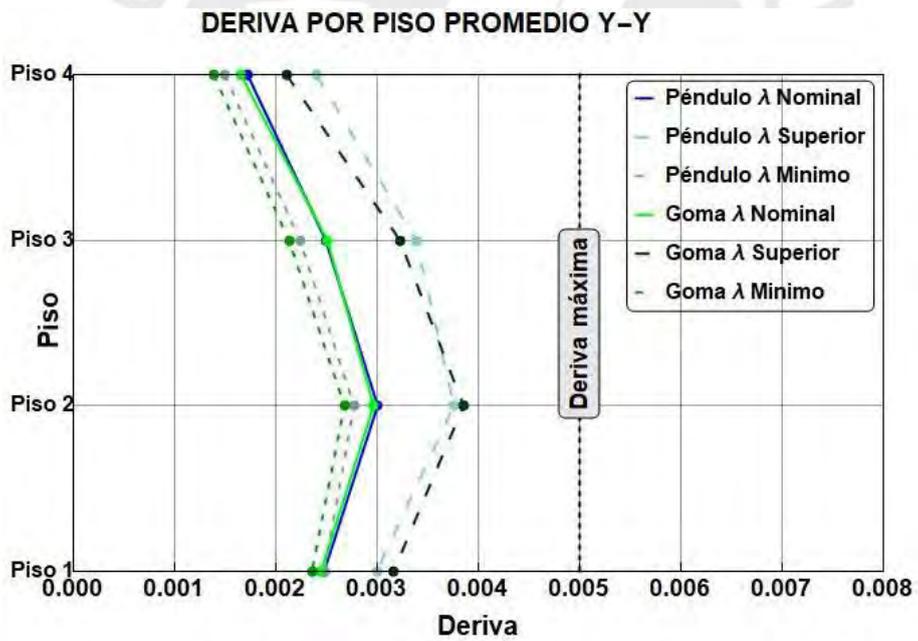


Figura 5.39 Derivas promedio TH FNA para goma y péndulo en Y (λ inferior, λ nominal y λ superior)

CAPITULO 6. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LA ESTRUCTURA AISLADA CON GOMA Y PÉNDULO

En esta sección se aborda el desempeño de la estructura mediante el análisis dinámico no lineal de la estructura. Para ello, se considera que la estructura completa (elementos estructurales y dispositivos) experimenta no linealidad durante el sismo, para representar este comportamiento se utilizan curvas esfuerzo-deformación. En primer lugar, se generan curvas IDA para la estructura aislada tanto con goma como con péndulo en función de derivas máximas, aceleraciones máximas de piso y rotaciones máximas de las rótulas plásticas (vigas y columnas) para intensidades de PGA (Aceleraciones máximas de suelo) que se encuentran en el rango de 0g a 0.71g. Por último, los resultados obtenidos para ambos casos de aislamiento se comparan.

6.1 Características de los modelos

Todos los elementos estructurales y dispositivos de aislamiento contemplan el comportamiento inelástico.

6.1.1 Modelo de los dispositivos de aislamiento

Los dispositivos de aislamiento fueron modelados de la siguiente manera: "Rubber Type" para los aisladores de goma y "Friction Pendulum" para los aisladores de péndulo. Se utilizan las relaciones de fuerza y deformación de cada dispositivo. Se desarrollaron tres modelos, uno para cada caso (λ inferior, λ nominal y λ superior), por tipo de dispositivo de acuerdo a los lineamientos la norma NTE E.031

6.1.2 Modelo de la estructura

Se representa el comportamiento no lineal de vigas y columnas con rótulas en sus extremos. El comportamiento de las rótulas se obtiene del diagrama Momento-Curvatura. Para calcular este diagrama, se usan los modelos uniaxiales de Esfuerzo-Deformación tanto del concreto como del acero. Por ejemplo, para el concreto confinado se usa el modelo de Mander con deformación última de 0.004 y para el acero el modelo de Park-Pauley deformación última 0.09.

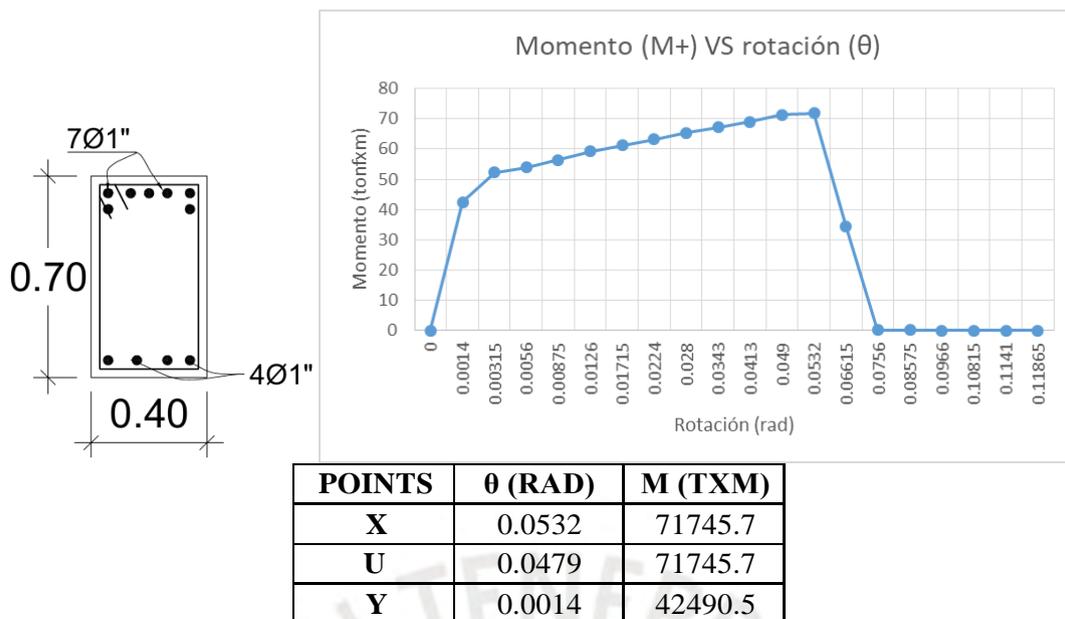


Figura 6.1 Diagrama momento-rotación para momento positivo (anti-horario)

El modelo total de la estructura se desarrolló en el programa Perform 3D. Las vigas fueron consideradas con rótulas a flexión en sus extremos, mientras que las columnas con rótulas con interacción compresión-flexión en ambas direcciones. Además, se consideró que ante cargas cíclicas como es el caso de los sismos existe degradación de la rigidez en vigas y columnas. Todas las losas de la estructura fueron asignadas con un diafragma rígido en el modelo. El comportamiento de las vigas y columnas fueron calculados según los lineamientos de FEMA 356. Por otro lado, los dispositivos de aislamiento fueron modelados de la siguiente manera: "Rubber Type" para los aisladores de goma y "Friction Pendulum" para los dispositivos de péndulo.

Para considerar el amortiguamiento de la superestructura se tomaron las consideraciones explicadas en el siguiente acápite.

6.1.2.1 Amortiguamiento inherente de la superestructura

Cuando se realiza el análisis no lineal de integración directa NLDI es común usar el amortiguamiento de Rayleigh para amortiguar los modos de la superestructura. Este tipo de amortiguamiento asume que la estructura tiene la matriz de amortiguamiento C

$$C = \alpha M + \beta K$$

donde M es la matriz de masa, K es la matriz de rigidez inicial, α y β son factores que se explican más adelante. En la Figura 6.2 se muestra la variación del amortiguamiento en función del periodo y en la Figura 6.3 el comportamiento físico de la matriz de Rayleigh.

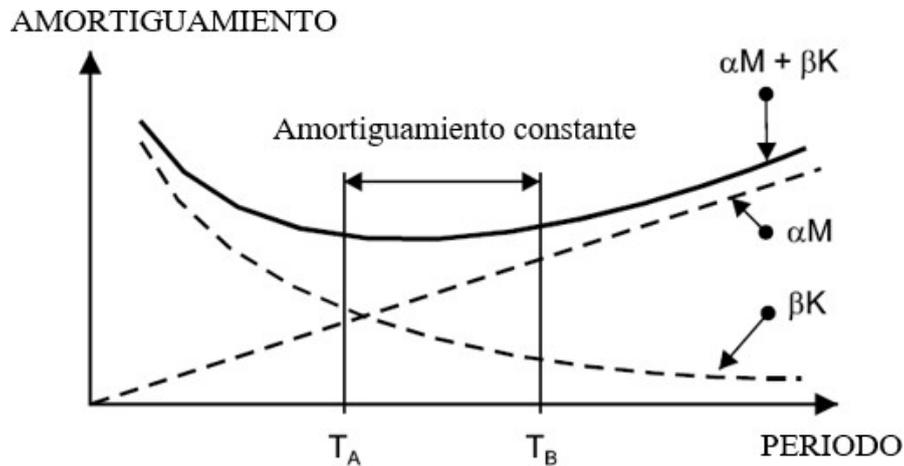


Figura 6.2 Variación del amortiguamiento con el periodo para análisis lineal (PERFORM 3D,2007)

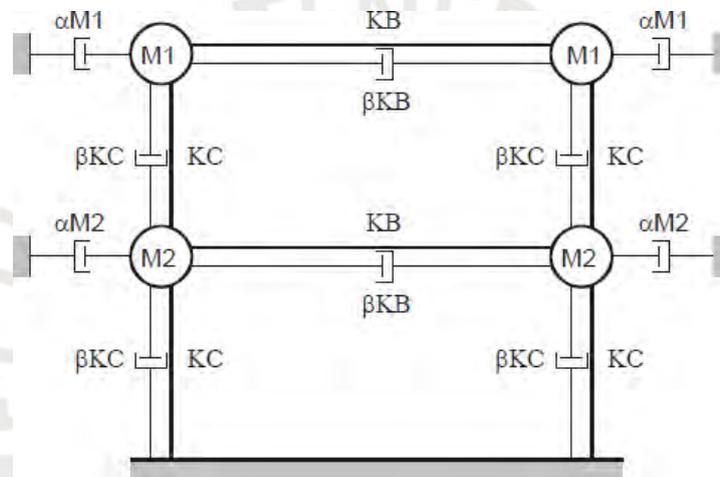


Figura 6.3 Significado físico del amortiguamiento de Rayleigh (PERFORM 3D,2007)

En la Figura 6.2 se observa el amortiguamiento proporcional a la matriz de masa (αM), al cual le corresponde mayor amortiguamiento en los modos inferiores (rango de periodos largos) y menor amortiguamiento en los modos superiores (rango de periodos cortos). La relación entre el amortiguamiento crítico y el periodo del modo se da mediante la siguiente ecuación:

$$\xi_i = \alpha \frac{T_i}{4\pi}$$

En la Figura 6.2 también se muestra que al amortiguamiento proporcional a la matriz de rigidez (βK) le corresponde menor amortiguamiento en los modos inferiores (rango de periodos largos) y mayor amortiguamiento en los modos superiores (rango de periodos cortos). Dicha relación se muestra en la ecuación:

$$\xi_i = \beta \frac{\pi}{T_i}$$

En edificios aislados el tipo de amortiguamiento más conveniente es el de amortiguamiento proporcional a la rigidez, debido a que para periodos largos el amortiguamiento es mínimo, pero para periodos cortos (periodos de la superestructura) el amortiguamiento puede llegar a ser excesivo, lo cual afecta las respuestas de por ejemplo aceleración de piso, aspecto que es importante para medir el desempeño de elementos no estructurales sensibles a aceleraciones.

Una solución a este problema es el propuesto por Sarlis and Constantinou (coeficientes α y β igual a cero) que captura satisfactoriamente la respuesta de los tres primeros modos, pero no estima de manera adecuada las respuestas de aceleraciones (ver Figura 6.4). En dicha figura los modos superiores se dejan sin amortiguamiento, lo que conduce a aceleraciones excesivamente elevadas en el rango de periodos cortos.

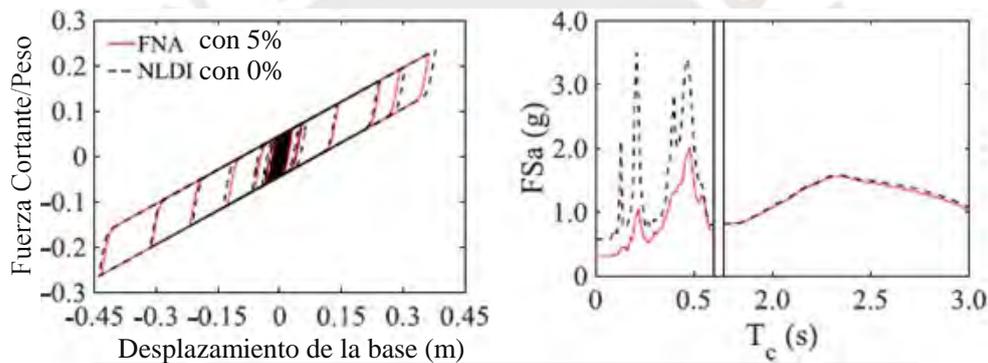


Figura 6.4 Comparación entre FNA con $\xi=5\%$ y NLDI con $\xi=0\%$ (Anajafi, et al., 2020)

La solución propuesta por Anajafi, et al. 2020 para solucionar este problema es generar una matriz de amortiguamiento global no clásica; es decir introducir el amortiguamiento inherente de la superestructura y del sistema de aislamiento por separado, para ello plantean el uso de elementos de amortiguamiento de fluido viscoso en la superestructura. Este acercamiento utiliza el componente βK el cual mitiga las respuestas de los modos superiores. A continuación, se explican los pasos a seguir: Para cada piso, la fuerza de amortiguamiento horizontal F_i está dada por la siguiente ecuación.

$$(F_i^{vd})_x = \beta_k k_i^s (\dot{x}_i^s - \dot{x}_{i-1}^s).$$

$$\beta_k = 2\xi^{\text{target}}/\omega_2,$$

donde k_{is} es la rigidez lateral del piso i , $\xi^{objetivo}$ es el amortiguamiento inherente en la superestructura de 5%, ω_2 es la segunda frecuencia angular del edificio aislado.

$$F^{vd} = k^{vd} \Delta = C^{vd} \dot{d}^\lambda.$$

k^{vd} es la rigidez del resorte, C^{vd} el coeficiente de amortiguamiento, Δ la deformación del resorte d es la ratio de deformación en el amortiguador, y λ el exponente de amortiguamiento.

$$\dot{d}_i \approx (\dot{x}_i^s - \dot{x}_{i-1}^s) \text{Cos}(\theta_i),$$

donde θ_i es el ángulo que forman los elementos con la horizontal, λ es igual a uno, y C_i^{vd} es

$$C_i^{vd} = \beta_k k_i^s / \text{Cos}^2(\theta_i).$$

A continuación, se muestran los resultados obtenidos por Anajafi, et al. para un edificio de cuatro pisos (ver Figura 6.5).

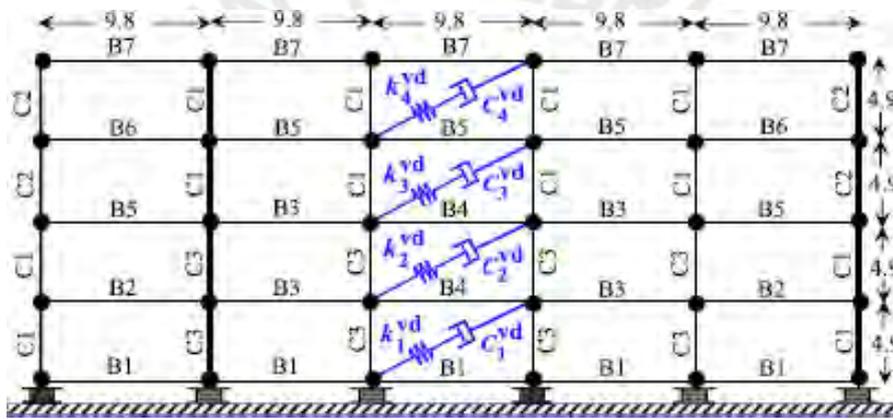


Figura 6.5 Disposición de los amortiguadores viscosos en altura (Anajafi, et al., 2020)

En la Figura 6.6 a) se muestra que el método propuesto y el obtenido por FNA toma muy bien la respuesta del primer modo, además en b) se aprecia que para periodos cortos el espectro de aceleraciones es similar al obtenido por FNA

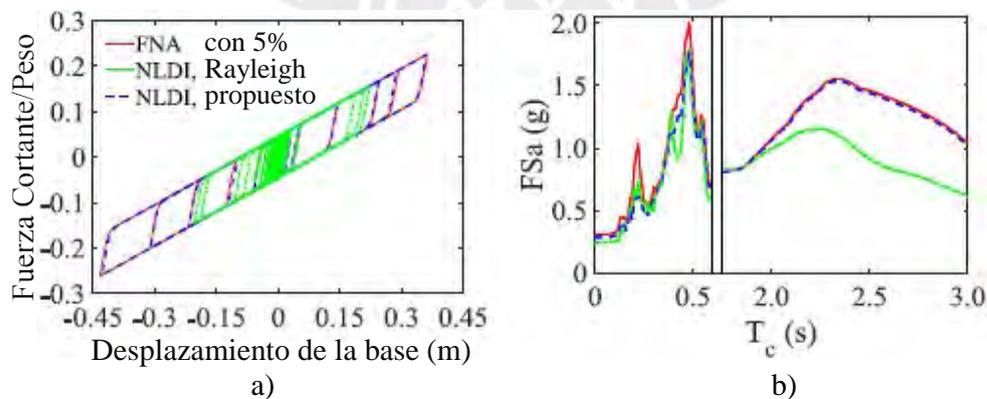


Figura 6.6 Comparación entre FNA con $\zeta=5\%$, NLDI con $\zeta=0\%$ y NLDI con amortiguadores (Anajafi, et al., 2020)

En la Figura 6.7 se observa la estructura modelada en el programa Perform 3D.

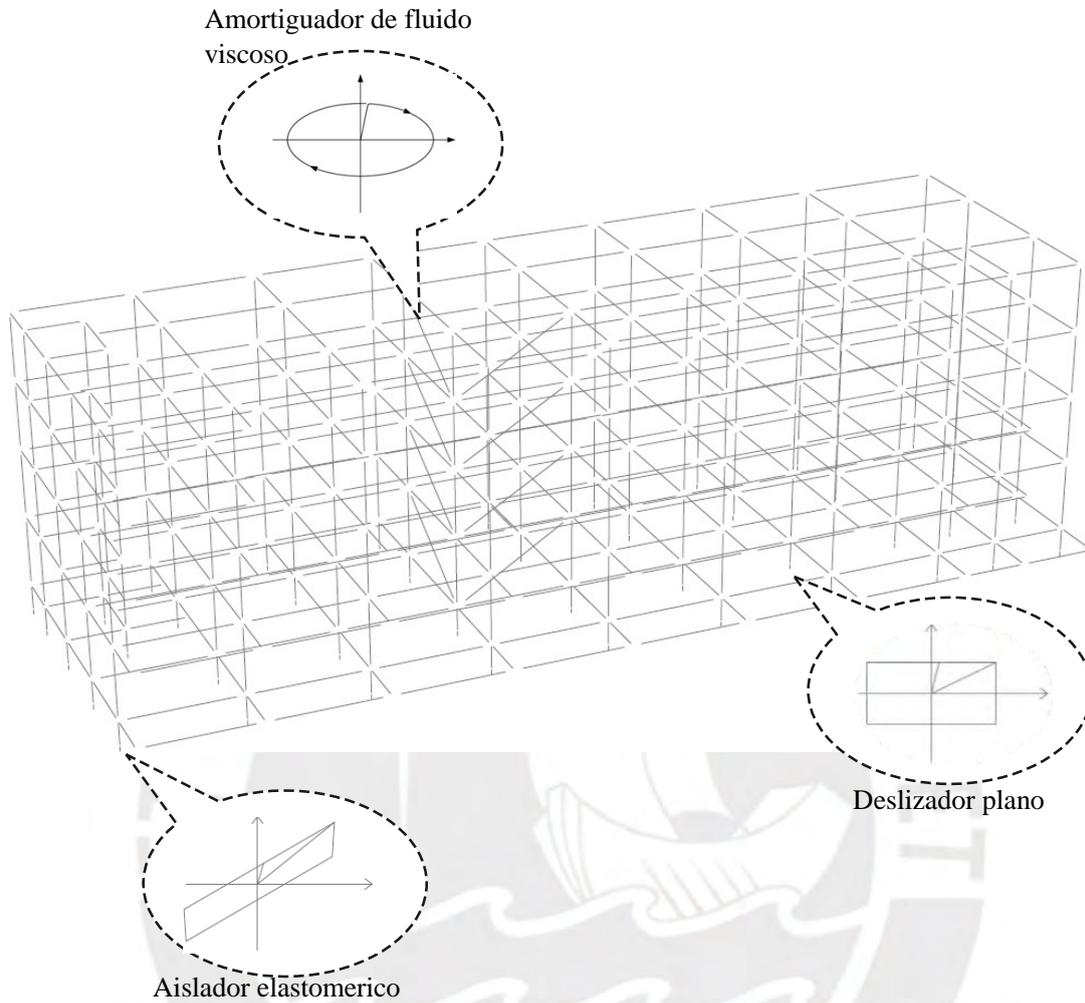


Figura 6.7 Modelo estructural en PERFORM-3D

6.2 Análisis Dinámico Incremental

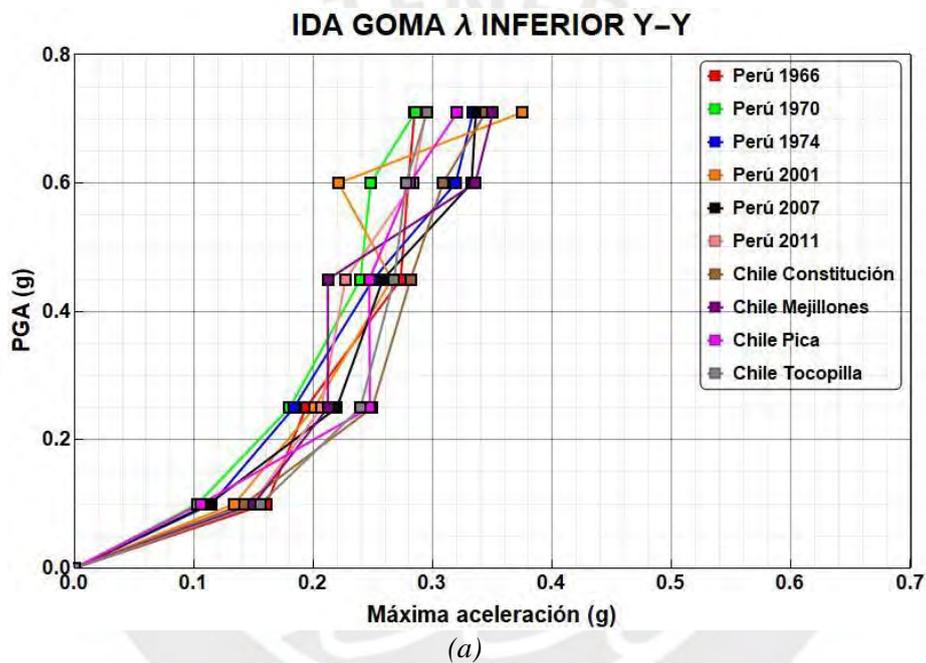
En esta sección se determinan las curvas IDA de aceleraciones y derivas en función de los valores de PGA, valores que oscilan entre 0,10 g y 0,71 g. Este análisis se realiza en los modelos con propiedades superiores, inferiores y nominales para la estructura aislada con goma y con péndulo friccional.

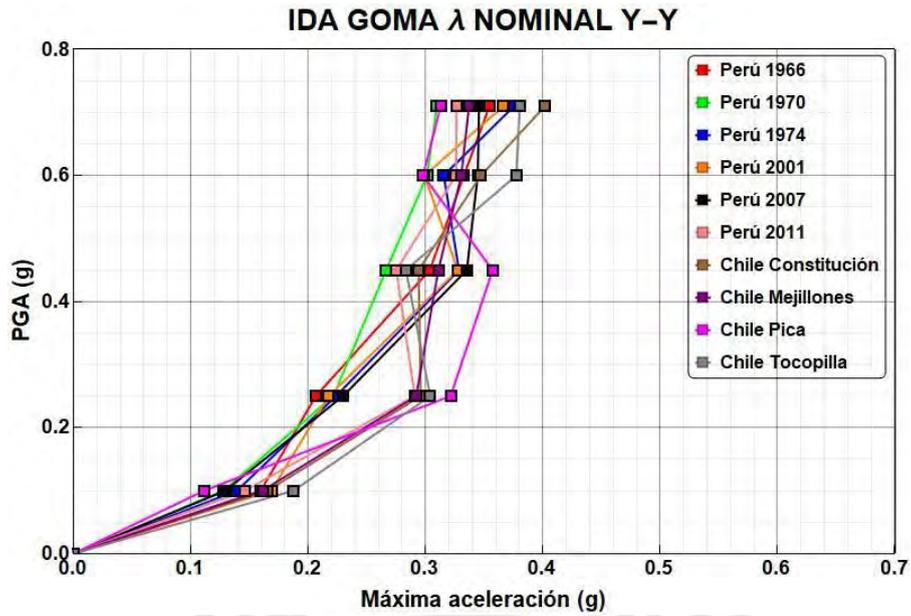
6.2.1 Análisis Dinámico Incremental de la estructura aislada con dispositivos de goma

6.2.1.1 Curvas IDA de aceleración de piso para estructura aislada con dispositivos de goma

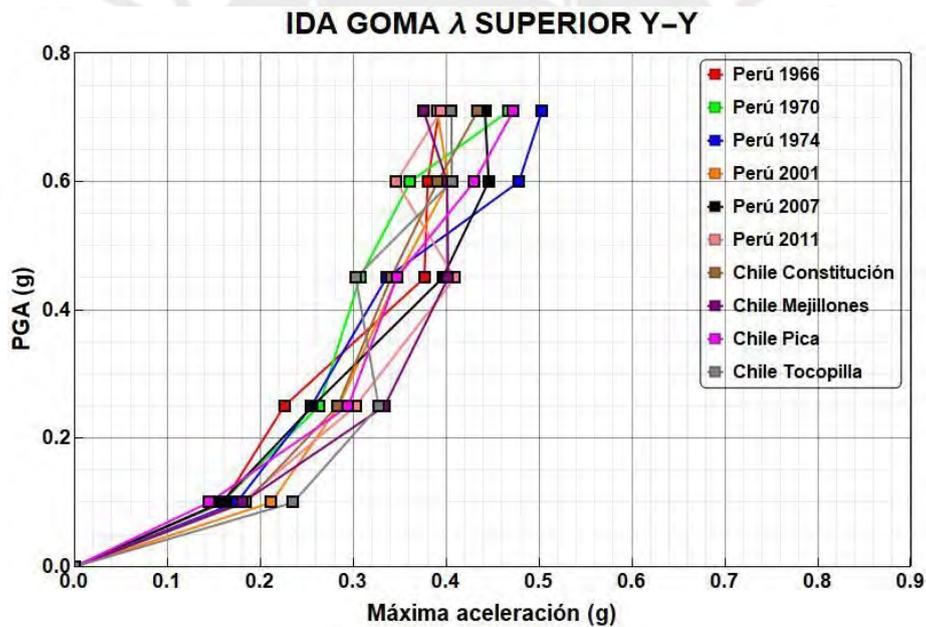
La Figura 6.8 muestra las curvas IDA de aceleraciones del último piso del hospital para la estructura aislada con dispositivos de goma modificadas con λ inferior, nominal y superior.

La tendencia en las curvas IDA presentadas muestra lo siguiente: cuando los dispositivos se modifican con las propiedades superiores la respuesta de la estructura es mayor que cuando se modifican con las propiedades inferiores. Para λ inferior la máxima aceleración es de 0.38g, para λ nominal una aceleración de 0.40g, y para λ superior 0.5g.





(b)



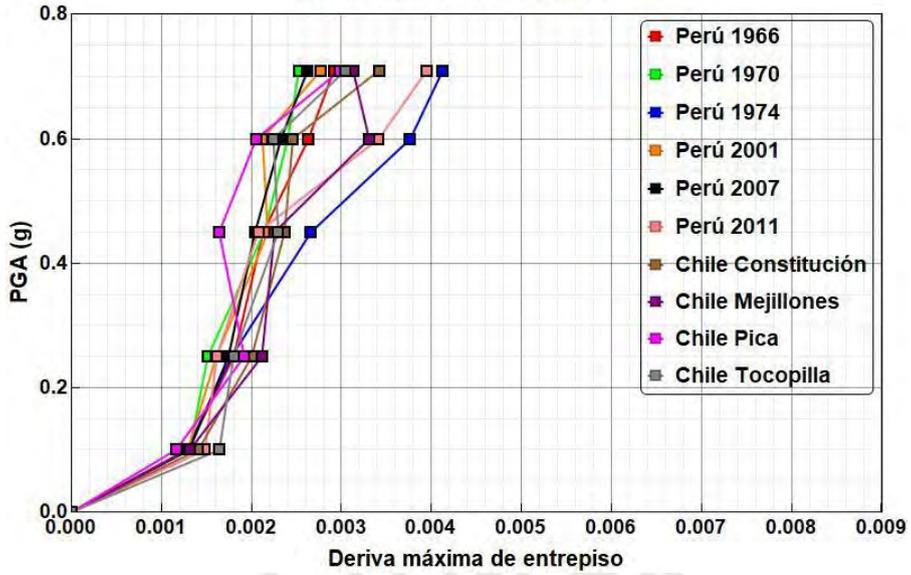
(c)

Figura 6.8 Curvas IDA de aceleración para dispositivos de goma; a) λ inferior, b) λ nominal, c) λ superior

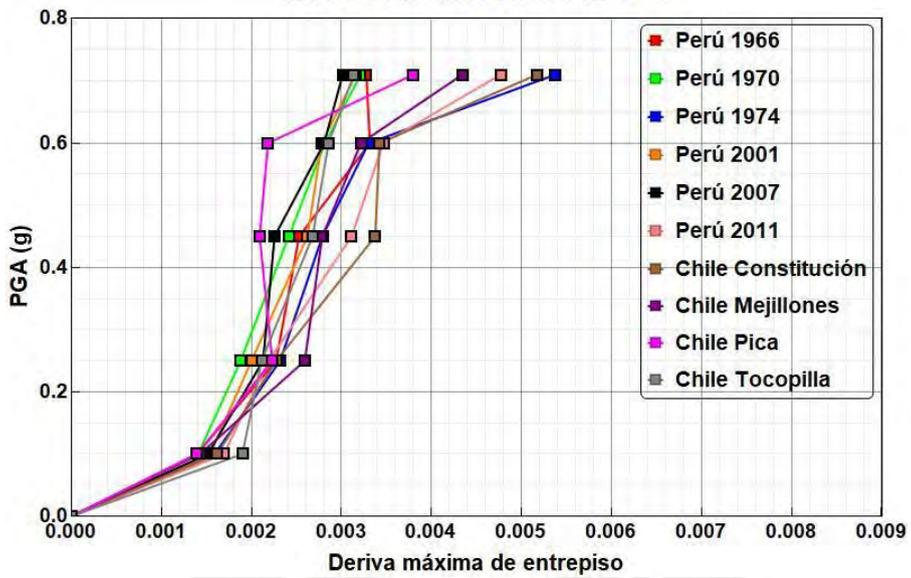
6.2.1.2 Curvas IDA de Derivas de entrepiso para estructura aislada con dispositivos de goma

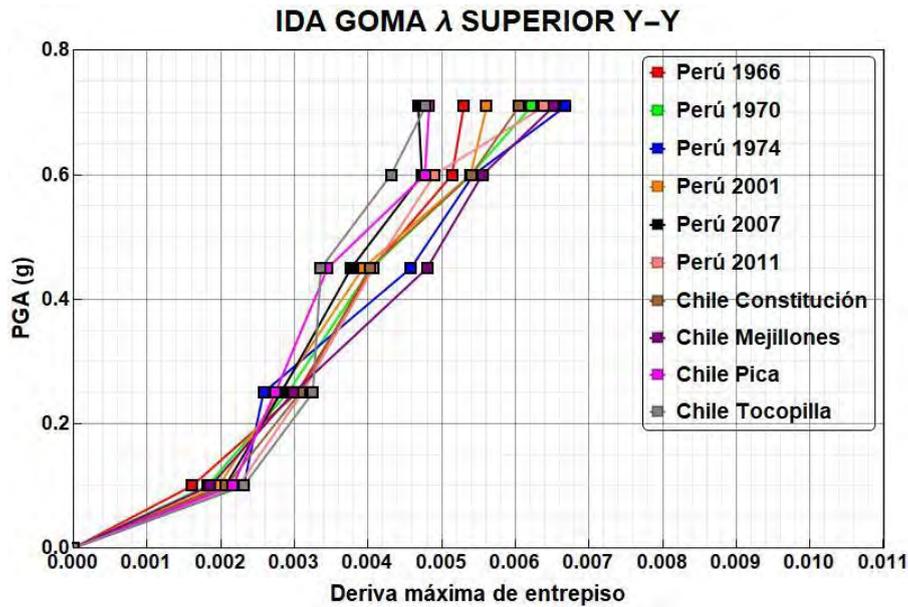
La Figura 6.9 muestra las curvas IDA de derivas máximas del segundo piso del hospital para la estructura aislada con dispositivos de goma modificados con los diferentes λ evaluados.

IDA GOMA λ INFERIOR Y-Y



IDA GOMA λ NOMINAL Y-Y





(c)

Figura 6.9) Curvas IDA de derivas para dispositivos de goma; a) λ inferior, b) λ nominal, c) λ superior

Se puede observar en las curvas IDA que, a medida que se incrementan los valores de lambda, las derivas también aumentan. Para una magnitud de aceleración sísmica PGA de 0.71g, la deriva máxima varía desde 3.0‰ (λ inferior) hasta 6.6‰ (λ superior).

6.2.1.3 Rotaciones máximas para el SMC de la estructura aislada con dispositivos de goma

Para analizar y calificar el daño que pueden sufrir los elementos estructurales a consecuencia del SMC se revisan las rotaciones máximas. Para ello se utiliza el criterio de desempeño de FEMA 356 que califica las rotaciones inelásticas de acuerdo a: Ocupación Inmediata (IO), Seguridad de Vida (LS), y Prevención del Colapso (CP), ver Figura 6.10. Las rotaciones obtenidas mediante el Análisis Dinámico Incremental se muestran como la relación entre la rotación máxima de los elementos estructurales y la rotación límite permitida en IO.

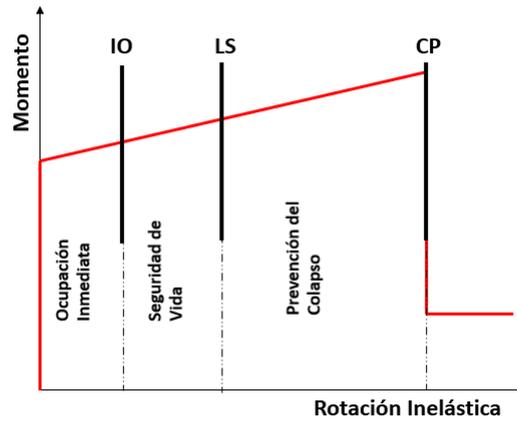


Figura 6.10 Rotación/Rotación Límite IO (Moscoso J., 2019)

En la Figura 6.11 se presenta las rotaciones máximas en las vigas, mientras que la Figura 6.12 muestra las rotaciones máximas para columnas; ambos casos se evalúan cuando lambda es máximo.

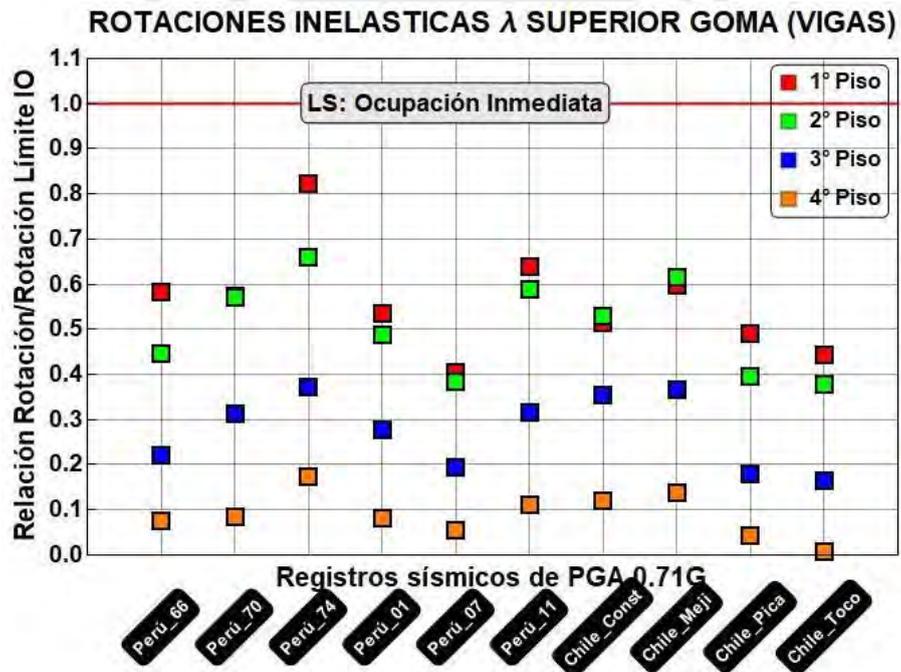


Figura 6.11 Relación entre rotación y rotación límite IO de vigas para aceleración de 0.71G (goma λ máximo)

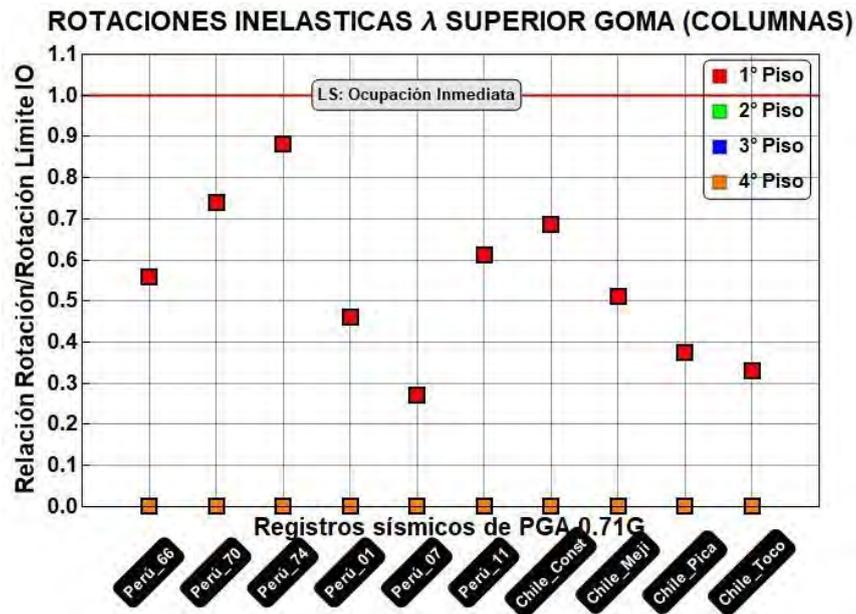


Figura 6.12 Relación entre rotación y rotación límite IO de columnas para aceleración de 0.71G (goma λ máximo)

Se verifica que las rotaciones máximas inelásticas se presentan en el primer piso del hospital. En particular, se observa que las vigas experimentan rotaciones inelásticas que alcanzan un ratio máximo de 0.82 respecto a la rotación límite de IO para λ superior. Por su parte, las columnas también presentan un ratio máximo en el primer piso, con un valor de 0.9 respecto a la rotación máxima permitida de IO. Este resultado se explica debido a la mayor esbeltez de las columnas orientadas en la dirección Y (dirección corta de la estructura) en comparación con las columnas orientadas en la dirección X.

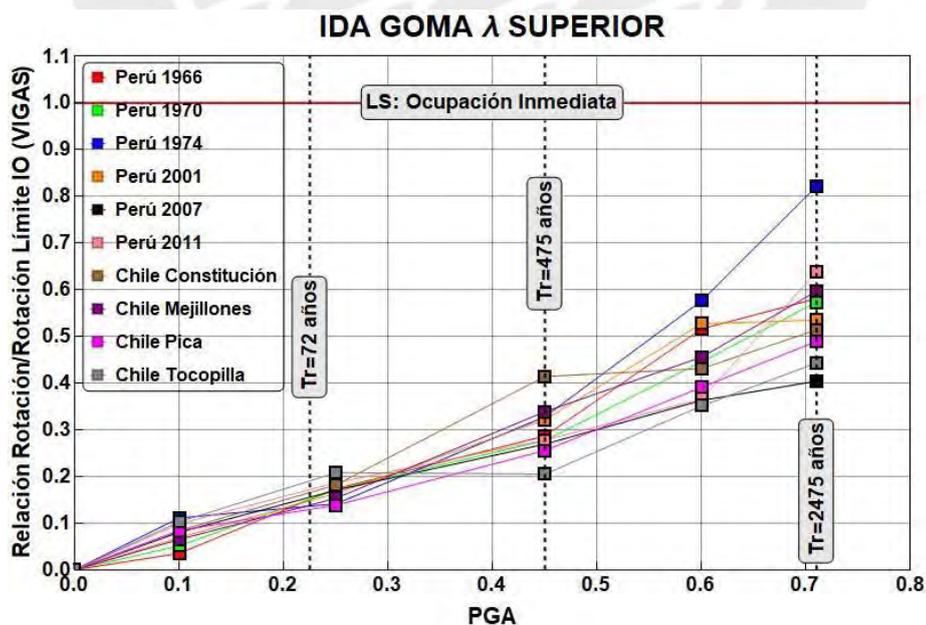


Figura 6.13 Curvas IDA de Relación entre rotación y rotación límite IO VS PGA (goma λ máximo)

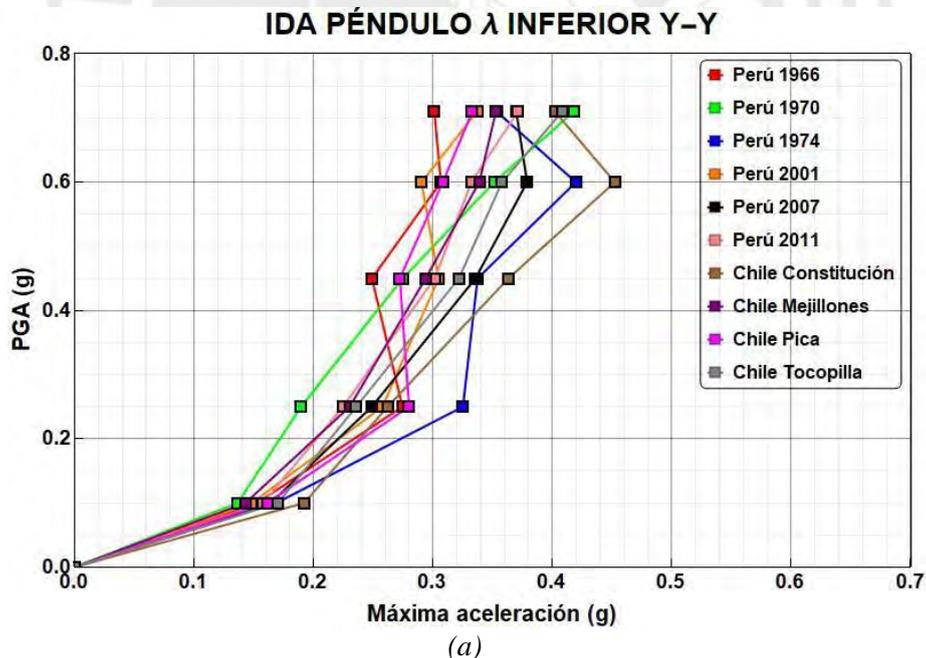
En la Figura 6.13 se presenta las curvas IDA PGA vs Rotación/Rotación Límite para las vigas del primer nivel para el caso de lambda máximo. Para la intensidad de 0.225g (Tr= 72 años) el cociente máximo es de 0.21 para el sismo de Tocopilla, para la intensidad de 0.45g (Tr= 475 años) el valor máximo de ratio es de 0.41 del sismo de Constitución; y para la intensidad de 0.71g (Tr= 2475 años) se alcanza una rotación máxima de 0.82, la cual ocurre en para el sismo de Perú de 1974.

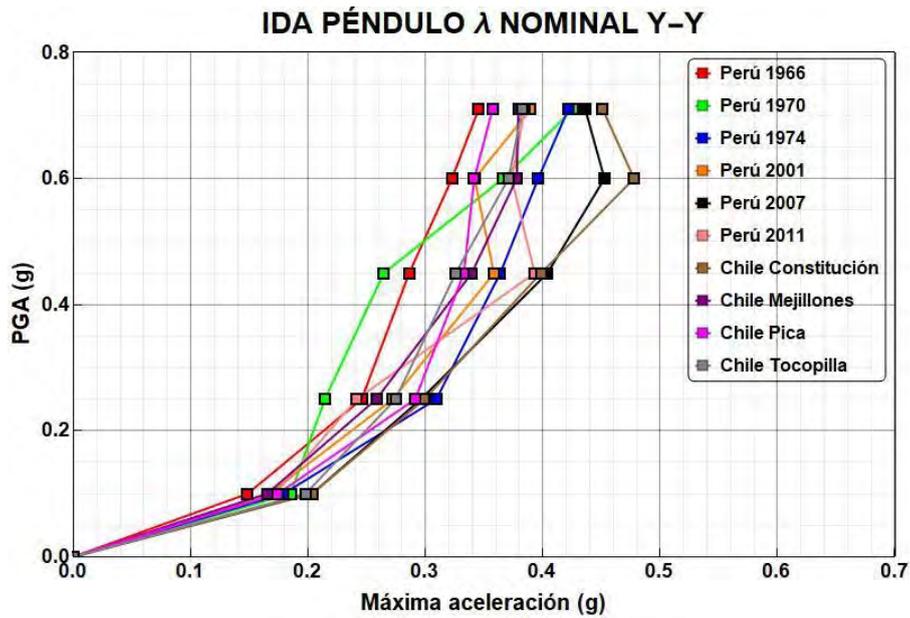
6.2.2 Análisis Dinámico Incremental de la estructura aislada con dispositivos de péndulo

6.2.2.1 Curvas IDA de aceleración de piso para estructura aislada con dispositivos de péndulo

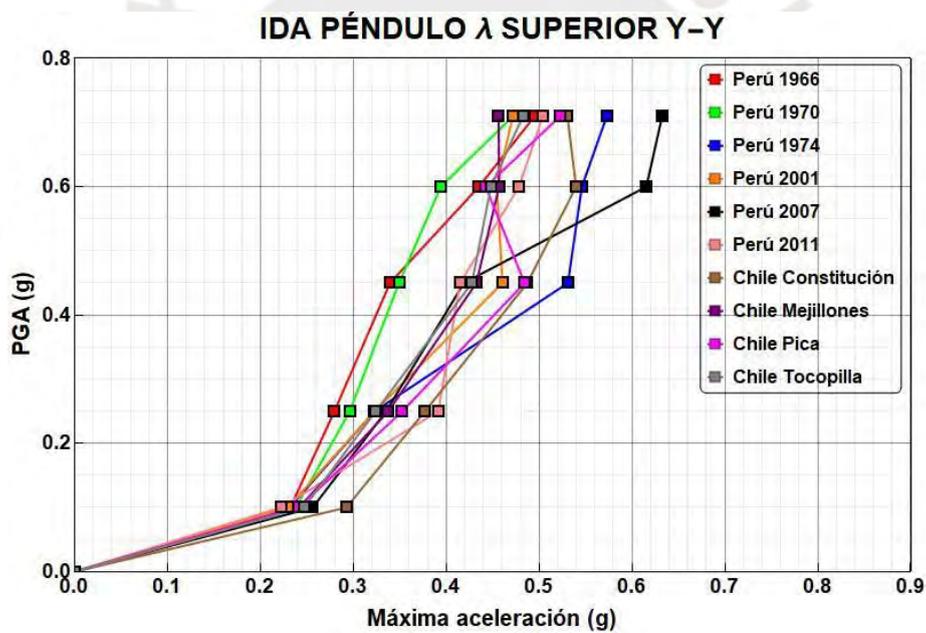
La Figura 6.14 muestra las curvas IDA de aceleraciones del último piso del hospital para la estructura aislada con dispositivos de goma modificadas con λ inferior, nominal y superior.

La estructura aislada con péndulo presenta la misma tendencia que la estructura aislada con goma; es decir, para lambda superior la respuesta es mayor que para lambda inferior. Para λ inferior la máxima aceleración es de 0.42g, para λ nominal una aceleración de 0.46g, y para λ superior 0.64g.





(b)



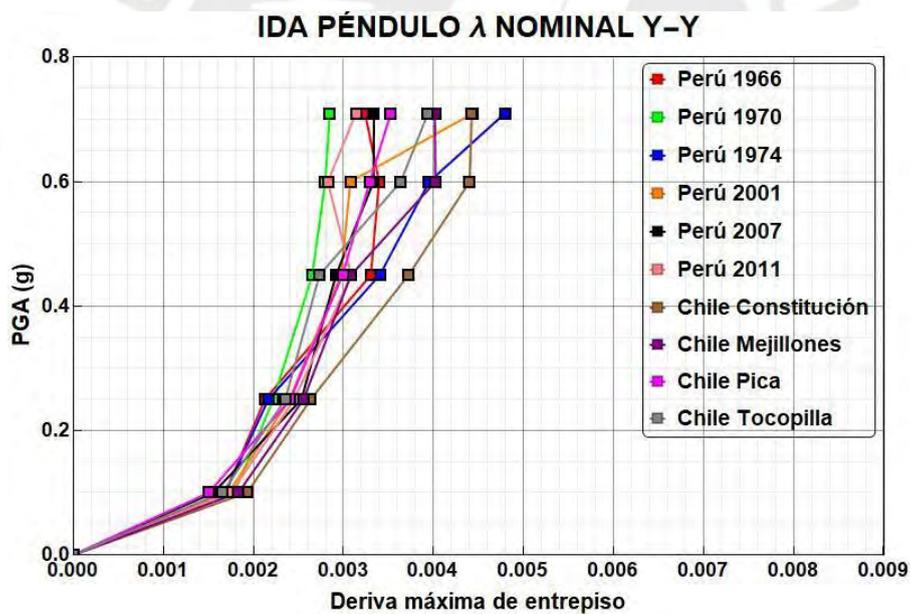
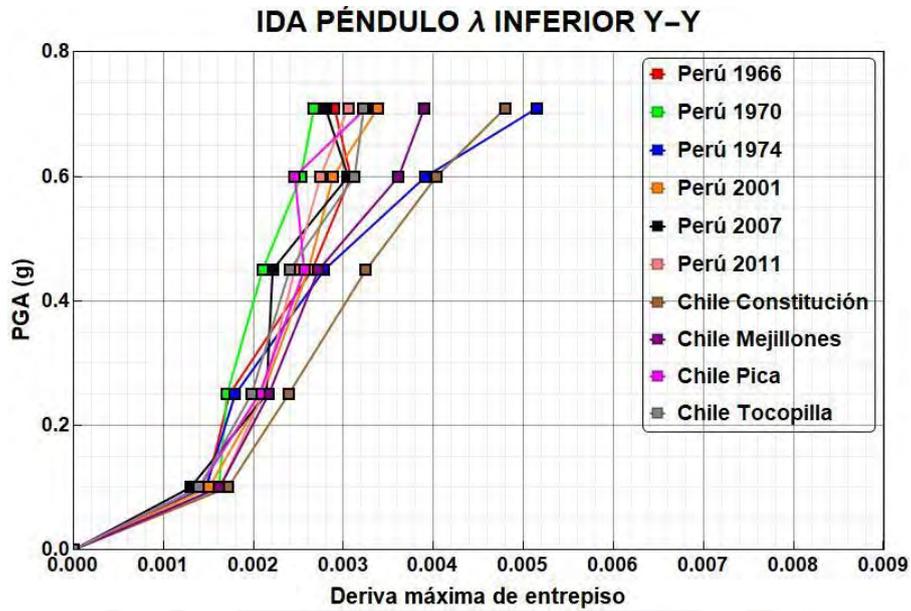
(c)

Figura 6.14 Curvas IDA de aceleración para dispositivos de péndulo; a) λ inferior, b) λ nominal, c) λ superior

6.2.2.2 Curvas IDA de Derivas de entrepiso para estructura aislada con dispositivos de péndulo

La Figura 6.15 muestra las curvas IDA de derivas máximas del segundo piso del hospital para la estructura aislada con dispositivos de péndulo modificados con los diferentes λ evaluados.

Las derivas máximas se producen en el segundo piso del edificio. La Figura 6.15 muestra las curvas IDA de derivas para los valores lambda de estudio para los dispositivos de goma.



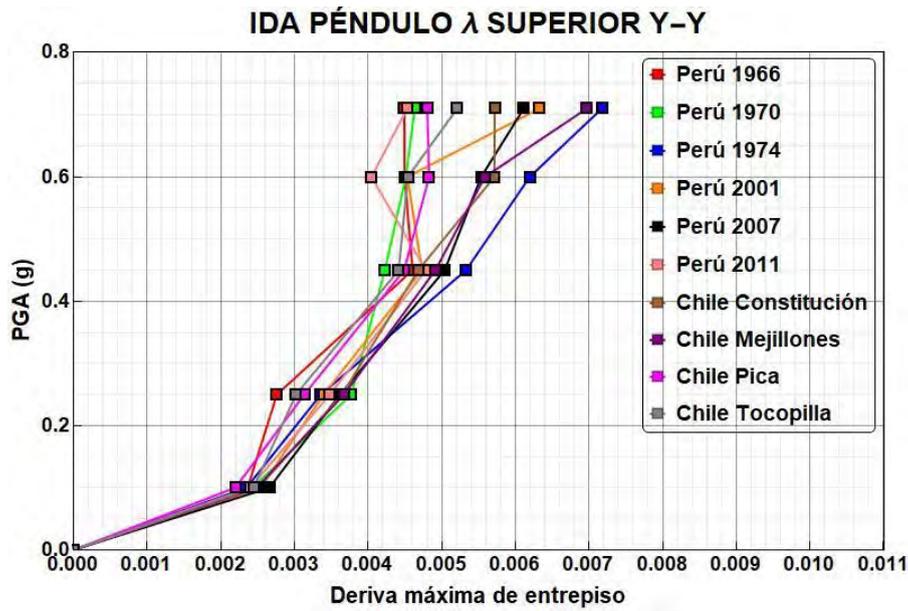


Figura 6.15 Curvas IDA de derivas para dispositivos de péndulo; a) λ inferior, b) λ nominal, c) λ superior

Se puede observar en las curvas IDA que, a medida que se incrementan los valores de lambda, las derivas también aumentan. Para una magnitud de aceleración sísmica PGA de 0.71g, la deriva máxima varía desde 5.0‰ (λ inferior) hasta 7.2‰ (λ superior).

6.2.2.3 Rotaciones máximas para el SMC de la estructura aislada con dispositivos de péndulo

Al igual que para la estructura aislada con goma se verifica que las rotaciones máximas inelásticas se presentan en el primer piso del hospital. En particular, se observa que las vigas experimentan rotaciones inelásticas que alcanzan un ratio máximo de 0.78 respecto a la rotación límite de IO para λ superior. Por su parte, las columnas también presentan un ratio máximo en el primer piso, con un valor de 0.79 respecto a la rotación máxima permitida de IO. Este resultado se explica debido a la mayor esbeltez de las columnas orientadas en la dirección Y (dirección corta de la estructura) en comparación con las columnas orientadas en la dirección X.

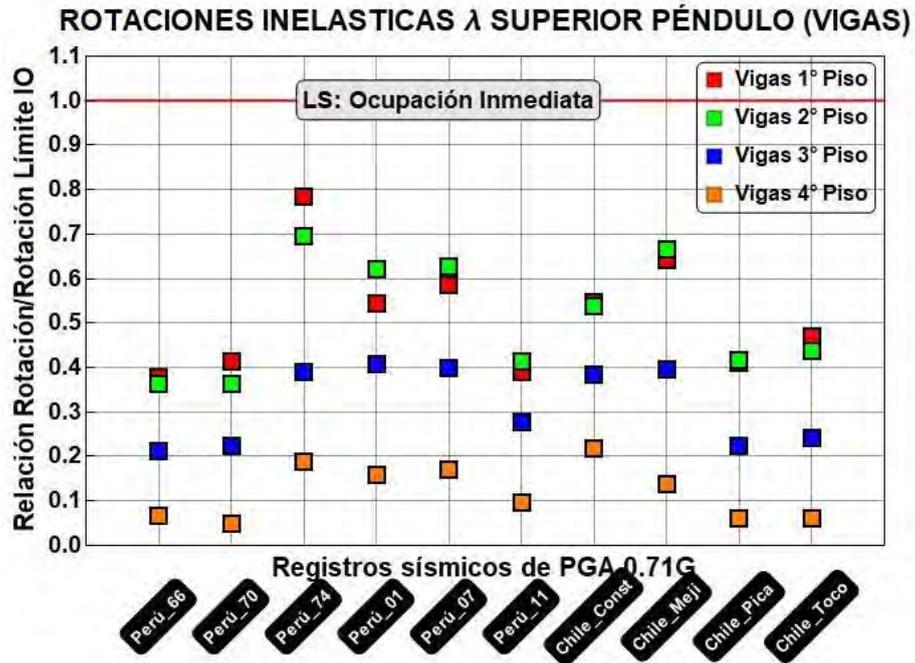


Figura 6.16 Relación entre rotación y rotación límite IO de vigas para aceleración de 0.71G (péndulo λ máximo)

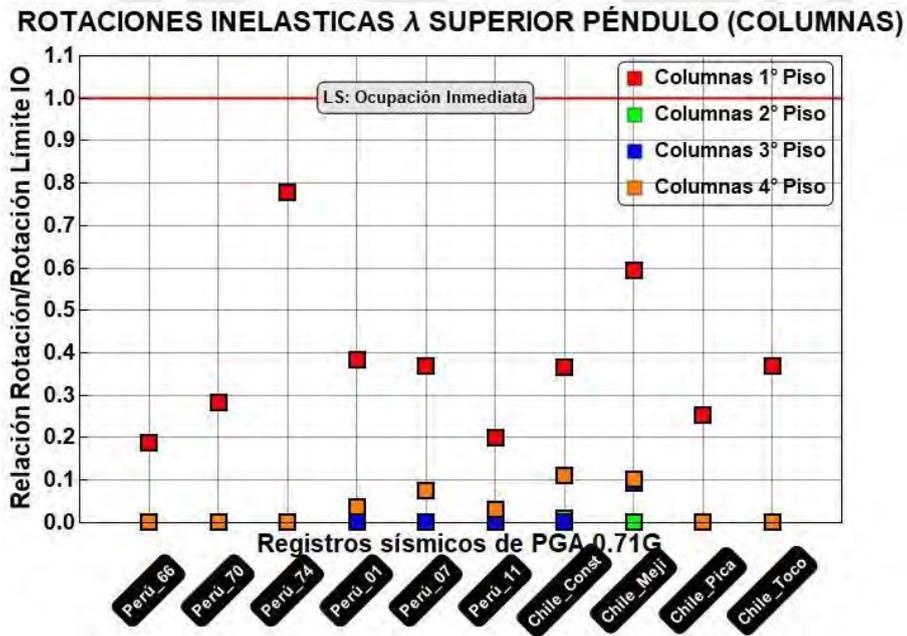


Figura 6.17 Relación entre rotación y rotación límite IO de columnas para aceleración de 0.71G (péndulo λ máximo)

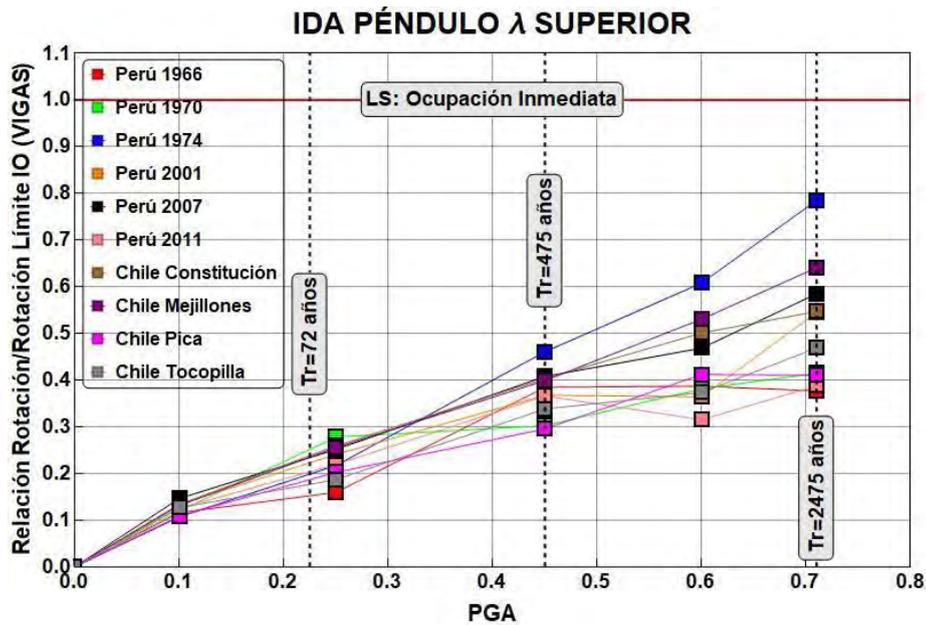


Figura 6.18 Curvas IDA de Relación entre rotación y rotación límite IO VS PGA (péndulo λ máximo)

En la Figura 6.18 se presenta las curvas IDA PGA vs Rotación/Rotación Límite para las vigas del primer nivel para el caso de lambda máximo. Para la intensidad de 0.225g (Tr= 72 años) el cociente máximo es de 0.26 para el sismo de Tocopilla, para la intensidad de 0.45g (Tr= 475 años) el valor máximo de ratio es de 0.46 del sismo de Constitución; y para la intensidad de 0.71g (Tr= 2475 años) se alcanza una rotación máxima de 0.78, la cual ocurre en para el sismo de Perú de 1974 (igual que para el caso de aisladores de goma).

6.3 CALIFICACIÓN DEL DESEMPEÑO

En este acápite se evalúa el desempeño de la estructura hospitalaria según los límites de estado recomendados por la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias, según se describen en la publicación HAZUS-MH MR5. Hay que destacar que los valores de límites de estado de HAZUS para medir el daño estructural son meramente referenciales, ya que estas curvas de fragilidad pertenecen a estructuras de concreto armado con factores de reducción sísmica superiores a 4 ($R > 4$).

Para calificar el desempeño se debe hacer una distinción entre la estructura y el del contenido. En primer lugar, se califica la respuesta global de la estructura usando criterios de derivas y de aceleraciones (medida de daño global), mientras que para calificar la respuesta a nivel local se usan criterios de giros inelásticos en los elementos estructurales (medida de daño en vigas y columnas). Después, se califica el comportamiento de los componentes no

estructurales con criterios de derivas para aquellos componentes vulnerables a desplazamientos relativos de piso, y aceleraciones de piso para aquellos componentes vulnerables a aceleraciones. Por último, se realiza comparativas de desempeño para la estructura aislada con goma y péndulo.

6.3.1 Calificación del desempeño de los componentes estructurales

Para evaluar el daño de los componentes estructurales, se consideran dos indicadores de daño: a nivel global derivas y a nivel local giros inelásticos en vigas y columnas. En la Tabla 6.1 se observa los umbrales de daño en función de las derivas especificados por HAZUS.

Tabla 6.1 Estados de daño en elementos estructurales (HAZUS, 2020)

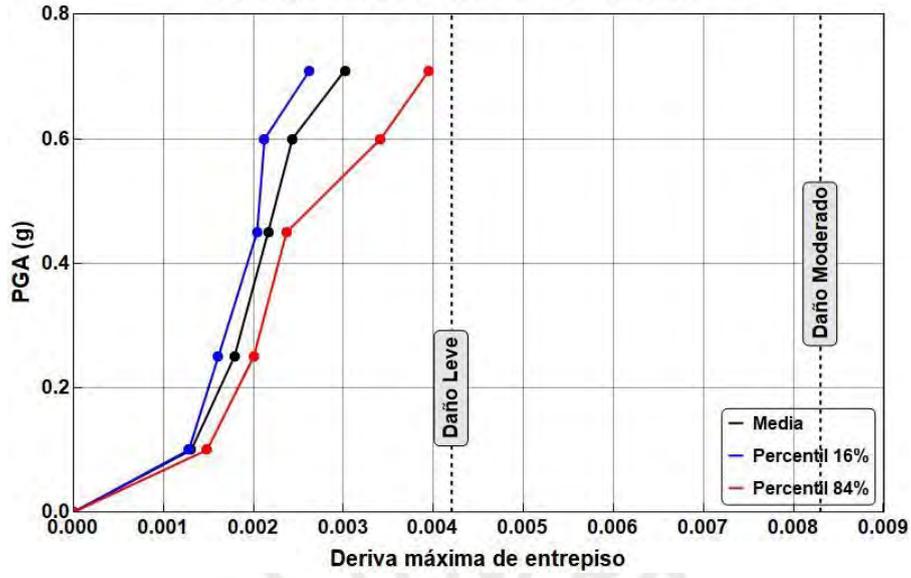
Nivel de Diseño Sísmico	Estados de daño para elementos estructurales- edificios de mediana altura con porticos de concreto armado resistentes a momentos			
	Leve	Moderado	Extenso	Completo
	Derivas de entrepiso			
Código-especial	4.2 ‰	8.3 ‰	2.50%	6.67%

Se ha evaluado el daño en base a las derivas de entrepiso. Cuando existe una calificación de "leve", se pueden observar grietas con un espesor menor a 0.1mm resultantes de la flexión o corte. Si el daño es considerado "moderado", se puede observar la fluencia en algunos elementos y la pérdida del recubrimiento. Cuando el daño es clasificado como "extenso", pueden generarse fallas producidas por corte y pandeo del refuerzo principal. Si el daño es clasificado como "completo", existe la probabilidad de colapso inminente.

6.3.1.1 Evaluación del desempeño de la estructura en el sistema con dispositivos de goma

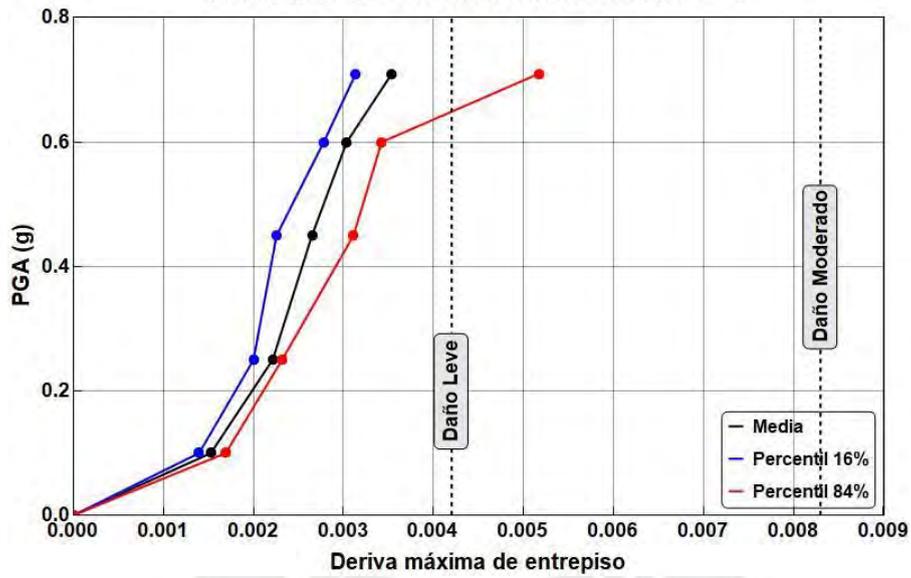
La Figura 6.19 presenta el desempeño de los elementos estructurales para los casos de lambda; para ello se calcula la media y los percentiles de estudio 16 y 84.

PERCENTILES GOMA λ INFERIOR Y-Y

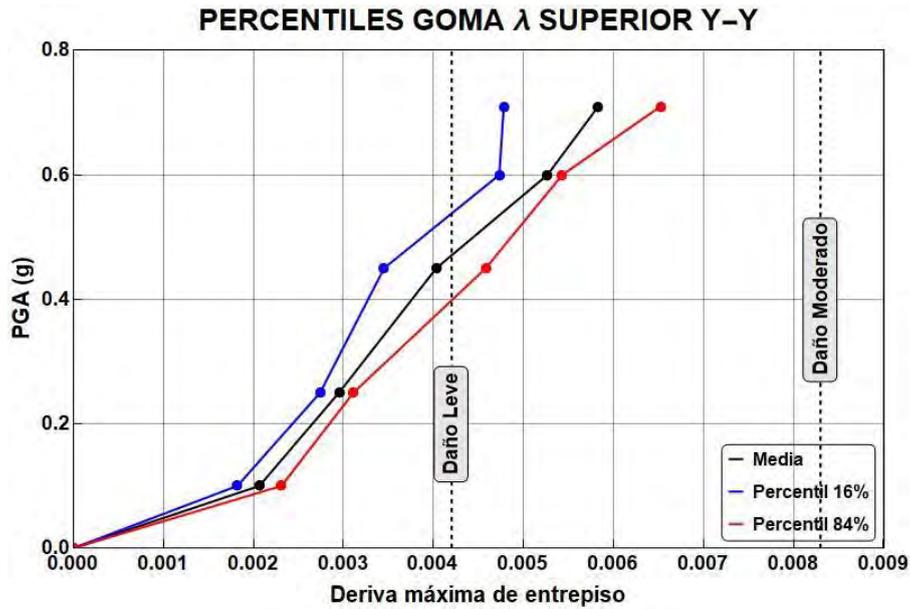


(a)

PERCENTILES GOMA λ NOMINAL Y-Y



(b)



(c)

Figura 6.19 Percentiles 16% y 84% en Curvas IDA de derivas para goma; a) λ inferior, b) λ nominal, c) λ superior

En la Figura 6.19 se aprecia que las derivas son menores a las derivas relacionadas a año leve para el caso de lambda inferior. Tanto para el caso de lambda nominal el percentil 84% y el caso de lambda superior para PGA 0.71g la deriva máxima sobrepasa el límite de daño leve, que según HAZUS nos encontramos entre daño leve y moderado.

La Figura 6.20 presenta un gráfico comparativo de curvas IDA promedio para las variaciones de propiedades de los dispositivos inferior, nominal y superior; en el cual ocurre daño moderado para el caso de lambda superior, con una deriva de 5.8‰ para PGA de 0.71g que es mayor a 4.2‰ según HAZUS. Además, para una intensidad mayor a 0.45g (periodo de retorno de 475 años) el daño que podría sufrir la estructura se encuentra entre leve y moderado. Entonces, esto nos indica que algunos elementos en la superestructura sufrirían fluencia.

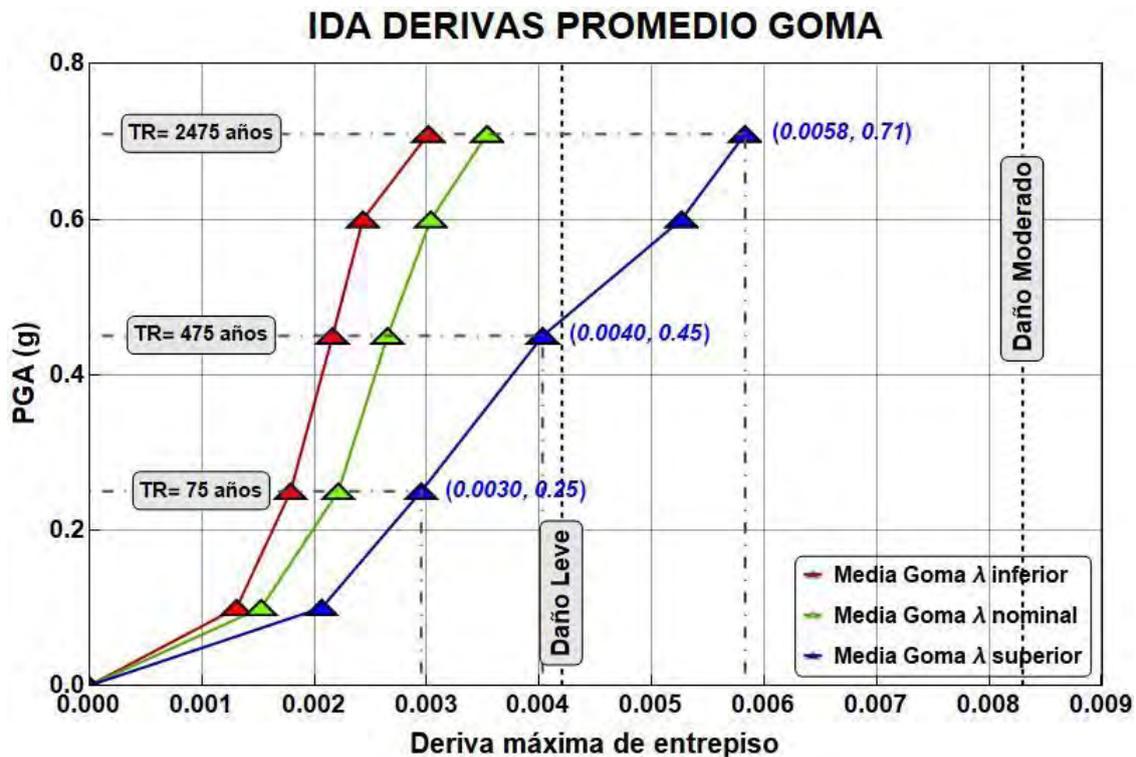


Figura 6.20 Curvas IDA de derivas promedio para goma- elementos no estructurales (λ inferior, λ nominal y λ superior)

Rotaciones Inelásticas en goma

Para calificar el desempeño de los componentes estructurales a nivel local se evalúan las rótulas tanto de vigas como de columnas. Como se explica en los acápites anteriores esta evaluación se da de acuerdo al ASCE 41. La máxima rotación calculada en los elementos se encuentra en torno a 0.54 veces la rotación correspondiente a la condición de IO para lambda superior y un PGA de 0.71g.

Con los resultados de derivas se puede concluir que después de un sismo de periodo de retorno de 2475 años con un PGA máximo de 0.71g habrá ocupación inmediata de la infraestructura hospitalaria. Por otro lado, la presencia de rotaciones inelásticas en elementos como vigas y columnas coincide con la clasificación de daño entre leve y moderado descrita en el manual de HAZUS, en la que los elementos están fuera del rango elástico.

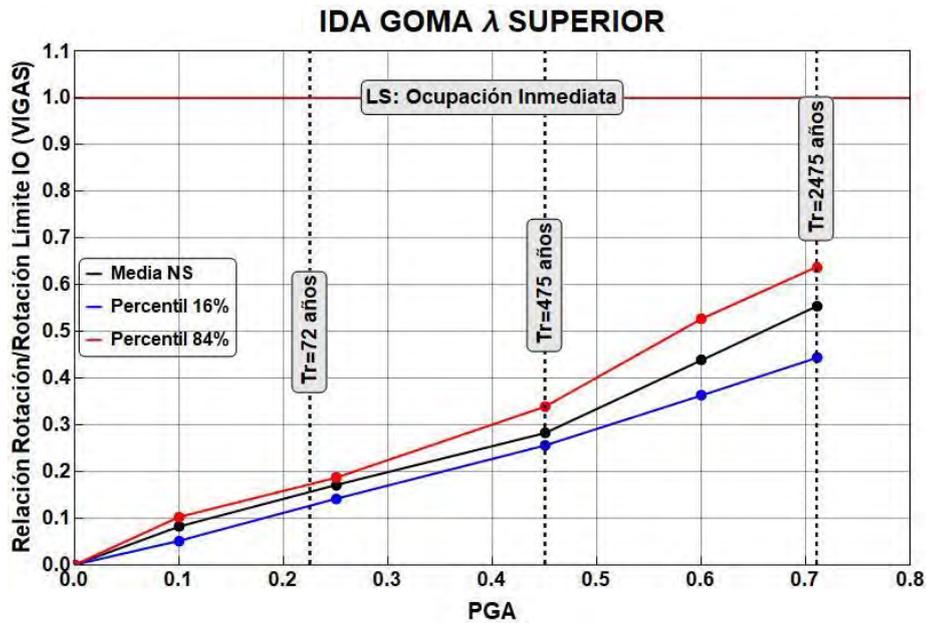


Figura 6.21 Curvas IDA de relación rotación/rotación límite en vigas: media, percentil 16% y percentil 84% para goma (λ superior)

Diseño de un dispositivo de goma con núcleo de plomo

Se evalúa el dispositivo de goma con núcleo de plomo que se encuentra en una de las esquinas del edificio. Para diseñar el dispositivo se sigue el procedimiento descrito en el Anexo 2. Los resultados se muestran en las siguientes tablas

Propiedades del aislador	Valor	Unidades
Diametro externo del aislador (d)	700	mm
Diametro del aislador (db)	688	mm
Diametro del nucleo (dL)	130	mm
Espesor total de goma (Tr)	200	mm
Espesor de las capas de goma (ti)	4.7	mm
Numero de capas de goma	43	-
Rigidez efectiva (Keff)	1360	N/m
Amortiguamiento efectivo (Beff)	0.27	-

Con estas características se busca un dispositivo en el mercado. Se encuentra un dispositivo Bridgestone con la denominación **LH070G4A**.

Verificación de la estabilidad de un dispositivo de goma de esquina

La estabilidad del dispositivo se verifica por capacidad axial y por deformación por corte según lo indicado en la norma E.031 Anexo 2.

Verificación por capacidad axial para análisis dinámico

Descripción	Módulo elástico (Eo)	Módulo de compresión (Ec)	Area reducida (AR)	Carga critica (Pc)	Factor de seguridad (Fs) > 1
Valor	2.48	5022	44876	3957	1.61
Unidades	Mpa	Mpa	mm	kN	-

Deformación por corte para análisis dinámico

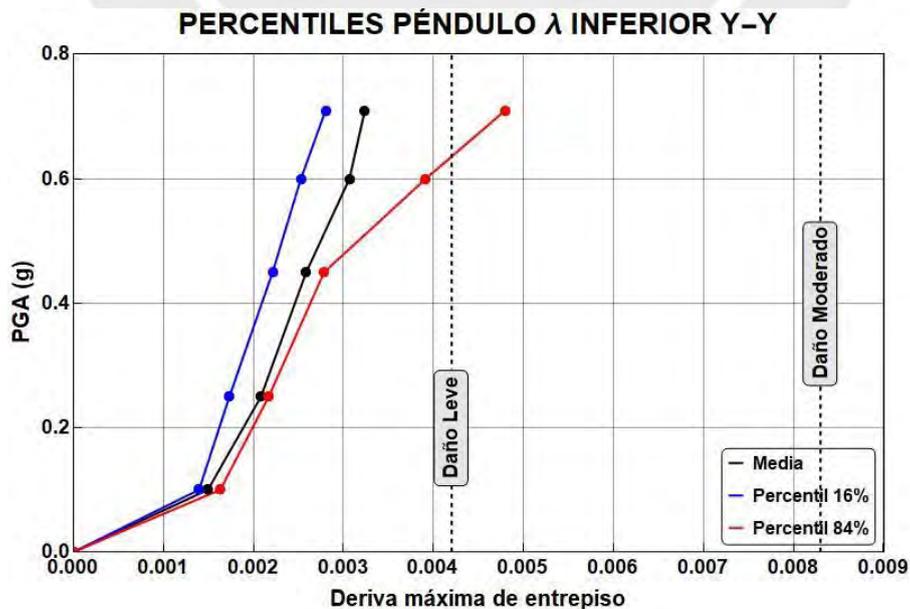
Además, se realiza la verificación por estabilidad para el caso estático. El desplazamiento total máximo para el caso de lambda inferior es de 0.44m. Entonces La deformación por corte debido a deformación lateral lateral con Hr=200 mm es:

$$\gamma D = \frac{DTM}{H_r} = 2.20$$

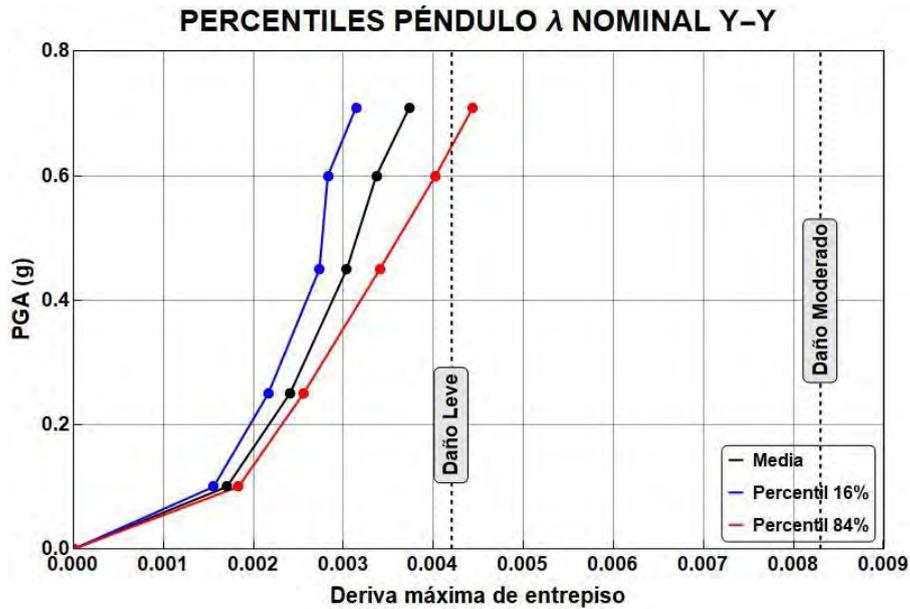
Por lo tanto, se concluye que el dispositivo colocado es adecuado.

6.3.1.2 Evaluación del desempeño de la estructura en el sistema con dispositivos de péndulo

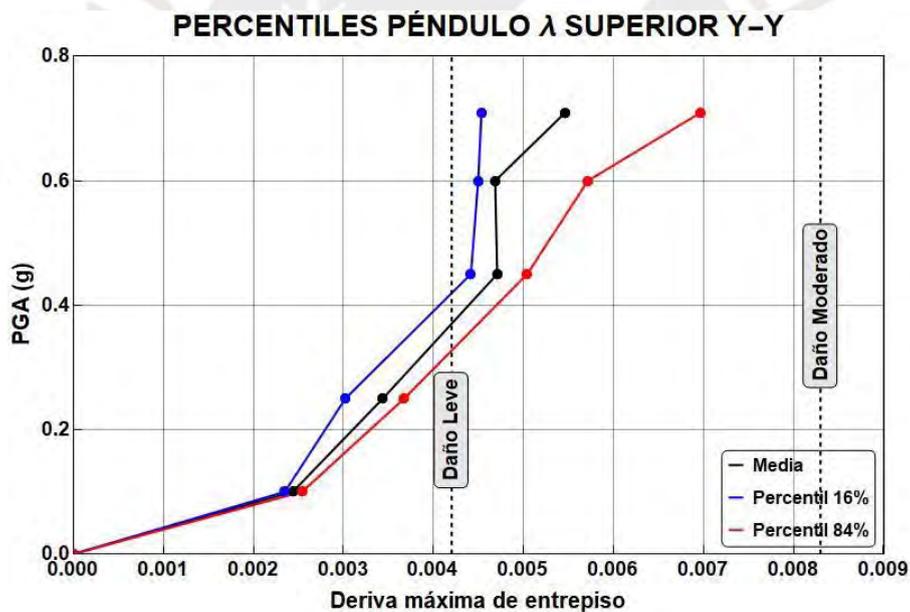
La Figura 6.22 presenta el desempeño de los elementos estructurales para los casos de lambda; para ello se calcula la media y los percentiles de estudio 16 y 84.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.22 Media, Percentiles 16% y 84% en Curvas IDA de derivas para péndulo; a) λ inferior, b) λ nominal, c) λ superior

En la Figura 6.22 se aprecia que las derivas son mayores al límite de daño leve para el caso de lambda inferior y nominal para el percentil 84%; mientras que para el caso de lambda superior para un PGA 0.71g la deriva máxima sobrepasa el límite de daño, lo que corresponde a daño moderado según el manual de HAZUS.

La Figura 6.23 presenta un gráfico comparativo de curvas IDA promedio de derivas para λ inferior, nominal y superior; en el cual ocurre daño moderado para el caso de lambda superior, con una deriva de 5.5‰ para PGA de 0.71g que es mayor a 4.2‰ según HAZUS. Además, para una intensidad mayor a 0.45g (periodo de retorno de 475 años) el daño que podría sufrir la estructura se encuentra entre leve y moderado. Entonces, esto nos indica que algunos elementos en la superestructura sufrirían fluencia.

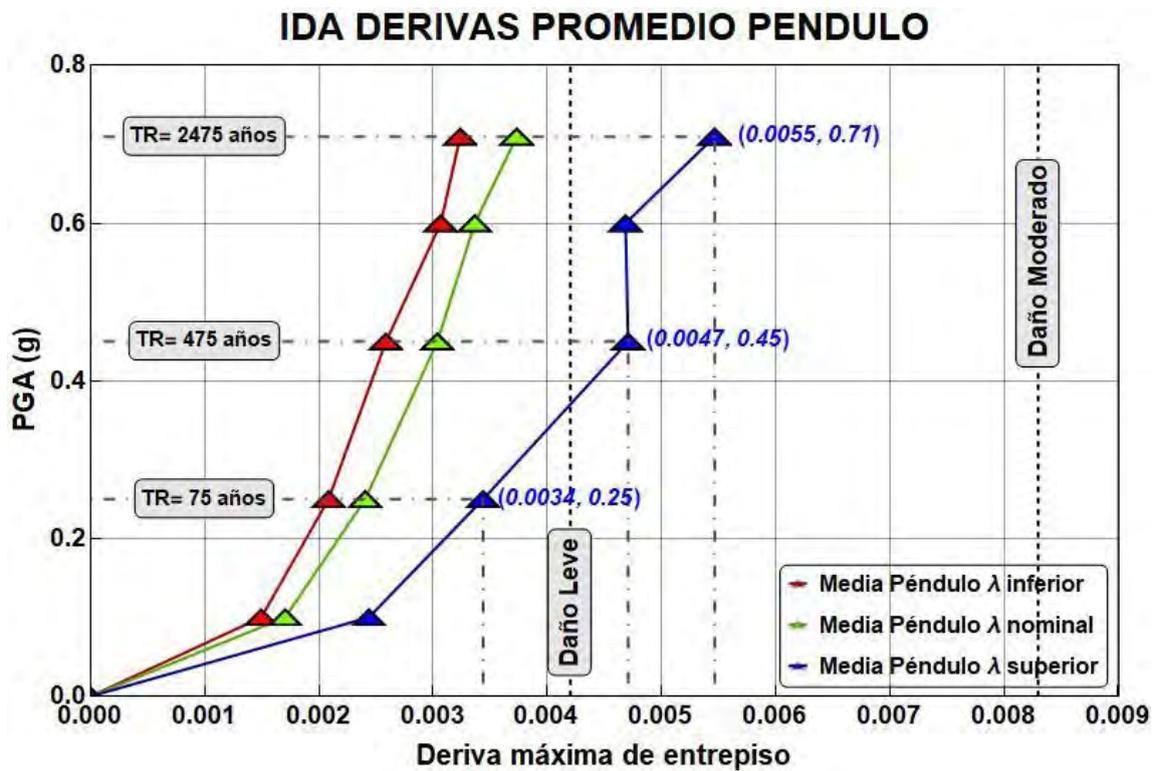


Figura 6.23 Curvas IDA de derivas promedio para péndulo - elementos estructurales (λ inferior, λ nominal y λ superior)

Rotaciones Inelásticas en péndulo

Se estudia las rotaciones de las rotulas en vigas y columnas al igual que en la estructura aislada con dispositivos de goma. La máxima rotación calculada en los elementos se encuentra en torno a 0.50 veces la rotación correspondiente a la condición de IO para lambda superior y un PGA de 0.71g.

Con los resultados de derivas se puede concluir que después de un sismo de periodo de retorno de 2475 años con un PGA máximo de 0.71g habrá ocupación inmediata de la infraestructura hospitalaria.

La presencia de rotaciones inelásticas en elementos como vigas y columnas coincide con la clasificación de daño entre leve y moderado descrita en el manual de HAZUS, en la que los elementos están fuera del rango elástico.

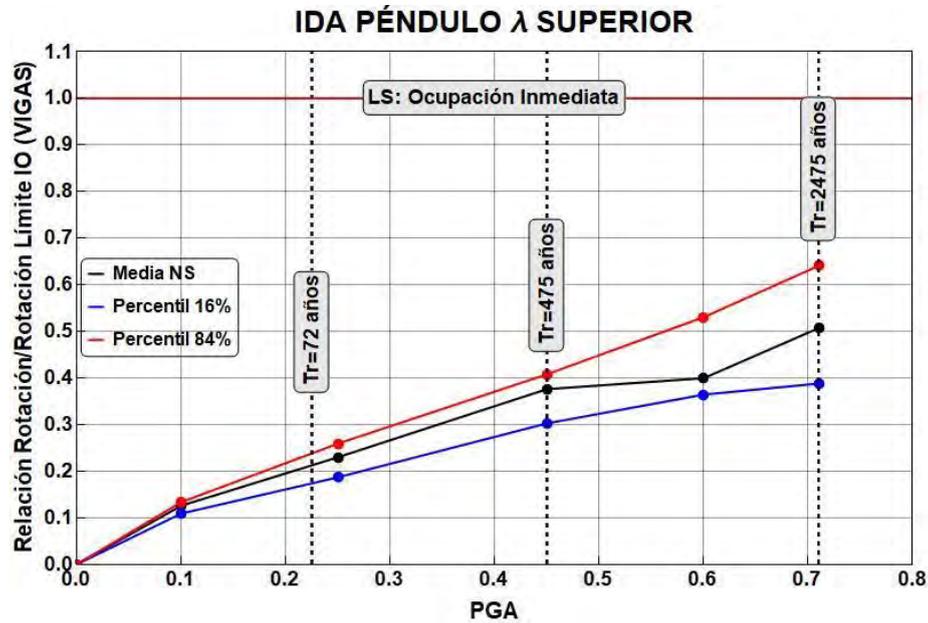


Figura 6.24 Curvas IDA de relación rotación/rotación límite en vigas: media, percentil 16% y percentil 84% para péndulo (λ superior)

6.3.1.3 Comparación del desempeño de elementos estructurales en la estructura aislada con dispositivos de goma y péndulo

A continuación, se muestra un gráfico unificado de curvas IDA de derivas de las medias y los percentiles 16 y 84 para los casos de dispositivos de goma y péndulo para propiedades afectadas por los factores lambda máximos.

En la Figura 6.25 se muestra que para la estructura con dispositivos de goma la deriva media en la dirección X es de 2.4/1000, mientras que para el caso de dispositivos de péndulo la máxima deriva tiene un valor de 2.8/1000, siendo este mayor en un 17%.

En la estructura con dispositivos de goma la deriva media en la dirección Y es de 5.8/1000, mientras que para el caso de dispositivos de péndulo la máxima deriva tiene un valor de 5.4/1000, siendo este mayor en un 7% como se muestra en la Figura 6.26. Esta diferencia en los resultados en mínima, lo que indica que el desempeño con ambos dispositivos de aislamiento es similar.

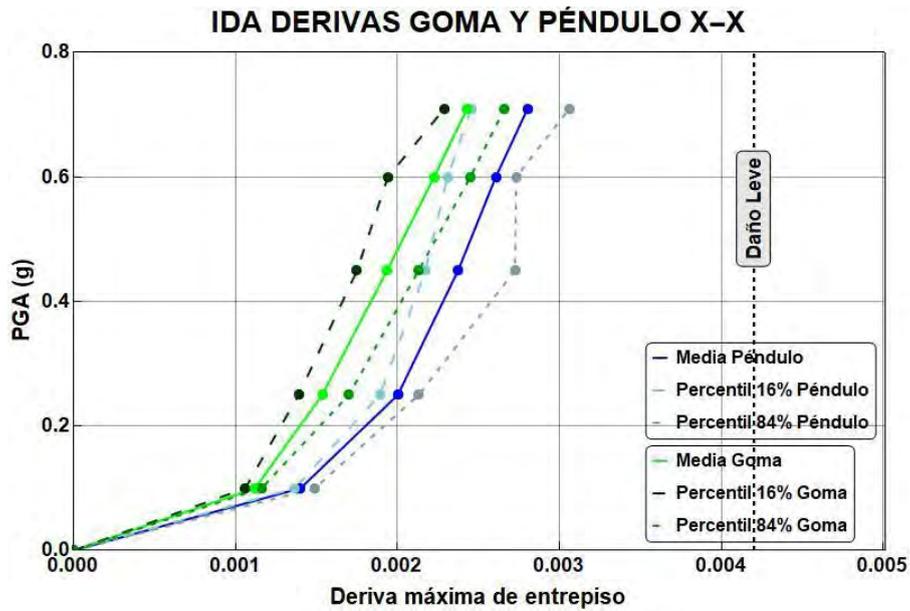


Figura 6.25 Comparación de curvas IDA de derivas entre curvas medias, de percentil 16% y percentil 84% para dispositivos de goma y péndulo (λ máximo dirección X)

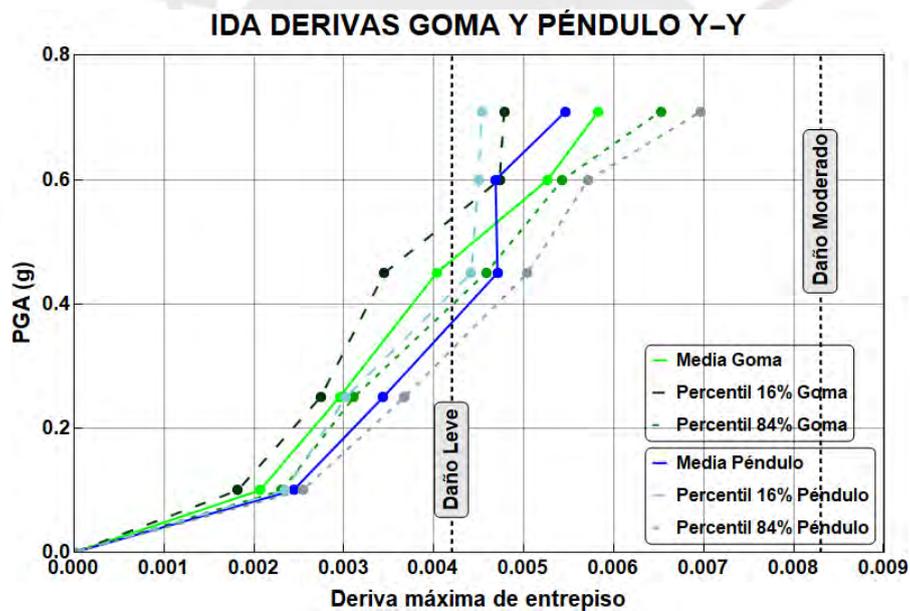


Figura 6.26 Comparación de curvas IDA de derivas entre curvas medias, de percentil 16% y percentil 84% para dispositivos de goma y péndulo (λ máximo dirección Y)

Igualmente se muestra la Figura 6.27 y 6.28 donde se observa que las rotaciones máximas de las vigas en el primer nivel para una intensidad de 0.71G (periodo de retorno de 2500 años) del caso de goma son superiores en 10% respecto a las rotaciones con el caso de péndulo. Se encuentra congruencia entre las curvas IDA derivas y de rotaciones inelásticas, donde el desempeño de la estructura con ambos dispositivos es similar.

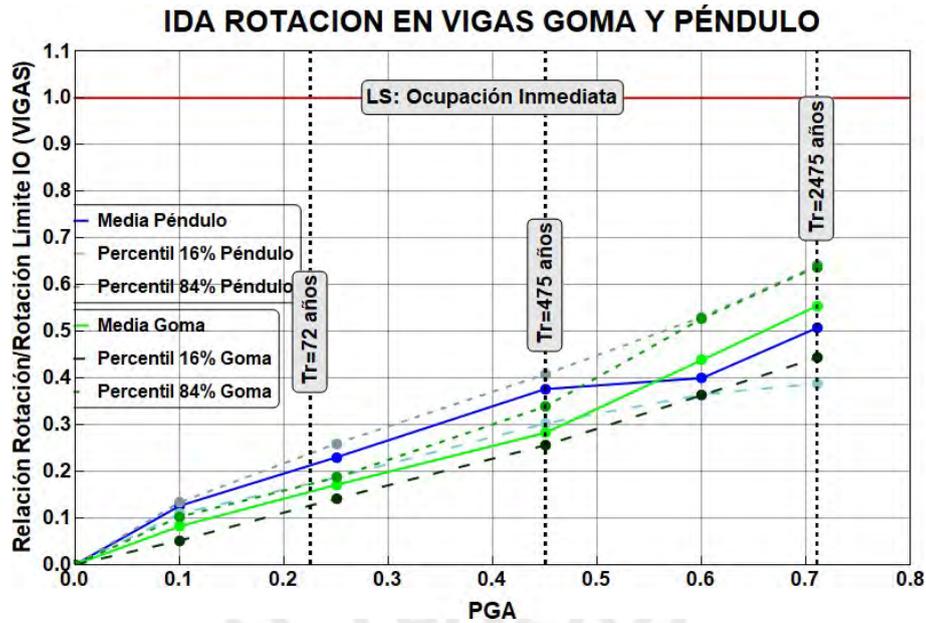


Figura 6.27 Comparación de curvas IDA de relación de rotaciones de vigas entre curvas medias, de percentil 16% y percentil 84% para dispositivos de goma y péndulo (λ máximo)

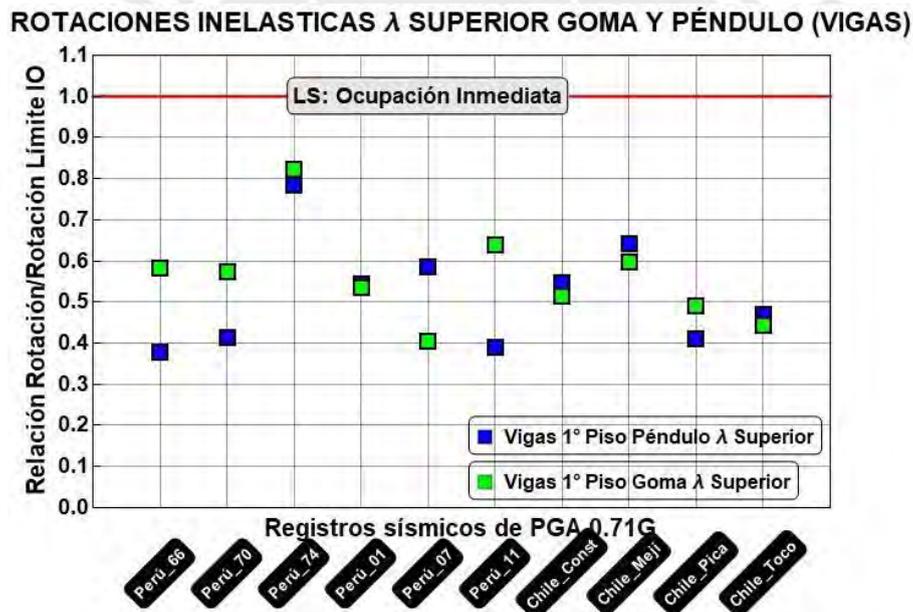


Figura 6.28 Comparación de relación de rotaciones de vigas para SMC (sismo de 2500 años) para dispositivos de goma y péndulo (λ máximo)

6.3.2 Evaluación del desempeño de los componentes no estructurales

En este acápite se evalúa el desempeño de los componentes no estructurales en hospitales. Para ello se hace la distinción entre elementos que son sensibles a aceleraciones, como es el caso de equipamiento médico; y elementos que son sensibles a los desplazamientos, como los muros de tabiques.

6.3.2.1 Componentes no estructurales susceptibles a aceleraciones.

El desempeño de este tipo de elementos también se realiza siguiendo los lineamientos de HAZUS. En hospitales de nivel de complejidad de atención alto existen varios subcomponentes, por ejemplo, equipos mecánicos, médicos y otros. Debido a la gran cantidad de subcomponentes HAZUS simplifica y sugiere aceleraciones límite para este tipo de elementos susceptibles a aceleraciones de piso. La Tabla 6.2 presenta estos umbrales de aceleración de piso.

Tabla 6.2 Estados de daño para componentes no estructurales susceptibles a aceleraciones (HAZUS, 2020)

Nivel de Diseño	Estados de daño para elementos no estructurales- todo tipo de edificaciones			
	Leve	Moderado	Extenso	Completo
	Aceleraciones maximas de piso (g)			
Código-especial	0.45 g	0.90 g	1.8 g	3.6 g

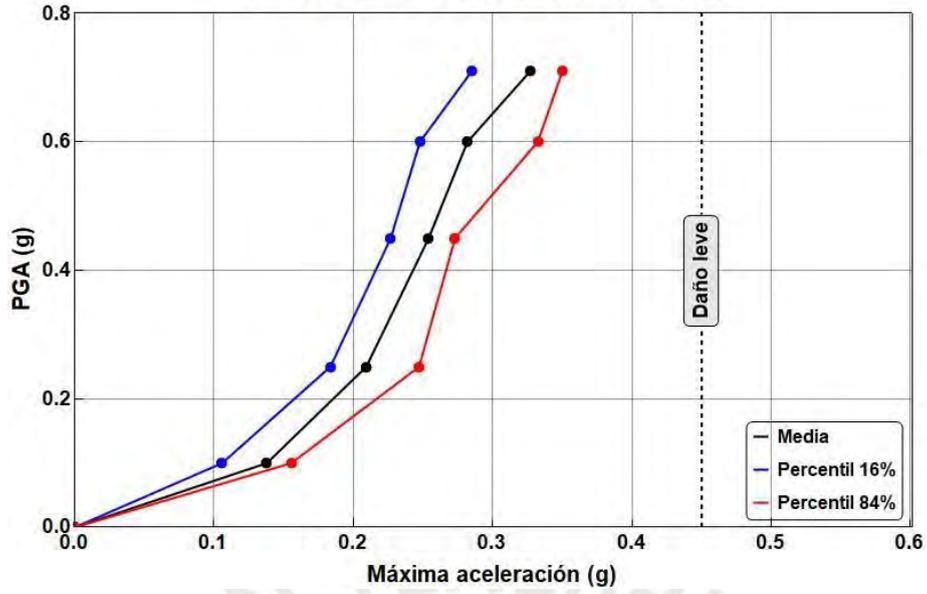
6.3.2.1.1 Calificación del desempeño de los componentes no estructurales susceptibles a aceleraciones en la estructura aislada con dispositivos de goma

La Figura 6.29 presenta las curvas IDA de aceleración media y valores de percentil 16% y 84% correspondientes al cuarto piso del hospital para los escenarios de lambda inferior, nominal y superior.

Los resultados indican que las aceleraciones de piso experimentadas son inferiores al límite de daño leve en los casos de valor lambda inferior y nominal. Sin embargo, en el escenario de valor lambda superior, se observa que para una intensidad de 0.71g, el percentil 84% se encuentra en el rango de daño moderado

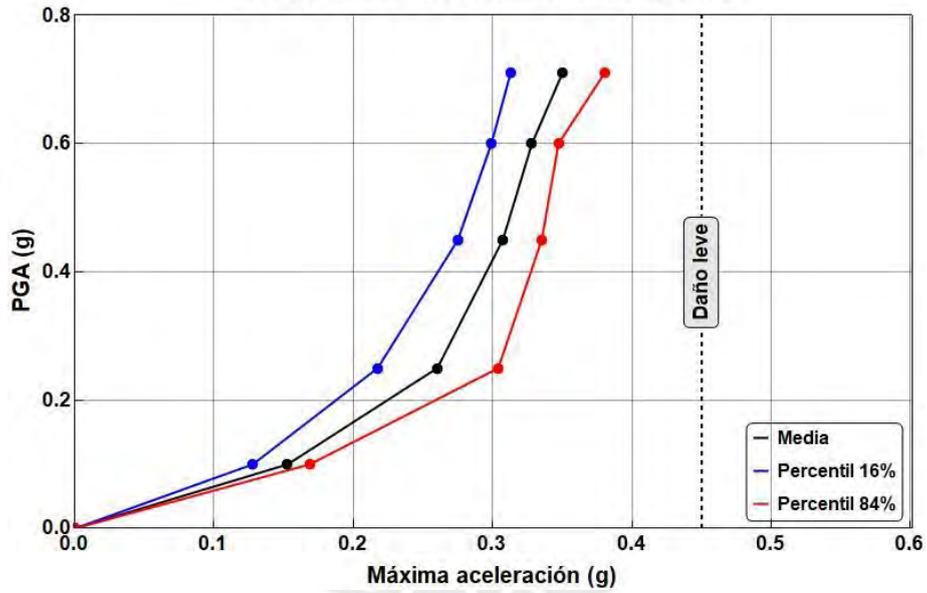
En la Figura 6.30 se presentan las curvas IDA de aceleración promedio para los casos de lambda inferior, nominal y superior. Se observa que existe daño leve para los tres casos, con una aceleración máxima promedio de 0.40g para un PGA de 0.71g, valor que es inferior a 0.45g de HAZUS. Estos valores de aceleraciones indican que los elementos no estructurales susceptibles a aceleraciones solo tendrán daño leve.

PERCENTILES GOMA λ INFERIOR



(a)

PERCENTILES GOMA λ NOMINAL



(b)

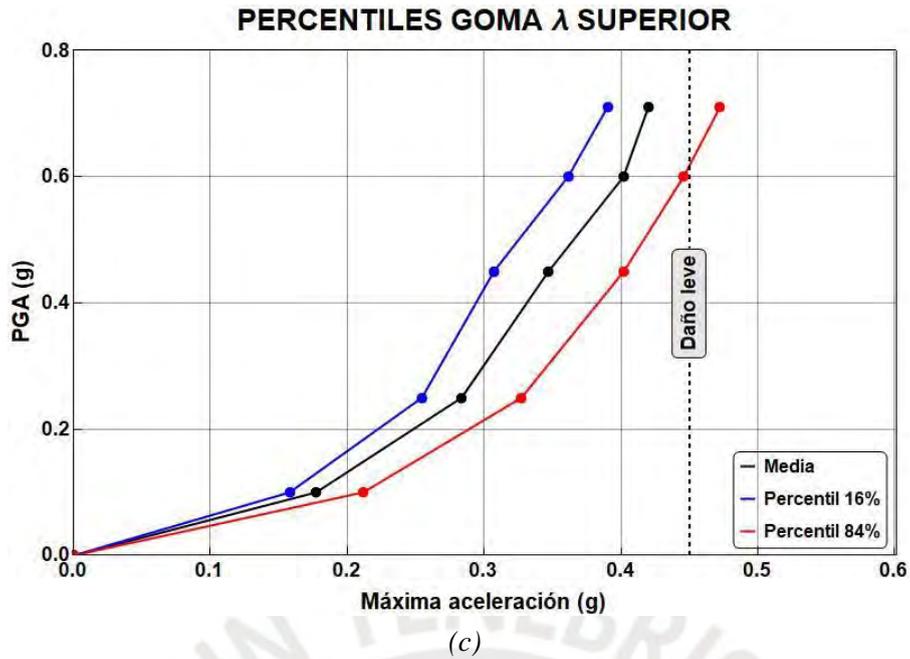


Figura 6.29 Media, Percentiles 16% y 84% en Curvas IDA de aceleraciones para goma; a) λ inferior, b) λ nominal, c) λ superior

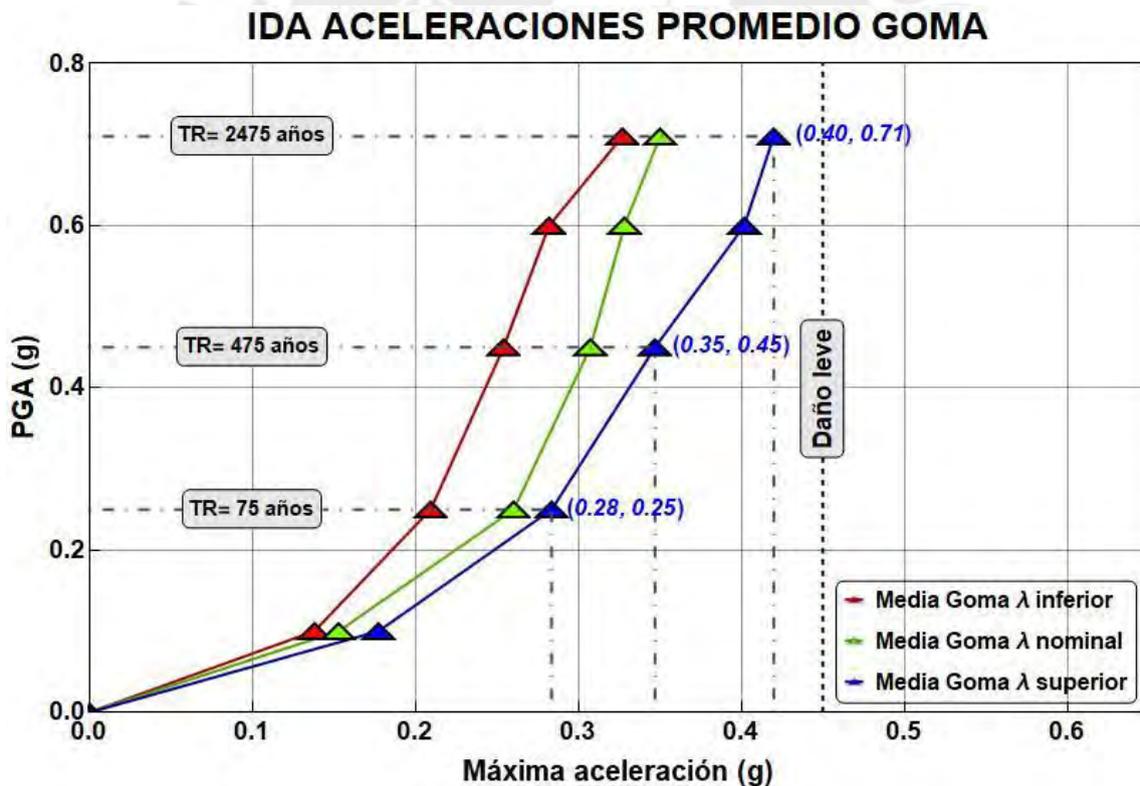
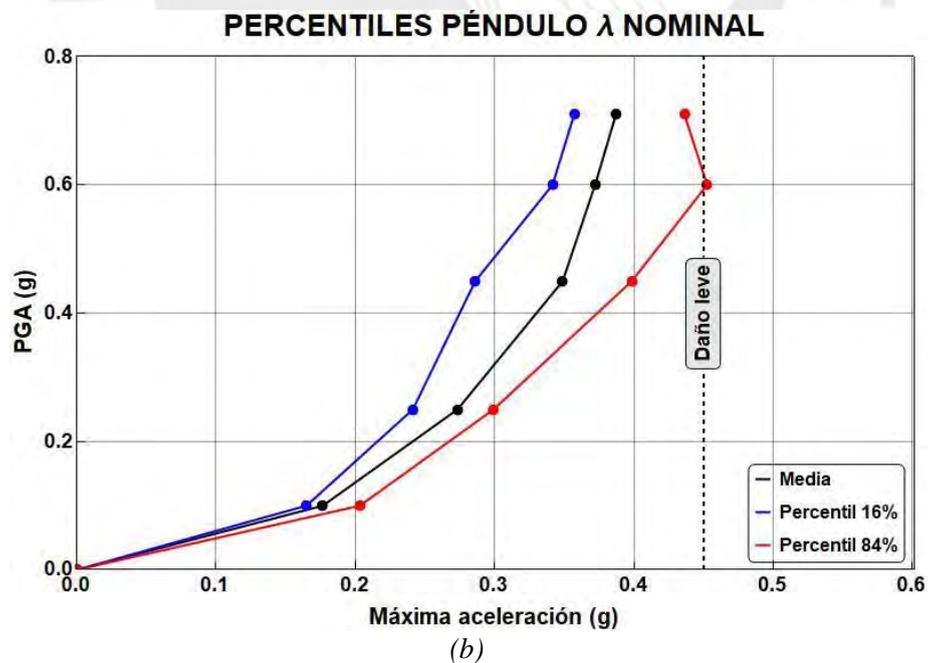
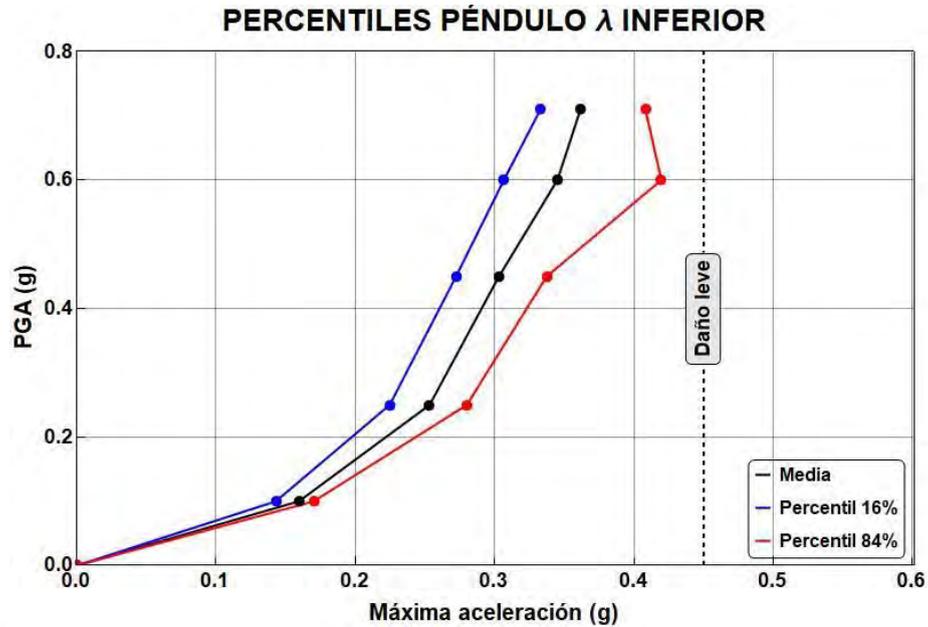
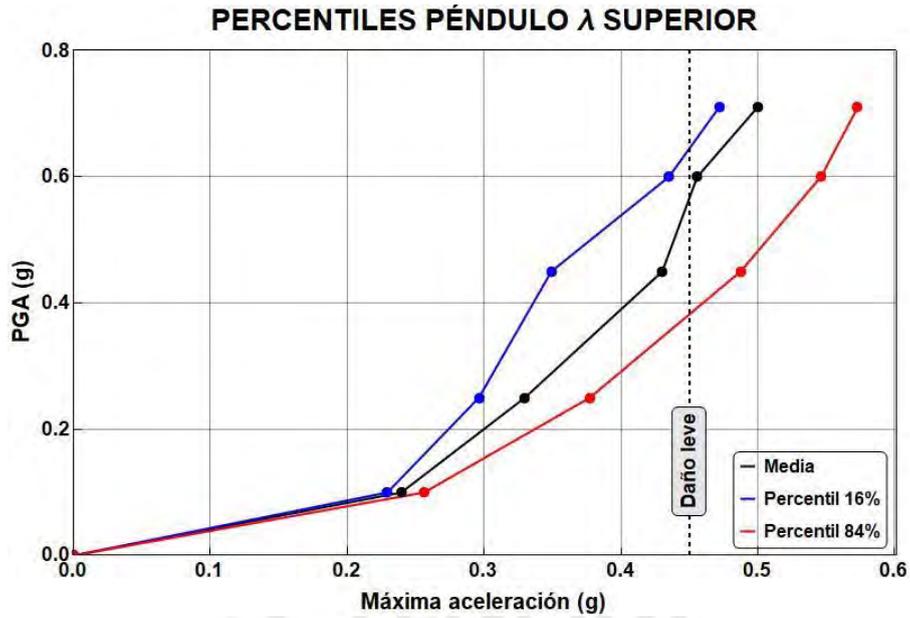


Figura 6.30 Curvas IDA de aceleraciones promedio para goma (λ inferior, λ nominal y λ máximo)

6.3.2.1.2 Calificación del desempeño de los componentes no estructurales susceptibles a aceleraciones en la estructura aislada con dispositivos de péndulo

La Figura 6.31 presenta las curvas IDA de aceleración media y valores de percentil 16% y 84% correspondientes al cuarto piso del hospital para los escenarios de lambda inferior, nominal y superior.





(c)

Figura 6.31 Media, Percentiles 16% y 84% en Curvas IDA de aceleraciones para péndulo; a) λ inferior, b) λ nominal, c) λ superior

Los resultados indican que las aceleraciones de piso experimentadas son inferiores al límite de daño leve. Sin embargo, en el escenario de valor lambda superior, se observa que para una intensidad de 0.71g, el percentil 84% se encuentra en el rango de daño leve y moderado.

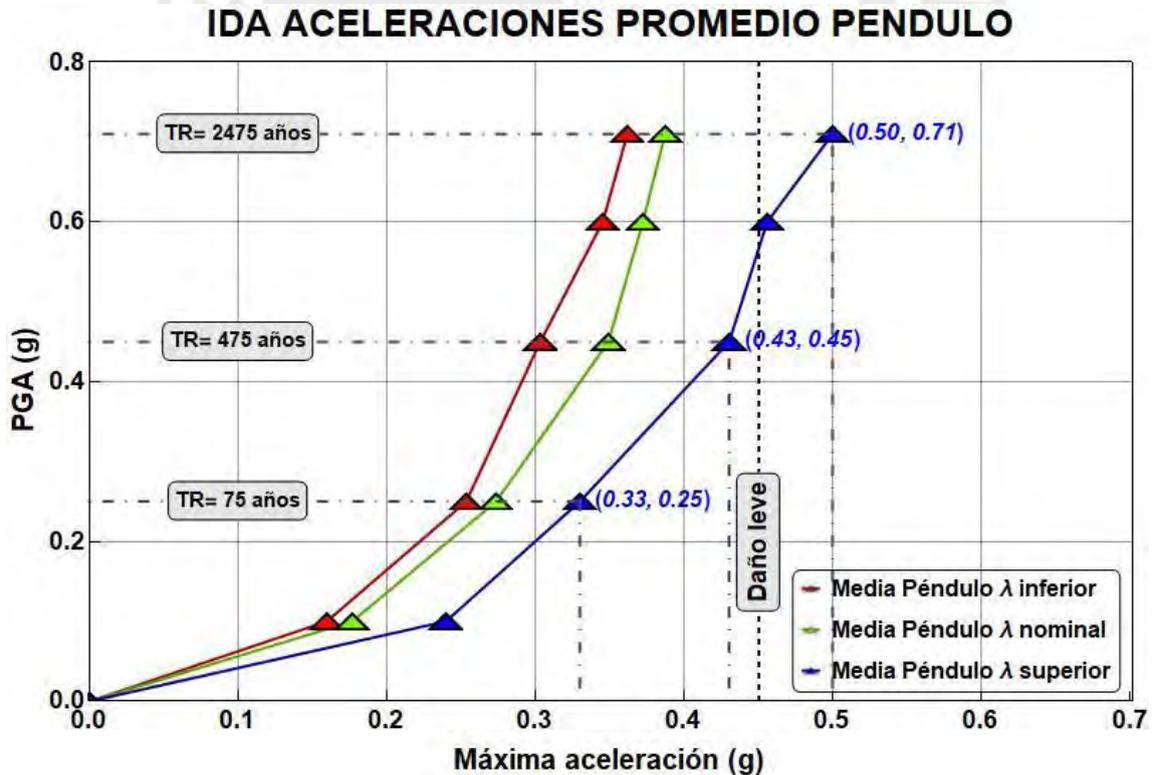


Figura 6.32 Curvas IDA de aceleraciones promedio para péndulo (λ min, λ nominal y λ máx.)

En la Figura 6.32 se presentan las curvas IDA de aceleración promedio para los casos de λ inferior, nominal y superior. Se observa que existe daño leve para λ inferior y λ nominal. Mientras que para el caso de λ superior existe daño moderado con una aceleración máxima promedio de 0.50g para PGA de 0.71g, valor que es superior a 0.45g de HAZUS. Estos valores de aceleraciones indican que los elementos no estructurales susceptibles a aceleraciones tendrán entre daño leve y moderado.

6.3.2.2 Componentes no estructurales susceptibles a desplazamientos

De acuerdo con el manual de HAZUS, se utilizó la deriva de entrepiso como medida del daño en este tipo de elementos. Es importante resaltar que HAZUS no toma en cuenta la tipología o el tamaño de la edificación, ya que los valores de derivas son aplicables a todas las edificaciones.

Según la Tabla 6.3, se presentan los estados límite de las derivas de los elementos no estructurales que son susceptibles a desplazamientos, definidos por HAZUS. En esta tabla se describen los niveles de daño en función a la magnitud de las derivas, los cuales van desde leves hasta completos. Por ejemplo, en el caso de daño leve, se observan las primeras grietas en las intersecciones de los muros de tabiquería, mientras que, en el caso de daño moderado, se presentan grietas en los tabiques, y en el caso de daño extenso se registran desprendimientos de acabados en tabiques. Finalmente, cuando el daño es completo, las tabiquerías se deben quitar.

Tabla 6.3 Estados de daño en componentes no estructurales susceptibles a desplazamientos (HAZUS, 2020)

Nivel de Diseño	Estados de daño para elementos no estructurales- todo tipo de edificaciones			
	Leve	Moderado	Extenso	Completo
	Derivas de entrepiso			
Todo tipo	4.0 ‰	8.0 ‰	2.50%	5.00%

6.3.2.2.1 Calificación del desempeño de los componentes no estructurales susceptibles a desplazamientos de la estructura aislada con dispositivos de goma

La estructura aislada con goma que ha sido afectada por los valores máximos de λ presenta derivas por encima de 4‰, lo cual indica que los elementos no estructurales susceptibles a desplazamientos superan el umbral de daño leve en un 45% como se ilustra en

la Figura 6.33. Estos valores de deriva indican que los elementos no estructurales podrían sufrir daño entre leve y moderado.

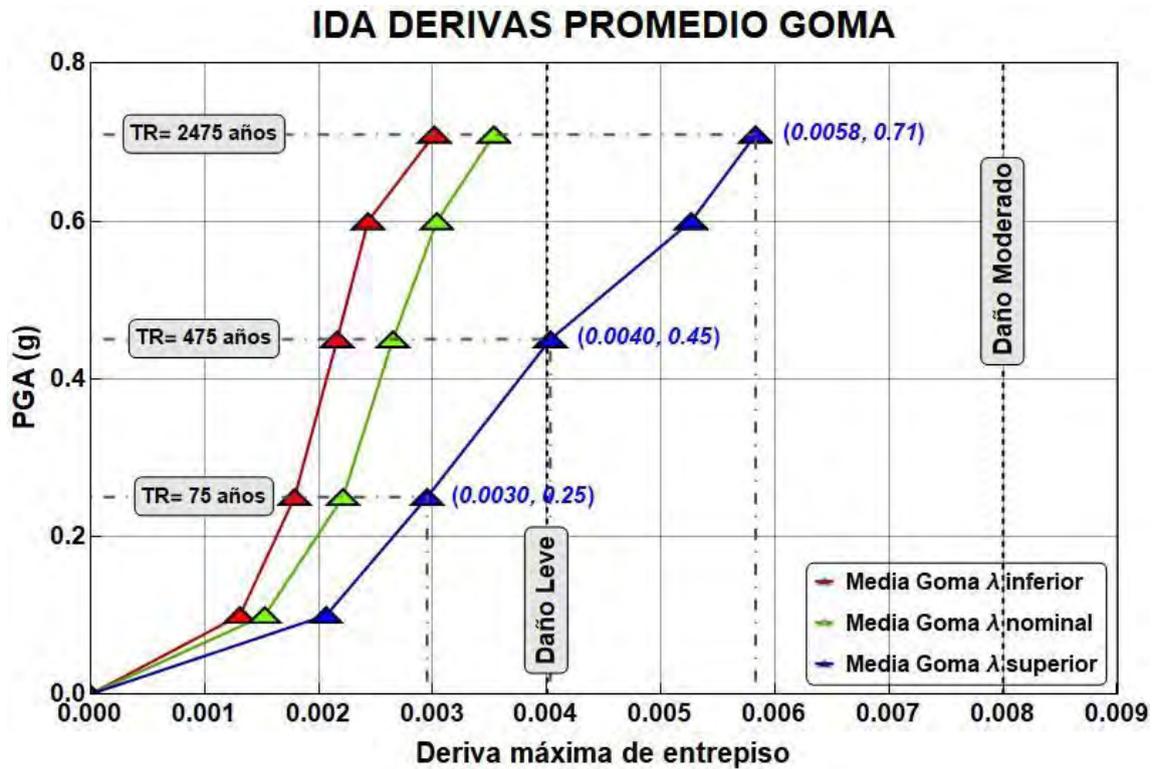


Figura 6.33 Curvas IDA de derivas promedio para goma- elementos no estructurales (λ inferior, λ nominal y λ máximo)

6.3.2.2.2 Calificación del desempeño de los componentes no estructurales susceptibles a desplazamientos en la estructura aislada con dispositivos de péndulo

La estructura aislada con péndulo que ha sido afectada por los valores máximos de lambda presenta derivas por encima de 4%, lo cual indica que los elementos no estructurales susceptibles a desplazamientos superan el umbral de daño leve en un 40% como se ilustra en

la Figura 6.34. Estos valores de deriva indican que los elementos no estructurales podrían sufrir daño entre leve y moderado.

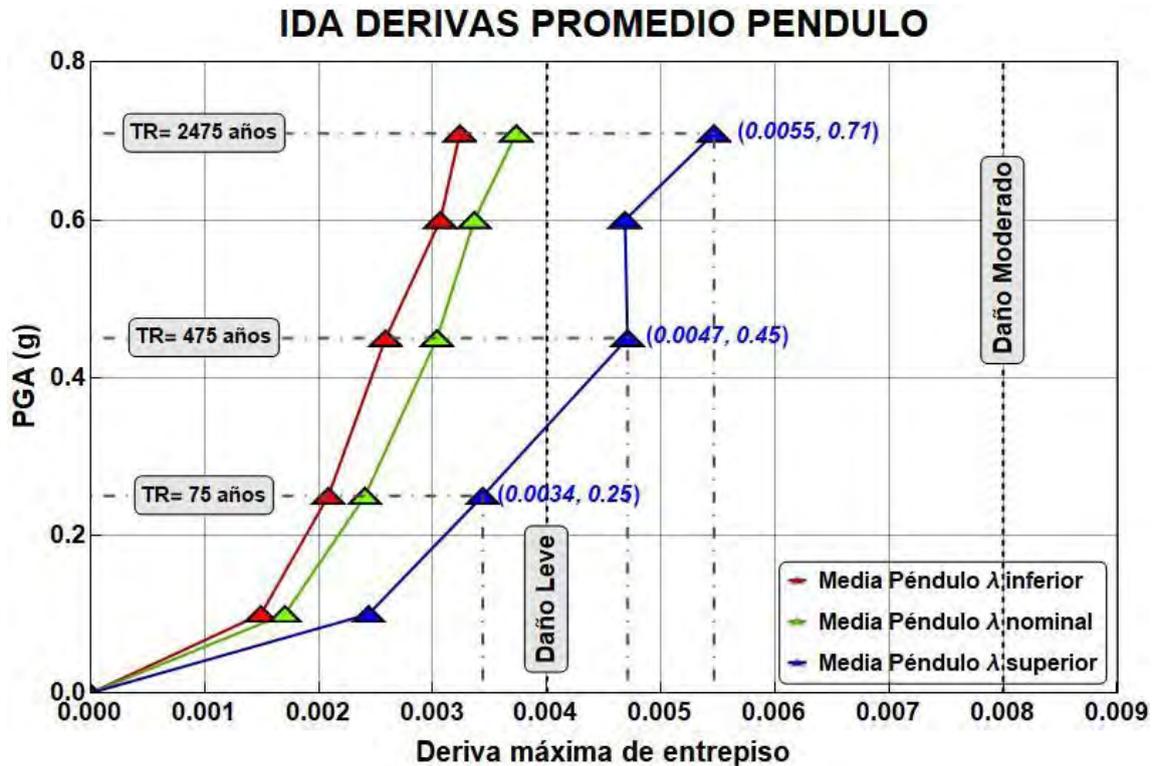


Figura 6.34 Curvas IDA de derivas promedio para péndulo- elementos no estructurales (λ inferior, λ nominal y λ máximo)

6.3.2.3 Comparación del desempeño de elementos no estructurales en la estructura aislada con dispositivos de goma y péndulo

Se compara el desempeño de los elementos no estructurales entre las propiedades superiores (λ máximo) del sistema con goma y con péndulo friccional.

En la Figura 6.35 se muestra que para la estructura aislada con dispositivos de goma la aceleración media en la dirección X es de 0.32g, mientras que para el caso de dispositivos de péndulo la máxima aceleración tiene un valor de 0.46g, siendo este mayor en 44%.

En la estructura con dispositivos de goma la aceleración media en la dirección Y es de 0.42g, mientras que para el caso de dispositivos de péndulo la máxima aceleración media tiene un valor de 0.5g, siendo este mayor en 19% como se muestra en la Figura 6.36. Esta diferencia en los resultados es considerable especialmente en la dirección X, ya que el valor medio en goma se encuentra en el límite de daño leve, mientras que para péndulo ya existe daño moderado. Se concluye que el desempeño con dispositivos de goma es mejor respecto al de

dispositivos de péndulo. Por lo tanto, la estructura con dispositivos de goma es mejor para controlar las aceleraciones de piso.

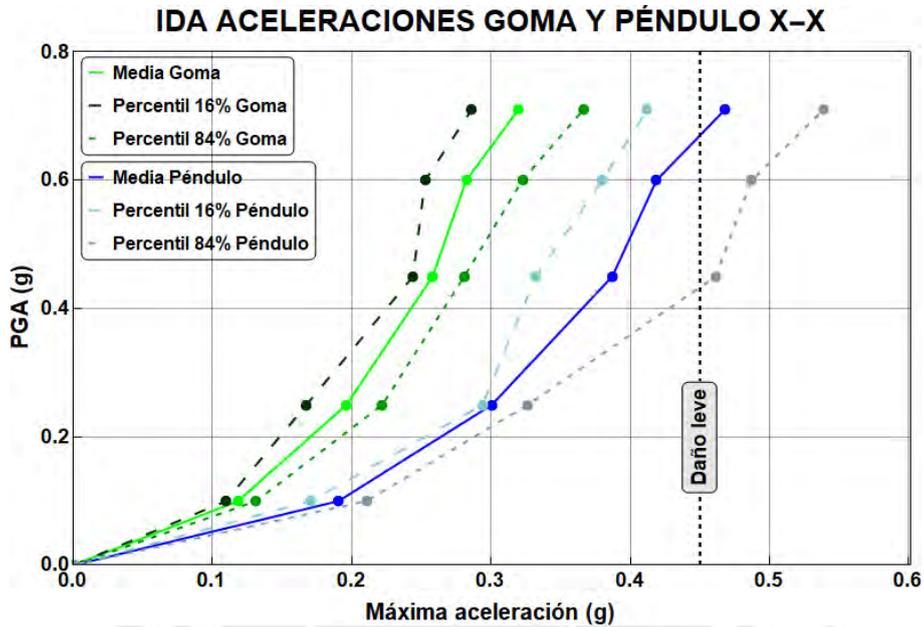


Figura 6.35 Comparación entre curvas IDA para aceleraciones medias, percentil 16% y percentil 84% para dispositivos de goma y péndulo (λ máximo dirección X)

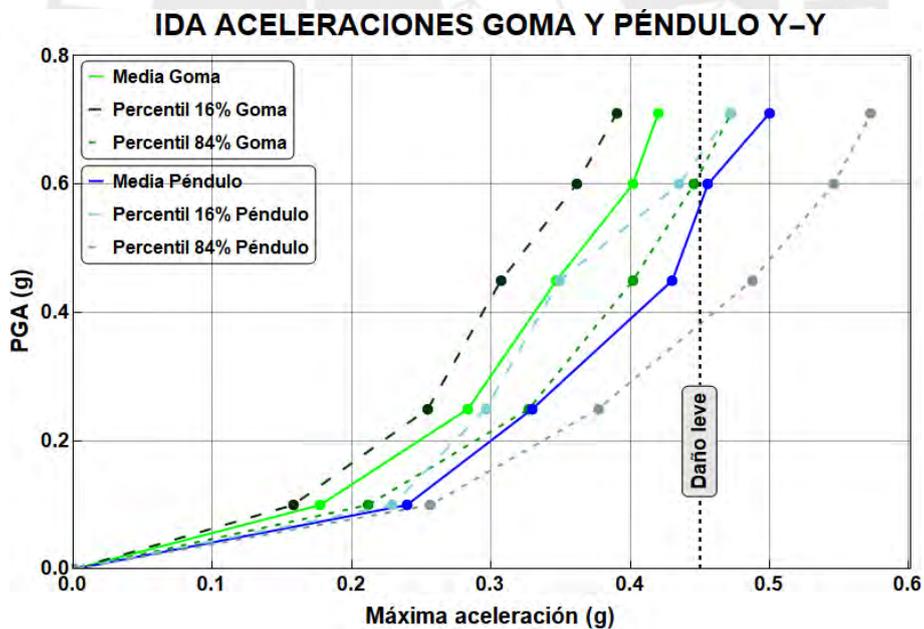


Figura 6.36 Comparación entre curvas IDA para aceleraciones medias, percentil 16% y percentil 84% para dispositivos de goma y péndulo (λ máximo dirección Y)

CAPITULO 7. CONCLUSIONES

- El amortiguamiento inherente de la superestructura (5%) en el análisis tiempo historia no lineal se pudo representar mediante dispositivos de fluido viscoso dispuestos en la superestructura con el fin de evitar un incremento artificial en el proceso de disipación de energía propio del sistema de aislamiento.
- Los resultados muestran que, con dispositivos de goma y péndulos friccionales, para intensidades mayores a 0.45g, se supera la deriva de 4.2‰, correspondiente al estado de daño moderado en elementos estructurales según HAZUS. Para un PGA de 0.71g (sismo con periodo de retorno de 2500 años), las derivas máximas promedio con dispositivos de goma y péndulos friccionales son de 5.8‰ y 5.5‰, respectivamente.
- En cada uno de los niveles de intensidad empleados los valores de deriva obtenidos para aislamiento con goma y péndulo fueron similares.
- Para los distintos niveles de intensidad el desempeño estructural alcanzado con ambos tipos de dispositivos es similar. Las rotaciones inelásticas máximas promedio de columnas y vigas para 0.71g de PGA resultan ser una fracción del límite de Ocupación Inmediata (OI): 0.55 y 0.54 para goma, y 0.40 y 0.52 para péndulos friccionales.
- Para una intensidad de 0.71g las aceleraciones máximas promedio de piso con dispositivos de goma y péndulos friccionales son de 0.40g y 0.50g, respectivamente. Según HAZUS el umbral de daño leve en elementos no estructurales sensibles a aceleraciones es de 0.45g. Asimismo, en ambos casos existiría daño moderado en los elementos no estructurales sensibles a desplazamientos, ya que se sobrepasa el límite de daño leve de 4.0‰ según HAZUS.
- Se concluye que el edificio aislado con dispositivos de goma presento una mejor protección de los elementos no estructurales susceptibles a aceleraciones.
- Para intensidades mayores a 0.45g la relación de daño-deriva de HAZUS indicaría que con ambos sistemas de aislamiento el daño estaría entre leve y moderado. Sin

embargo, las rotaciones inelásticas en los elementos estructurales muestran que tendrían el estado de Ocupación Inmediata.

- La calificación del daño usando la relación deriva-daño de HAZUS es contradictoria a los resultados observados en las deformaciones en las rotulas plásticas obtenidas en vigas y columnas. Esta discrepancia se debe a que la información proporcionada por HAZUS corresponde a edificios de base fija diseñados con factores de reducción altos ($R=8$ para pórticos); en cambio los edificios aislados se diseñan con valores de R reducidos ($R=2$ para el edificio aislado evaluado).



CAPITULO 8. BIBLIOGRAFÍA

- Aguiar Falconi, R., Almazan, J. L., Dechent, P., & Suarez, V. (2008). *Aisladores de base Elastómericos y FPS*. Ecuador: CEINCI ESPE.
- American Society of Civil Engineers. (2016). *ASCE 7: Minimum Design Loads for Buildings and* . United States of America: ASCE standard.
- Anajafi, H., Medina, R. A., & Santini-Bell, E. (2020). *Effects of the improper modeling of viscous damping on the first-mode and higher-mode dominated responses of base-isolated buildings*. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 49(1), 51-73.
- Computers and Structures, Inc. (2006). *PERFORM-3D: Nonlinear Analysis and Performance Assessment for 3D Structures (Version 4, User Guide)*. Computers and Structures, Inc.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2000). *FEMA 356: Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. Washington, DC, USA.
- Filiatrault, A., and Sullivan, T. J. (2014). *Performance-based seismic design of nonstructural building components: The next frontier of earthquake engineering*. *Earthquake Eng. Eng. Vib.*, 13(S1), 17–46..
- Gordon P., W., & Keri L, R. (2012). *A Review of Seismic Isolation for Buildings: Historical Development and Research Needs*. *Buildings*, 300-325.
- M. Kelly, J., & Naeim, F. (1999). *Design of Seismic Isolated Structures from theory to practice*. United States of America: John Wiley & Sons, INC.
- McVitty, W., & Constantinou, M. (2015). *Property Modification Factors for seismic Isolators: Design Guidance for Buildings*. New York: MCEER.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2019). *NTE E.031: Aislamiento Sísmico*. Lima, Perú:Reglamento nacional de edificaciones
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2006). *NTE E.020: Cargas*. Lima, Perú:Reglamento nacional de edificaciones

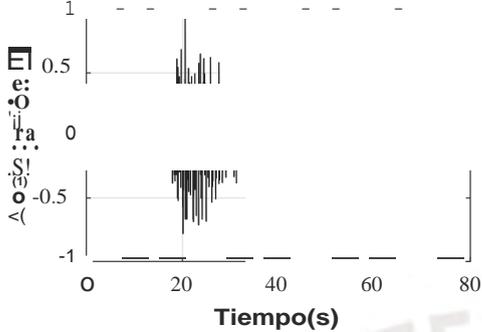
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2009). *NTE E.060: Concreto Armado*. Lima, Perú:Reglamento nacional de edificaciones
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2018). *NTE E.030: Diseño sismorresistente*. Lima, Perú:Reglamento nacional de edificaciones
- Muñoz Peláez, G. (2004). *Apuntes del curso de ingeniería antisísmica 1*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Fondo Editorial.
- Nagarajaiah, S., & Xiaohong, S. (2000). Response of base-isolated usc hospital building in northridge earthquake. *JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING*, 1177-1186.
- Pant, D. R., & Wijeyewickrema, A. C. (2012). *On modeling viscous damping in nonlinear dynamic analysis of base-isolated reinforced concrete buildings*. In 15th World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE). Lisboa.
- Perotti, F., Domaneschi, M., & De Grandis, S. (2013). *The numerical computation of seismic fragility of base-isolated Nuclear Power Plants buildings*. *Nuclear Engineering and Design*, 262, 189–200.
- Rivera, G. (2015). *Determinación de parámetros espectrales de registros sísmicos chilenos en función de propiedades características del suelo*. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- SEAOC. (2000). *Vision 2000: Performance-Based Seismic Engineering of Buildings (Vols. I & II: Conceptual Framework)*. Structural Engineers Association of California. Sacramento, CA, USA.
- S.J, P., & G.R, R. (2012). State Of Art Review - Base Isolation Systems For. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 438-453.
- Skinner R., R. W. (1992). *An Introduction to Seismic Isolation*. John Wiley y Sons.
- Symans, M. D. (2009). *Seismic protective systems: seismic isolation*. Instructional Material. 451.

- Tothong, P., & Luco, N. (2007). *Probabilistic seismic demand analysis using advanced ground motion intensity measures*. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36(13), 1837–1860.
- Vamvatsikos, D., & Cornell, C. A. (2002). Incremental dynamic analysis. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 31(3), 491-514.
- Villagomez Molero, D. (2015). *Lineamientos para el análisis y diseño de edificaciones sismicamente aisladas en el Perú*. Lima: PUCP.
- Yassin, M. H. M. (1994). *Nonlinear analysis of prestressed concrete structures under monotonic and cyclic loads*. University of California, Berkeley.
- Yucra Ayala, M. E. (2018). Evaluación del Desempeño Sísmico de Hospitales Aislados en el Perú.
- Vilca-Cordova, F., Quiroz, L. G., & Torres-Matos, M. (2017). *Performance assessment of lead rubber bearing system and triple friction pendulum system at Piura's hospital, in Peru*. In Proceedings of the 16th world conference on earthquake.
- Vulcano, A., Bertero, V. V., & Colotti, V. (1988). *Analytical modeling of R/C structural walls*. In *Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering*. TokyoKyoto.
- Zayas, V., Low, S. S., and Mahin, S. A. (1987). *The FPS earthquake resisting system, experimental report*. Report No. UCB/EERC-87/01, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, Calif., June.

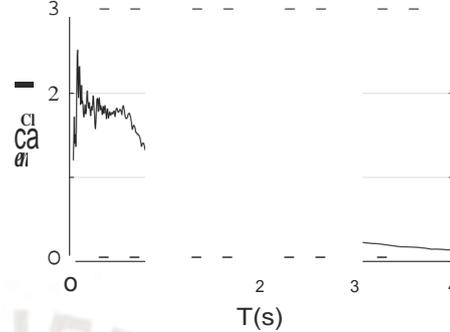


ANEXO 1: ESPECTROS DE RESPUESTA

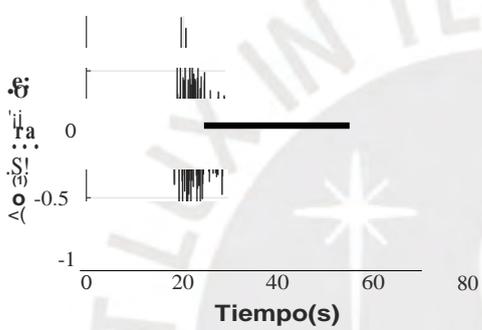
Acelerograma espectro compatible - 1966 EW



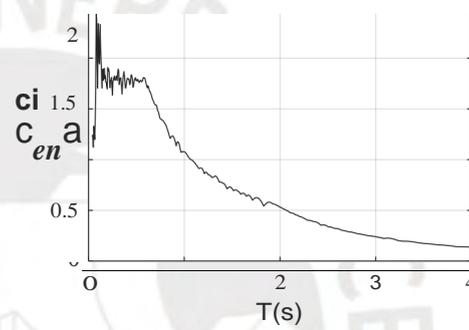
Espectro de respuesta -1966 EW



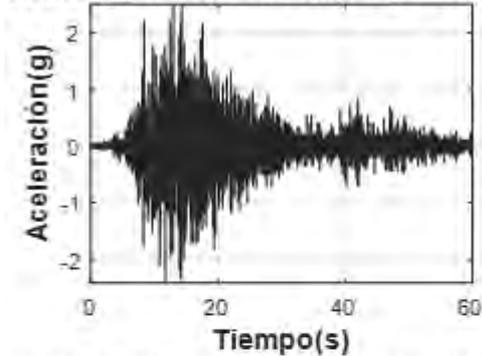
Acelerograma espectro compatible -1966 NS



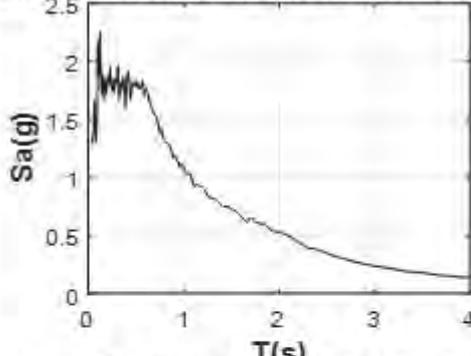
Espectro de respuesta -1966 NS



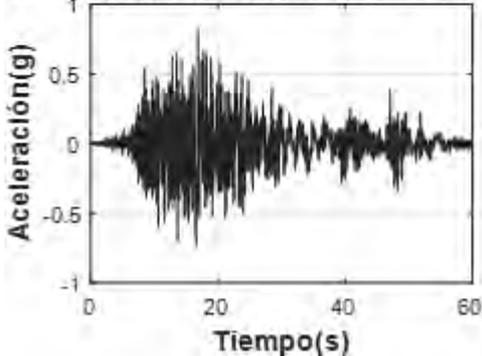
Acelerograma espectro compatible - 1970 EW



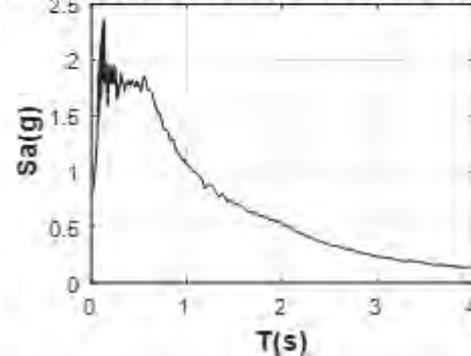
Espectro de respuesta - 1970 EW



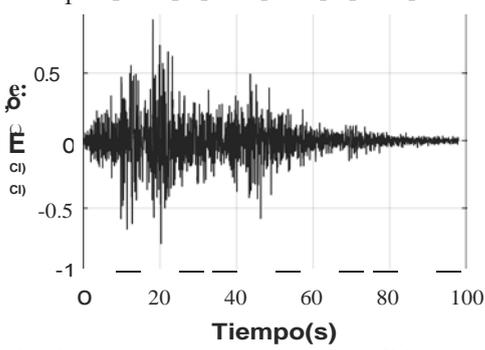
Acelerograma espectro compatible - 1970 NS



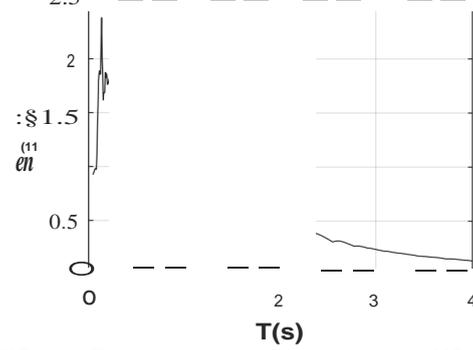
Espectro de respuesta - 1970 NS



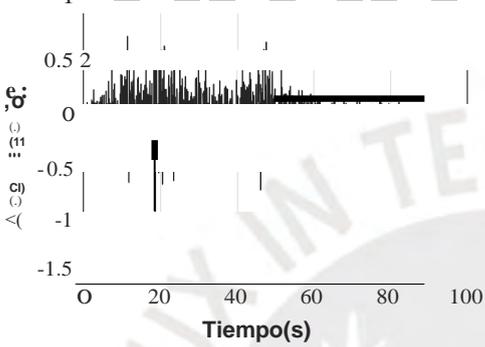
Acelerograma espectro compatible -1974 EW



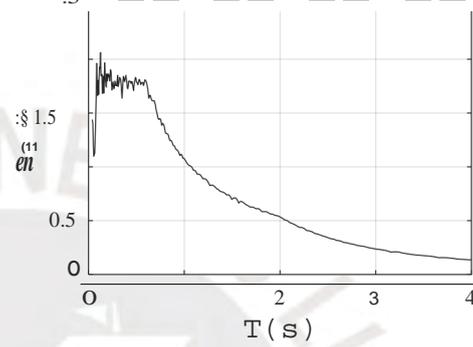
Espectro de respuesta -1974 EW



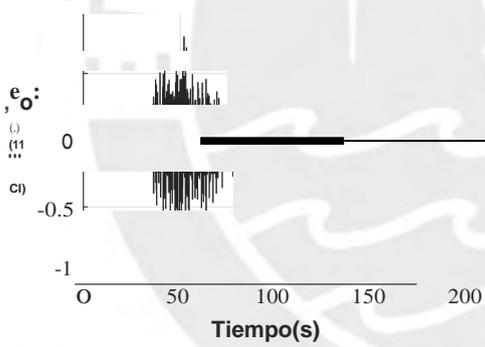
Acelerograma espectro compatible -1974 NS



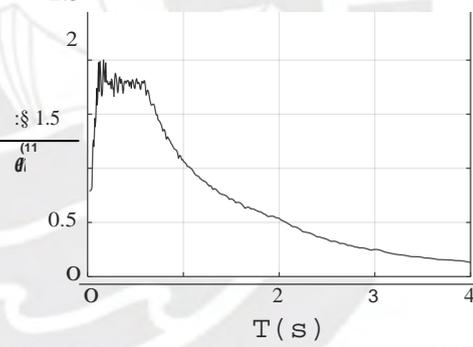
Espectro de respuesta -1974 NS



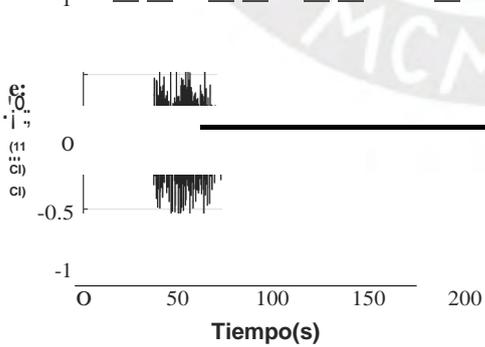
Acelerograma espectro compatible -2001 EW



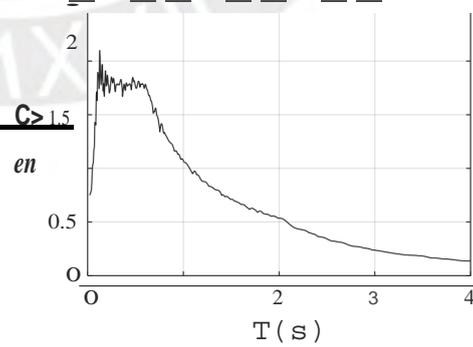
Espectro de respuesta -2001 EW



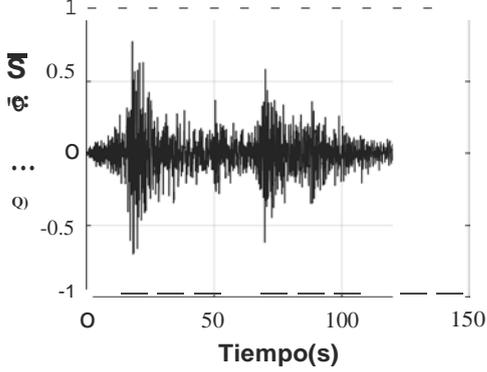
Acelerograma espectro compatible -2001 NS



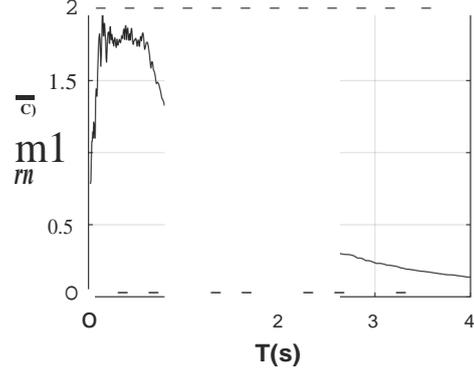
Espectro de respuesta -2001 NS



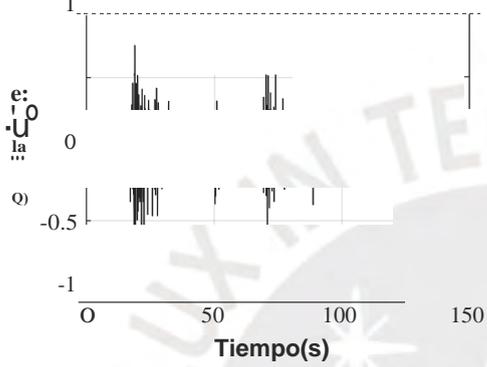
Acelerograma espectro compatible - 2007 EW



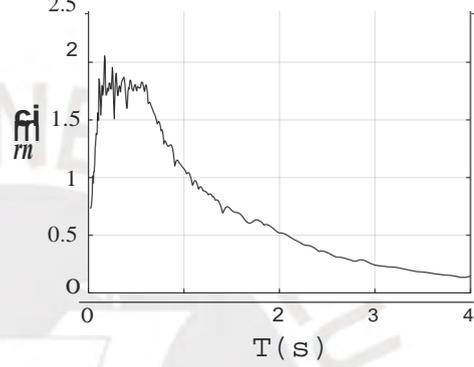
Espectro de respuesta - 2007 EW



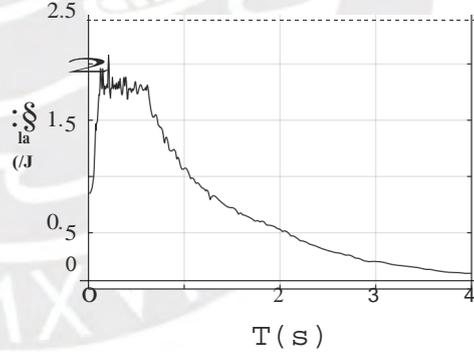
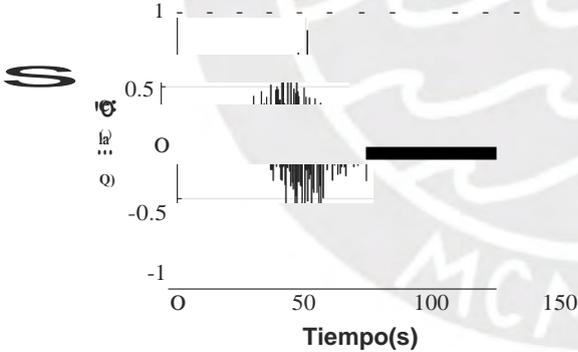
Acelerograma espectro compatible - 2007 NS



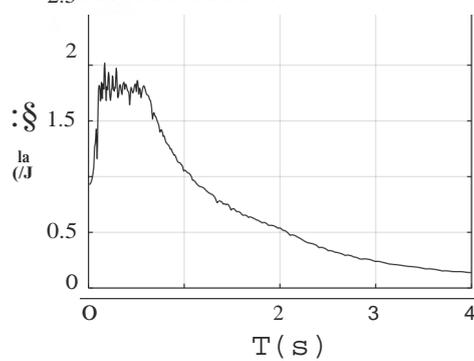
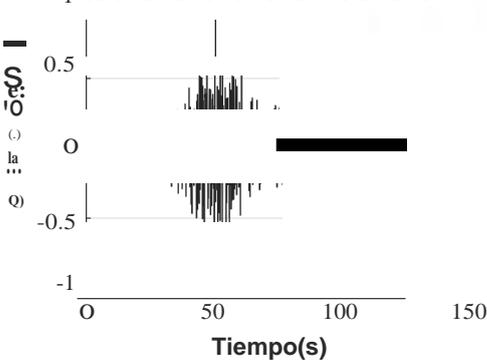
Espectro de respuesta - 2007 NS

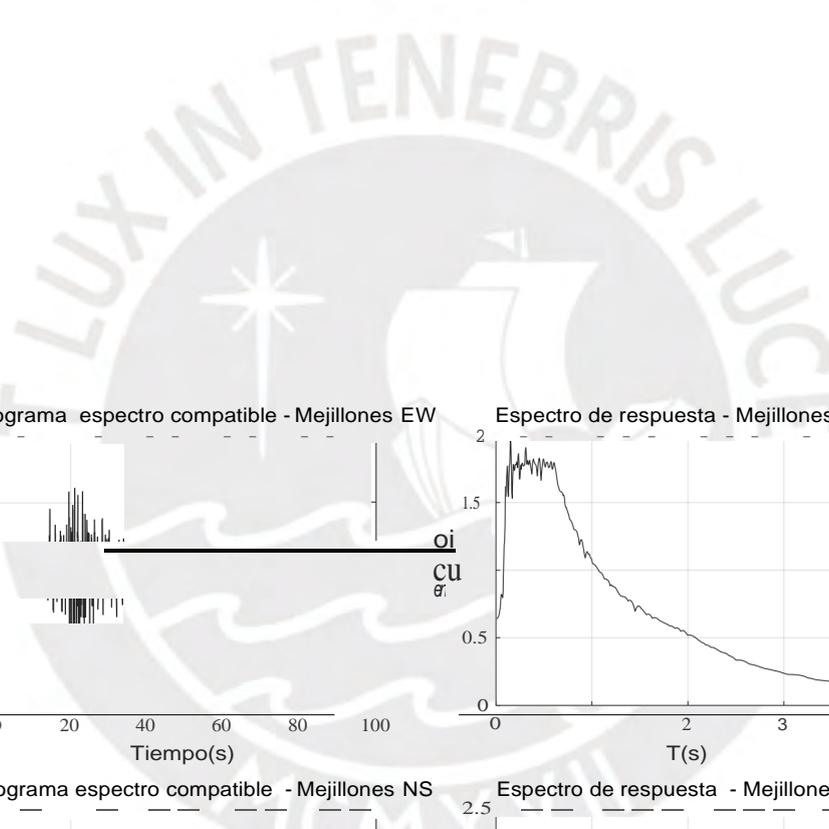


Acelerograma espectro compatible - 2011 EW Espectro de respuesta - 2011 EW

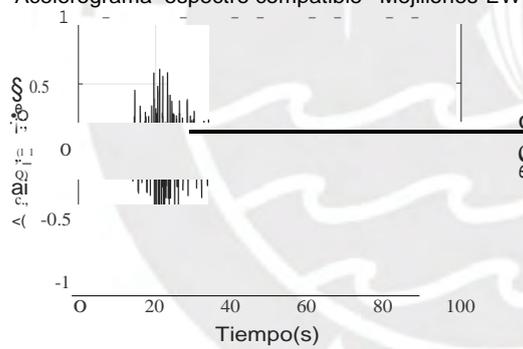


Acelerograma espectro compatible - 2011 NS Espectro de respuesta - 2011 NS

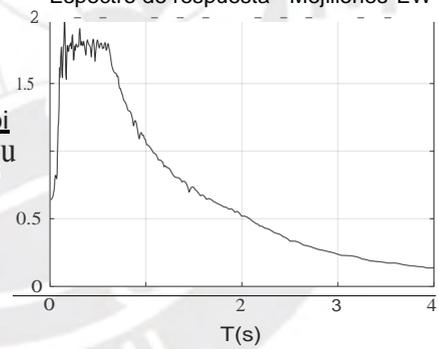




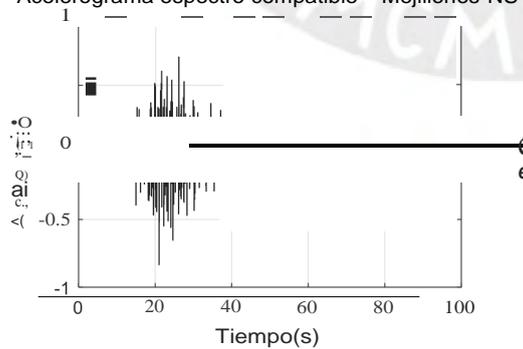
Acelerograma espectro compatible - Mejillones EW



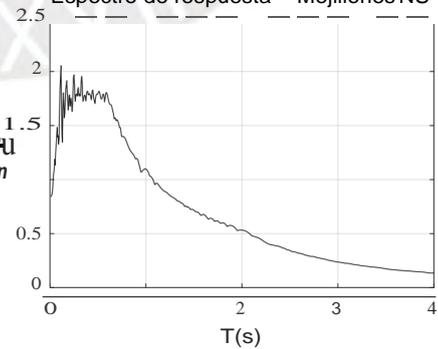
Espectro de respuesta - Mejillones EW



Acelerograma espectro compatible - Mejillones NS

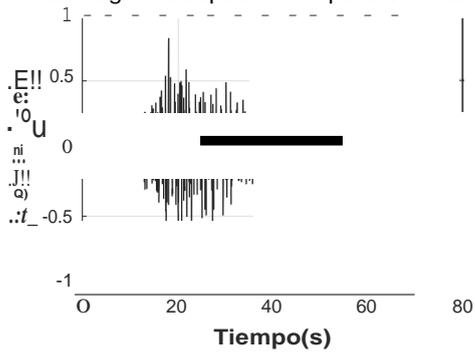


Espectro de respuesta - Mejillones NS

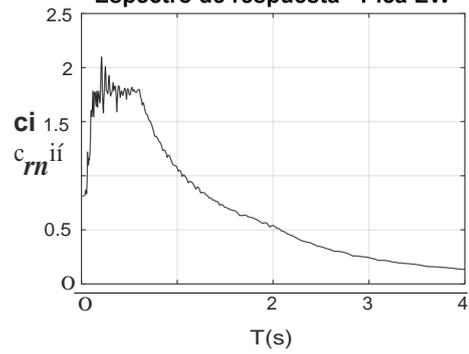


en

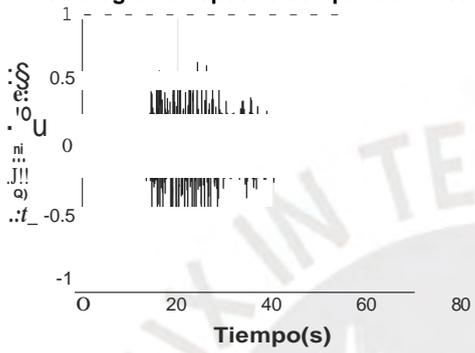
Acelerograma espectro compatible - Pica EW



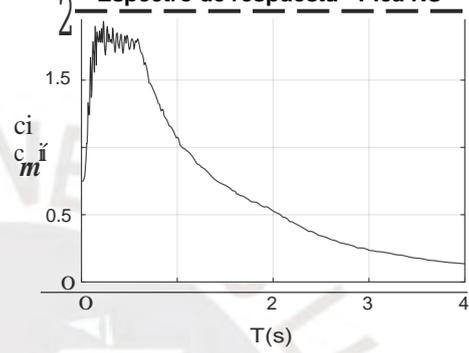
Espectro de respuesta - Pica EW



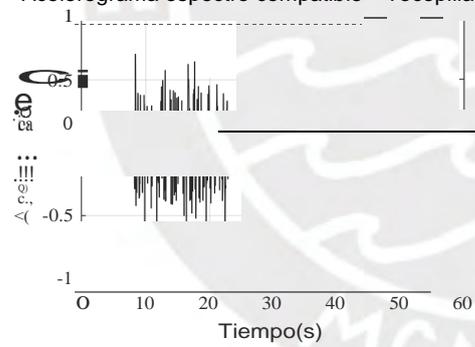
Acelerograma espectro compatible - Pica NS



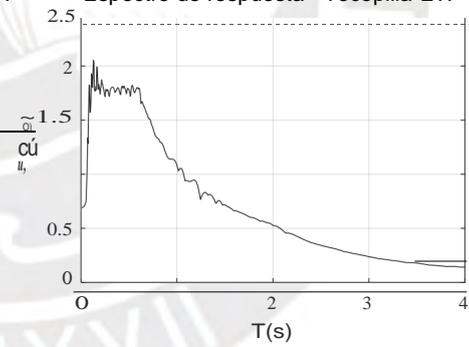
Espectro de respuesta - Pica NS



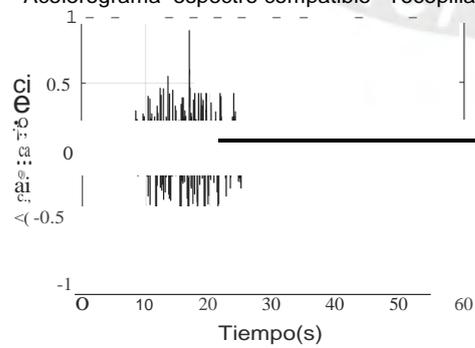
Acelerograma espectro compatible - Tocopilla EW



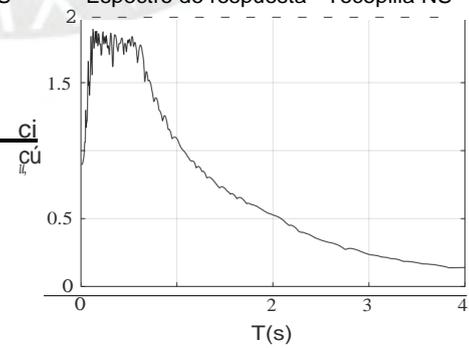
Espectro de respuesta - Tocopilla EW

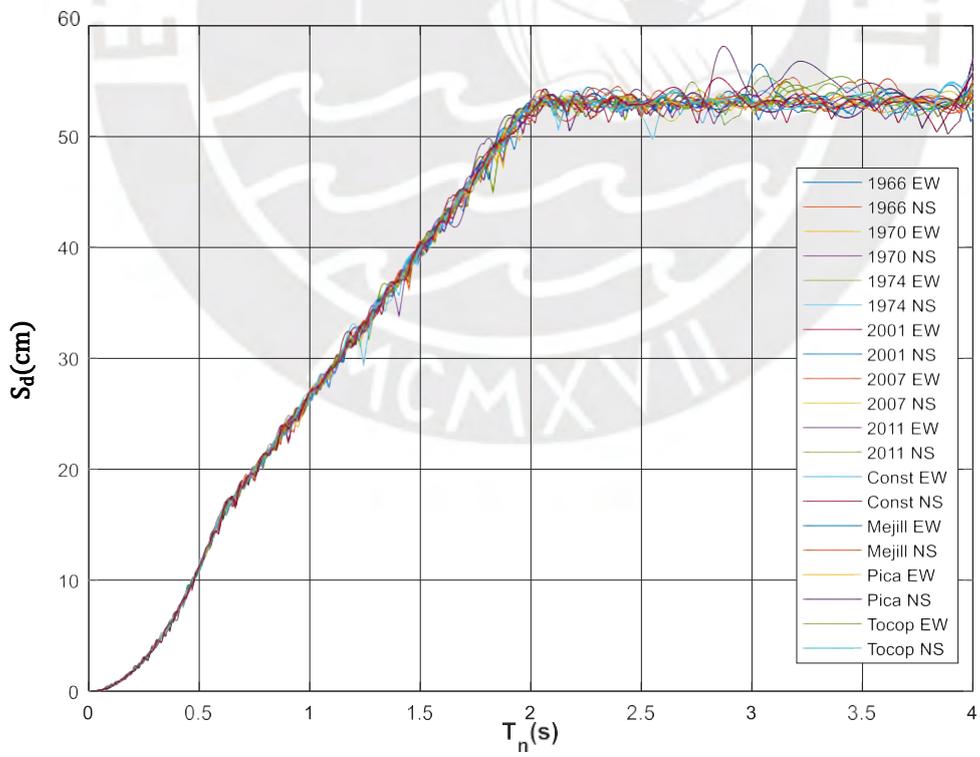
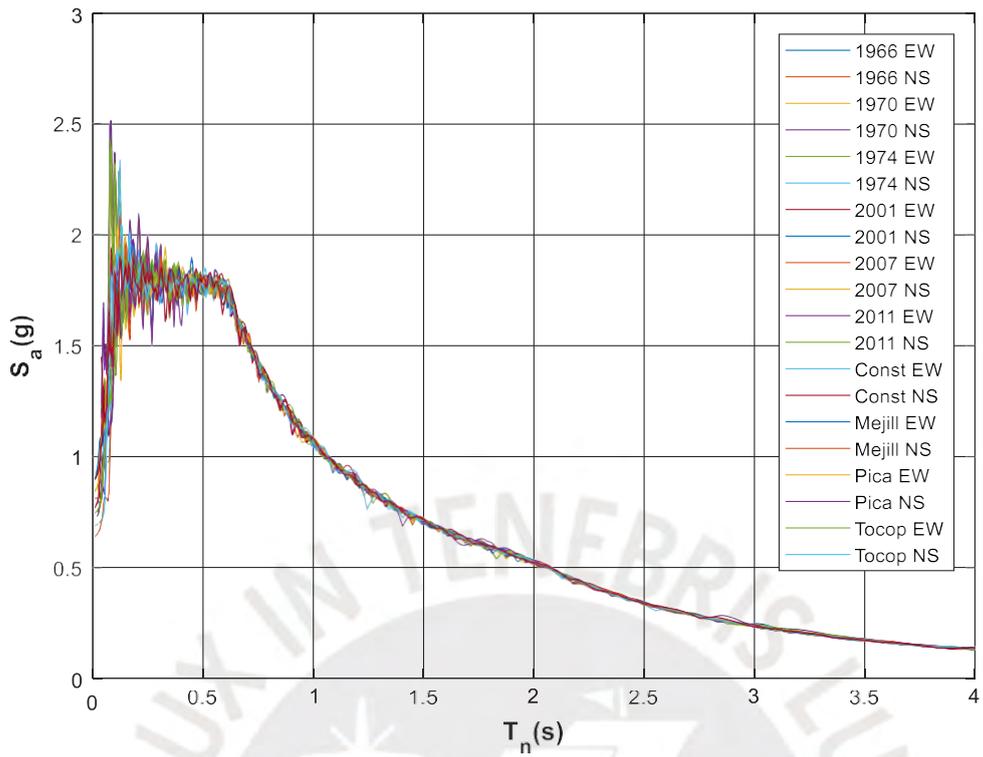


Acelerograma espectro compatible - Tocopilla NS



Espectro de respuesta - Tocopilla NS





ANEXO 2: Diseño de un dispositivo de goma con núcleo de plomo

Se evalúa un dispositivo de goma con núcleo de plomo que se encuentra en una de las esquinas del edificio. Para diseñar el dispositivo se sigue el procedimiento descrito en el Anexo 2:

Primero se calcula el diámetro mínimo requerido del núcleo con:

$$dL_{\min} = \sqrt{\frac{4n\Psi Q}{\pi(n-1)f_y L}}$$

Segundo, se calcula el diámetro del núcleo y la rigidez del dispositivo y se calcula el diámetro del núcleo.

$$Q_i = \frac{1}{2} \pi \beta_e k_e D_d$$

Tercero, se calcula el diámetro del aislador y el espesor total de la goma.

$$A_b = \frac{P}{f_c} \quad T_r = \frac{GA_b}{kr}$$

Cuarto, se calcula el espesor de las capas de goma

$$A_r = \frac{db^2}{4} (\delta - \sin \delta), \quad \delta = 2 \cos^{-1} \left(\frac{D_d}{db} \right)$$

El factor de forma S para satisfacer los límites de la deformación por compresión γ_c con $\gamma_c = 2$

$$S = \frac{3P \pm \sqrt{9P^2 - 32(\gamma_c A_r G)^2 k'}}{8\gamma_c A_r G k'} \quad \text{si } S < 15$$

$$S = \frac{\gamma_c A_r K}{12P} \pm \sqrt{\left(\frac{\gamma_c A_r K}{12P} \right)^2 - \frac{K}{8GK'}} \quad \text{si } S > 15$$

$$S > \frac{P}{1.66GA_b}$$

El máximo espesor de las capas de goma es:

$$t_i = \frac{d^2 - dL^2}{4dS}$$

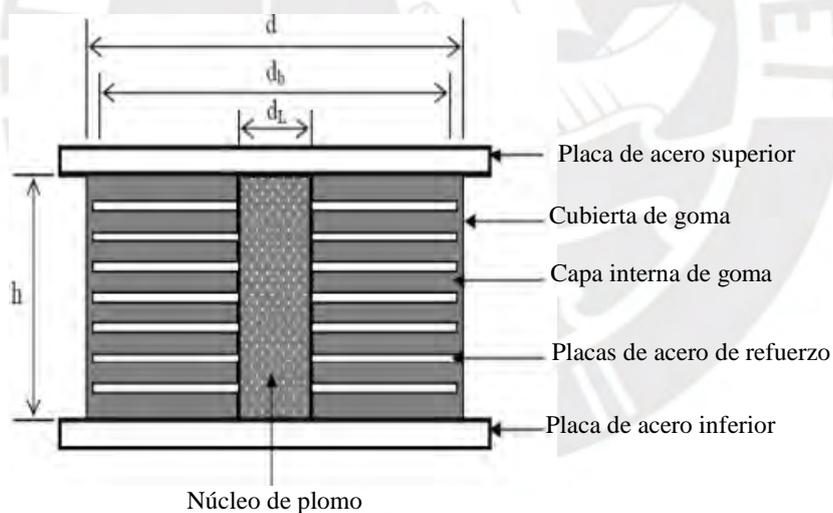
Los datos de entrada se presentan a continuación

Descripción	n	Ψ	$f_y L$	Qd	Te	ξ	Dd	Keff	f_c
Valor	10	1	9	50721.62	3.9	0.16	390	1177.2	11
Unidades	-	-	Mpa	N	s	-	mm	N/mm	Mpa

Descripción	Esfuerzo de fluencia del núcleo (fyL)	Modulo de corte de la goma (Gr)	Modulo de compresibilidad de la goma (Kr)	Constante para la goma (K')
Valor	9	0.62	2000	0.73
Unidades	Mpa	Mpa	Mpa	-

Las características del dispositivo se muestran a continuación.

Propiedades del aislador	Valor	Unidades
Diametro externo del aislador (d)	700	mm
Diametro del aislador (db)	688	mm
Diametro del nucleo (dL)	130	mm
Espesor total de goma (Tr)	200	mm
Espesor de las capas de goma (ti)	4.7	mm
Numero de capas de goma	43	-
Rigidez efectiva (Keff)	1360	N/m
Amortiguamiento efectivo (Beff)	0.27	-



Con estas características se busca un dispositivo en el mercado. Se encuentra un dispositivo Bridgstone con la denominación **LH070G4A**:

Verificación de la estabilidad de un dispositivo de goma de esquina

La estabilidad del dispositivo se verifica por capacidad axial y por deformación por corte según lo indicado en la norma E.031 Anexo 2.

Para verificar la capacidad axial previamente, se calcula el módulo elástico E_o y el módulo de compresión E_c

$$E_o = fG \quad E_c = E_o(1 + 2kS^2)$$

$$AR = AA \cdot 2 \frac{[De^2 \cdot \sin^{-1}(\frac{\sqrt{De^2 - De^2}}{De}) - DTM \cdot \sqrt{De^2 - DTM^2}]}{\pi De^2}$$

Para asegurar la capacidad de pandeo el factor de seguridad solo para carga axial debe ser mayor a 3, y para carga axial ultima a DTM debe ser mayor a 1.

$$P_{\text{crítico}} = \frac{\pi}{\sqrt{8G}} G \cdot S \cdot \frac{De}{N \cdot tr} AR \quad FS = \frac{P_{\text{crit}}}{P}$$

La deformación por corte se calcula por el efecto de tres deformaciones: por deformación lateral (a), por compresión (b) y por deformación angular (c).

$$\gamma_D = \frac{DTM}{Hr} \quad (a), \quad \gamma_C = \frac{6 \cdot P \cdot S}{E_c \cdot Ar} \quad (b), \quad \gamma_\Theta = \frac{0.375 \cdot De^2 \cdot \Theta}{tr \cdot Hr} \quad (c)$$

La deformación por corte total se calcula como la suma de las tres deformaciones.

$$\gamma_D + \gamma_C + 0,5\gamma_\Theta < 6$$

La Tabla muestra los datos de entrada

Descripcion	f	Módulo de corte de la goma (G)	Factor de forma (S)	Constante empirica (k)	Desplazamiento total maximo (DTM)	Área del aislador (AA)	Diámetro del aislador (De)
Valor	4	0.62	37.2	0.73	457	384845	688
Unidades	-	Mpa	-	-	mm	mm ²	mm

Verificación por capacidad axial

Deformación por corte

Descripcion	Deformación lateral (γ_D)	Deformación por compresión (γ_C)	Deformación angular (γ_Θ)	Deformacion total $\gamma_D + \gamma_C + \gamma_\Theta$	Factor de seguridad (F_s) > 1
Valor	2.29	2.43	1.05	0.73	1.15

Comprobación mediante análisis estático

Al igual que se verifico con el análisis dinámico, también se realizó la verificación con el análisis estático.

Para determinar el DTM se utiliza el caso de propiedades inferiores del sistema de aislamiento, este se calcula con los siguientes datos: $KM= 2008 \text{ ton/m}$, $\beta M= 0.16$, $TM=3.9 \text{ s}$, $BM= 1.38$, $SM1= 0.14g$, $DM= 0.382 \text{ m}$, $N=41$

$$\sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2) = 52015$$

$$r_a = \frac{1}{12} \sqrt{b^2 + d^2} = 17.2$$

$$P_t = \frac{1}{r_a} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2)}{N}} = 2.07$$

$y= 25.9 \text{ m}$, $\text{excc natural}= 0.9 \text{ m}$, $\text{excc accidental}= 2.81 \text{ m}$, $e= e_{\text{nat}} + e_{\text{acc}} = 2.81 \text{ m}$

$$DTM = DM \left[1 + \left(\frac{y}{P_t} \right) \left(\frac{12e}{b+d} \right) \right] = 0.41 \text{ m}$$

$$DTM > 1.15 DM, \quad DTM = 440 \text{ mm}$$

La deformación por corte debido a deformación lateral con $H_r=200 \text{ mm}$ es:

$$\gamma D = \frac{DTM}{H_r} = 2.20$$

Por lo tanto, se concluye que el dispositivo colocado es adecuado.

