

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

**PROCEDIMIENTOS DE ANÁLISIS Y DISEÑO PARA EDIFICIOS
SÍSMICAMENTE AISLADOS EN EL PERÚ**

Tesis para optar el Título de **INGENIERO CIVIL**, que presenta el bachiller:

Juan Héctor Chumpitaz Martinez

ASESOR: Ing. Juan Alejandro Muñoz Pelaez

Lima, noviembre de 2017





A Héctor y Blanquita, mis padres, y toda mi familia, que siempre depositaron su confianza en mí para alcanzar este objetivo.

RESUMEN

El aislamiento de base es uno de los sistemas de protección sísmica con mayor efectividad. Esta técnica consiste en insertar una interfaz flexible compuesta por aisladores en la base de un edificio. La flexibilidad de los dispositivos logra que el periodo fundamental de la estructura se incremente, de tal manera que las solicitaciones sísmicas que actúan sobre la estructura se reducen considerablemente.

En Perú existen estructuras con aislamiento sísmico, pero no se cuenta con un código peruano de diseño de estructuras aisladas; esto obliga al proyectista a realizar el diseño de este tipo de estructuras haciendo referencia a normas extranjeras.

El presente trabajo propone una serie de procedimientos o metodología para el análisis y diseño de estructuras aisladas, basada en conceptos teóricos y casos prácticos. Esta metodología utiliza como documentos de referencia algunos códigos internacionales de diseño y la Norma Peruana de Diseño Sismorresistente E.030.

Se usó como ejemplo un edificio aporticado de concreto armado de cinco pisos, con un sistema de aislamiento en su base. Se prediseñó el sistema de aislamiento empleando métodos estáticos sobre un sólido rígido y se hizo un análisis espectral de todo el edificio como verificación previa. El diseño final se desarrolló empleando procedimientos de análisis Tiempo-Historia No Lineal.

El diseño del sistema de aislamiento del edificio se desarrolló tomando como información los resultados del análisis tanto para el sismo de diseño (SD) como el sismo máximo posible (SMP) considerados para estructuras peruanas. Finalmente se realizó un prediseño básico de los aisladores, considerando que son del tipo HDRB, y también se diseñaron algunos elementos estructurales utilizando la Norma E.060 Concreto Armado.

Se concluyó que un edificio aislado tiene un desempeño superior al que tendría un edificio con base fija. Sin embargo, para lograr aislar un edificio se deben cumplir algunos requisitos mínimos. Por otro lado, los procedimientos de análisis y diseño presentados pueden ser ajustados de acuerdo a la aparición de nuevos códigos e investigaciones, sobre todo algunos parámetros de diseño que deberían ser adaptados a la realidad peruana.

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE INGENIERO CIVIL

Título : "Procedimientos de análisis y diseño para edificios sísmicamente aislados en el Perú"
 Área : Estructuras – Investigación
 Asesor : Ing. Alejandro Muñoz Peláez
 Alumno : JUAN HÉCTOR CHUMPITAZ MARTINEZ
 Código : 2008.2287.412
 Tema N° : # 42.1
 Fecha : Lima, 14 de febrero de 2017



ANTECEDENTES

El aislamiento de base constituye una excelente alternativa para mejorar sustancialmente el desempeño sísmico de los edificios. Esta tecnología se emplea en el mundo desde 1969, sin embargo en el Perú recién se viene utilizando desde el 2012 en contados edificios. A la fecha en el país no se cuenta con procedimientos establecidos ni normas que posibiliten el diseño racional y sistematizado de estas edificaciones.

OBJETIVOS Y ALCANCES

Estudiar la dinámica y los procedimientos de análisis para estructuras aisladas, así como las normas extranjeras para el diseño de las edificaciones con aislamiento sísmico.

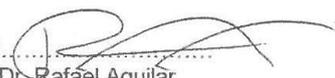
Proponer una metodología para el análisis y diseño de edificios aislados en el Perú. Esta se presentará empleando un ejemplo sencillo de aplicación.

La metodología que se desarrolle dará especial énfasis a los aisladores elastoméricos, pero su esquema general se podrá aplicar a cualquier dispositivo.

PLAN DE TRABAJO

El trabajo se iniciará revisando la dinámica de las estructuras aisladas y los tipos de dispositivos existentes en el mercado nacional. Luego se presentarán las técnicas de análisis y modelamiento de edificios aislados. Posteriormente se generarán algunas alternativas de procedimientos de diseño que se revisarán con casos prácticos. Finalmente se propondrá una metodología general con la cual se desarrollará un ejemplo de aplicación.

Máximo: 100 páginas

VB° 
 Dr. Rafael Aguilar
 Director de Investigación



CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	ix
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xii
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivos y Alcance.....	1
1.3. Organización del Documento.....	2
Capítulo 2. AISLAMIENTO SÍSMICO DE EDIFICIOS.....	4
2.1 Edificios aislados en el mundo.....	4
2.2 Fundamentos del aislamiento sísmico	5
2.2.1 Estructura Aislada.....	5
2.2.2 Aislamiento sísmico y balance de energía.....	8
2.2.3 Comportamiento dinámico de estructuras aisladas	8
2.2.4 Equivalente lineal elástico.....	11
2.3 Desempeño de un edificio aislado	13
Capítulo 3. DISPOSITIVOS DE AISLAMIENTO SÍSMICO	15
3.1 Características generales de los dispositivos de aislamiento	15
3.1.1 Capacidad de carga y rigidez vertical	15
3.1.2 Curva fuerza-desplazamiento lateral	15
3.1.3 Capacidad de Restauración lateral.....	16
3.1.4 Modelo bilineal y lineal equivalente	16
3.2 Principales Tipos de Dispositivos.....	18
3.2.1 Aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LDRB)	18
3.2.2 Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB)	20
3.2.3 Aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (HDRB).....	21
3.2.4 Deslizadores de fricción o aisladores deslizantes	24
3.2.5 Aisladores con sistema de péndulo friccional (FPS).....	25
Capítulo 4. ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS AISLADAS	28
4.1 Representación de las solicitaciones sísmicas	28
4.1.1 Registros de aceleración	28
4.1.2 Espectros de respuesta	28
4.1.3 Fuerzas equivalentes.....	29
4.2 Análisis preliminar de un edificio con base fija.....	29
4.3 Análisis por el método estático o de la fuerza equivalente.	32

4.3.1	Modelo de un grado de libertad	32
4.3.2	Análisis del sistema de aislamiento	32
4.3.3	Análisis de la superestructura.....	34
4.4	Introducción al Análisis dinámico: Modelo de 2 grados de libertad	35
4.4.1	Dinámica de una estructura de 2 grados de libertad	35
4.4.2	Análisis modal.....	36
4.5	Representación de los aisladores en un modelo estructural	39
4.6	Modelo elástico de un edificio aislado.....	40
4.6.1	Estructura.....	41
4.6.2	Sistema de aislamiento.....	41
4.7	Análisis elástico de edificios aislados	43
4.7.1	Análisis modal.....	43
4.7.2	Respuesta espectral	46
4.8	Análisis no lineal de edificios aislados	50
4.8.1	Modelo	51
4.8.2	Características de los Registros	52
4.8.3	Procedimientos de análisis	54
4.8.4	Respuesta inelástica en el tiempo	55
4.8.5	Tratamiento de resultados	59
4.9	Efecto P-delta en el sistema de aislamiento	61
Capítulo 5. NORMAS DE REFERENCIA PARA EL ANÁLISIS Y DISEÑO.....		63
5.1	Objetivos de desempeño	63
5.2	Requisitos generales de diseño	64
5.2.1	Niveles de Sismo	64
5.2.2	Requisitos para el sistema de aislamiento.....	64
5.2.3	Requisitos para el sistema estructural	66
5.2.4	Elementos que cruzan la interfaz de aislamiento	67
5.3	Solicitaciones sísmicas para estructuras aisladas	68
5.3.1	Espectro de diseño	68
5.3.2	Registros de aceleración	69
5.4	Selección del procedimiento de análisis estructural	70
5.4.1	Análisis Estático o Fuerzas Equivalentes	70
5.4.2	Análisis Espectral.....	70
5.4.3	Análisis Tiempo - Historia	70
5.5	Desplazamientos laterales y rigideces mínimas	71
5.5.1	Análisis estático o de la fuerza equivalente	71
5.5.2	Análisis dinámico	73

5.6	Límites para la distorsión o deriva de entrepiso.....	74
5.7	Fuerzas laterales mínimas	74
5.7.1	Análisis estático	74
5.7.2	Análisis dinámico	76
5.8	Ensayos de dispositivos.....	76
Capítulo 6. METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE EDIFICIOS AISLADOS		77
6.1	Requisitos mínimos para aislar un edificio.....	79
6.1.1	Esbeltez	79
6.1.2	Masa y periodo de vibración del edificio	79
6.2	Estructuración y Predimensionamiento del Edificio Aislado	80
6.2.1	Estructuración.....	80
6.2.2	Predimensionamiento de los elementos estructurales	81
6.3	Pre-diseño del Sistema de Aislamiento	84
6.3.1	Estimación inicial del periodo de vibración aislado.....	84
6.3.2	Rigidez y Amortiguamiento iniciales	84
6.3.3	Desplazamientos y Fuerzas de diseño iniciales	85
6.4	Diseño del sistema de aislamiento.....	85
6.4.1	Procedimiento para el Sismo de Diseño.....	86
6.4.2	Procedimiento para el Sismo Máximo Posible.....	98
6.5	Diseño de los dispositivos.....	106
6.6	Diseño de elementos estructurales.....	106
6.6.1	Combinaciones de carga para el Diseño en Concreto Armado.....	107
6.6.2	Requisitos de ductilidad para elementos de Concreto Armado	108
Capítulo 7.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		115
7.1	Conclusiones	115
7.1.1	De la teoría de análisis de edificios aislados	115
7.1.2	De la metodología de diseño presentada	116
7.1.3	Del diseño realizado	117
7.2	Recomendaciones	118
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....		120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Biblioteca de Ingeniería PUCP	5
Figura 2.2. Aislador elastomérico en la Biblioteca de Ingeniería – PUCP.....	5
Figura 2.3. Edificio con aislamiento en su base	6
Figura 2.4. Esquema del Sistema de aislamiento sin niveles de sótano.....	7
Figura 2.5. Esquema del Sistema de aislamiento con niveles de sótano	7
Figura 2.6. Interfaz de aislamiento en distintos planos	7
Figura 2.7. Deformación de una estructura con y sin aislamiento en su base	9
Figura 2.8. Efecto P-delta en las columnas que cruzan la interfaz de aislamiento	9
Figura 2.9. Relación V-D de un dispositivo ensayado en laboratorio.....	10
Figura 2.10. Reducción de la pseudo-aceleración en estructuras aisladas.	10
Figura 2.11. Espectro de desplazamientos típico para estructuras aisladas.	11
Figura 2.12. Energía disipada y rigidez efectiva de un dispositivo típico	12
Figura 2.13. Relación F_d vs D	12
Figura 3.1. Rigideces K_1 , K_2 y K_{eff} de un dispositivo típico	16
Figura 3.2. Modelo bilineal de la curva de histéresis.....	16
Figura 3.3. Esquema de un aislador LDRB	18
Figura 3.4. Curva de Histéresis de un LDRB	19
Figura 3.5. Aislador LDRB conectado a un amortiguador	20
Figura 3.6. Esquema de un aislador elastomérico con núcleo de plomo.	20
Figura 3.7. Curva de histéresis de un LRB.....	21
Figura 3.8. Aislador HDRB	22
Figura 3.9. Módulo de corte Vs Deformación angular del HDRB	22
Figura 3.10. Curva de histéresis de un HDRB	23
Figura 3.11. Curvas histeréticas de los LDRB, LRB y HDRB para un mismo desplazamiento	23
Figura 3.12. Deslizador de fricción	24
Figura 3.13. Esquema de los componentes del deslizador de fricción	24
Figura 3.14. Curva de histéresis de un deslizador de fricción	25
Figura 3.15. Esquema de un aislador FPS.....	25
Figura 3.16. Fuerzas sobre el cojinete al desplazarse una distancia horizontal “x”. 26	
Figura 3.17. Fuerza total actuante sobre el FPS.....	27
Figura 3.18. Esquema de un aislador friccional de péndulo doble.....	27
Figura 3.19. Esquema de un aislador friccional de péndulo triple.....	27
Figura 3.20. Diagrama de histéresis de un aislador de péndulo friccional triple	27

Figura 4.1. Planta y elevación típicas del edificio ejemplo	30
Figura 4.2. Vista tridimensional del modelo elástico del edificio ejemplo.....	31
Figura 4.3. Modelo de un edificio aislado y su equivalente de 1 GDL.....	32
Figura 4.4. Modelo de 2 GDL sobre la que actúa una aceleración basal <i>u_g</i>	36
Figura 4.5. Formas de vibración de la estructura de 2 GDL.....	37
Figura 4.6. Modelo del sistema de aislamiento cuando se cuenta con sótanos.	39
Figura 4.7. Modelo del sistema de aislamiento cuando no se cuenta con sótanos. 39	
Figura 4.8. Modelo de un aislador con puntos extremos i-j.....	40
Figura 4.9. Espectro de pseudo-aceleración reducido por amortiguamiento.	42
Figura 4.10. Interfaz bajo la plataforma superior y columnas del primer nivel	42
Figura 4.11. Primera y segunda forma (traslación del sistema de aislamiento)	43
Figura 4.12. Izquierda: tercera forma (rotación del sistema de aislamiento).....	44
Figura 4.13. Derecha: cuarta forma (deformación de la superestructura relativa al sistema de aislamiento).....	44
Figura 4.14. Periodos con base fija y aislada del edificio ejemplo	45
Figura 4.15. Espectro elástico de la Norma E.030 para $\xi=5\%$, empleado para los métodos a) y b)	47
Figura 4.16. Espectro elástico de la Norma E.030 reducido por amortiguamiento, empleado para el método c).....	47
Figura 4.17. Desplazamientos de piso del edificio aislado.....	48
Figura 4.18. Aceleraciones de piso por los tres métodos.....	49
Figura 4.19. Cortante de entrepiso de los 3 métodos	50
Figura 4.20. Señal de 1966 compatible con el espectro de la Norma E:030	53
Figura 4.21. Señal de 2010 compatible con el espectro de la Norma E.030	53
Figura 4.22. Espectros de pseudo aceleración superpuestos.....	54
Figura 4.23. Espectros de desplazamiento superpuestos.....	54
Figura 4.24. Historia de desplazamientos del sistema de aislamiento.....	56
Figura 4.25. Historia de aceleraciones del sistema de aislamiento.....	56
Figura 4.26. Historia de fuerza cortante del sistema de aislamiento.....	56
Figura 4.27. Historia de deriva del segundo entrepiso.	57
Figura 4.28. Máximos desplazamientos y drifts para el Sismo de 1966.	57
Figura 4.29. Máxima respuesta de cortante y aceleración para el Sismo de 1966 ..	57
Figura 4.30. Máximos desplazamientos y drifts para el Sismo de 2010	58
Figura 4.31. Máxima respuesta de cortante y aceleración para el Sismo de 2010 ..	58
Figura 4.32. Diagrama bilineal del aislador central	58
Figura 4.33. Diagrama bilineal de todo el sistema de aislamiento.	59

Figura 4.34. Momentos de segundo orden para aisladores elastoméricos y deslizadores de fricción	62
Figura 4.35. Momentos de segundo orden para aisladores de doble péndulo de fricción y péndulo de fricción simple.....	62
Figura 5.1. Aplicación de las ecuaciones 5.13 y 5.14	73
Figura 6.1. Etapas de la Metodología de diseño	77
Figura 6.2. Diagrama de flujo de la metodología de diseño de edificios aislados....	78
Figura 6.3. Concentración de columnas en caja de ascensor y escaleras.	81
Figura 6.4. Detalle general de pedestales bajo y sobre un aislador.....	83
Figura 6.5. Disposición de los aisladores en planta	88
Figura 6.6. Deformada del edificio para el sismo de diseño en la dirección X-X	89
Figura 6.7. Diagrama de histéresis global, para el desplazamiento de diseño	92
Figura 6.8. Fuerzas involucradas en el límite de la fuerza de restauración	94
Figura 6.9. Rigideces efectivas K_{Dmin} (azul) y K_{Mmin} (verde).	98
Figura 6.10. Diagrama de histéresis del sistema de aislamiento para el SMP.	102
Figura 6.11. Envolvente de resistencias requeridas a flexión en vigas de aislamiento	109
Figura 6.12. Envolvente de resistencia requerida a fuerza cortante en vigas de aislamiento	109
Figura 6.13. Detalle de refuerzo de viga VAIS-01	110
Figura 6.14. Envolvente de resistencias requeridas a flexión en vigas de la superestructura	110
Figura 6.15. Envolvente de resistencias requeridas a cortante en vigas de la superestructura	111
Figura 6.16. Detalle de refuerzo de viga VT-01 (1er. y 2do. piso).....	111
Figura 6.17. Refuerzo propuesto para la columna C-01	112
Figura 6.18. Diagrama de interacción para la columna más solicitada	113
Figura 6.19. Detalle de armadura de pedestal para aislador AS1.....	114

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Niveles de sismo propuestos por el SEAOC Visión 2000.	13
Tabla 4.1. Pesos del edificio	30
Tabla 4.2. Masas de cada piso del edificio	31
Tabla 4.3. Tres primeros modos de vibración del edificio con base fija	31
Tabla 4.4. Resultados del análisis estático	34
Tabla 4.5. Distribución del cortante en la altura	35
Tabla 4.6. Modos de vibración del edificio con base fija y aislado	44
Tabla 4.7. Resumen de resultados de desplazamientos.....	48
Tabla 4.8. Amortiguamiento para la respuesta de cada modo de vibración	49
Tabla 4.9. Resumen de cortantes y porcentajes del peso obtenidos.....	50
Tabla 4.10. Propiedades lineales y no lineales de los dispositivos	52
Tabla 4.11. Propiedades equivalentes	60
Tabla 4.12. Comparación de resultados del análisis espectral y tiempo-historia.....	60
Tabla 5.1. Factor de reducción por amortiguamiento del ASCE 7-10.....	71
Tabla 6.1. Predimensionamiento de elementos estructurales del edificio ejemplo ..	83
Tabla 6.2. Resultados del análisis modal	88
Tabla 6.3. Nueva distribución de rigideces.....	88
Tabla 6.4. Resultados del análisis modal con la nueva distribución de rigidez.....	88
Tabla 6.5. Parámetros de respuesta espectral con cada método de análisis	90
Tabla 6.6. Propiedades bilineales de los aisladores	91
Tabla 6.7. Resultados del análisis tiempo-historia para la dirección X-X.....	92
Tabla 6.8. Resultados del análisis tiempo-historia para la dirección Y-Y.....	92
Tabla 6.9. Parámetros equivalentes globales del sistema de aislamiento	93
Tabla 6.10. Verificación de la fuerza restauradora.....	94
Tabla 6.11. Resultados del nuevo análisis estático.....	95
Tabla 6.12. Nueva distribución de rigidez	95
Tabla 6.13. Nuevos resultados del análisis espectral	96
Tabla 6.14. Selección del cortante de diseño.....	96
Tabla 6.15. Desplazamientos para el diseño del edificio y dispositivos	97
Tabla 6.16. Cálculo de D_{TD} mínimo (ASCE 7-10).....	97
Tabla 6.17. Iteraciones para obtener el desplazamiento D_M	99
Tabla 6.18. Distribución de rigideces en los dispositivos, para el SMP	100
Tabla 6.19. Resultados del análisis modal para el SMP.	100
Tabla 6.20. Respuesta espectral del sistema de aislamiento ante el SMP.....	101

Tabla 6.21. Respuesta en el tiempo para el SMP en la dirección X-X.....	102
Tabla 6.22. Respuesta en el tiempo para el SMP en la dirección Y-Y.....	102
Tabla 6.23. Parámetros equivalentes del sistema de aislamiento para el SMP.....	103
Tabla 6.24. Resultados del nuevo análisis estático.....	103
Tabla 6.25. Nueva distribución de rigidez para el SMP.....	103
Tabla 6.26. Resultados del análisis modal para el SMP.	104
Tabla 6.27. Nuevos resultados del análisis espectral ante el SMP	104
Tabla 6.28. Selección del cortante de diseño.....	104
Tabla 6.29. Desplazamientos para el diseño de los dispositivos	105
Tabla 6.30. Cálculo de D_{TM} mínimo (ASCE 7-10)	105
Tabla 6.31. Cargas actuantes sobre la columna del cruce de ejes 4-B	112
Tabla 6.32. Combinaciones de diseño para la columna 4-B.....	112



LISTA DE SÍMBOLOS

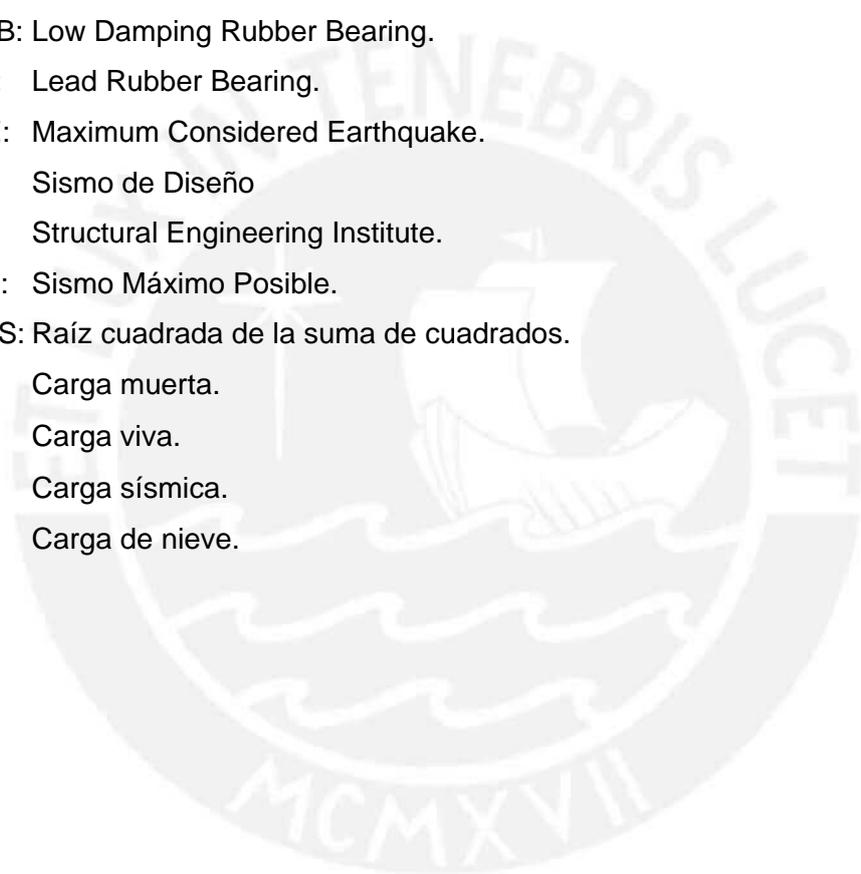
- ϵ : Relación entre periodos de vibración de una estructura aislada y una de base fija. También se entiende como el cociente entre los desplazamientos de la azotea y el sistema de aislamiento de una estructura aislada.
- ξ_b : Razón de amortiguamiento crítico de la interfaz de aislamiento de un modelo de uno o varios GDL.
- ξ_{eff} : Razón de amortiguamiento crítico de un modelo equivalente lineal elástico.
- ξ_s : Razón de amortiguamiento crítico de la superestructura de un modelo de dos o más GDL.
- γ : Deformación angular de un dispositivo elastomérico.
- γ_m : Relación entre la masa de la superestructura y la masa total de una estructura aislada de dos o más GDL.
- ϕ : Forma asociada a un modo de vibración de una estructura.
- τ_y : Esfuerzo de fluencia del plomo de un dispositivo LRB:
- μ : Coeficiente de fricción dinámico entre la superficie curva y el cojinete de un dispositivo FPS.
- ω : Frecuencia angular de un modelo equivalente lineal elástico.
- ω_b : Frecuencia angular del sistema de aislamiento, empleando un modelo de uno o varios GDL.
- A : Área de la sección transversal de un dispositivo elastomérico.
- A_c : Área de la sección transversal de una columna.
- A_D : Área equivalente a la energía que disiparía un sistema lineal equivalente debido al amortiguamiento del mismo.
- A_H : Área encerrada en un lazo de histéresis.
- A_p : Área de la sección transversal del plomo de un dispositivo LRB.
- A_r : Área de la sección de la goma de un dispositivo LRB.
- B : Coeficiente de reducción de solicitaciones debido al amortiguamiento ξ_b
- B_D : Coeficiente de amortiguamiento asociado al Sismo de Diseño
- B_M : Coeficiente de amortiguamiento asociado al Sismo Máximo Posible
- \hat{C} : Matriz de amortiguamiento de una estructura de dos grados de libertad.
- C_b : Coeficiente de amortiguamiento del sistema de aislamiento, de un modelo de uno o varios GDL.
- C_{bi} : Coeficiente de amortiguamiento de un dispositivo.
- CS : Coeficiente sísmico de una estructura.
- D_D : Desplazamiento de diseño

D_M : Desplazamiento máximo
 D_{max} : Desplazamiento lateral máximo de un dispositivo.
 D_{TD} : Desplazamiento total de diseño
 D_{TM} : Desplazamiento total máximo
 D'_D : Desplazamiento de diseño, considerando la flexibilidad de la superestructura
 D'_M : Desplazamiento máximo, considerando la flexibilidad de la superestructura
 D_y : Desplazamiento de fluencia de un dispositivo.
 $E_I(t)$: Energía de entrada a una estructura en el instante “ t ” de un movimiento sísmico.
 $E_s(t)$: Energía de deformación elástica en una estructura en el instante “ t ” de un movimiento sísmico.
 $E_k(t)$: Energía cinética debido a la velocidad de una estructura en el instante “ t ” de un movimiento sísmico.
 $E_D(t)$: Energía disipada durante un movimiento sísmico debido al amortiguamiento que se almacena en una estructura en un instante “ t ”
 $E_H(t)$: Energía histerética disipada a través de la degradación de los elementos estructurales, durante el instante “ t ” de un movimiento sísmico.
 F_d : Fuerza de amortiguamiento.
 F_x : Fuerza a un nivel “ x ” respecto a la base, para el análisis estático de un edificio.
 F_y : Fuerza de fluencia de un dispositivo.
 f'_c : Resistencia a la compresión del concreto.
 g : Aceleración de la gravedad.
 G_{eff} : Módulo de corte efectivo de la goma de un dispositivo elastomérico.
 G_p : Módulo de corte del plomo de un dispositivo LRB.
 G_r : Módulo de corte de la goma de un dispositivo LRB.
 H : Altura total de las capas de goma de un dispositivo elastomérico.
 h : Peralte de una viga.
 h_x : Altura del nivel “ x ” respecto a la base, para el análisis estático de un edificio.
 \hat{K} : Matriz de rigidez de una estructura de dos grados de libertad.
 K_1 : Rigidez del primer tramo del modelo bilineal.
 K_2 : Rigidez del segundo tramo del modelo bilineal.
 k_b : Rigidez efectiva de la interfaz de aislamiento de un modelo de un GDL.
 K_{eff} : Rigidez lateral efectiva de un modelo equivalente lineal elástico.
 $K_{Dmín}$: Rigidez mínima efectiva del sistema de aislamiento asociada al SD.
 $K_{Dmáx}$: Rigidez máxima efectiva del sistema de aislamiento asociada al SD:
 $K_{Mmín}$: Rigidez mínima efectiva del sistema de aislamiento asociada al SMP.

$K_{Mm\acute{a}x}$: Rigidez máxima efectiva del sistema de aislamiento asociada al SMP:
 L_n : Luz libre entre apoyos de un tramo de viga.
 M : Masa de un edificio.
 \hat{M} : Matriz de masas de una estructura de dos grados de libertad.
 m_s : Masa de la superestructura de un modelo de uno o varios GDL.
 m_b : Masa del sistema de aislamiento de un modelo de uno o varios GDL.
 P_s : Carga axial en servicio que actúa sobre una columna.
 $P_{m\acute{a}x}$: Carga máxima sobre un aislador.
 $P_{m\acute{i}n}$: Carga mínima sobre un aislador.
 Q_d : Fuerza que acompaña al desplazamiento nulo del dispositivo, denominado fuerza de activación del dispositivo.
 \ddot{s} : Aceleración del suelo.
 S_a : Seudo aceleración espectral.
 S_{MS} : Coeficiente sísmico obtenido del espectro de diseño a nivel del SMP.
 S_{DS} : Coeficiente sísmico obtenido del espectro de diseño a nivel del SD.
 t : Instante durante un movimiento sísmico.
 t_f : Instante al final de un movimiento sísmico.
 T_b : Periodo fundamental del sistema de aislamiento, empleando un modelo de uno o varios GDL.
 T_D : Periodo de vibración del edificio aislado, asociado al Sismo de Diseño.
 T_M : Periodo de vibración del edificio aislado, asociado al Sismo Máximo Posible.
 T_s : Periodo de vibración de la superestructura de un edificio de dos o más GDL, cuando esta tiene base fija.
 $\dot{x}(t)$: Velocidad de una estructura en el instante “ t ” de un movimiento sísmico.
 \underline{V} : Vector de posición de una estructura de dos GDL.
 V_{max} : Cortante lateral máximo de un dispositivo.
 V_b : Cortante de diseño del sistema de aislamiento y la subestructura de un edificio aislado.
 V_s : Fuerza cortante de diseño de la superestructura.
 W_D : Energía disipada, que corresponde al área encerrada por un ciclo del diagrama bilineal A_H .
 w_x : Porción del peso total de un edificio en el nivel “ x ”, para el análisis estático.
 X_b : Desplazamiento del sistema de aislamiento, empleando un modelo de uno o varios GDL.
 X_s : Desplazamiento lateral de una estructura con base fija.

LISTA DE ABREVIATURAS

- ASCE: American Society of Civil Engineers.
CM: Centro de masas.
CQC: Combinación cuadrática completa.
CR: Centro de rigidez.
DBE: Design-Based Earthquake.
FPS: Friction Pendulum System Bearing.
GDL: Grado(s) de Libertad.
HDRB: High Damping Rubber Bearing.
LDRB: Low Damping Rubber Bearing.
LRB: Lead Rubber Bearing.
MCE: Maximum Considered Earthquake.
SD: Sismo de Diseño
SEI: Structural Engineering Institute.
SMP: Sismo Máximo Posible.
SRSS: Raíz cuadrada de la suma de cuadrados.
D: Carga muerta.
L: Carga viva.
E: Carga sísmica.
S: Carga de nieve.



Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Perú, por su ubicación geográfica, es un país con una alta ocurrencia de sismos. Eventos pasados nos han dejado enseñanzas respecto a las provisiones que se deben tomar para reducir la vulnerabilidad de las edificaciones.

La filosofía del diseño sismo resistente de las edificaciones consiste en salvaguardar la vida de los ocupantes, aceptando un daño parcial de las estructuras, pero evitando su colapso. Esta filosofía toma en cuenta la importancia de la edificación y el nivel de daños que debería presentar luego de un terremoto. Por ejemplo, los centros de salud, centrales de bomberos y de comunicaciones deberían mantenerse completamente operativos luego del sismo y sin presentar daños.

Tradicionalmente las estructuras son dotadas de rigidez, resistencia y ductilidad adecuadas para lograr los objetivos de la filosofía mencionada. Como alternativa a ello, en las últimas décadas surgen los sistemas de protección sísmica, en el cual se instalan en la estructura dispositivos capaces de reducir su vulnerabilidad frente a la acción de los sismos. Uno de los sistemas más frecuentes en la ingeniería sismorresistente es el aislamiento sísmico.

Existen actualmente diversos edificios con aislamiento en su base alrededor del mundo. Se observó un buen comportamiento en los edificios que contaban con esta tecnología, cuando fueron sometidos a sismos en ciudades como Northridge en 1994, Kobe en 1995 y Concepción en 2010. En general, en estos edificios no se reportaron pérdidas materiales cuantiosas ni daños personales.

No se puede evitar que ocurra un sismo de gran magnitud, pero actualmente se cuenta con las herramientas técnicas suficientes para reducir los daños que puede causar un terremoto en una estructura. Por ello resulta importante promover una cultura de prevención y protección sísmica que no sólo debe incluir a los ingenieros civiles, sino también a todos los involucrados en el sector construcción y a nuestras autoridades.

1.2. Objetivos y Alcance

El objetivo central de este trabajo es el desarrollo de una metodología de análisis y diseño de edificios con aisladores sísmicos, adaptando el conocimiento existente a la realidad peruana. Los objetivos específicos son los siguientes:

- a) Estudiar los fundamentos del comportamiento dinámico de una estructura aislada, y presentar algunos métodos de análisis de estructuras aisladas empleando ejemplos sencillos de uno, dos y varios grados de libertad.
- b) Revisar las propiedades de los dispositivos de aislamiento más frecuentes en el mercado.
- c) Revisar los requerimientos para estructuras aisladas en códigos internacionales, identificando los aspectos de directa aplicación en Perú.
- d) Identificar algunos requisitos mínimos que deben tener los edificios para ser aislables.
- e) Desarrollar un ejemplo sencillo de diseño del sistema de aislamiento de un edificio de 5 pisos aplicando la metodología presentada en este trabajo.
- f) Desarrollar el diseño de los elementos estructurales del edificio seleccionado. Para ello, se destaca los requerimientos del diseño en concreto armado para el caso especial de estructuras aisladas.
- g) Presentar planos básicos estructurales del edificio aislado.

Si bien en este trabajo se usaron aisladores elastoméricos y códigos como el ASCE 7-10, la metodología propuesta es de aplicación para cualquier tipo de dispositivo.

1.3. Organización del Documento

El segundo capítulo consiste en una breve presentación de los fundamentos teóricos del aislamiento de base, comportamiento dinámico y desempeño durante los sismos.

En el tercer capítulo se presenta una descripción de las propiedades y el comportamiento de los dispositivos más frecuentes en ingeniería.

La teoría del análisis de estructuras con aislamiento sísmico utilizando diferentes métodos se estudia en el cuarto capítulo. Se emplea un edificio ejemplo para la aplicación de la teoría de análisis.

En el quinto capítulo se presentan las disposiciones de algunas normas internacionales respecto al aislamiento sísmico, que se toman como referencia en el presente trabajo. Asimismo, se presentan aquellas disposiciones de la Norma Peruana E.030 que son aplicables a estructuras aisladas.

La metodología para el diseño de edificaciones con aisladores sísmicos se presenta en el sexto capítulo y se aplica al edificio ejemplo ya presentado en el cuarto

capítulo. Esta metodología se concentra en el diseño del sistema de aislamiento cumpliendo los requisitos de desempeño del edificio. Se concluye con un procedimiento sencillo de diseño de los dispositivos y los elementos estructurales del edificio ejemplo.

Por último, en el séptimo capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones que se desprenden del trabajo realizado.



Capítulo 2. AISLAMIENTO SÍSMICO DE EDIFICIOS

2.1 Edificios aislados en el mundo

La técnica del aislamiento sísmico de edificios data de inicios del siglo XX, cuando se planteó que, al colocar una capa de arena fina, mica o talco bajo una edificación esta podría deslizar durante un sismo. Luego, se inventaron numerosos mecanismos o dispositivos que tratan de lograr el desacople de una estructura del terreno, para mitigar el daño que puede causar un terremoto, como rodillos, bolas, cables, columnas de roca, y la arena. (Kelly & Naeim, 1999)

En la actualidad esta técnica ha alcanzado un gran desarrollo y difusión, inicialmente gracias al desarrollo de los aisladores de goma o elastoméricos desde hace 50 años, y posteriormente de los aisladores friccionales. El primer edificio aislado con un sistema de aislamiento de goma es una escuela ubicada en Skopje, actual República de Macedonia, el cual data de 1969 (Kelly & Naeim, 1999).

Luego de los terremotos de Northridge (1994) y Kobe (1995), se comprobó el buen desempeño de los edificios aislados durante dichos eventos, en comparación con los edificios que no contaban con esta técnica de protección sísmica. Debido a ello, la ejecución de edificios aislados empezó a crecer notablemente.

En Latinoamérica, Chile es el país que cuenta con el mayor número de edificios aislados, en los cuales se obtuvieron excelentes resultados en sus últimos sismos. El primer edificio aislado en Chile fue el Andalucía, proyecto financiado por el Ministerio de Vivienda y la Universidad de Chile en 1992, donde se utilizaron aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (HDRB). A la vez, se construyó un edificio gemelo construido con las técnicas tradicionales. Tras el terremoto del 27 de febrero de 2010, el edificio aislado no sufrió ningún daño y la aceleración en la azotea fue cuatro veces menor que la aceleración en el edificio gemelo, que sí registró daños en su estructura y caídas de objetos en su interior. Existen otros edificios aislados con uso educativo, de salud, e inclusive militar.

En el Perú, debido a la reciente difusión de la técnica del aislamiento de base, se han comenzado a desarrollar proyectos con aislación sísmica para edificios de uso educativo, salud, oficinas y vivienda, utilizando como referencia códigos de diseño extranjeros. En la Norma Peruana de Diseño Sismorresistente actual solo se establece que los hospitales deben contar con un sistema de aislamiento sísmico cuando se encuentren en las zonas de alta sismicidad.

Algunos proyectos existentes con aislación sísmica en el Perú son los edificios educativos de la PUCP (Pontificia Universidad Católica del Perú) (Figuras 2.1 y 2.2) y la UPC (Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas).



Figura 2.1. Biblioteca de Ingeniería PUCP



Figura 2.2. Aislador elastomérico en la Biblioteca de Ingeniería – PUCP

2.2 Fundamentos del aislamiento sísmico

2.2.1 Estructura Aislada

El aislamiento sísmico es una técnica que consiste en colocar una estructura sobre un grupo de dispositivos muy flexibles lateralmente, que permiten que la estructura se mantenga “casi quieta” mientras que el suelo alcanza desplazamientos importantes durante un terremoto. Un edificio aislado (Figura 2.3) tiene desplazamientos de entrepiso y aceleraciones de piso reducidas, logrando que tanto la estructura y su contenido prácticamente no sufran daños.

El sistema de aislamiento no puede ser de “aislamiento perfecto” (rigidez nula) ya que la rigidez del sistema debe permitir que el edificio regrese a su posición inicial después de ocurrido el evento sísmico.



Figura 2.3. Edificio con aislamiento en su base (Sirve S.A., 2016)

Un edificio con aislamiento sísmico tiene los siguientes componentes:

- Subestructura: Estructura que se encuentra bajo los dispositivos de aislamiento y que, por tanto, durante un terremoto tiene prácticamente el mismo movimiento que el suelo. Puede consistir en la cimentación del edificio, o los niveles por debajo de la interfaz de aislamiento (generalmente sótanos). En este último caso, es necesario conectar todas las columnas con una parrilla inmediatamente bajo los dispositivos.
- Superestructura: Estructura que se encuentra sobre los dispositivos de aislamiento. Inmediatamente sobre los dispositivos es necesario colocar un diafragma rígido compuesto por vigas y losas.
- Interfaz de aislamiento: Conjunto de dispositivos muy flexibles lateralmente y muy rígidos verticalmente. La interfaz puede encontrarse en el nivel del terreno natural, sobre o debajo de este, dependiendo del proyecto de arquitectura.
- Junta de separación sísmica: Espacio suficiente para que el edificio aislado no sea impactado por el suelo circundante o edificios vecinos. Una junta para un edificio aislado en la costa del pacífico de Sudamérica se encuentra en el orden de los 40 cm.

- Sistema de aislamiento: Suele referirse al conjunto formado por la interfaz de aislamiento, el diafragma inmediatamente superior y la cimentación o la parrilla inferior en el caso de edificios con sótanos (Figuras 2.4 y 2.5).

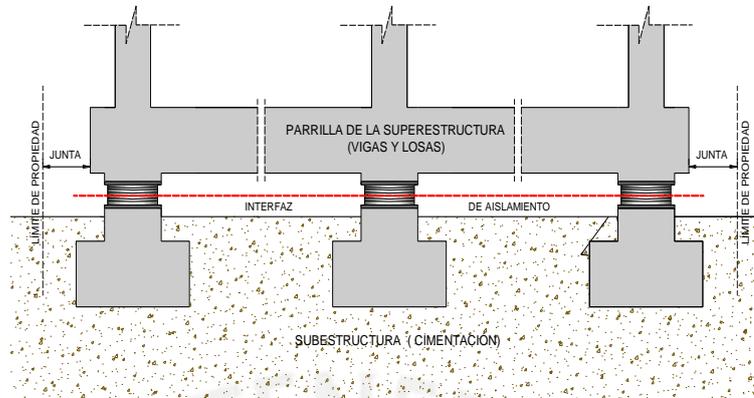


Figura 2.4. Esquema del Sistema de aislamiento sin niveles de sótano

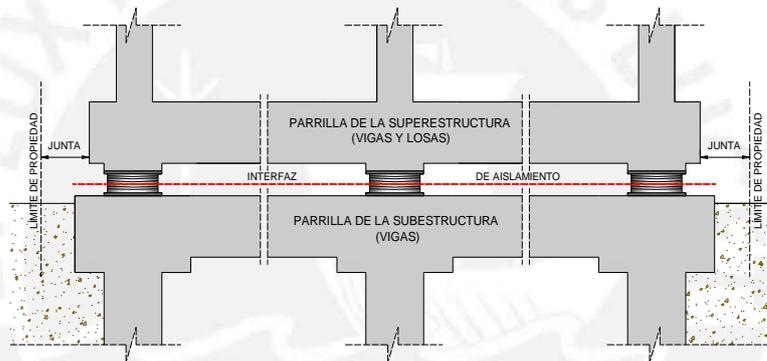


Figura 2.5. Esquema del Sistema de aislamiento con niveles de sótano

En algunas ocasiones la interfaz de aislamiento no se encuentra en un mismo plano. Generalmente esto ocurre cuando la subestructura está compuesta por niveles subterráneos de diferentes dimensiones en planta (Figura 2.6).

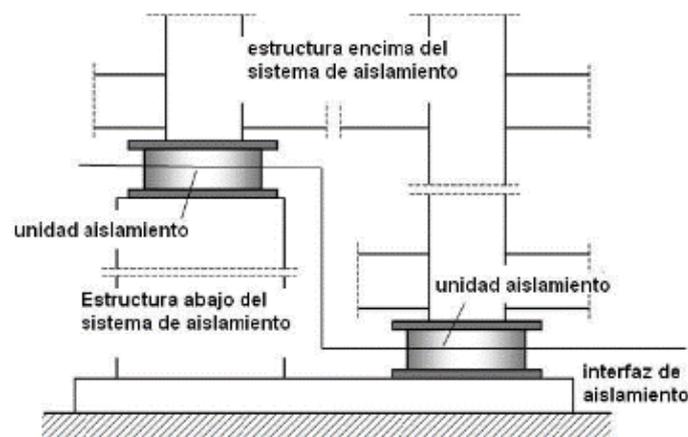


Figura 2.6. Interfaz de aislamiento en distintos planos (FEMA, 2012)

2.2.2 Aislamiento sísmico y balance de energía

Desde el inicio de un movimiento sísmico hasta un instante “ t ” la estructura recibe una energía de entrada, $E_I(t)$. Esta última se traduce en energía cinética $E_k(t)$, energía de deformación elástica $E_s(t)$ y se disipa como energía de amortiguamiento $E_D(t)$ y energía histerética $E_H(t)$ en forma de daño estructural. Este balance energético se expresa en la Ec. 2.1:

$$E_I(t) = E_s(t) + E_k(t) + E_D(t) + E_H(t) \quad (2.1)$$

Al finalizar el movimiento sísmico, “ $t = t_f$ ”, la estructura se detiene y ya no almacena energía cinética $E_k(t_f) = 0$. Asimismo, la estructura ha recuperado parcialmente su posición original y ya no almacena energía de deformación $E_s(t_f) = 0$. De esta manera, la Ec. 2.2 muestra el balance de energía desde el inicio hasta el final del movimiento.

$$E_I = E_D + E_H \quad (2.2)$$

Donde E_I se obtiene de la Ec. 2.3.

$$E_I = -M \int_0^t \ddot{s}(x) \dot{x}(t) dt \quad (2.3)$$

El valor de E_I dependerá únicamente del valor de la velocidad relativa del edificio, ya que la masa “ M ” es constante y la aceleración del suelo \ddot{s} depende del evento sísmico. En el caso particular de un edificio aislado, el edificio se moverá lentamente, desarrollando poca velocidad, por ende, la energía que ingresa a la estructura también se reduce.

2.2.3 Comportamiento dinámico de estructuras aisladas

Cuando una estructura se aísla se obtiene un nuevo sistema que tiene un periodo de vibración (T_b) mucho mayor que el correspondiente a la estructura original (T_s) debido a la notable flexibilidad lateral de la interfaz de aislamiento.

El incremento del periodo de una estructura con base fija (T_s) a un periodo de vibración de una estructura con base aislada (T_b), debe garantizar que el nuevo

sistema tenga una menor demanda sísmica. Se suelen emplear periodos de vibración de la estructura aislada del orden de 2.5 a 3.5 veces el periodo de vibración la estructura con base fija.

En la azotea de un edificio aislado se produce un desplazamiento lateral mayor que en la azotea de un edificio sin aislamiento. Sin embargo, el desplazamiento de la estructura aislada se concentra en la interfaz de aislamiento, quedando la superestructura con desplazamientos laterales de entrepiso menores que los correspondientes a la estructura sin aislar (Figura 2.7).

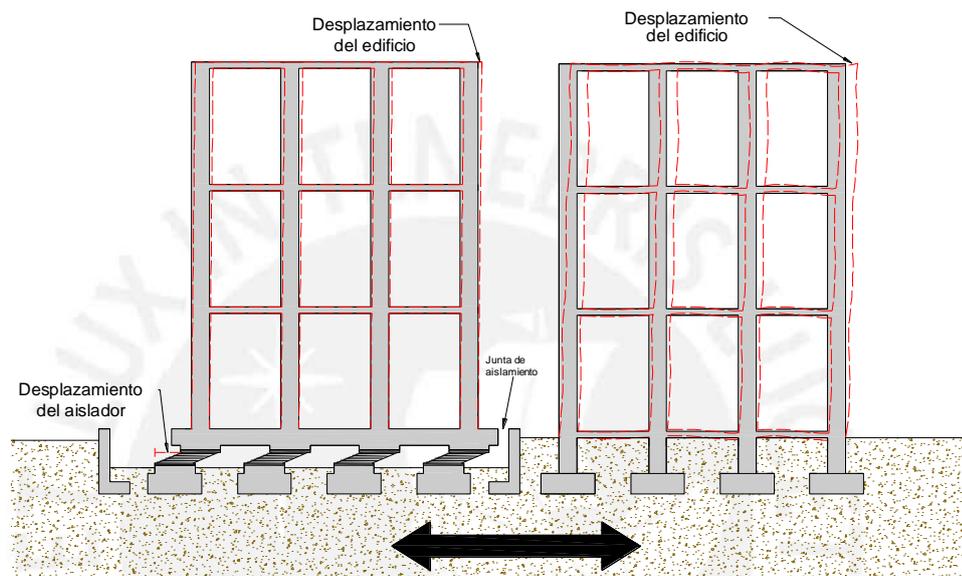


Figura 2.7. Deformación de una estructura con y sin aislamiento en su base

El desplazamiento relativo que ocurre en la interfaz de aislamiento ocasiona que los efectos de segundo orden (P-delta) sean importantes (Figura 2.8).

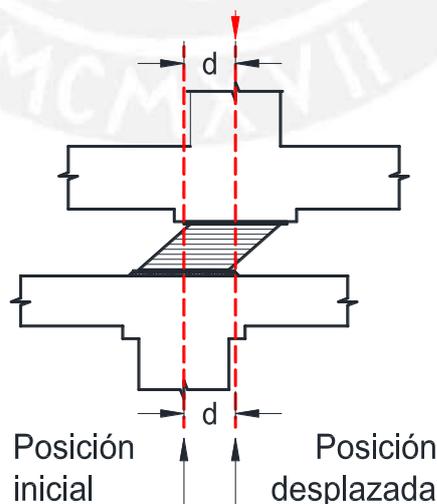


Figura 2.8. Efecto P-delta en las columnas que cruzan la interfaz de aislamiento

La Figura 2.9 muestra la relación entre la fuerza cortante (V) y el desplazamiento lateral relativo (D) entre los extremos de un aislador típico de goma. Se nota que para pequeños desplazamientos (menores que el desplazamiento de fluencia D_y) la rigidez lateral es considerablemente más alta que la que acompaña a los desplazamientos importantes. La relación V-D no es lineal ni elástica, y en cada ciclo de oscilación la energía disipada corresponde al área encerrada en el ciclo (loop) de histéresis.

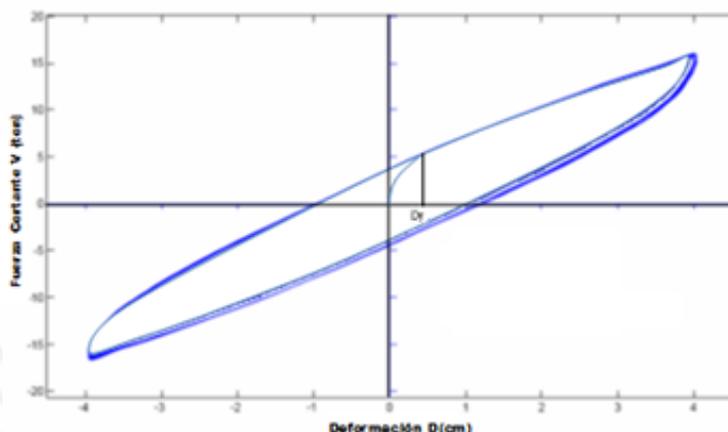


Figura 2.9. Relación V-D de un dispositivo ensayado en laboratorio (Instituto Nacional de Normalización, 2013)

Este proceso de disipación de energía puede representarse mediante un mecanismo de amortiguamiento de fluido viscoso “equivalente” que, para los dispositivos modernos, suele ser mayor que el valor típico correspondiente a la razón de amortiguamiento crítico de 5% considerado para los edificios.

La Figura 2.10 muestra el cambio que experimenta la demanda sísmica de pseudo-aceleraciones de diseño sobre un edificio con base fija con relación al mismo edificio pero con base aislada. Los valores espectrales se reducen tanto por el crecimiento del periodo natural de vibración como por el incremento del amortiguamiento.

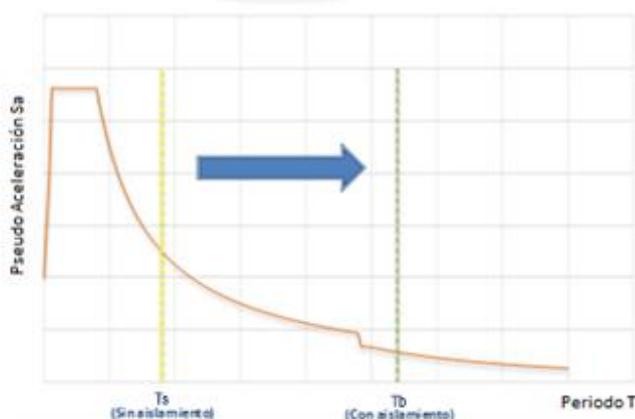


Figura 2.10. Reducción de la pseudo-aceleración en estructuras aisladas.

En el espectro de desplazamientos de la Figura 2.11, se aprecia que el desplazamiento de la estructura aislada, X_b , correspondiente al periodo de vibración del edificio aislado (T_b) es mayor que el desplazamiento lateral X_s , correspondiente al periodo de vibración de la estructura con base fija (T_s). Asimismo, se observa que el amortiguamiento de los dispositivos provoca un salto en el espectro que reduce los valores de desplazamientos, como por ejemplo, el valor de X_b , ubicado más allá de dicho salto.

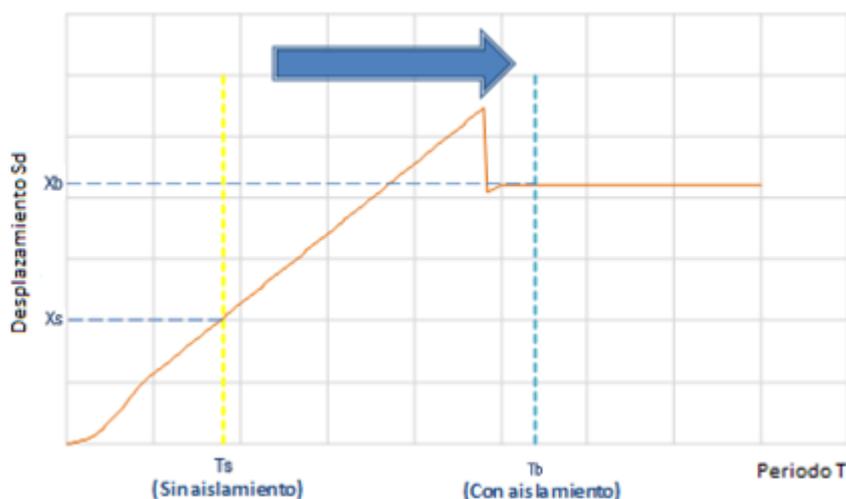


Figura 2.11. Espectro de desplazamientos típico para estructuras aisladas.

El mayor desplazamiento en la estructura aislada se debe al incremento del periodo, y se concentra casi completamente en la interfaz de aislamiento.

Para pequeños desplazamientos laterales del sistema de aislamiento, los dispositivos no son tan flexibles, no se logra el incremento previsto para el periodo de vibración, y en estas condiciones el sistema no es muy eficiente en la reducción de vibraciones.

Durante un terremoto, la deformación de la superestructura es tan pequeña que el sistema estructural se mantiene prácticamente en régimen elástico. Por tanto, para estudiar el comportamiento dinámico se puede suponer un modelo de estructura lineal elástica montada sobre dispositivos con comportamiento inelástico que, para ciertos propósitos podrían modelarse con un equivalente lineal elástico.

2.2.4 Equivalente lineal elástico

El área encerrada en un lazo (loop) de histéresis A_H representa la cantidad de energía que el dispositivo disipa en una oscilación (Figura 2.12). Se puede construir un modelo equivalente elástico con rigidez lateral efectiva K_{eff} y razón de

amortiguamiento efectivo ξ_{eff} . La rigidez efectiva se obtiene del cociente entre la fuerza cortante lateral máxima $V_{m\acute{a}x}$ y el desplazamiento lateral máximo $D_{m\acute{a}x}$.

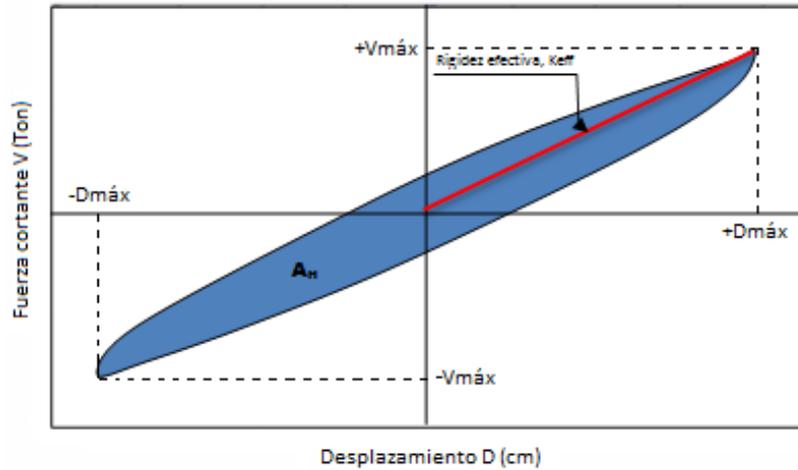


Figura 2.12. Energía disipada y rigidez efectiva de un dispositivo típico

El sistema equivalente debe disipar por amortiguamiento la misma cantidad de energía que el dispositivo real. La Figura 2.13 muestra la relación entre la fuerza de amortiguamiento F_d y el desplazamiento $D_{m\acute{a}x}$ correspondiente a un ciclo de oscilación del sistema equivalente.

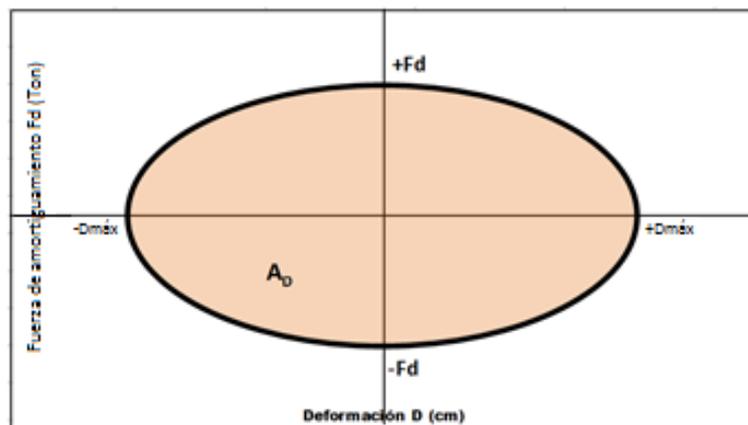


Figura 2.13. Relación F_d vs D

El área A_D es la energía que disipa el sistema equivalente (Ec. 2.4):

$$A_D = 2\pi K_{eff} D^2 \xi_{eff} = 2\pi M \omega^2 D^2 \xi_{eff} \quad (2.4)$$

Por tanto, igualando ambas áreas ($A_D = A_H$) se obtiene la expresión de la Ec. 2.5 para determinar la razón de amortiguamiento crítico efectivo:

$$\xi_{eff} = \frac{A_H}{2\pi K_{eff} D^2} = \frac{A_H}{2\pi M \omega^2 D^2} \quad (2.5)$$

2.3 Desempeño de un edificio aislado

El desempeño de un edificio se puede definir en función del nivel de daño estructural y no estructural que experimentaría para distintos niveles de demanda sísmica, y según la importancia de la edificación.

La Tabla 2.1 muestra los diferentes niveles de sismo empleados para describir el desempeño, propuestos por el SEAOC Visión 2000 (1995).

Tabla 2.1. Niveles de sismo propuestos por el SEAOC Visión 2000.

Sismos	Periodo de retorno (años)	Probabilidad de excedencia en 50 años (%)
Frecuentes	45	69
Ocasionales	75	50
Raros	475	10
Muy raros	970	5

Los sismos con periodo de retorno entre 50 y 100 años se consideran *frecuentes*. El sismo *raro* corresponde a un evento de 475 años de periodo de retorno y el sismo *extremo* se asocia a un periodo de retorno de 970 años en algunos códigos, y de 2500 años en otros.

En estructuras aisladas, los sismos frecuentes ocasionan que el sistema de aislamiento presente pequeños desplazamientos laterales, lo cual provoca que los dispositivos trabajen con una rigidez efectiva muy alta. El periodo de vibración se acorta y se pierde el efecto del aislamiento. Sin embargo, a pesar de ello el edificio aislado permanece elástico y operativo.

Un sismo raro ocasionará grandes desplazamientos laterales en el sistema de aislamiento, activándolo totalmente y haciéndolo incursionar en el rango inelástico. El sistema trabajará con una rigidez efectiva mucho menor y la superestructura se beneficiará por el aislamiento de tal forma que podrá comportarse prácticamente elástica.

Para un sismo muy raro, el sistema de aislamiento estará sometido a mayores solicitaciones y, a pesar de ello, debe mantener la estabilidad vertical y su capacidad de restituir a la estructura a su posición original. Es de esperar que la superestructura tenga esporádicas incursiones inelásticas conservando casi completamente su rigidez y resistencia original (comportamiento esencialmente elástico).

Otro punto de vista del desempeño de las estructuras aisladas puede tomarse en función de la deriva de entrepiso.

Hazus (FEMA, 2012) es una metodología empleada en los Estados Unidos para estimar las potenciales pérdidas debido a los terremotos, inundaciones y huracanes. En el caso de los edificios, Hazus presenta el posible nivel de daño que puede presentarse para diferentes niveles de deriva de entrepiso, tomando en cuenta las siguientes variables: exigencias de construcción sismorresistente, la altura del edificio y la demanda sísmica.

Según Hazus, para edificios aporricados de concreto armado entre 4 y 7 pisos, con requisitos de diseño sismorresistente modernos para los elementos estructurales, si se mantiene la deriva de entrepiso por debajo de 0.003 se logra que el edificio se mantenga con un nivel ligero de daño. Para edificios con más de 7 pisos, si se desea un nivel ligero de daño la deriva límite es de 0.0025.

Como en los edificios aislados se logran derivas de entrepiso inferiores al 0.003 en sismos raros, se espera que el desempeño de estos edificios sea prácticamente elástico y sin daños, como se observó en los últimos terremotos fuertes ocurridos en el mundo, tales como los eventos de Northridge (1994), Kobe (1995), Chile (2010) y Japón (2011).

El uso del aislamiento sísmico resulta aconsejable en los edificios destinados al manejo de una emergencia, como los hospitales y centros de comunicación. Se conoce que en estos edificios el costo de su contenido (instrumentación, equipos, etc.) es aproximadamente un 70% del monto total de la inversión, mientras que el incremento en el costo de las estructuras (30%) por la instalación de un sistema de aislamiento es de un 10% (33% del total). Por lo tanto, el incremento en el monto total de inversión para la construcción de un hospital con sistema de aislamiento en su base es reducido.

Al no presentarse daños significativos en las estructuras aisladas se reduce al mínimo la posibilidad de colapso y por ende, se logra salvaguardar la vida de los ocupantes durante la ocurrencia de un evento sísmico raro.

Capítulo 3. DISPOSITIVOS DE AISLAMIENTO SÍSMICO

3.1 Características generales de los dispositivos de aislamiento

Existen dispositivos de aislamiento de tres tipos: los aisladores elastoméricos, los de péndulo friccional y los deslizadores.

Todos los dispositivos de aislamiento tienen definidos su capacidad de carga y rigidez vertical, así como su curva fuerza-desplazamiento lateral.

3.1.1 Capacidad de carga y rigidez vertical

La capacidad de carga depende de las características propias de cada aislador. Por ejemplo, en los dispositivos elastoméricos, la capacidad de carga está relacionada con el área de la sección transversal, el tipo de goma y la distorsión máxima que alcanzaría el dispositivo.

La capacidad de carga del dispositivo no debe ser excedida durante un terremoto por el efecto combinado de la carga muerta, la carga viva, las cargas ocasionadas por el momento volcante sísmico, y las producidas por las aceleraciones sísmicas verticales.

La rigidez vertical de los dispositivos depende directamente de la compresibilidad del material y la altura en que se desarrollan las deformaciones verticales. En el caso de los aisladores elastoméricos la rigidez vertical suele ser alrededor de 1000 veces la rigidez lateral (Arriagada, 2005)

3.1.2 Curva fuerza-desplazamiento lateral

La Figura 3.1 muestra la curva fuerza-desplazamiento de un aislador durante un ensayo cíclico en el cual alcanzó un desplazamiento máximo D_{max} y una fuerza máxima V_{max} .

Al comenzar el ensayo la rigidez del dispositivo es alta, representada en la Figura 3.1 como K_1 . Luego, cuando se sobrepasa el rango elástico, la rigidez del dispositivo pasa a ser K_2 , que es notablemente menor que la rigidez inicial.

Se define la rigidez efectiva como la rigidez secante asociada a los valores máximos del desplazamiento y la fuerza lateral (Ec. 3.1):

$$K_{eff} = \frac{V_{max}}{D_{max}} \quad (3.1)$$

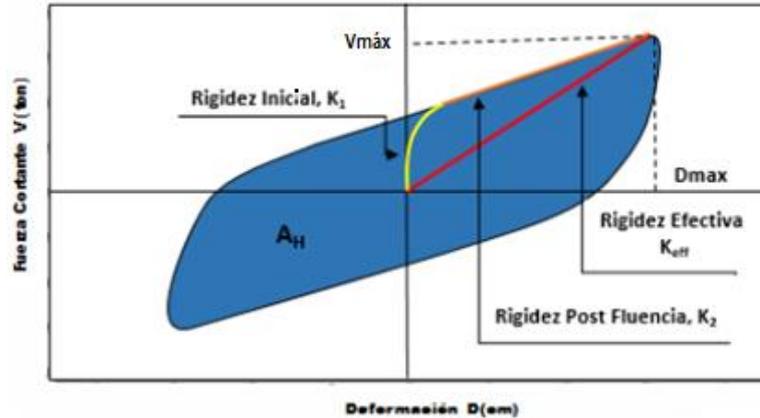


Figura 3.1. Rigideces K_1 , K_2 y K_{eff} de un dispositivo típico

En un ensayo cíclico, la curva histéretica obtenida encierra en cada ciclo un área que representa la cantidad de energía disipada por el dispositivo durante la aplicación de la carga cíclica.

3.1.3 Capacidad de Restauración lateral

Los aisladores elastoméricos y de péndulo friccional deben tener la capacidad de regresar la estructura a su posición inicial luego de terminado el movimiento del suelo, esto debido a una adecuada rigidez lateral en relación a los mecanismos de amortiguamiento. Los deslizadores no cuentan con esta propiedad.

3.1.4 Modelo bilineal y lineal equivalente

Los diagramas fuerza-desplazamiento de los dispositivos se pueden idealizar mediante modelos de comportamiento bilineal, como el mostrado en la Figura 3.2 en color rojo.

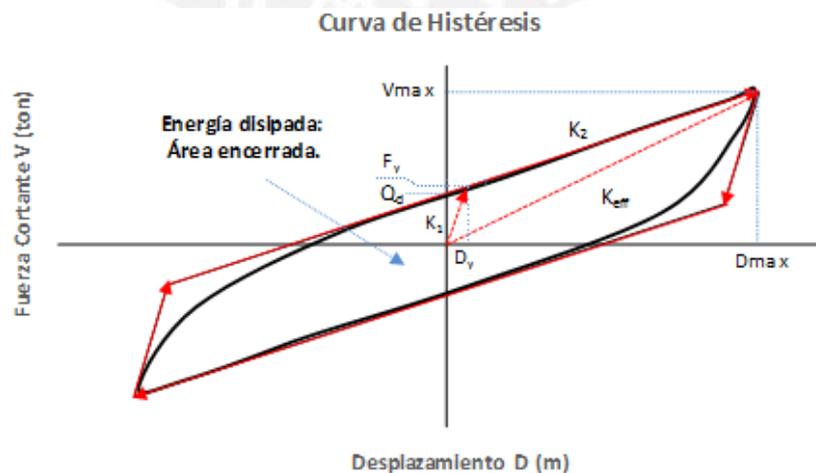


Figura 3.2. Modelo bilineal de la curva de histéresis

En el modelo bilineal, las rigideces de los tramos se representan por K_1 y K_2 . Se suele referir como desplazamiento y fuerza de fluencia a los valores correspondientes al cambio de pendiente (D_y , F_y). La fuerza que acompaña al desplazamiento nulo se representa por Q_d .

Q_d puede calcularse como:

$$Q_d = F_y - K_2 D_y \quad (3.2)$$

Luego, como:

$$F_y = K_1 D_y \quad (3.3)$$

Reemplazando la Ec. 3.3 en la Ec. 3.2 se obtiene la relación de la Ec. 3.4:

$$D_y = \frac{Q_d}{K_1 - K_2} \quad (3.4)$$

Para ciertos propósitos es necesario representar el dispositivo mediante un modelo elástico equivalente, cuya rigidez corresponde a la definida en la Ec. 3.1:

$$K_{eff} = \frac{V_{max}}{D_{max}} \quad (3.1)$$

Como:

$$V_{max} = K_2 D_{max} + Q_d \quad (3.5)$$

Reemplazando la Ec. 3.5 en la Ec. 3.1 se obtiene:

$$K_{eff} = K_2 + \frac{Q_d}{D_{max}} \quad (3.6)$$

La energía disipada, W_D , corresponde al área encerrada por un ciclo del diagrama bilineal, A_H . El área y la energía disipada se relacionan en la Ec. 3.7:

$$W_D = A_H = 4Q_d(D_{max} - D_y) \quad (3.7)$$

Luego, la razón de amortiguamiento crítico efectivo se calcula reemplazando A_H en la expresión genérica de la Ec. 2.5. Se obtiene la Ec. 3.8:

$$\xi = \frac{A_H}{2\pi K_{eff} D^2} = \frac{4Q_d(D - D_y)}{2\pi K_{eff} D^2} = \frac{4Q_d(D - D_y)}{2\pi M \omega^2 D^2} \quad (3.8)$$

3.2 Principales Tipos de Dispositivos

A continuación, se estudian los tres tipos de dispositivos de aislamiento más frecuentes: aisladores elastoméricos, deslizadores y péndulos de fricción.

3.2.1 Aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LDRB)

Se denominan LDRB por sus siglas del inglés, Low Damping Rubber Bearing. Son dispositivos compuestos por planchas de goma/caucho (elastómero) intercaladas y unidas con láminas de acero mediante un proceso de vulcanizado. Cuentan con dos planchas de acero de mayor espesor en sus extremos, que sirven para unir el dispositivo con la estructura. En general, estos dispositivos tienen una forma cilíndrica, y la altura suele ser menor que el diámetro (Figura 3.3).



Figura 3.3. Esquema de un aislador LDRB (FIP Industriale, 2015)

Los LDRB inicialmente se fabricaban sin planchas de acero y, por tanto, tenían poca rigidez y capacidad de carga vertical. Luego, con las planchas se obtuvieron los actuales dispositivos muy rígidos verticalmente y muy flexibles lateralmente.

En la Figura 3.4 se muestra la curva histerética de un LDRB, la cual encierra un área reducida. Esto significa una baja capacidad de disipar energía. El porcentaje de amortiguamiento efectivo de estos dispositivos es menor a 7%.

La curva puede representarse mediante una recta de rigidez efectiva, K_{eff} , con la que el dispositivo trabaja casi para cualquier deformación lateral. Esto se debe a que la goma tiene un módulo de corte prácticamente constante e independiente del

nivel de deformación angular, γ , el que puede alcanzar valores de hasta 200% ($\gamma = 2$).

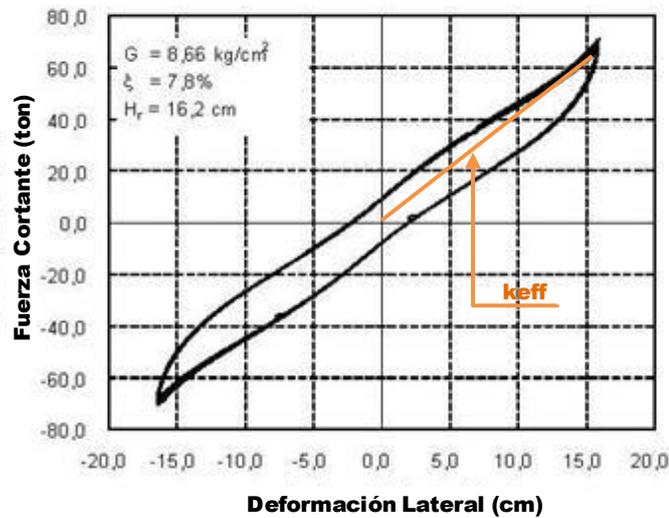


Figura 3.4. Curva de Histéresis de un LDRB (Instituto Nacional de Normalización, 2013)

La rigidez lateral equivalente depende del área de la sección transversal del dispositivo A , la altura de la goma H y el módulo de corte G_{eff} equivalente de la goma. Estas variables se relacionan según la Ec. 3.9 de la Resistencia de Materiales:

$$K_{eff} = \frac{G_{eff} A}{H} \quad (3.9)$$

Ensayos demuestran que las propiedades de corte de cualquier dispositivo elastomérico dependen de la fabricación, la temperatura de operación y el envejecimiento. Para el caso de la goma de bajo amortiguamiento no se tiene grandes variaciones salvo por imprecisiones durante la fabricación del dispositivo, en el que la rigidez efectiva podría alcanzar un 20% de variación. El valor de G_{eff} suele encontrarse entre 5 y 8 kg/cm^2 , y se mantiene casi constante para toda deformación angular (Bridgestone, 2013).

Como el valor del amortiguamiento de estos dispositivos resulta menor que el de una estructura tradicional, los LDRB se usaban en combinación con dispositivos (Figura 3.5) para incrementar el amortiguamiento del sistema de aislamiento (amortiguadores).

A la fecha, los LDRB han sido reemplazados por dispositivos de goma con alto amortiguamiento y por dispositivos con núcleos de plomo, que no requieren combinarse con otros dispositivos.



Figura 3.5. Aislador LDRB conectado a un amortiguador (Symans)

3.2.2 Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB)

Estos dispositivos consisten de capas de goma de bajo amortiguamiento también intercaladas con planchas de acero, y con un inserto cilíndrico de plomo (núcleo de plomo) para disipar energía. Se denominan LRB por sus siglas del inglés, Lead Rubber Bearing (Figura 3.6)



Figura 3.6. Esquema de un aislador elastomérico con núcleo de plomo. (Nunez, 2015)

La fabricación del LRB normalmente se realiza a partir de un LDRB, haciendo un agujero en la zona central, donde se inserta el núcleo a presión.

Cuando los LRB son sometidos a movimientos sísmicos importantes, el núcleo de plomo empieza a fluir y a disipar energía en forma de calor. Bajo deformaciones laterales, el esfuerzo de fluencia del plomo, τ_y , se encuentra alrededor de los 100 kg/cm² (Instituto Nacional de Normalización, 2013)

Después del movimiento, el caucho se encarga de retornar a la estructura a su posición original. Como el núcleo de plomo se recristaliza a temperatura ambiente, queda listo para seguir disipando energía en el siguiente evento sísmico.

La Figura 3.7 muestra el diagrama de histéresis de un LRB. El área encerrada por el lazo es mayor que la correspondiente al LDRB, y en donde la rigidez efectiva K_{eff} es notoriamente mayor que la rigidez post-fluencia K_2 .

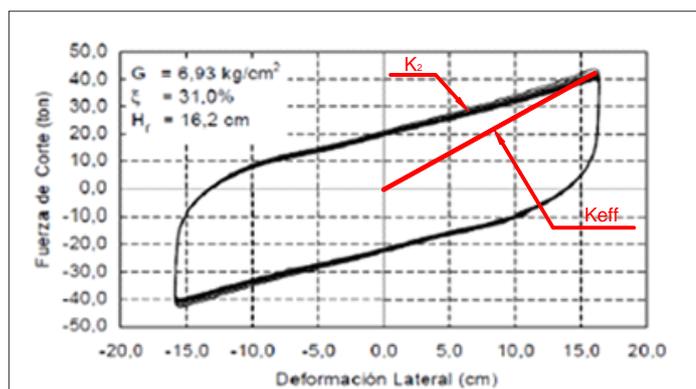


Figura 3.7. Curva de histéresis de un LRB (Instituto Nacional de Normalización, 2013)

La rigidez post-fluencia K_2 está definida de forma similar a la rigidez efectiva del LDRB, al que se debe incluir el aporte del plomo (Ec. 3.10):

$$K_2 = \frac{Gr Ar}{H} + \frac{Gp Ap}{H} \quad (3.10)$$

La deformación angular del dispositivo no tiene gran influencia en el módulo de corte de la goma que típicamente se emplea en los LRB.

Ensayos realizados muestran que la rigidez K_2 puede tener un 20% de variación debido al proceso de fabricación del dispositivo y un 10% debido a cambios de temperatura. Inclusive, se sabe que la edad del dispositivo es influyente, ya que predicciones indican que se tendría un 20% de variación para 60 años de servicio del dispositivo (Bridgestone, 2013).

Los LRB pueden disipar energía alcanzando valores de amortiguamiento equivalente entre 25% y 30% (Mendo, 2015), por lo que no requieren combinarse con otros amortiguadores.

3.2.3 Aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (HDRB)

Se conocen como HDRB por sus siglas del inglés, High Damping Rubber Bearing. Su fabricación es similar a la de los LDRB y LRB, sin embargo, el caucho empleado tiene aditivos de distintos tipos (carbón en polvo, aceites, resinas, polímeros, etc.), los cuales incrementan la capacidad de disipar energía (Figura 3.8).

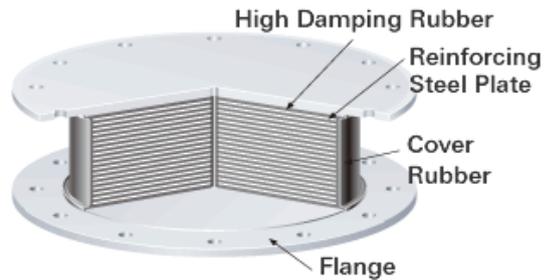


Figura 3.8. Aislador HDRB (Bridgestone, 2013)

El caucho con aditivos provee al HDRB de alta rigidez lateral para desplazamientos pequeños, con lo que logra minimizar las vibraciones bajo cargas de viento y sismos leves.

La rigidez lateral equivalente del dispositivo se obtiene de forma similar a los dispositivos anteriores. Sin embargo, como lo muestra la Figura 3.9, la nueva composición de la goma provoca que su módulo de corte dependa de la deformación angular que experimenta; este módulo disminuye para deformaciones angulares grandes.

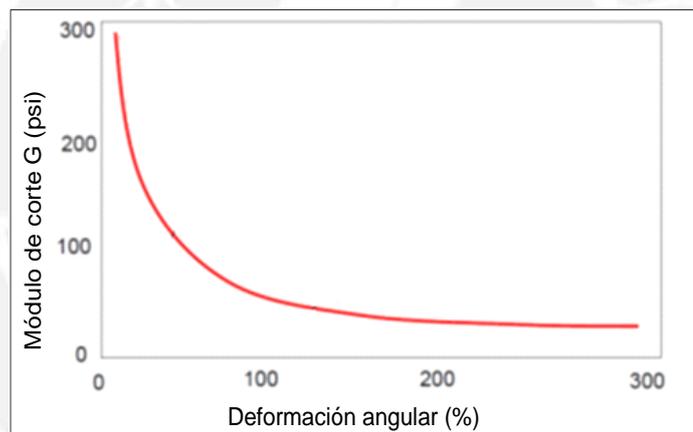


Figura 3.9. Módulo de corte Vs Deformación angular del HDRB (Symans)

El HDRB tiene la capacidad de desarrollar incursiones inelásticas. Sin embargo, tras varios ciclos de deformación las propiedades de corte y de restauración del caucho a su posición original se empiezan a degradar. Algunas causas de ello son la variación de temperatura, el incremento de la carga axial y las imprecisiones propias del proceso de fabricación del dispositivo. En estos casos se tiene un 10% de variación del valor de la rigidez efectiva (Bridgestone, 2013).

En la Figura 3.10 se muestra un ciclo fuerza-deformación de un HDRB. La capacidad de disipar energía de este dispositivo es también importante.

El porcentaje de amortiguamiento equivalente del HDRB oscila entre 10 a 20% para una deformación angular de 100%. Dado que son valores que se espera que tenga un sistema de aislamiento, no se necesitan amortiguadores adicionales. Además, el valor del módulo de corte varía entre 17 y 64 kg/cm² (Mendo, 2015). Un valor típico asumido con fines de diseño es de 40 kg/cm².

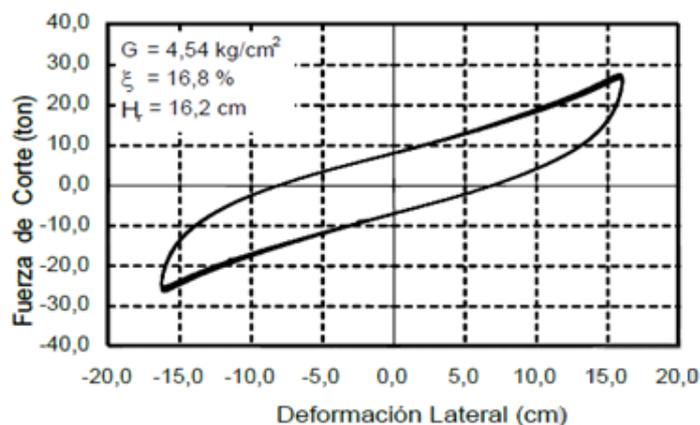


Figura 3.10. Curva de histéresis de un HDRB. (Instituto Nacional de Normalización, 2013)

La relación de rigideces K_1/K_2 es aproximadamente igual a 10 (Bridgestone, 2013). Mientras que la rigidez K_2 es fácil de obtener mediante ensayos, es complicado determinar con precisión el valor de K_1 , por lo que se recurre a valores empíricos proporcionados por los fabricantes.

La Figura 3.11 muestra, a manera de resumen y en forma superpuesta, las curvas de histéresis de los tres aisladores elastoméricos ya descritos. Se observa la diferencia en la capacidad de disipación de energía de los tres dispositivos.

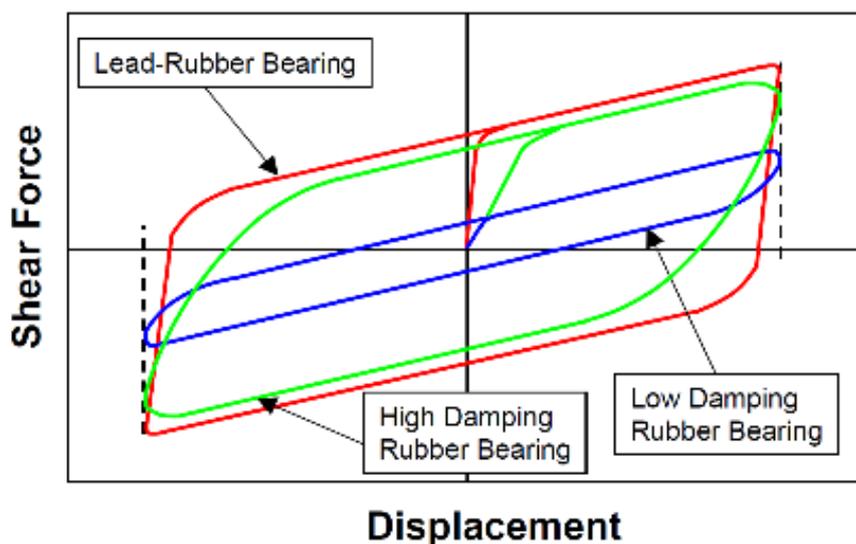


Figura 3.11. Curvas histéricas de los LDRB, LRB y HDRB para un mismo desplazamiento (Symans)

3.2.4 Deslizadores de fricción o aisladores deslizantes

Los deslizadores de fricción consisten en un disco de Teflón (Politetra Fluoro Etileno) que se desliza en una superficie plana de acero inoxidable. Pueden ser fabricados con o sin refuerzos elastoméricos (Figuras 3.12 y 3.13). Estos dispositivos tienen gran capacidad de carga, pero reducida rigidez lateral.



Figura 3.12. Deslizador de fricción (FIP Industriale, 2015)

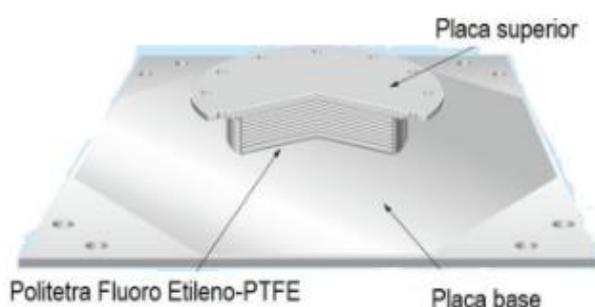


Figura 3.13. Esquema de los componentes del deslizador de fricción (Bridgestone, 2013)

Para desplazamientos grandes del sistema de aislamiento, los deslizadores disipan energía a través de la fricción entre las superficies en contacto. Este fenómeno se traduce en amortiguamiento efectivo para cuando se usa un modelo equivalente lineal elástico.

La fuerza de fricción estática impide que ocurran pequeños movimientos y vibraciones, al ser capaz de equilibrar las fuerzas que los originan. Cuando las fuerzas sísmicas logran superar a la fuerza de fricción, el dispositivo ya no impide el desplazamiento relativo de las superficies en contacto. El punto de desequilibrio de la fuerza de fricción puede entenderse como un punto de “fluencia” del dispositivo.

En la Figura 3.14 se muestra la curva de histéresis de un deslizador típico, el cual se asemeja a un comportamiento elastoplástico perfecto. Como el deslizador ya no impide el desplazamiento cuando se supera la fuerza de fricción, ya no trabaja con una rigidez lateral apreciable, lo cual se traduce en una curva horizontal.

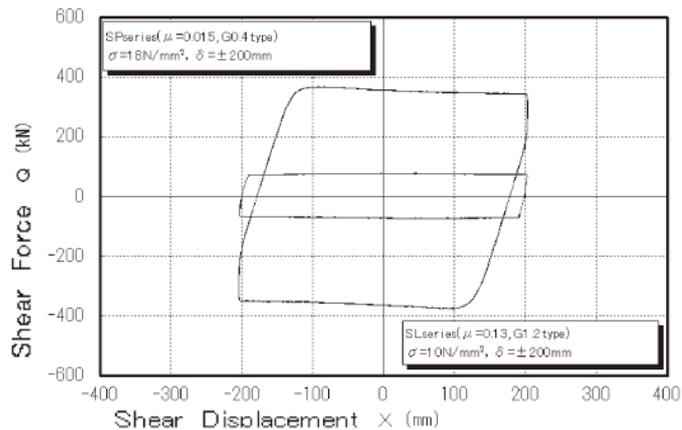


Figura 3.14. Curva de histéresis de un deslizador de fricción (Bridgestone, 2013)

Generalmente estos dispositivos son utilizados en conjunto con aisladores elastoméricos, pues no cuentan con la capacidad de restaurar a la interfaz de aislamiento a su posición original.

3.2.5 Aisladores con sistema de péndulo friccional (FPS)

El aislador FPS consiste en un deslizador articulado o cojinete que se mueve sobre una superficie de acero inoxidable, que tiene la característica de ser esférica cóncava (Figura 3.15). Este deslizador cuenta con capacidad de restitución mediante el efecto de péndulo. Este dispositivo, por contar con un solo deslizador, se denomina “simple”.

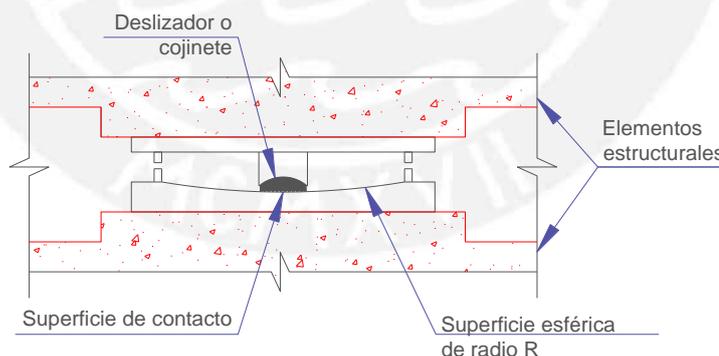


Figura 3.15. Esquema de un aislador FPS

Durante un movimiento importante, el aislador FPS se activa cuando la fuerza cortante sobre el dispositivo supera la fuerza de fricción estática. Una vez en movimiento, el deslizador articulado se mueve a lo largo de la superficie esférica disipando energía por fricción y elevando la masa que soporta, con movimientos equivalentes a los de un péndulo simple. Luego del sismo, la carga vertical que llega

al dispositivo restituye al sistema a su posición inicial por efecto de la gravedad (Figura 3.16).

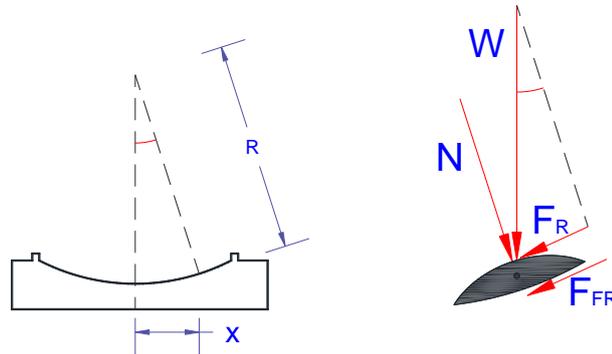


Figura 3.16. Fuerzas sobre el cojinete al desplazarse una distancia horizontal “x”.

Cuando la carga axial W se desplaza horizontalmente una distancia “ x ”, el cojinete se inclina un ángulo θ y aparece la fuerza de restauración F_R , tangente a la superficie cóncava que se determina como: $F_R = W \operatorname{sen} \theta$.

En la zona de contacto entre el cojinete y la superficie curva existe una fuerza normal N y una fuerza de fricción F_{FR} . La fuerza normal es la proyección de la carga axial sobre la perpendicular a la superficie curva: $N = W \cos \theta$

Representando por μ al coeficiente de fricción dinámico correspondiente a las superficies en contacto, la fuerza de fricción se obtiene como: $F_{FR} = \mu N = \mu W \cos \theta$

Para valores elevados del radio de curvatura, R , disminuye el efecto restitutivo del dispositivo. Si además se tienen valores altos de fricción se podría perder la capacidad de recentrado, o, durante el movimiento podrían presentarse intervalos de tiempo en que el cojinete queda “pegado” a la superficie cóncava.

Como el ángulo θ es pequeño se pueden usar las siguientes aproximaciones:

$$\operatorname{sen} \theta = \frac{x}{R} \approx \theta \quad \cos \theta \approx 1$$

Por tanto, las fuerzas restitutiva y de fricción se representan por:

$$F_R = \frac{W}{R} x(t) \quad F_{FR} = \pm \mu W$$

El signo indica el sentido de la fuerza de fricción, que es opuesto al signo de la velocidad del cojinete. La fuerza actuante en el dispositivo, F , será la suma de las fuerzas anteriores (Ec. 3.11)

$$F = \frac{W}{R} x(t) \pm \mu W \quad (3.11)$$

Y su modelo fuerza-desplazamiento se muestra en la .

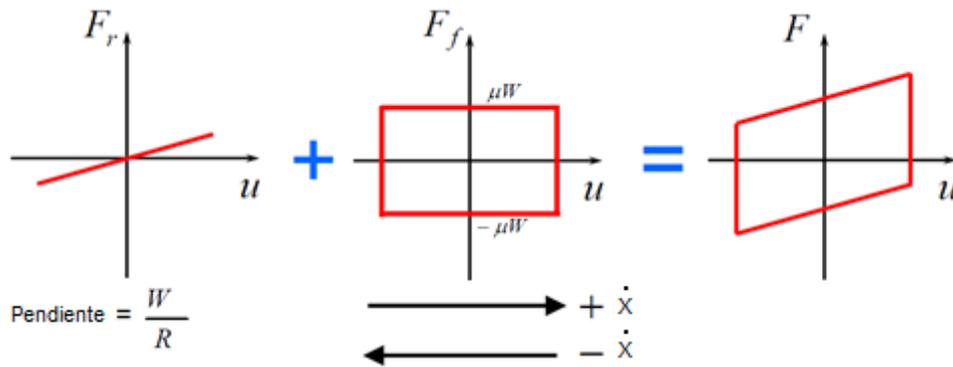


Figura 3.17. Fuerza total actuante sobre el FPS (FEMA 451)

Aisladores FPS dobles y triples

Actualmente existen aisladores FPS más complejos con dos y tres deslizadores y superficies de contacto (Figuras 3.18 y 3.19).

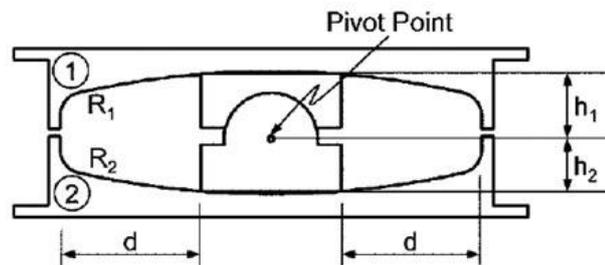


Figura 3.18. Esquema de un aislador friccional de péndulo doble (Current World Environment)

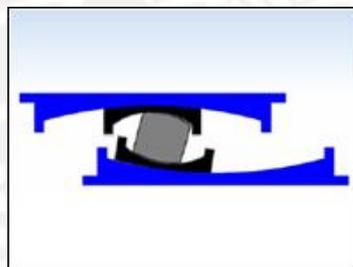


Figura 3.19. Esquema de un aislador friccional de péndulo triple (EPS, 2011)

La curva de histéresis del aislador de péndulo triple muestra distintas rigideces de acuerdo al nivel de desplazamiento que tiene el dispositivo (Figura 3.20)

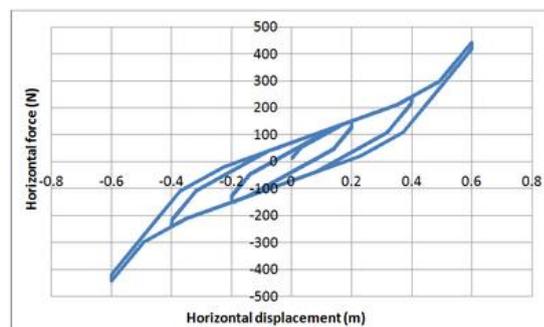


Figura 3.20. Diagrama de histéresis de un aislador de péndulo friccional triple (2012)

Capítulo 4. ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS AISLADAS

En este capítulo se presentan diferentes métodos de análisis de edificios aislados, los cuales se aplican a distintos modelos matemáticos de dichas estructuras. Para ello también se presentan diferentes formas de representar las solicitaciones a las que puede estar sometida una estructura durante un sismo.

Se presenta un edificio sencillo, con el que se desarrollará un análisis preliminar considerando que tiene base fija. Luego se analiza el edificio cuando se le incluye un sistema de aislamiento en su base, con los diferentes métodos estudiados. Finalmente se desarrolla la representación en el análisis del efecto P-delta que ocurre en el sistema de aislamiento.

4.1 Representación de las solicitaciones sísmicas

4.1.1 Registros de aceleración

Los registros de aceleración o acelerogramas de terremotos pasados son útiles para predecir teóricamente el comportamiento de una estructura durante estos eventos. Se somete a las estructuras a dichos registros para conocer su respuesta en el tiempo.

En estructuras aisladas, los registros de aceleración cobran mayor importancia en el análisis que en estructuras convencionales, dado que es necesario desarrollar un análisis no lineal debido al comportamiento altamente inelástico de los dispositivos.

Para algunos propósitos, se requiere obtener señales sintéticas a partir de las obtenidas de eventos pasados (señales semilla). Estos acelerogramas sintéticos se crean mediante procedimientos estadísticos, con la finalidad de ajustarlas de acuerdo a las necesidades del análisis.

4.1.2 Espectros de respuesta

Cuando interesa conocer solamente la respuesta elástica máxima de una estructura ante un acelerograma, puede simplificarse el problema dinámico con el uso de espectros de respuesta.

Para construir un espectro se requiere conocer la respuesta máxima que experimentan varias estructuras de un grado de libertad (1 GDL) al someter a cada

una de ellas a un movimiento sísmico en su base. Cada estructura debe tener distinto periodo fundamental de vibración, pero igual amortiguamiento estructural. Tabulando los valores obtenidos se construye la curva espectral que relaciona la respuesta máxima con el periodo de vibración de la estructura.

Mediante procedimientos numéricos, se determina el espectro de respuesta cualquier tipo de acelerograma que sea característico del sitio donde se ubicará la estructura, para cierto valor de amortiguamiento estructural.

En las estructuras aisladas se tiene al menos dos valores de amortiguamiento: de las estructuras y de la interfaz de aislamiento. En el acápite 4.6.2 se presenta la modificación del espectro de respuesta para representar este caso especial.

4.1.3 Fuerzas equivalentes

Las solicitaciones sísmicas se representan por una fuerza cortante estática equivalente en la base de una estructura, que se define como un porcentaje del peso de la estructura. Este porcentaje se obtiene del espectro de aceleraciones con el periodo fundamental de la estructura. El cortante en la base puede distribuirse en la altura de la estructura siguiendo algún criterio o forma modal.

Estas fuerzas, al tener naturaleza estática, limitan el alcance del estudio de la respuesta estructural pues los terremotos son fenómenos dinámicos. Por ejemplo, no se puede estimar historias, aceleraciones, tendencias ni diagramas de histéresis.

El uso de las fuerzas equivalentes resulta útil para estimar, de manera rápida y sencilla, la respuesta de una estructura cuyo modelo también sea sencillo. Los códigos de diseño sísmico aceptan su uso para estructuras aisladas regulares bajas.

4.2 Análisis preliminar de un edificio con base fija

Como primer paso para el análisis de un edificio aislado se realiza el análisis modal del mismo edificio, pero con base fija, para obtener sus periodos fundamentales en cada dirección de análisis.

Ejemplo de aplicación

El edificio ejemplo consta de 5 pisos sin sótanos, y cuenta con un sistema estructural de pórticos de concreto armado (Figura 4.1). El uso del edificio es para un hospital, el cual se ubica en Lima sobre un suelo bueno. Sus características son las siguientes:

- Altura de piso a piso típica de 4 m
- Vigas de 30 x 70 cm
- Columnas cuadradas de 70 cm de lado, espaciadas cada 6 m.
- Losas de techo de 20 cm de peralte.
- Los elementos de concreto tienen un $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ y un $E = 2.2 \times 10^6 \text{ Ton/m}^2$.
- El amortiguamiento del edificio ξ_s se asumió en 5%.
- Cargas muertas:
 - Peso propio de los elementos de concreto, de 2400 kg/m^3 .
 - Piso terminado de 100 kg/m^2 en toda el área.
 - Tabiquería fija, de aproximadamente 250 kg/m^2 , solo en los pisos típicos. En la azotea no hay tabiquería.
- Cargas vivas:
 - Sobrecarga de 300 kg/m^2 en el piso típico.
 - En la azotea la sobrecarga será de 100 kg/m^2 .

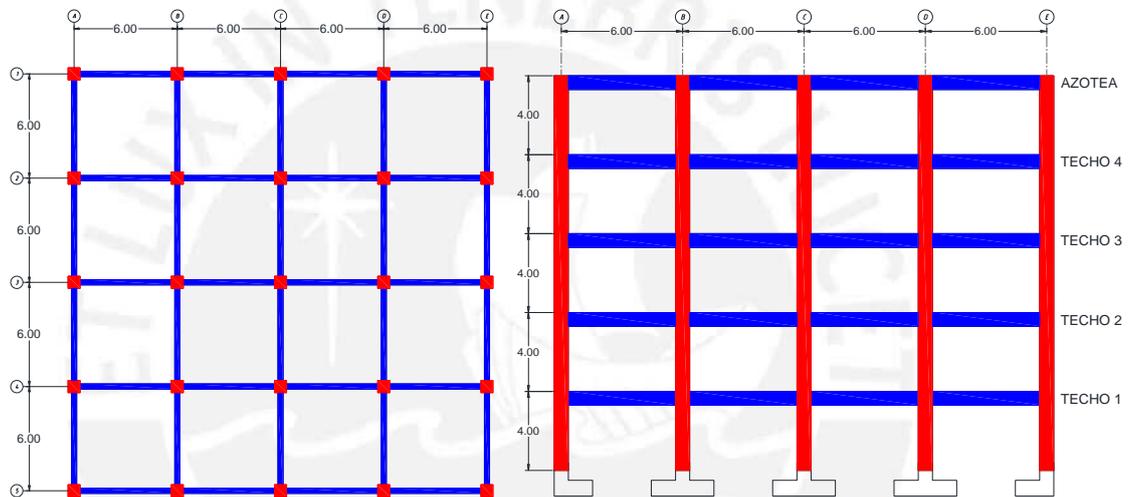


Figura 4.1. Planta y elevación típicas del edificio ejemplo

Las cargas muerta y viva de cada nivel se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Pesos del edificio

Techo	Carga muerta (Ton)	Carga viva (Ton)
Losa aislamiento	744	173
Techo 1	704	173
Techo 2	704	173
Techo 3	704	173
Techo 4	704	173
Azotea	501	58

Los códigos de diseño sísmico consideran que la masa de la estructura que actuará durante un sismo será igual a la carga muerta más un porcentaje de la carga viva. En el presente ejemplo se consideró un 50% de carga viva por tratarse de un hospital. En la Tabla 4.2 se muestra la masa de cada nivel así calculada.

Tabla 4.2. Masas de cada piso del edificio

Techo	Carga muerta (Ton.s ² /m)	Carga viva (50%) (Ton.s ² /m)	Masa (CM + 50% CV) (Ton.s ² /m)
Losa aislamiento	75.9	8.8	84.7
Techo 1	71.8	8.8	80.6
Techo 2	71.8	8.8	80.6
Techo 3	71.8	8.8	80.6
Techo 4	71.8	8.8	80.6
Azotea	51.1	2.9	54.0

Para estimar el periodo de la estructura con base fija se elaboró un modelo tridimensional lineal elástico. Se consideraron 3 grados de libertad por cada techo, cada uno de los cuales constituyen diafragmas rígidos. Todas las columnas se conectaron en su base con vigas, las cuales luego formarán parte de la plataforma superior de aislamiento del edificio aislado. La base de cada columna se articuló; el detalle de las articulaciones se muestra en la Figura 4.2.

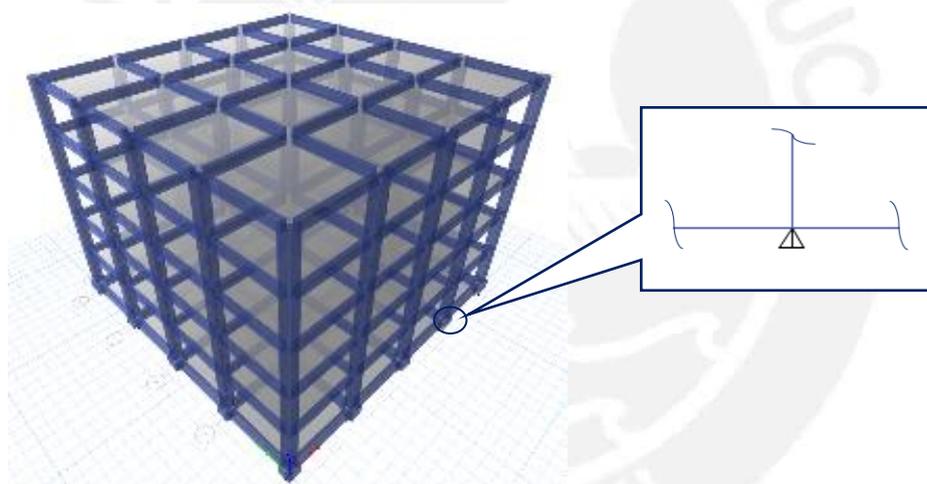


Figura 4.2. Vista tridimensional del modelo elástico del edificio ejemplo

En la Tabla 4.3 se muestran los periodos y porcentajes de masa efectiva de los tres primeros modos de vibración del edificio con base fija. El periodo fundamental del edificio con base fija (T_1) para cada dirección de análisis (X-Y), es igual a 0.88 s.

Tabla 4.3. Tres primeros modos de vibración del edificio con base fija

Modo	Periodo (s)	%L ² /M	%L ² /M
		(X-X)	(Y-Y)
1	0.878	81.70%	1.63%
2	0.878	1.63%	81.70%
3	0.769	0.00%	0.00%

4.3 Análisis por el método estático o de la fuerza equivalente.

Este método consiste en aplicar un sistema de fuerzas a una estructura, la cual aproxima las solicitaciones que aparecerán durante un movimiento sísmico.

Dependiendo del tipo de modelo que se utiliza para aplicar este método, puede emplearse tanto para un prediseño del sistema de aislamiento de un edificio aislado, como para hacer un diseño completo del sistema bajo ciertas condiciones.

En el presente trabajo solo se presentará el desarrollo de este método utilizando un modelo de 1 GDL, pues para modelos de varios GDL se prefiere utilizar los métodos con naturaleza dinámica.

4.3.1 Modelo de un grado de libertad

Dado que, durante un sismo, los desplazamientos relativos de entrepiso de la superestructura son muy reducidos en comparación al desplazamiento de la interfaz de aislamiento, se puede simplificar el análisis de un edificio aislado utilizando un modelo de 1 GDL.

Sea un edificio aislado de “n” pisos. Se puede suponer que la superestructura se desplaza como un sólido rígido, junto con la plataforma superior del sistema de aislamiento. Asimismo, la interfaz de aislamiento bajo el sólido rígido puede considerarse lineal elástico, con un amortiguamiento efectivo ξ_b y rigidez efectiva k_b . La masa de la superestructura, m_s , es igual a la suma de las masas de los “n” pisos de la superestructura ($m_s = \sum_{i=1}^n m_i$), mientras que la masa del sistema de aislamiento se representa por m_b (Figura 4.3).

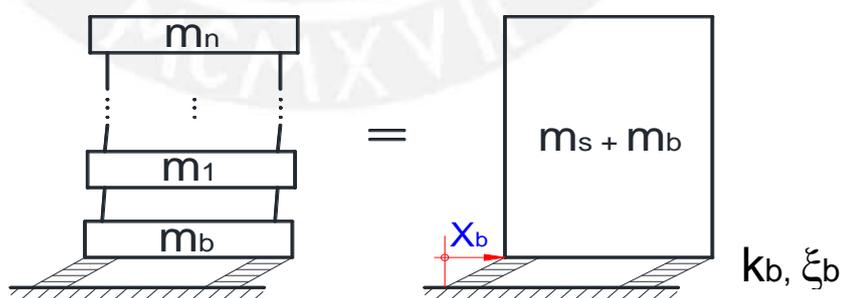


Figura 4.3. Modelo de un edificio aislado y su equivalente de 1 GDL

4.3.2 Análisis del sistema de aislamiento

Al emplear el modelo del sólido rígido en el análisis, se puede estimar el periodo fundamental del sistema de aislamiento con la Ec. 4.1:

$$T_b = 2\pi \sqrt{\frac{m_s + m_b}{k_b}} \quad (4.1)$$

El coeficiente de amortiguamiento C_b del sistema de aislamiento puede expresarse en función del porcentaje de amortiguamiento efectivo ξ_b y la frecuencia angular del sistema de aislamiento $\omega_b = 2\pi/T_b$ (Ec. 4.2):

$$C_b = \xi_b 2(m_s + m_b)\omega_b = \xi_b 2\sqrt{(m_s + m_b)k_b} \quad (4.2)$$

La fuerza sísmica en la base de la estructura se expresa en la Ec. 4.3:

$$V_b = CS \cdot \frac{W}{B} = \frac{CS}{B} (m_s + m_b)g \quad (4.3)$$

Dónde: CS es el coeficiente sísmico de la estructura, que representa el porcentaje del peso que se considerará como carga lateral. Este coeficiente suele extraerse de espectros de los códigos de diseño.

B es un coeficiente de reducción de solicitaciones sísmicas debido al amortiguamiento ξ_b . Este coeficiente se ha obtenido de promedios estadísticos para espectros con amortiguamientos distintos (Villagomez, 2015).

Y el desplazamiento del sistema de aislamiento se estima con la Ec. 4.4:

$$X_b = \frac{V_b}{k_b} = \frac{V_b}{g \omega_b^2} \quad (4.4)$$

La respuesta sísmica obtenida con las ecuaciones anteriores es conservadora, pues no considera la flexibilidad de la superestructura en el análisis. Sin embargo, sí es posible obtener una estimación del periodo aislado del edificio, información útil para emplear otros métodos de análisis con naturaleza dinámica.

Ejemplo de aplicación

Para que el edificio aislado presente una respuesta sísmica reducida en comparación con el edificio con base fija, se decidió que el periodo objetivo del sistema de aislamiento sea aproximadamente 3 veces el periodo de la estructura con

base fija. Dado que T_f es igual a 0.88 s, se decidió que el periodo objetivo T_b sea de 2.6 s.

En la Tabla 4.4 se muestran los resultados del análisis estático. El coeficiente B se extrajo de la Norma ASCE 7-10 (American Society of Civil Engineers, 2010). El coeficiente sísmico CS se extrajo del espectro de la Norma E.030 Diseño Sismorresistente (SENCICO, 2016), considerando que $Z = 0.45$, $U = S = R = 1$.

Tabla 4.4. Resultados del análisis estático

Masa total (m_s+m_b)	461.12	Ton.s ² /m
Periodo T_b	2.6	s
Rigidez k_b (Ec. 4.1)	2693	Ton.s/m
% Amortiguamiento ξ_b	15	%
Coeficiente B	1.35	
Coeficiente C_b (Ec. 4.2)	334.31	Ton.s
Coeficiente CS (Norma E.030)	0.166	
V_b (Ec. 4.3)	556	ton
X_b (Ec. 4.4)	20.7	cm

4.3.3 Análisis de la superestructura

Para el análisis de la superestructura se utiliza el modelo mostrado en la Figura 4.3. El cortante basal se distribuye en la altura del edificio asumiendo una forma de vibración del edificio, de manera que el sistema de fuerzas se asemeje a la forma asumida. Resolviendo el edificio para el sistema de fuerzas se haya la respuesta de desplazamientos y fuerzas en los elementos estructurales. Los códigos de diseño sísmico proveen criterios de distribución del cortante basal en altura.

Ejemplo de aplicación

En el edificio ejemplo el cortante basal " V_b " de 556 Ton se distribuyó en la altura utilizando la expresión de la Ecuación 17.5-8 de la Norma ASCE 7-10:

$$F_x = \frac{V_b w_x h_x}{\sum_{i=1}^n w_i h_i}$$

Donde: F_x es la fuerza a un nivel "x" respecto a la base.
 w_x es la porción del peso total del edificio (CM + 0.5CV) en el nivel "x".
 h_x es la altura del nivel "x" respecto a la base

La Tabla 4.5 muestra la distribución del cortante basal para la dirección X-X, la cual es igual para la otra dirección Y-Y. Esta distribución resulta creciente en la altura, salvo en la azotea donde por la diferencia de masa la fuerza es menor.

Tabla 4.5. Distribución del cortante en la altura

Techo	w_x (Ton)	h_x (m)	$w_x \cdot h_x$ (Ton.m)	V_s (Ton)	F_x (Ton)
Techo 1	790.65	4	3162.6	556	42
Techo 2	790.65	8	6325.2	556	83
Techo 3	790.65	12	9487.8	556	125
Techo 4	790.65	16	12650.4	556	167
Azotea	530.1	20	10602	556	140

No se calcularon los desplazamientos y fuerzas internas en los elementos estructurales, pues para este fin se prefirió emplear otros métodos de análisis.

4.4 Introducción al Análisis dinámico: Modelo de 2 grados de libertad

Como paso previo al estudio del análisis dinámico de edificios aislados, se presentará el análisis modal de un modelo de 2 grados de libertad, con la finalidad de mostrar ciertos parámetros y tendencias importantes en la respuesta de los edificios aislados ante movimientos en su base.

El modelo de 2 grados de libertad fue desarrollado por Naeim y Kelly, y publicado en el libro “Design of Seismic Isolated Structures from Theory to Practice” el año 1999.

4.4.1 Dinámica de una estructura de 2 grados de libertad

La Figura 4.4 muestra el modelo sencillo de una estructura aislada de un piso, de rigidez k_s , amortiguamiento ξ_s y masa m_s , sobre una plataforma de aislamiento de masa m_b que a su vez se encuentra sobre una interfaz de rigidez k_b y amortiguamiento ξ_b .

El modelo tiene 2 grados de libertad dinámicos: en la plataforma de aislamiento y en el techo. El sistema de coordenadas a utilizar será aquel que considere desplazamientos relativos entre el techo de la estructura y la base aislada, y entre la base aislada y el suelo.

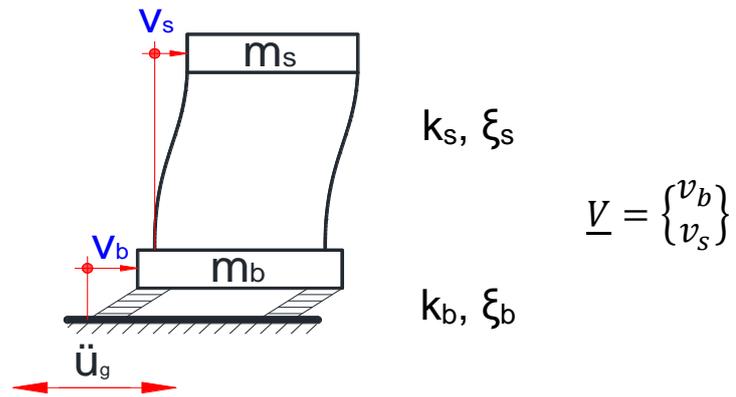


Figura 4.4. Modelo de 2 GDL sobre la que actúa una aceleración basal \ddot{u}_g .

Si la estructura se somete a una aceleración \ddot{u}_g en su base, la ecuación matricial de equilibrio dinámico, en función del sistema de coordenadas \underline{V} , estará dada por la expresión de la Ec. 4.5:

$$\underline{\hat{M}} \ddot{\underline{V}} + \underline{\hat{C}} \dot{\underline{V}} + \underline{\hat{K}} \underline{V} = -\underline{\hat{M}} \hat{r} \ddot{u}_g \quad (4.5)$$

Siendo $\underline{\hat{M}}$ la matriz de masas de la estructura, $\underline{\hat{C}}$ la matriz de amortiguamiento y $\underline{\hat{K}}$ la matriz de rigidez lateral correspondiente a los 2 GDL considerados.

$$\underline{\hat{M}} = \begin{bmatrix} m_s + m_b & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix} \quad \underline{\hat{K}} = \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix}$$

$$\underline{\hat{C}} = \begin{bmatrix} C_b & 0 \\ 0 & C_s \end{bmatrix} \quad \hat{r} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

4.4.2 Análisis modal

Para determinar los modos de vibración de la estructura de 2 GDL se supondrá que no tiene amortiguamiento y se encuentra en vibración libre. La Ec. 4.5 de equilibrio dinámico se reduce a la expresión de la Ec. 4.6:

$$\underline{\hat{M}} \ddot{\underline{V}} + \underline{\hat{K}} \underline{V} = \underline{0} \quad (4.6)$$

La solución de la Ec. 4.6 en función de cada instante de tiempo "t" se presenta en la Ec. 4.7:

$$\underline{V} = A \text{ sen}(\omega t) \underline{\phi} \quad (4.7)$$

Donde A es una constante y ω es la frecuencia angular asociada a la forma de vibrar $\underline{\phi}$ de la estructura. Reemplazando la Ec. 4.7 en la Ec. 4.6 y simplificando se obtiene:

$$(\underline{\hat{K}} - \omega^2 \underline{\hat{M}}) \underline{\phi} = 0 \quad (4.8)$$

Resolviendo la Ec. 4.8 se obtienen las frecuencias nominales de las Ecs. 4.9 y 4.10:

$$\omega_b^2 = \frac{k_b}{m_b + m_s} \quad , \quad \omega_s^2 = \frac{k_s}{m_s} \quad (4.9) \text{ y } (4.10)$$

Definiendo la relación de masas γ y la relación de periodos ϵ en las Ecs. 4.11 y 4.12:

$$\gamma_m = \frac{m_s}{m_b + m_s} \quad , \quad \epsilon = \left(\frac{\omega_b}{\omega_s}\right)^2 = \left(\frac{T_s}{T_b}\right)^2 \quad (4.11) \text{ y } (4.12)$$

Cuando los valores de ϵ son pequeños, se obtienen las frecuencias de las Ecs. 4.13 y 4.14:

$$\omega_1^2 = \omega_b^2(1 - \epsilon\gamma) \quad , \quad \omega_2^2 = \frac{1 + \epsilon\gamma}{1 - \gamma} \omega_s^2 \quad (4.13) \text{ y } (4.14)$$

Conocidas estas frecuencias es posible obtener las formas modales de las Ec. 4.15 y 4.16, cuya representación gráfica se muestra en la Figura 4.5.

$$\underline{\phi}_1 = \begin{Bmatrix} 1 \\ \epsilon \end{Bmatrix} \quad , \quad \underline{\phi}_2 = \begin{Bmatrix} 1 \\ -\frac{1}{\gamma}[1 - (1 - \gamma)\epsilon] \end{Bmatrix} \quad (4.15) \text{ y } (4.16)$$

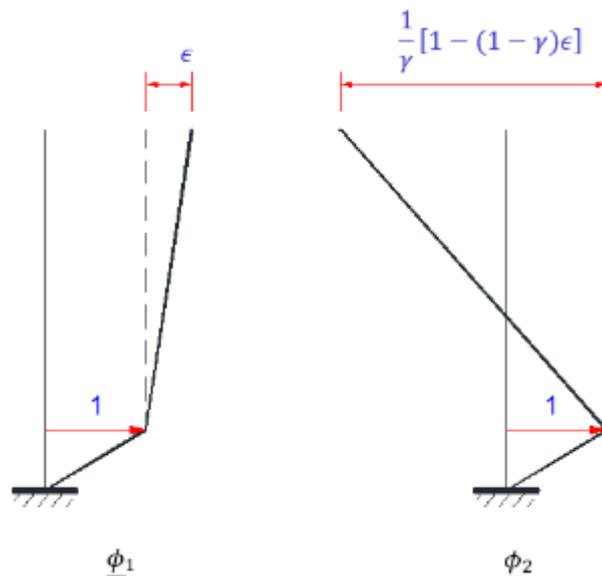


Figura 4.5. Formas de vibración de la estructura de 2 GDL

La primera forma de vibrar muestra que, para un desplazamiento unitario en el sistema de aislamiento, el techo del primer piso solo se mueve una distancia adicional ϵ . Se deduce que es conveniente que el valor de ϵ sea lo más pequeño posible, lo cual se logra haciendo que el periodo de vibración T_b sea mayor que T_s .

La segunda forma de vibrar corresponde al efecto de la flexibilidad de la superestructura en la respuesta, y se asemeja a la deformada de una estructura con base fija relativa al sistema de aislamiento.

Los periodos de vibración modales se muestran en las Ecs. 4.16 y 4.17.

$$T_1 = T_b \frac{1}{\sqrt{1 - \epsilon\gamma}} \quad , \quad T_2 = T_s \sqrt{\frac{1 - \gamma}{1 + \gamma\epsilon}} \quad (4.16) \text{ y } (4.17)$$

El periodo de vibración del sistema de aislamiento, T_1 , se puede estimar con la Ec. 4.16, donde el periodo T_b (Ec. 4.1) se ve afectado por un factor $\frac{1}{\sqrt{1 - \epsilon\gamma}}$, el cual toma en cuenta las propiedades de rigidez y masa de la superestructura.

Empleando las formas y periodos de vibración anteriores se obtienen los factores de participación de las Ecs. 4.18 y 4.19:

$$\frac{L_1^*}{M_1^*} = 1 - \gamma\epsilon \quad (4.18)$$

$$\frac{L_2^*}{M_2^*} = \gamma\epsilon \quad (4.19)$$

Se observa que el factor de participación del primer modo es considerablemente mayor que el del segundo, pues el producto $\gamma\epsilon$ es muy pequeño. Por tanto, se deduce que la dinámica de una estructura aislada estará prácticamente gobernada por la dinámica del sistema de aislamiento.

El amortiguamiento con el que responde cada modo está dado por la Ec. 4.20:

$$\xi_i = \frac{C_i^*}{2 \omega_i M_i^*} \quad (4.20)$$

Luego, para cada modo se obtienen los amortiguamientos de las Ecs. 4.21 y 4.22:

$$\xi_1 = \xi_b \left(1 - \frac{3}{2} \gamma \epsilon\right) \quad (4.21)$$

$$\xi_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \gamma}} (\xi_s + \gamma \epsilon^{1/2} \xi_b) \left(1 - \frac{\gamma\epsilon}{2}\right) \quad (4.22)$$

De la misma forma que con los periodos de vibración, el amortiguamiento del sistema de aislamiento ξ_1 será igual al considerado para el modelo de 1 GDL, ξ_b , pero afectado por un factor $\left(1 - \frac{3}{2} \gamma \epsilon\right)$ que disminuye su valor. Asimismo, el amortiguamiento de la superestructura ξ_2 es mayor que la asumida inicialmente, ξ_s .

Es posible extender el análisis modal realizado para modelos de varios GDL. Sin embargo, las bases para la comprensión del comportamiento dinámico seguirán siendo las mismas que las aplicadas para el modelo de 2 GDL. Para estructuras de varios GDL, en adelante se define el parámetro “épsilon” (ϵ) como el *cociente entre el desplazamiento de la azotea y del sistema de aislamiento*.

4.5 Representación de los aisladores en un modelo estructural

Cuando se desea elaborar modelos tridimensionales de edificios aislados es necesario representar la distribución espacial de la rigidez y del amortiguamiento predimensionados con modelos sencillos, a través de dispositivos puntuales.

Los dispositivos pueden ser modelados como elementos de conexión entre dos puntos. En el caso de los aisladores los puntos de conexión serán los pedestales sobre y debajo de la interfaz de aislamiento cuando se tienen sótanos (Figura 4.6), o el pedestal sobre el dispositivo y la zapata bajo el dispositivo (Figura 4.7).

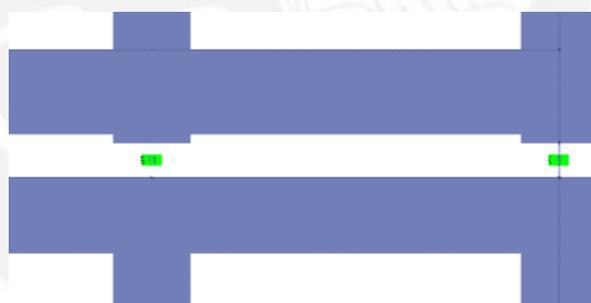


Figura 4.6. Modelo del sistema de aislamiento cuando se cuenta con sótanos.

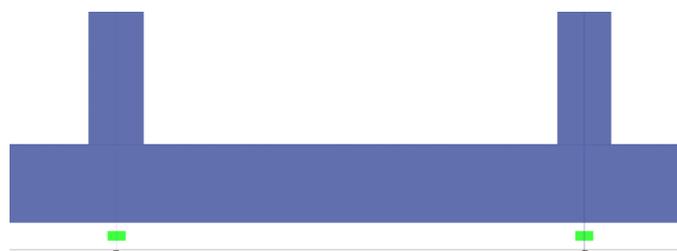


Figura 4.7. Modelo del sistema de aislamiento cuando no se cuenta con sótanos.

Un elemento de conexión está compuesto por 6 resortes, cada uno de los cuales corresponde a 3 grados de libertad traslacionales y 3 rotacionales. Los

resortes horizontales proporcionan las características al sistema de aislamiento. La rigidez del resorte vertical es generalmente muy elevada y se emplea para el análisis por vibraciones verticales del edificio. Generalmente las direcciones laterales se refieren como “2” y “3” y la vertical como “1” (Figura 4.8).

En el rango inelástico, se podrá asignar a los grados de libertad laterales curvas constitutivas específicas del tipo de dispositivo. Por ejemplo, en el caso de los aisladores elastoméricos, los grados de libertad lateral se suelen representar mediante modelos bilineales y para el grado de libertad vertical es suficiente un modelo lineal.

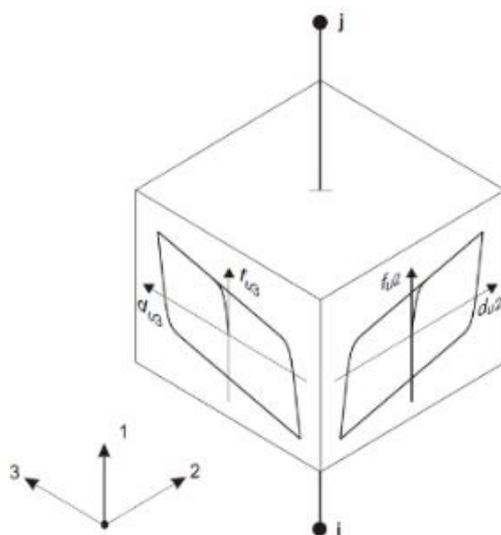


Figura 4.8. Modelo de un aislador con puntos extremos i-j. (Computers & Structures Inc., 2015).

Para un modelo lineal equivalente del sistema de aislamiento, solo bastará definir la rigidez lateral y el amortiguamiento equivalente de cada dispositivo.

En los dispositivos elastoméricos, las propiedades de los resortes laterales no dependen de la carga que actúa en la coordenada vertical. Sin embargo, en los dispositivos friccionales sí existe dependencia de la rigidez lateral con la carga.

En la mayoría de los casos, para analizar los dispositivos solo hace falta trabajar con los dos grados de libertad de deformación lateral y el de deformación vertical.

4.6 Modelo elástico de un edificio aislado

Se emplea un modelo tridimensional en el cual se representan los elementos estructurales de todo el edificio y los dispositivos.

Como se espera que la estructura del edificio no tenga daño significativo durante un sismo raro, se acepta un modelo lineal con secciones brutas para la estructura. Los dispositivos se modelan con rigidez y amortiguamiento equivalente.

4.6.1 Estructura

Para un edificio aislado, se desarrolla un modelo tridimensional donde los elementos estructurales se consideran elásticos, con deformaciones por flexión, carga axial y fuerza cortante. Cada piso del edificio y la plataforma de aislamiento se consideran como diafragmas rígidos con tres grados de libertad (dos traslacionales y uno rotacional). La parrilla inferior de vigas, si existiera, no constituye un diafragma rígido.

4.6.2 Sistema de aislamiento

El trabajo en conjunto de todos los dispositivos debe reproducir la rigidez k_b y el porcentaje de amortiguamiento ξ_b globales de la interfaz de aislamiento.

La rigidez k_b debe distribuirse preliminarmente en cada dispositivo siguiendo alguna regla práctica, como por ejemplo repartiéndola por igual en cada aislador. Posteriormente la distribución de rigideces se ajusta en la etapa de diseño del sistema de aislamiento, para cumplir los requisitos de los códigos. Por tanto, este proceso tiene naturaleza iterativa y no existe una solución única.

El amortiguamiento equivalente del sistema de aislamiento puede ser representado de dos formas, para cuando se desea realizar un análisis espectral y tiempo-historia:

a) Mediante el coeficiente C_{bi} de amortiguamiento de cada dispositivo

Conociendo el valor del porcentaje de amortiguamiento ξ_b de la interfaz de aislamiento, se determina el coeficiente de amortiguamiento C_b mediante la ecuación 4.2. Este coeficiente se distribuye en cada dispositivo siguiendo un criterio similar para la rigidez, y se obtiene un valor C_{bi} para cada aislador.

b) Diferenciación del amortiguamiento modal

Cuando se realiza el análisis modal de una estructura aislada, es posible identificar aquellos modos en donde predomina la deformación del sistema de aislamiento, y aquellos otros en donde predomina la deformación de la superestructura, relativa al sistema de aislamiento. A cada uno de los modos asociados al sistema de aislamiento se les asigna el porcentaje de

amortiguamiento ξ_b , y para el resto de modos se suele considerar entre 2% a 5% de amortiguamiento, valores típicos en los edificios.

Para el caso del análisis espectral se puede representar el efecto del amortiguamiento con una reducción del espectro en la zona que corresponde a los periodos asociados a la deformación de los dispositivos.

c) Modificación del espectro de respuesta

Todos los modos de vibración trabajan con el amortiguamiento del edificio, y se reducen los valores espectrales en la zona correspondiente a los periodos de los modos aislados por el coeficiente "B_D". La Figura 4.9 muestra un espectro elástico reducido por amortiguamiento en la zona de periodos del sistema de aislamiento.

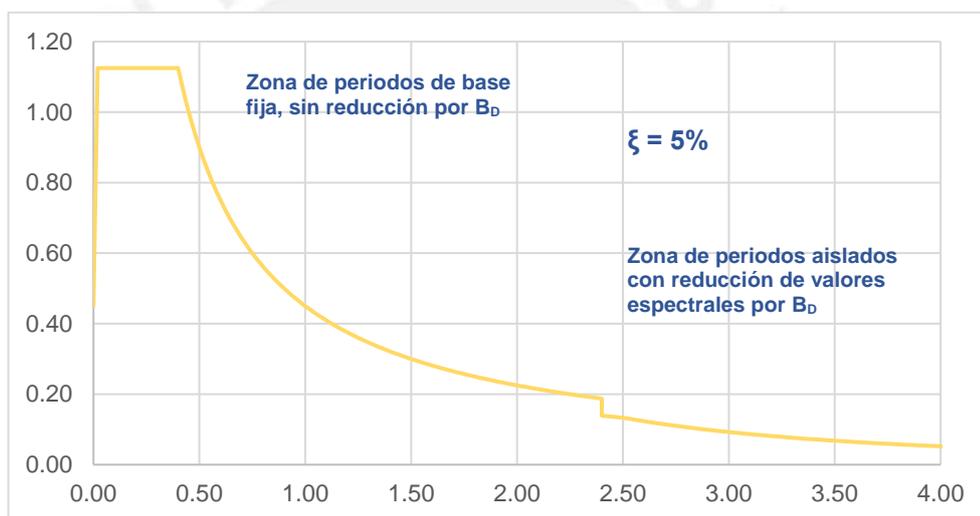


Figura 4.9. Espectro de pseudo-aceleración reducido por amortiguamiento.

Ejemplo de aplicación

La Figura 4.10 muestra el detalle de la interfaz de aislamiento que fue colocado en el modelo tridimensional del edificio con base fija.

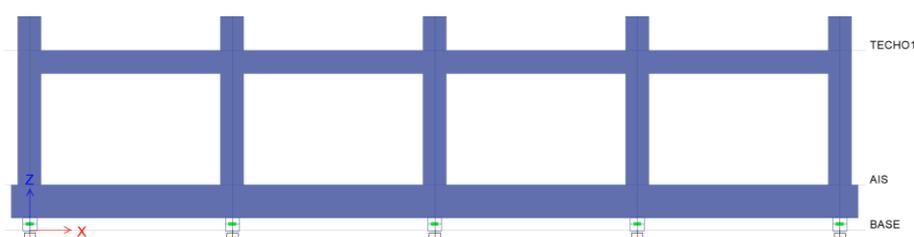


Figura 4.10. Interfaz bajo la plataforma superior y columnas del primer nivel

Para este ejemplo se decidió que la rigidez de la interfaz k_b , se distribuya en cada dispositivo (k_{bi} , $\sum k_{bi} = k_b$) en forma equitativa. La rigidez k_{bi} resultó igual a 107.72 Ton/m. Luego se calculó el coeficiente de amortiguamiento de la interfaz de aislamiento, C_b , y se distribuyó por igual en cada dispositivo, C_{bi} .

$$C_b = \xi_b 2\sqrt{(m_s + m_b)k_b} = 0.15 \times 2 \times \sqrt{461.12 \times 2692.94} = 334.304 \text{ Ton. s/m}$$

$$C_{bi} = 13.37 \text{ Ton. s/m}$$

4.7 Análisis elástico de edificios aislados

4.7.1 Análisis modal

El análisis modal consiste en evaluar las formas y periodos naturales que pueda presentar un edificio aislado en vibración libre, cuando los aisladores y los elementos estructurales no tienen amortiguamiento.

En un edificio aislado de n pisos se tienen $n + 1$ diafragmas, por lo que se tendrán $3(n+1)$ modos de vibración. Los tres primeros modos corresponden a la traslación y giro en planta del sistema de aislamiento. Los demás modos corresponden a la deformación de la superestructura respecto a la base aislada.

Este análisis se aplica para evaluar la eficiencia del aislamiento de la superestructura a través del cociente épsilon (ϵ). Asimismo, se revisa que la respuesta del sistema de aislamiento sea predominantemente en traslación para evitar problemas de torsión en planta.

Ejemplo de aplicación

Las Figuras 4.11, 4.12 y 4.13 muestran las formas de los cuatro primeros modos de vibración del edificio aislado.

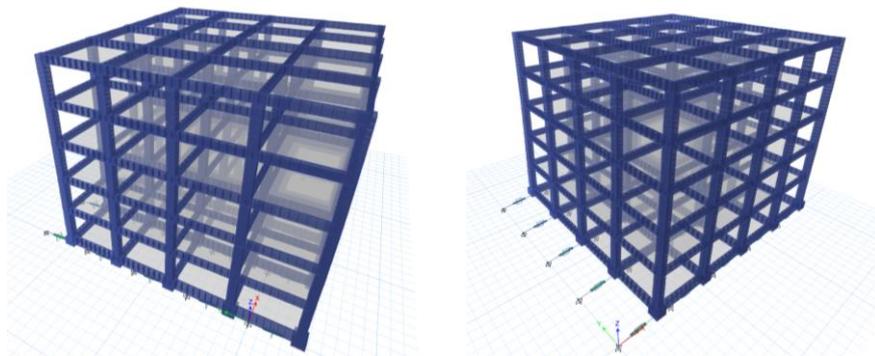


Figura 4.11. Primera y segunda forma (traslación del sistema de aislamiento)

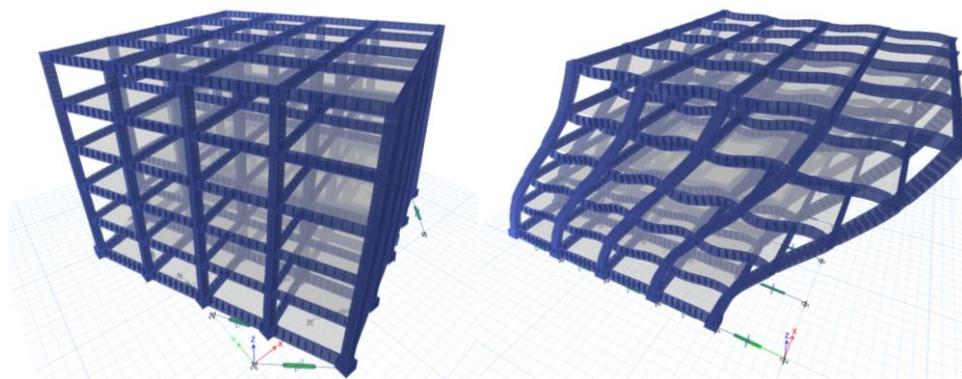


Figura 4.12. Izquierda: tercera forma (rotación del sistema de aislamiento).

Figura 4.13. Derecha: cuarta forma (deformación de la superestructura relativa al sistema de aislamiento).

La Tabla 4.6 muestra a la derecha los modos de vibración del edificio aislado, y del edificio con base fija a la izquierda. En verde se muestran los periodos del sistema de aislamiento, mientras que el resto de modos en amarillo corresponden a la deformación de la superestructura, correspondiéndose entre sí (el primer modo con base fija y el cuarto con base aislada, y así sucesivamente).

Tabla 4.6. Modos de vibración del edificio con base fija y aislado

Edificio con base fija				Edificio aislado			
Modo	Periodo (s)	%L ² /M (X-X)	%L ² /M (Y-Y)	Modo	Periodo (s)	%L ² /M (X-X)	%L ² /M (Y-Y)
1	0.878	81.70%	1.63%	1	2.716	0.00%	99.73%
2	0.878	1.63%	81.70%	2	2.716	99.73%	0.00%
3	0.769	0.00%	0.00%	3	2.596	0.00%	0.00%
4	0.27	10.67%	0.01%	4	0.503	0.00%	0.26%
5	0.27	0.01%	10.67%	5	0.503	0.26%	0.00%
6	0.238	0.00%	0.00%	6	0.439	0.00%	0.00%
7	0.145	0.02%	3.92%	7	0.226	0.00%	0.01%
8	0.145	3.92%	0.02%	8	0.226	0.01%	0.00%
9	0.128	0.00%	0.00%	9	0.199	0.00%	0.00%
10	0.094	0.00%	1.62%	10	0.133	0.00%	0.00%
11	0.094	1.62%	0.00%	11	0.133	0.00%	0.00%
12	0.084	0.00%	0.00%	12	0.118	0.00%	0.00%
13	0.071	0.42%	0.00%	13	0.09	0.00%	0.00%
14	0.071	0.00%	0.72%	14	0.09	0.00%	0.00%
15	0.064	0.00%	0.00%	15	0.08	0.00%	0.00%
				16	0.071	0.00%	0.00%
				17	0.071	0.00%	0.00%
				18	0.063	0.00%	0.00%

Se encontró que los dos primeros modos aislados tienen un porcentaje de masa efectiva casi del 100% y el tercer modo aislado casi no aporta. Estos resultados se deben a que no existe excentricidad natural ni accidental en la planta de la losa aislada. Si existieran excentricidades, el porcentaje de masa efectiva del tercer modo se incrementaría, disminuyendo las de los primeros modos.

Los dos primeros periodos aislados son del orden de 3.2 veces los periodos fundamentales del edificio con base fija. Para el modelo de 1 GDL se había considerado una relación entre periodos de 3, sin embargo, con el modelo tridimensional se obtuvo una mayor relación debido a la flexibilidad de la superestructura.

La cuarta y quinta forma de vibrar, correspondientes a la traslación de superestructura relativa al sistema de aislamiento en cada dirección de análisis, son muy similares a la segunda forma del modelo de 2 GDL (Figura 4.5). Los periodos de estos modos son iguales a 0.503 s.

Luego de revisar el resto de formas de vibrar del edificio aislado, se concluyó que las formas de los modos superiores al sistema de aislamiento se asemejan a las formas del edificio con base fija.

En el caso de los periodos, se observó que el periodo del cuarto modo con base aislada es menor que el correspondiente con base fija; asimismo, con cada uno de los modos restantes, se observó que el periodo también se redujo, pero la diferencia con el periodo del modo correspondiente del edificio con base fija va acortándose conforme se analizan modos cada vez más superiores. En los últimos modos la diferencia es nula. Este comportamiento se visualiza en la Tabla 4.6.

La Figura 4.14 muestra un espectro elástico reducido por amortiguamiento, sobre el que se ubicaron los periodos de la estructura con base fija y aislada.

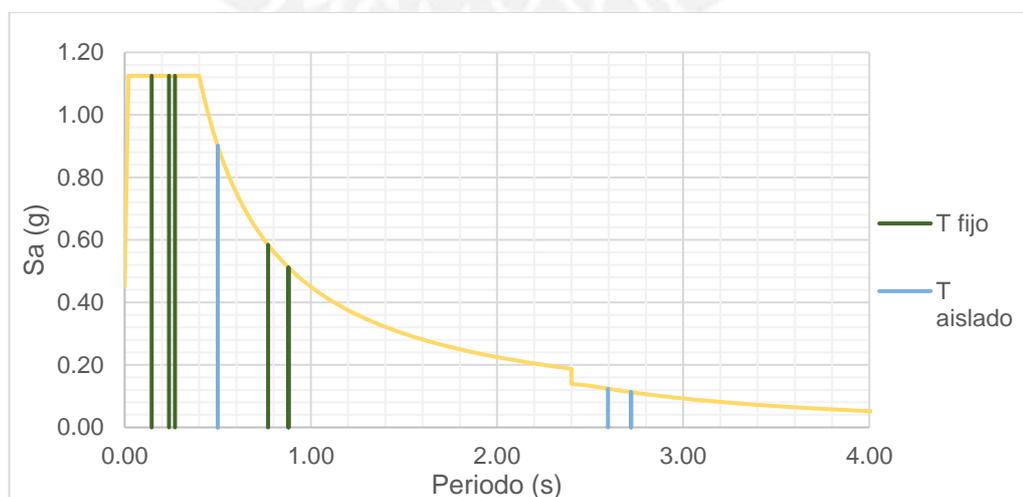


Figura 4.14. Periodos con base fija y aislada del edificio ejemplo

4.7.2 Respuesta espectral

Este método permite conocer la máxima respuesta sísmica de una estructura, tras someterlo a un movimiento representado por un espectro de respuesta en su base. El método emplea algún criterio de combinación de modos de vibración para encontrar dicha respuesta.

La máxima respuesta sísmica incluye desplazamientos, aceleraciones y cortante en el sistema de aislamiento; desplazamientos, derivas, cortante de entrepiso y aceleraciones en la superestructura, y finalmente las fuerzas internas en los elementos estructurales y dispositivos.

Ejemplo de aplicación

Se calculó la respuesta espectral del edificio aislado empleando los tres métodos para representar el amortiguamiento en el modelo tridimensional (Ver acápite 4.6.2). Para cada método el modelo empleado tuvo las siguientes características:

a) Coeficientes de amortiguamiento C_{bi}

Se emplearon los coeficientes C_{bi} de cada dispositivo. Todos los elementos estructurales trabajaron con un amortiguamiento supuesto de 5%. La respuesta proveniente de cada modo no se afectó por ningún amortiguamiento adicional al provisto por dichos coeficientes.

b) Diferenciación del amortiguamiento modal

La respuesta proveniente de los modos del sistema de aislamiento se obtuvo para un amortiguamiento de 15% mientras que para el resto de modos el amortiguamiento fue el valor típico de 5%. Los dispositivos no tuvieron ningún coeficiente C_{bi} .

c) Modificación del espectro de respuesta

La respuesta proveniente de todos los modos se obtuvo considerando un amortiguamiento estructural de 5%. El amortiguamiento de 15% del sistema de aislamiento se representó reduciendo el espectro de respuesta por $B_D = 1.35$, valor extraído de la tabla 17.5-1 del ASCE 7-10 (Figura 4.16). El espectro se redujo desde el periodo $T = 2.55$ s para afectar a los 3 periodos de vibración del sistema de aislamiento.

El espectro utilizado para los métodos a) y b) fue el especificado en la Norma E.030 (Figura 4.15). Los parámetros sísmicos son los mismos que se aplicaron para el análisis estático del acápite 4.3:

$$Z = 0.45, U = 1.0, S = 1.0, T_p = 0.4, T_l = 2.5, R = 1, C = \begin{cases} 2.5, & T \leq T_p \\ 2.5 \frac{T_p}{T}, & T_p \leq T < T_l \\ \frac{2.5 T_p T_l}{T^2}, & T \geq T_l \end{cases}$$

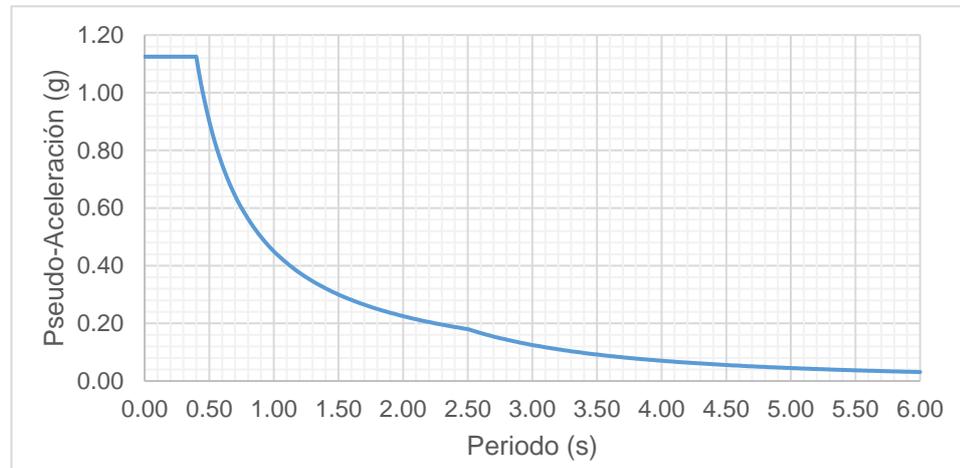


Figura 4.15. Espectro elástico de la Norma E.030 para $\xi=5\%$, empleado para los métodos a) y b)

El espectro reducido por amortiguamiento, utilizado para el método c), se presenta en la Figura 4.16.

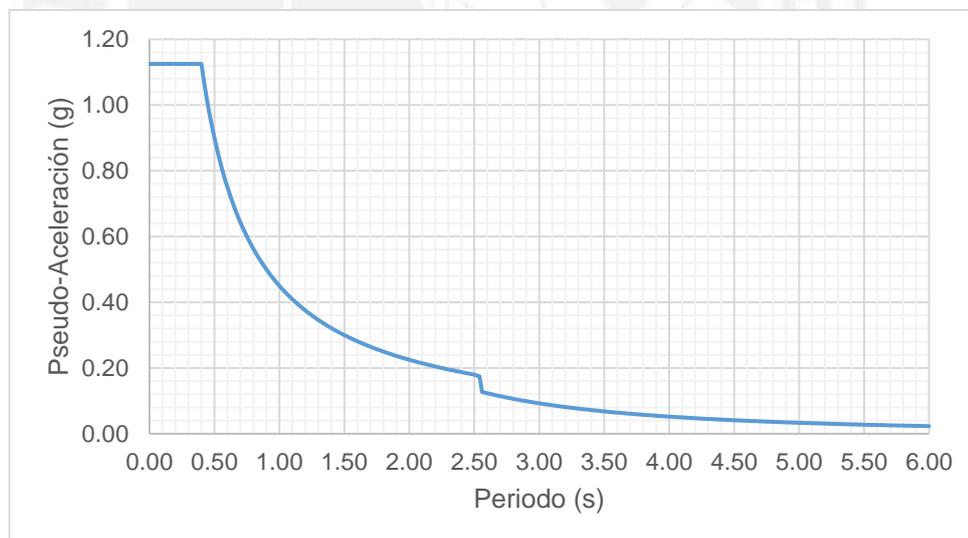


Figura 4.16. Espectro elástico de la Norma E.030 reducido por amortiguamiento, empleado para el método c).

Solo se presentan los resultados para la dirección de análisis X-X pues para la otra dirección los resultados son iguales dada la simetría del edificio.

En todos los métodos se calculó la respuesta espectral considerando una combinación de modos SRSS (raíz cuadrada de la suma de cuadrados). No obstante, se pudo emplear cualquier combinación de modos permitida por los códigos.

La Tabla 4.7 muestra el resumen de los desplazamientos y derivas del edificio. La respuesta de desplazamientos en la altura se muestra en la Figura 4.17.

Tabla 4.7. Resumen de resultados de desplazamientos

Parámetro	Método a)	Método b)	Método c)
Desplazamiento del sistema de aislamiento (cm)	19.5	19.1	18.7
Desplazamiento de la azotea (cm)	22.6	22.1	21.6
Deriva máxima de entrepiso	0.0022	0.002136	0.00218

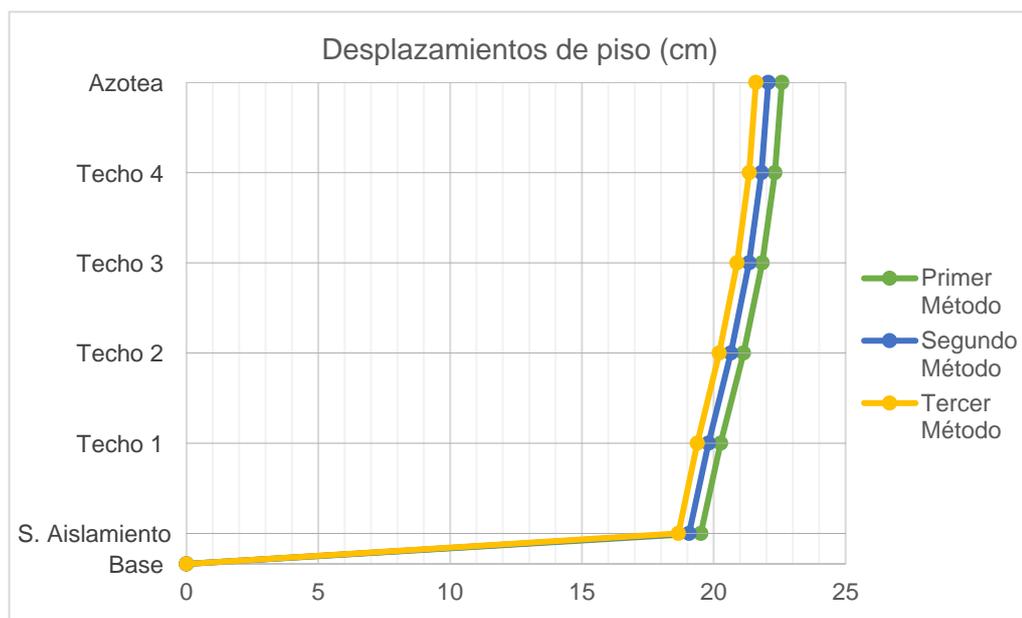


Figura 4.17. Desplazamientos de piso del edificio aislado

Todos los desplazamientos del sistema de aislamiento obtenidos son menores que el obtenido utilizando el análisis estático. Esto se debe a que el modelo tridimensional sí considera la flexibilidad de la superestructura en el análisis.

El edificio se deformó en todos los casos siguiendo la primera forma de vibrar. El cociente épsilon (ϵ), que relaciona el desplazamiento de la azotea y del sistema de aislamiento, fue cercano a 0.1, valor reducido que indica que no hubo gran desplazamiento de la azotea relativo al sistema de aislamiento (apenas 3 cm). Asimismo, las derivas de entrepiso son reducidas, y a lo más de 0.0022.

Todos los métodos arrojaron respuestas de desplazamientos y derivas de entrepisos muy similares. Los métodos a) y b) trabajaron con los amortiguamientos asignados sin alterarse, no obstante, en el método a) sí se observaron alteraciones, tal y como se muestra en la Tabla 4.8.

De los resultados del primer método se observa que el amortiguamiento de los modos traslacionales aislados disminuye y el amortiguamiento de los modos de la superestructura se incrementa en un rango de 10.3% a 5.2%.

Tabla 4.8. Amortiguamiento para la respuesta de cada modo de vibración

Amortiguamiento	Modo	Método a)	Método b)	Método c)
	1	13.1%	15.0%	5.0%
	2	13.1%	15.0%	5.0%
	3	14.8%	15.0%	5.0%
	4	10.3%	5.0%	5.0%
	5	10.3%	5.0%	5.0%
	6	10.7%	5.0%	5.0%
	7	7.0%	5.0%	5.0%
	8	7.0%	5.0%	5.0%
	9	7.1%	5.0%	5.0%
	10	6.0%	5.0%	5.0%
	11	6.0%	5.0%	5.0%
	12	6.0%	5.0%	5.0%
	13	5.5%	5.0%	5.0%
	14	5.5%	5.0%	5.0%
	15	5.5%	5.0%	5.0%
	16	5.2%	5.0%	5.0%
	17	5.2%	5.0%	5.0%
	18	5.2%	5.0%	5.0%

Por otro lado, las aceleraciones de piso se incrementan en la altura, de acuerdo a la primera forma de vibración del edificio, siendo máximas en la azotea. Los valores se encuentran en el rango de 1.3 a 1.4 m/s².

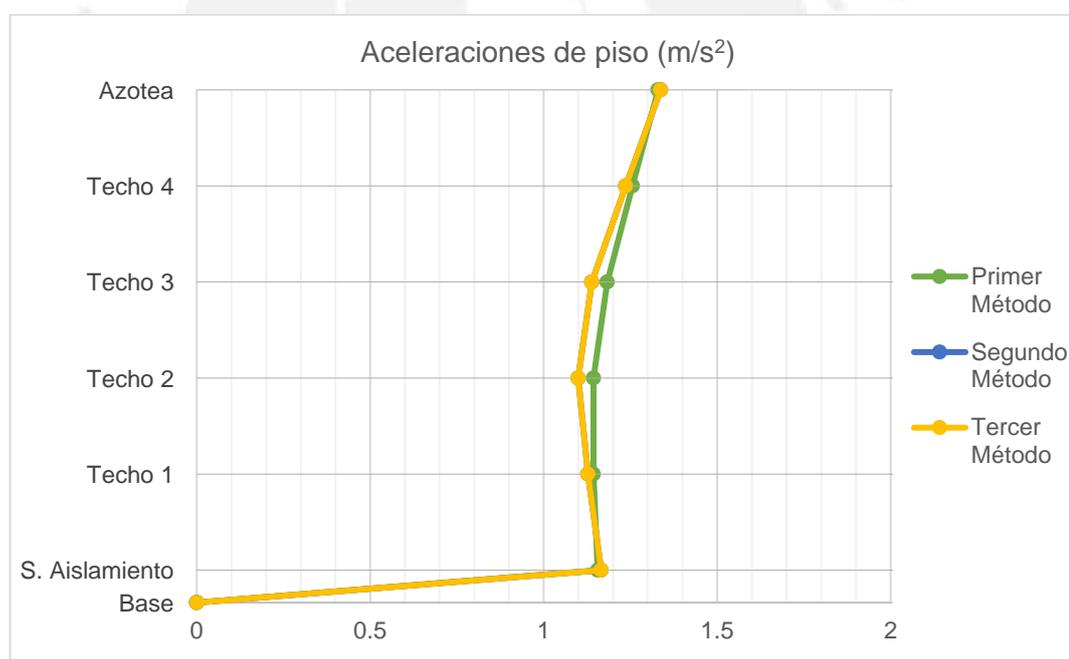


Figura 4.18. Aceleraciones de piso por los tres métodos

Comparando los métodos, todos los valores fueron similares entre sí, salvo a media altura del edificio donde se obtuvo mayor aceleración en el primer método. La aceleración máxima en la azotea fue de 1.32 m/s², valor reducido si se comparara con la aceleración que ocurriría en la azotea del edificio sin aislamiento (11.5 m/s²) asumiendo comportamiento elástico. La reducción es del 88%.

Finalmente, se presenta la respuesta de fuerza cortante de entrepiso.

Tabla 4.9. Resumen de cortantes y porcentajes del peso obtenidos

Parámetro	Primer Método	Segundo Método	Tercer Método
Fuerza cortante en la interfaz de aislamiento	523	500	511
% peso como fuerza sísmica	11.5%	11.0%	11.2%

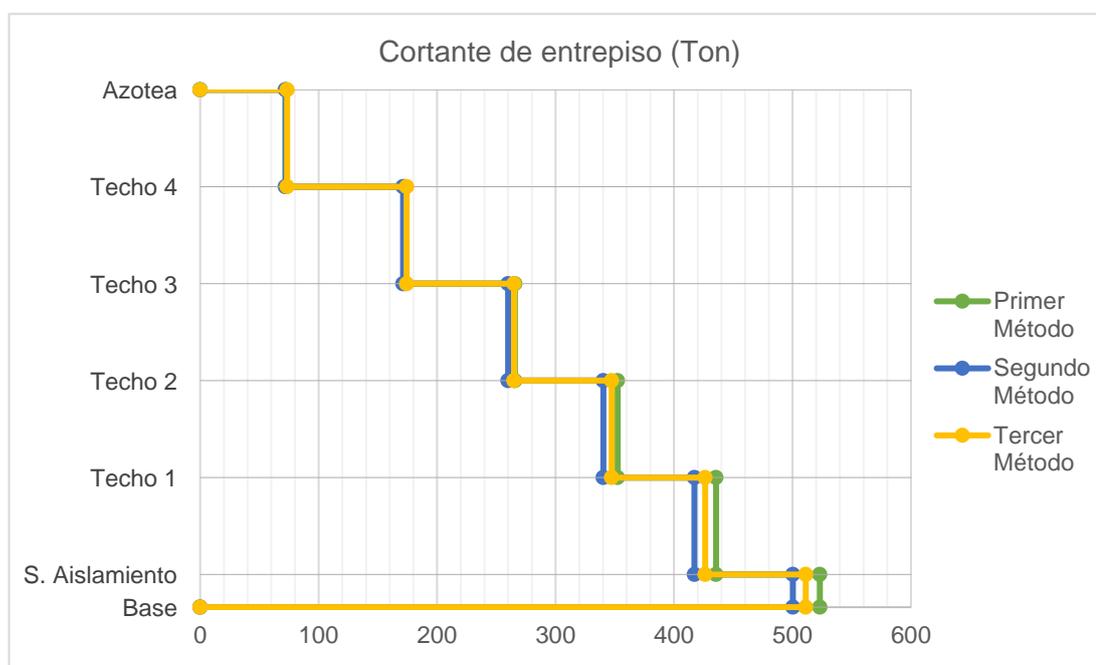


Figura 4.19. Cortante de entrepiso de los 3 métodos

Comparando los métodos utilizados, los cortantes de entrepiso obtenidos son similares y la diferencia se va acortando con la altura del edificio.

Las fuerzas de piso (iguales a la diferencia de los cortantes de entrepiso adyacentes) son similares en todos los pisos (alrededor de 90 Ton) debido a que las aceleraciones y las masas son similares en cada piso. En la azotea se obtuvo mayor diferencia debido a la menor masa que se tiene en ese nivel.

La fuerza cortante en el sistema de aislamiento fue del orden del 11.5% del peso total, valor reducido en comparación al que se obtendría para el mismo edificio con base fija (45% sin reducción por ductilidad y sobrerresistencia).

4.8 Análisis no lineal de edificios aislados

Cuando se desea estudiar una estructura aislada considerando la no linealidad que tienen los dispositivos en la realidad, se puede emplear el método de análisis tiempo-historia, el cual es aplicable a cualquier tipo de estructura.

El método de análisis tiempo - historia se basa en evaluar la respuesta de una estructura cuando se somete a un registro de aceleración en su base. Debido a que los registros de aceleración no pueden reducirse a funciones matemáticas sencillas, se emplean procedimientos numéricos para resolver las ecuaciones de equilibrio dinámico en cada instante de tiempo. Por tanto, el esfuerzo numérico al trabajar con este método es mucho mayor que con los métodos elásticos.

En los dispositivos friccionales la dependencia que existe entre la fuerza de fricción, la carga axial actuante y la velocidad del dispositivo obliga a que se emplee este método de análisis, ya que en un análisis lineal elástico no se puede reflejar este comportamiento. A pesar que en los dispositivos elastoméricos se considera que no existe dependencia entre la carga axial y la fuerza cortante, también se suele emplear este método de análisis con fines de diseño o verificación.

En el Anexo 1 se presenta una descripción del procedimiento para aplicar las cargas de gravedad como paso previo al análisis con registros de aceleración.

4.8.1 Modelo

El modelo estructural puede ser de 1 o 2 GDL, o tridimensional. La no linealidad estará dada por los diagramas constitutivos bilineales de los dispositivos. De estos diagramas los programas de computación suelen requerir los valores de K_1 , K_2 y F_y .

Ejemplo de aplicación

Se construyó un modelo bilineal para el aislador a partir de la rigidez, amortiguamiento y el desplazamiento obtenido con el tercer método de análisis espectral. Se suele considerar para los aisladores HDRB una relación entre rigideces $K_1/ K_2 = 10$; este valor se empleará para resolver las siguientes ecuaciones presentadas en el capítulo 3:

$$Q_d = F_y - K_2 D_y \quad (3.2)$$

$$F_y = K_1 D_y \quad (3.3)$$

$$D_y = \frac{Q_d}{K_1 - K_2} \quad (3.4)$$

$$\xi_{eff} = \frac{4Q_d(D - D_y)}{2\pi K_{eff} D^2} \quad (3.8)$$

Tabla 4.10. Propiedades lineales y no lineales de los dispositivos

Parámetro	De borde y esquineros
D (m)	0.1866
K_{eff} (Ton/m)	107.72
ξ_{eff}	15%
Q_d (Ton)	4.91
K_2/K_1	0.10
K_2 (Ton/m)	81.39
K_1 (Ton/m)	813.93
F_y (Ton)	5.46
D_y (m)	0.0067

4.8.2 Características de los Registros

Para estructuras aisladas, es práctica común realizar el análisis no lineal tiempo-historia empleando registros de aceleración *Espectro Compatibles – Matched Spectrum*.

La *compatibilidad espectral* es un ajuste mediante algoritmos que se realiza a los registros de aceleración, llamados “semillas”, para lograr que su espectro de aceleraciones, para cierto grado de amortiguamiento estructural, sea similar a un espectro de diseño proveniente de los códigos.

El uso de las señales espectro-compatibles permite reducir la incertidumbre en los resultados del análisis, en comparación con la incertidumbre inherente de los registros que solo se escalan a un valor pico (PGA). Asimismo, el ajuste suele realizarse solo en cierto intervalo de periodos de interés.

Un espectro de diseño objetivo puede ser el especificado por la Norma E.030, presentado en el acápite 5.3.1. Este espectro debe considerar la rápida subida de aceleración en la zona de periodos muy cortos (E.030, Artículo 4.7.1) para evitar problemas de convergencia en el ajuste de las señales semilla.

Los problemas de convergencia en los registros espectro-compatibles conducen a respuestas máximas que no son similares a las que se obtendrían mediante métodos elásticos. Para verificar la convergencia se debe comprobar que las cantidades espectrales de desplazamiento y aceleración de la señal compatible sean cercanas a las que se obtendrían de un análisis estático del edificio aislado empleando un modelo de 1 GDL.

Con la verificación anterior se puede determinar el valor de B_D para la señal. Cabe resaltar que el valor de B_D que se extrae de los códigos ha sido resultado de promedios estadísticos luego del tratamiento de muchas señales que no necesariamente son similares a los registros de sismos peruanos pasados.

Las siguientes figuras muestran dos acelerogramas escalados a un PGA de 0.45g y compatibilizados con el espectro de la Norma E.030 utilizado en el acápite 4.7.2, con el programa SeismoMatch (Seismosoft Ltd., 2016): la componente N82W del sismo peruano de 1966 (Figura 4.20) y la componente E-W del acelerograma chileno del evento de Talca, región del Maule, del año 2010 (Figura 4.21).

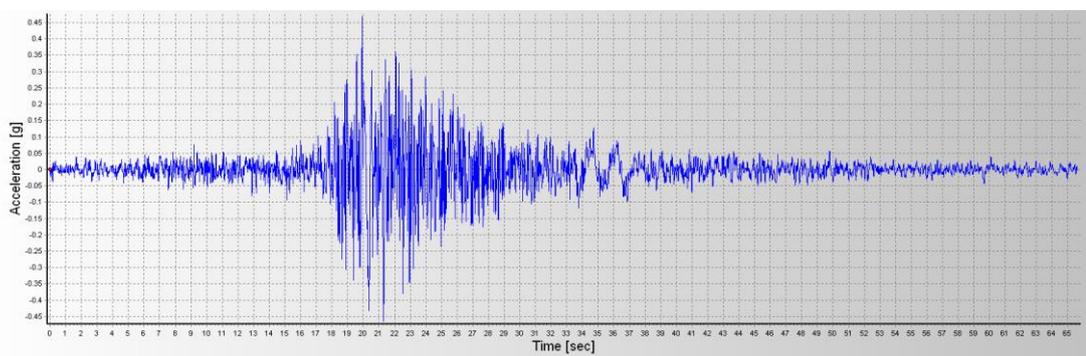


Figura 4.20. Señal de 1966 compatible con el espectro de la Norma E:030

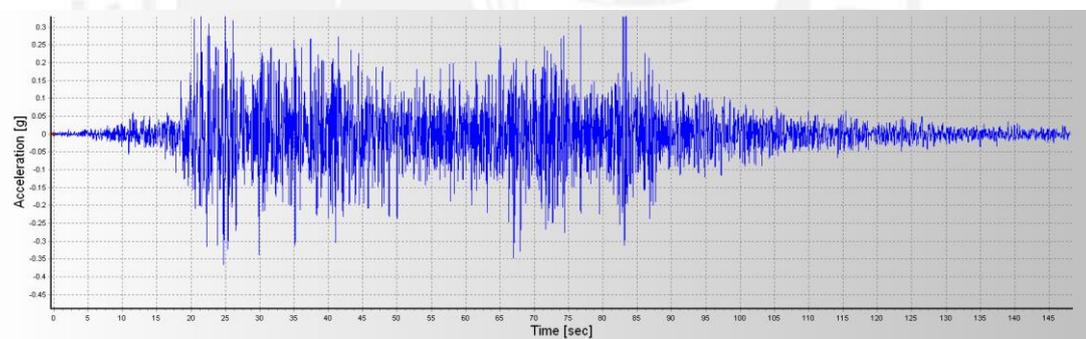


Figura 4.21. Señal de 2010 compatible con el espectro de la Norma E.030

La Figura 4.22 muestra en rojo el espectro de diseño de la Norma E:030, en azul el espectro del acelerograma compatible de 1966 y en verde el espectro del acelerograma compatible del 2010. Todos los espectros se obtuvieron para 5% de amortiguamiento. La Figura 4.23 muestra los espectros de desplazamiento de todos los casos anteriores.

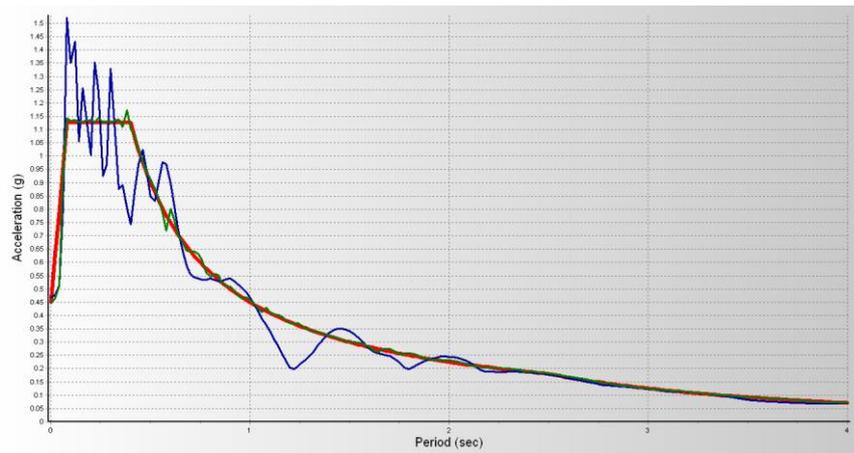


Figura 4.22. Espectros de pseudo aceleración superpuertos

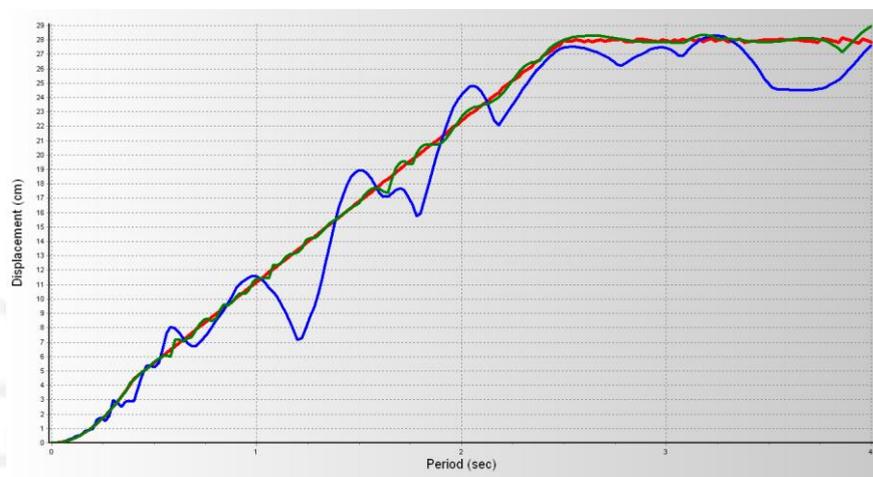


Figura 4.23. Espectros de desplazamiento superpuertos

La señal del 2010 tuvo un ajuste prácticamente perfecto para todos los periodos del espectro objetivo, mientras que la señal de 1966 presenta discrepancias en distintos periodos. Estas discrepancias influyen en la respuesta del edificio, tal como se evalúa en el acápite 4.8.4 y se discute en el acápite 4.8.5.

4.8.3 Procedimientos de análisis

Existen dos procedimientos de análisis en el tiempo aceptados por los códigos de diseño sísmico, el procedimiento bidimensional y tridimensional.

El procedimiento bidimensional consiste en aplicar el 100% de una componente de un registro en la dirección de análisis, y no se considera otro registro en la otra dirección. El procedimiento tridimensional aplica en simultaneo una componente del registro al 100% en la dirección de análisis, y una fracción de la otra componente en la dirección perpendicular.

El procedimiento tridimensional reconoce que las señales sísmicas pueden venir por cualquier dirección que no sean las del análisis. No obstante, dado que las señales siempre vendrán por cualquier dirección, sus componentes ortogonales siempre serán una fracción que no alcanzarán al 100% analizado con el procedimiento bidimensional.

En cualquiera de los métodos, siempre se debe considerar en el análisis los efectos del movimiento del suelo cuando ya actúan las cargas de gravedad en la estructura (Peso sísmico), pues en sistemas inelásticos el principio de superposición no se cumple, y también porque se debe considerar la posible dependencia de la carga lateral con la carga vertical (importante en dispositivos friccionales).

Finalmente, para los procedimientos de análisis no lineal es recomendable utilizar la mayor cantidad de señales espectro-compatibles posible para reducir la incertidumbre en los resultados.

4.8.4 Respuesta inelástica en el tiempo

Luego del análisis se obtiene la respuesta inelástica en el tiempo. Para un edificio aislado, los parámetros de interés son los desplazamientos, fuerzas y aceleraciones de piso, y derivas de entrepiso. Asimismo, se obtienen los diagramas histeréticos del sistema de aislamiento y los dispositivos.

El enfoque para el estudio de la respuesta del edificio aislado dependerá de si se requiere conocer las demandas sobre los dispositivos o las estructuras. Para los dispositivos, las fuerzas y desplazamientos deben obtenerse de la resultante de la respuesta en cada componente X-Y, debido a que el aislador debe ser capaz de desarrollar el desplazamiento demandado por un movimiento sísmico en cualquier dirección, considerando que tiene la misma rigidez lateral también en cualquier dirección. Para los elementos estructurales los códigos aceptan solo considerar la componente de la respuesta de fuerzas y desplazamientos en la dirección de análisis (X o Y).

Ejemplo de aplicación

Se aplicó sobre el edificio ejemplo las dos señales presentadas en el acápite 4.8.2. Se empleó el procedimiento de análisis bidimensional en la dirección X-X. Debido a que no existen excentricidades en planta, prácticamente todos los puntos del sistema de aislamiento tienen la misma respuesta sísmica. Asimismo, si se

realizara el análisis en la otra dirección de análisis se obtendrían los mismos resultados.

Las Figuras 4.24 a 4.26 muestran, para las dos señales, las historias de desplazamientos y aceleraciones del sistema de aislamiento, así como la historia de fuerza cortante de la interfaz de aislamiento.

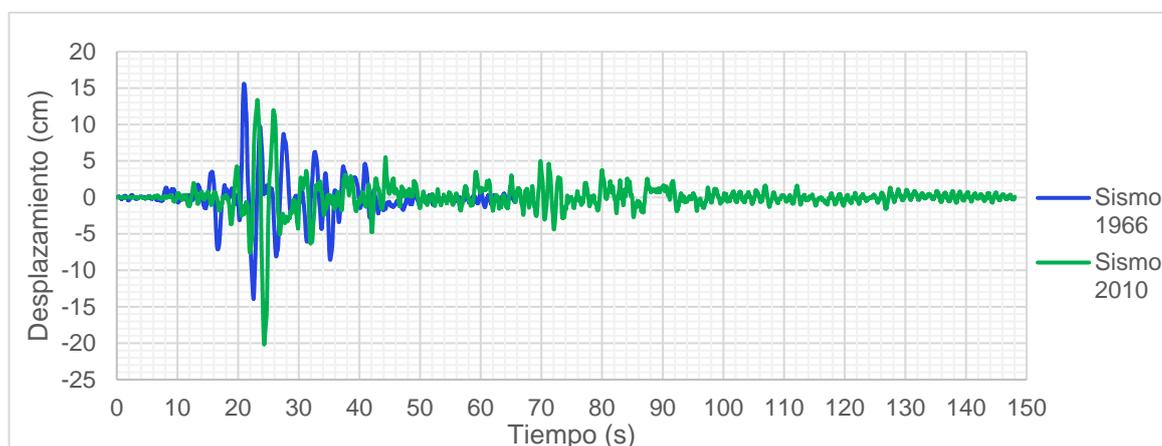


Figura 4.24. Historia de desplazamientos del sistema de aislamiento

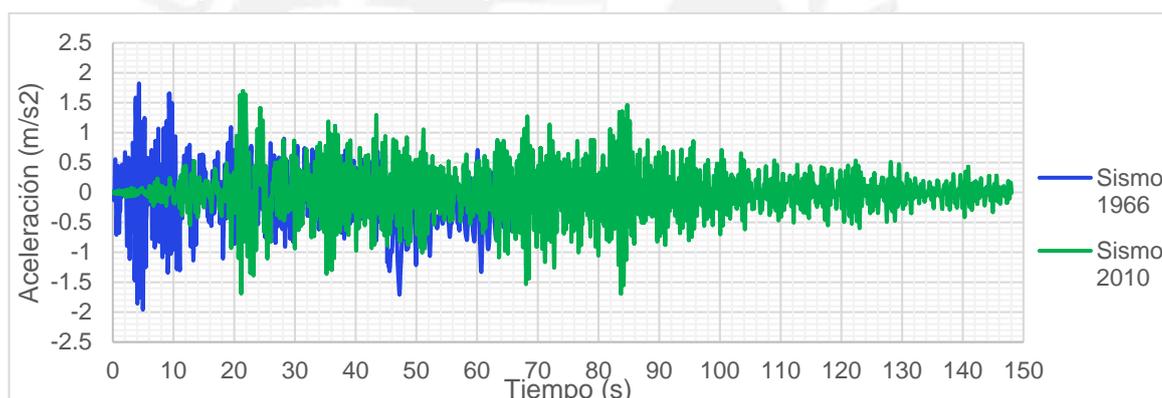


Figura 4.25. Historia de aceleraciones del sistema de aislamiento

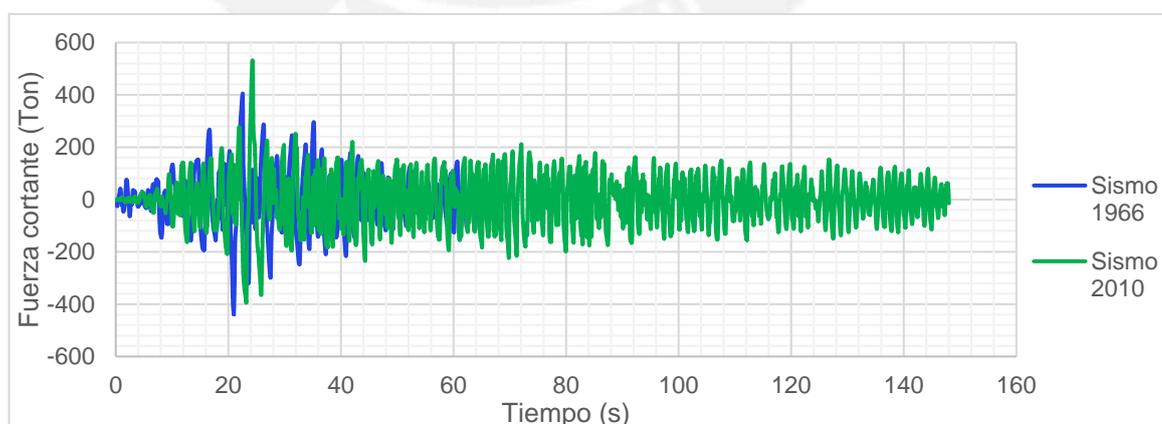


Figura 4.26. Historia de fuerza cortante del sistema de aislamiento

Para ambas señales, la deriva máxima se produjo en el segundo piso. Las historias de deriva de ese entrepiso se muestran en la Figura 4.27.

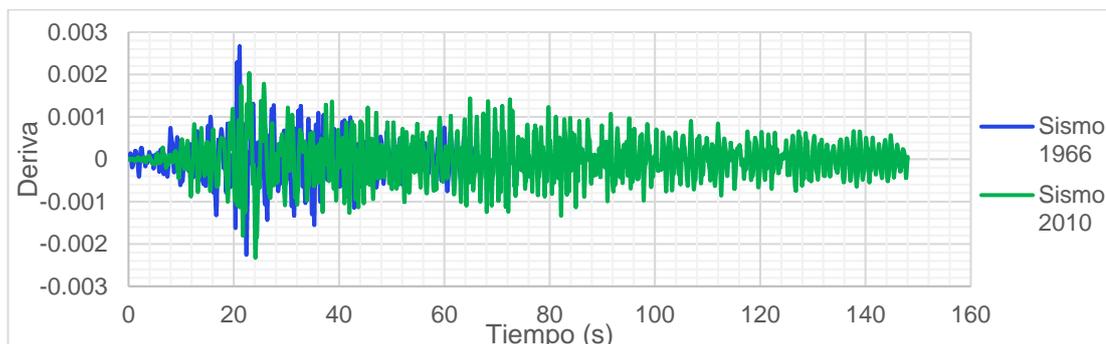


Figura 4.27. Historia de deriva del segundo entrepiso.

Las Figuras Figura 4.28Figura 4.27 y Figura 4.29 muestran la máxima y mínima respuesta de desplazamientos, derivas, cortante de entrepiso y aceleraciones absolutas en la altura del edificio para el Sismo de 1966. Las Figuras 4.30 y 4.31 muestran lo propio para el Sismo de Chile 2010.

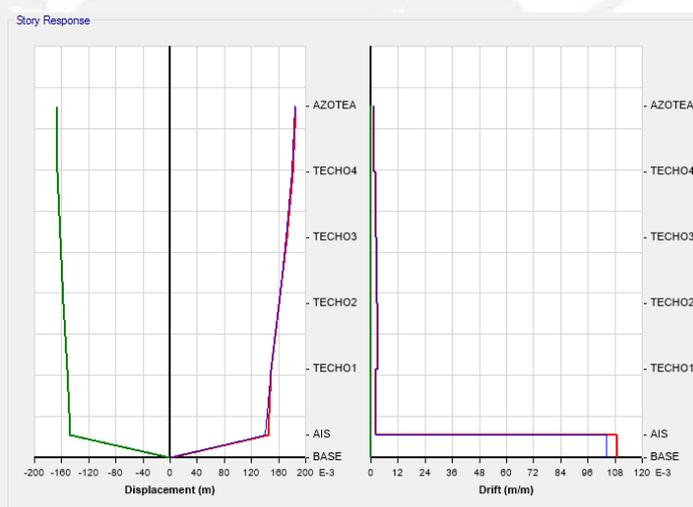


Figura 4.28. Máximos desplazamientos y drifts para el Sismo de 1966.

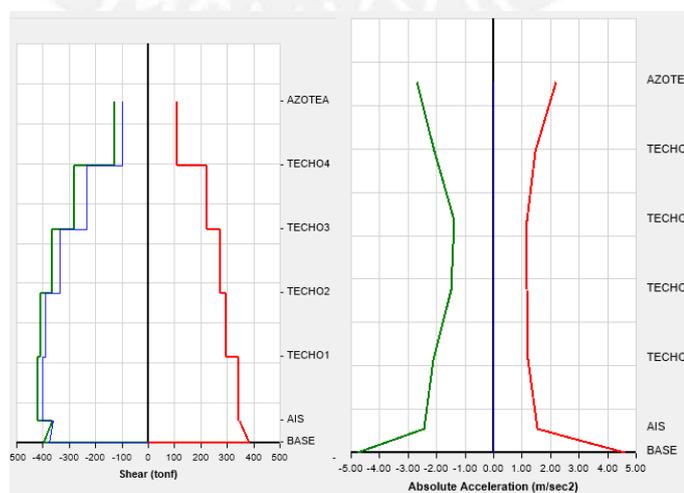


Figura 4.29. Máxima respuesta de cortante y aceleración para el Sismo de 1966

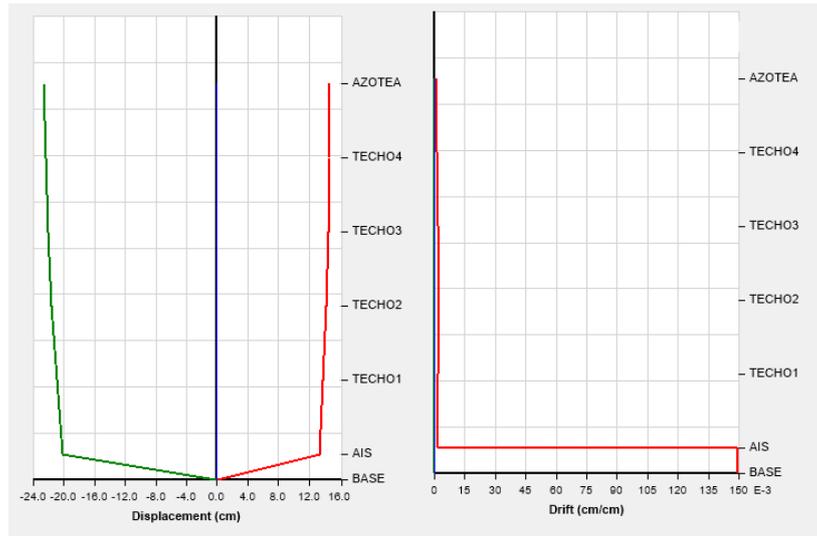


Figura 4.30. Máximos desplazamientos y drifts para el Sismo de 2010

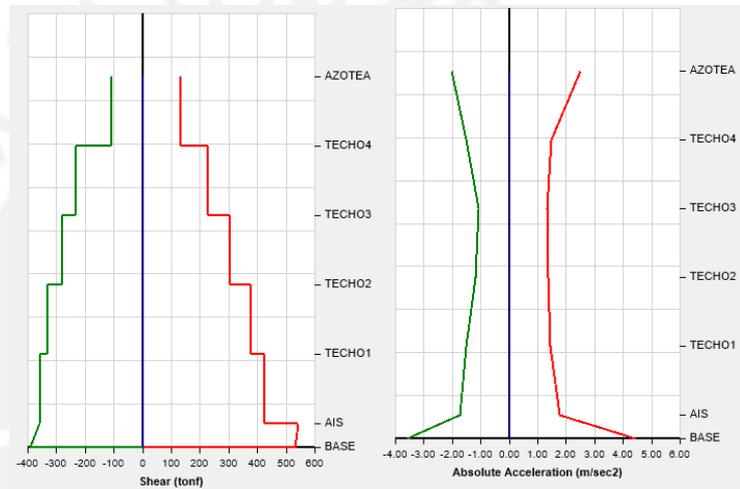


Figura 4.31. Máxima respuesta de cortante y aceleración para el Sismo de 2010

Con los resultados anteriores, se construyó el diagrama histérico del aislador central y de todo el sistema de aislamiento (Figuras 4.32 y 4.33).

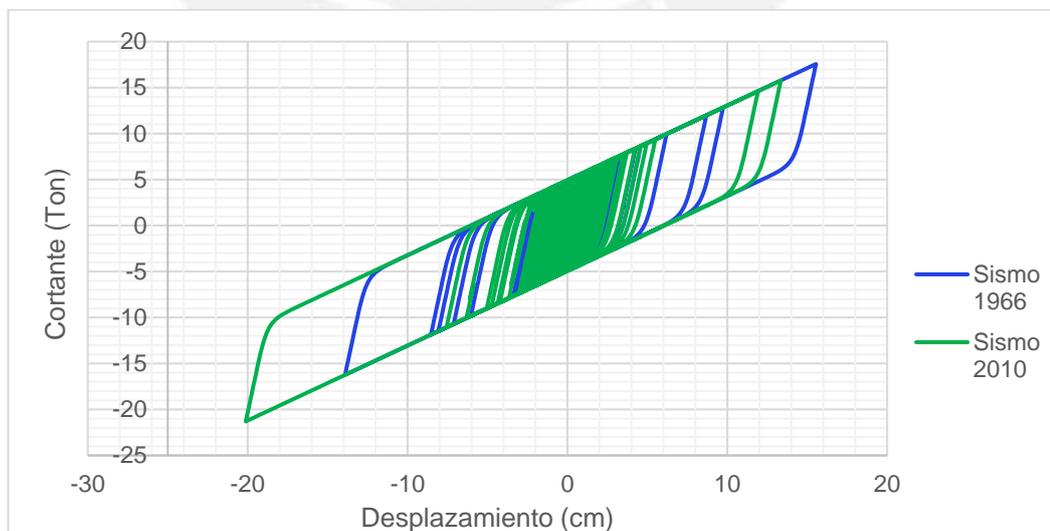


Figura 4.32. Diagrama bilineal del aislador central

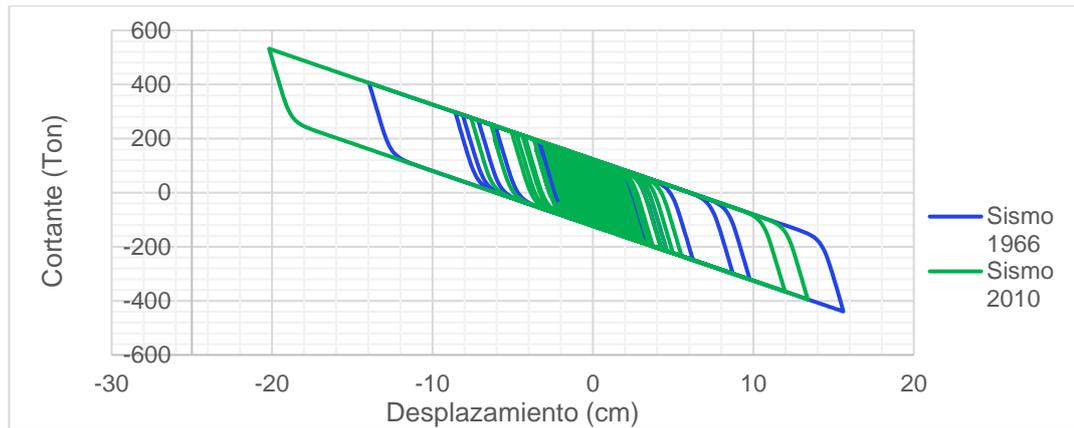


Figura 4.33. Diagrama bilineal de todo el sistema de aislamiento.

4.8.5 Tratamiento de resultados

El tratamiento o discusión de los resultados obtenidos consiste en determinar las propiedades lineales equivalentes del sistema de aislamiento y los dispositivos, para verificar las propiedades utilizadas en el análisis modal espectral. Para ello, a partir de los diagramas histéreticos se pueden obtener las expresiones de las Ecs. 4.23 a 4.25 para las propiedades lineales equivalentes:

$$K_{eff} = \frac{|V_{max}| + |V_{min}|}{|D^+| + |D^-|} \quad (4.23)$$

$$\xi_{eff} = \frac{Q_d(|D^+| + |D^-| - 2|D_y|)}{\pi K_{eff} D^2} \quad (4.24)$$

$$D = \frac{|D^+| + |D^-|}{2} \quad (4.25)$$

Donde (V_{max}, D^+) es el punto extremo superior del diagrama de histéresis y (V_{min}, D^-) es el punto extremo inferior.

Luego de verificar las propiedades equivalentes se procede a la discusión de los parámetros sísmicos (desplazamientos, fuerzas, etc.) provenientes de los análisis ya realizados.

Ejemplo de aplicación

Utilizando las Ecs. 4.23 a 4.25 y los diagramas histéreticos anteriores, se obtuvieron las propiedades equivalentes del aislador central y del sistema de aislamiento, mostradas en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11. Propiedades equivalentes

	Propiedad	Sismo 1966	Sismo 2010
Aislador Central	D (cm)	14.7	16.7
	ξ_{eff}	17.7%	16.1%
	K_{eff} (Ton/cm)	114.8	110.8
Sistema de aislamiento	D (cm)	14.8	16.8
	K_{eff} (Ton/cm) =	2857.4	2758.5
	ξ_{eff}	18.4%	16.8%

Las propiedades equivalentes de rigidez y amortiguamiento resultaron mayores que las empleadas en el análisis espectral, básicamente porque el desplazamiento del sistema de aislamiento resultó menor que el obtenido del análisis espectral. Así, a menores desplazamientos se obtiene mayores amortiguamientos y rigideces efectivas.

Por otro lado, la Tabla 4.12 muestra la comparación de resultados máximos del tercer método de análisis espectral y tiempo historia no lineal.

Tabla 4.12. Comparación de resultados del análisis espectral y tiempo-historia

	Espectral	Sismo 1966	Sismo 2010
Desplazamiento del Sistema de aislamiento (cm)	19.0	13.6	20.2
Desplazamiento de la Azotea (cm)	22.0	16.8	22.6
Aceleración del Sistema de aislamiento (g)	0.12	0.23	0.17
Aceleración de la Azotea (g)	0.136	0.27	0.26
Fuerza cortante en la Interfaz de aislamiento (Ton)	511	398	532
Deriva máxima	0.0022	0.0026	0.0023

De la tabla anterior se observa que la señal con resultados más cercanos a los obtenidos del análisis modal espectral es la del Sismo de 2010 debido a que su ajuste espectral fue más preciso. Asimismo, se observó lo siguiente:

- El desplazamiento obtenido del Sismo de 1966 fue menor que el obtenido del método modal espectral pues el valor espectral de desplazamiento de esta señal para el periodo fundamental del sistema de aislamiento se encuentra por debajo del valor correspondiente al espectro de diseño de la Norma E.030.
- Cuando se obtiene un menor desplazamiento en el sistema de aislamiento, se tiende a obtener mayores rigideces y amortiguamientos efectivos. Este fenómeno no es beneficioso para el sistema porque limitar el desplazamiento durante un sismo raro provocará que el edificio tienda a comportarse como

uno con base fija. Esta tendencia también provoca que el desplazamiento de la azotea relativo al sistema de aislamiento también se incremente.

- Cuando se obtiene menores desplazamientos del sistema de aislamiento también se reduce la aceleración del sistema de aislamiento debido al mayor amortiguamiento, pero se produce un incremento mayor en la aceleración de la azotea que cuando se tienen mayores desplazamientos del sistema de aislamiento. El mismo caso ocurre con las derivas de entrepiso, a mayor cociente épsilon (ϵ) las derivas aumentan.
- La fuerza cortante en la interfaz de aislamiento disminuye cuando se tiene menores desplazamientos.
- Las aceleraciones del método tiempo-historia son mayores a las obtenidas del análisis modal espectral.

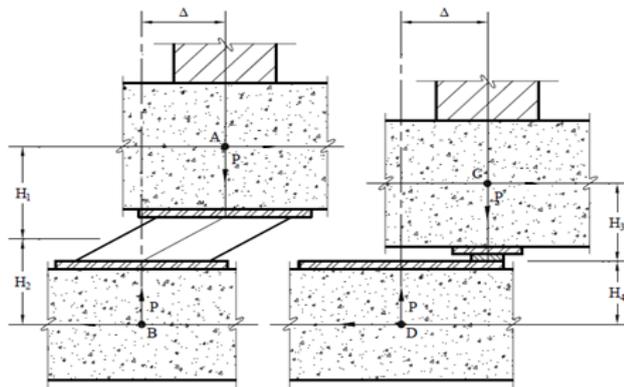
De lo anterior se concluye que el método de análisis tiempo-historia no debería omitirse en el diseño de los edificios aislados, pues su uso permite identificar los fenómenos físicos que no se podrían visualizar a través de los resultados de un análisis elástico. Puede emplearse este método para verificar y confirmar los resultados del análisis espectral, así como para fines de diseño.

4.9 Efecto P-delta en el sistema de aislamiento

Como parte del análisis de las estructuras aisladas, es importante recalcar que el efecto de segundo orden que ocurrirá en cada dispositivo no es despreciable dado el gran desplazamiento relativo que se espera que ocurra entre sus extremos.

El efecto de segundo orden en cada dispositivo queda representado por un momento adicional, $M_{P-\Delta}$, igual al producto del desplazamiento del dispositivo por la carga axial que actúa sobre el dispositivo.

Se considera que el momento $M_{P-\Delta}$ es resistido por ambas parrillas superior e inferior del sistema de aislamiento (o cimentación, si no existiera parrilla inferior), según el tipo de dispositivo que se utilice. A su vez, las vigas y columnas concurrentes a cada aislador tomarán parte de este momento de acuerdo a su rigidez al giro. El FEMA P-751 recomienda emplear las distribuciones de las Figuras 4.34 y 4.35.



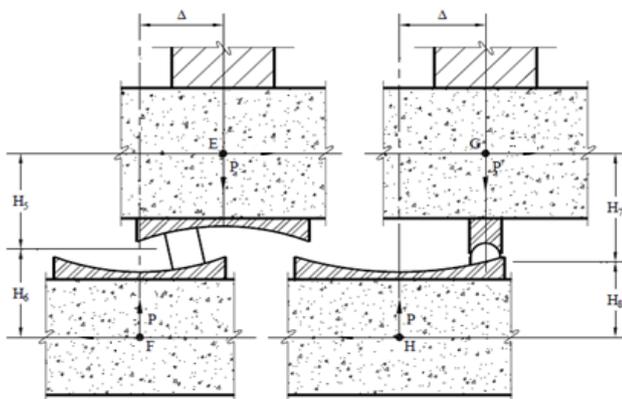
Momentos para el caso elastomérico:

$$M_A = \frac{P \Delta}{2} \quad ; \quad M_B = \frac{P \Delta}{2}$$

Momentos para el caso de deslizador friccional:

$$M_C = 0 \quad ; \quad M_D = P \Delta$$

Figura 4.34. Momentos de segundo orden para aisladores elastoméricos y deslizadores de fricción (FEMA P-751, 2009)



Momentos para el péndulo friccional doble:

$$M_E = \frac{P \Delta}{2} \quad ; \quad M_F = \frac{P \Delta}{2}$$

Momentos para el péndulo friccional simple:

$$M_G = 0 \quad ; \quad M_H = P \Delta$$

Figura 4.35. Momentos de segundo orden para aisladores de doble péndulo de fricción y péndulo de fricción simple (FEMA P-751, 2009)

Capítulo 5. NORMAS DE REFERENCIA PARA EL ANÁLISIS Y DISEÑO

En este capítulo se revisan los aspectos más importantes de las normas que se tomaron como referencia para el análisis y diseño de edificios con aisladores sísmicos. En ese sentido, la Norma Peruana E.030 Diseño Sismorresistente (SENCICO, 2016) especifica que para el diseño de edificios aislados se cumplan los requisitos, en la medida que sea posible, del siguiente documento:

- ASCE/SEI 7-10 – Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (American Society of Civil Engineers, 2010).

Se presentan las disposiciones de la Norma E.030 que son aplicables a las estructuras aisladas. También se extrajeron algunas disposiciones de los siguientes documentos, que complementan al ASCE 7-10:

- Norma Nch2745:2013 - Análisis y diseño de edificios con Aislación Sísmica (Instituto Nacional de Normalización, 2013)
- ASCE/SEI 7-16 - Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (American Society of Civil Engineers, 2017). Se trata de la versión del ASCE 7 que reemplaza a la versión del 2010.

5.1 Objetivos de desempeño

El ASCE 7-10 no especifica explícitamente los objetivos de desempeño, sino mediante disposiciones de rigidez que se presentan más adelante. La Norma NCh2745, menciona explícitamente que el diseño debe estar orientado a cumplir con los siguientes objetivos:

- Para eventos sísmicos menores se debe lograr un comportamiento totalmente elástico en la superestructura, sin daño en los elementos estructurales, no estructurales y el contenido.
- Para eventos sísmicos raros el comportamiento debe ser tal que no ocurra falla en el sistema de aislación, pudiendo existir daños en los elementos estructurales y no estructurales.

5.2 Requisitos generales de diseño

5.2.1 Niveles de Sismo

El ASCE 7-10 define un nivel de sismo máximo posible, MCE, el cual tiene 2500 años de periodo de retorno, y un nivel de sismo de diseño, DBE, cuya aceleración máxima es igual a $2/3$ de la aceleración del MCE ($MCE = 1.5 DBE$). El sismo de diseño es equivalente al nivel de sismo definido en la Norma E.030, que tiene 475 años de periodo de retorno. En adelante estos sismos se denominarán SMP y SD.

El sismo de diseño se emplea para diseñar los elementos estructurales, así como para determinar los desplazamientos y fuerzas actuantes sobre los dispositivos que se requieren para realizar los ensayos de control de calidad en los dispositivos que se colocarán en obra.

Los dispositivos deben ser diseñados para soportar los desplazamientos y fuerzas provenientes del MCE, sin problemas de estabilidad. Estos desplazamientos y fuerzas se utilizan también para ensayar dispositivos prototipo que no se llegan a colocar en obra (ensayos destructivos).

5.2.2 Requisitos para el sistema de aislamiento

a) Variabilidad

El sistema de aislamiento debe diseñarse considerando la variación en las propiedades nominales de los dispositivos. Estas variaciones pueden encontrarse tras los ensayos de control de calidad de los dispositivos y las condiciones en las que se ejecutan, errores en la fabricación de los aisladores, el envejecimiento, efectos ambientales que actúan durante la vida útil del dispositivo, y errores cometidos durante el proceso constructivo del edificio aislado (Ver capítulo 3).

Debido a la variabilidad, el valor nominal de la rigidez efectiva del sistema de aislamiento debe tener un rango de valores $[K_{\min}, K_{\max}]$ tanto para el sismo de diseño como para sismo máximo posible. El proyectista, a su criterio, decide cual es la relación entre las rigideces máxima y mínima del sistema de aislamiento, valor que también depende de lo que pueden lograr los proveedores de dispositivos.

La Norma ASCE 7-16, por su parte, establece las propiedades “lower bound” y “upper bound” (borde superior y borde inferior, traducidos del inglés) para obtener

las rigideces máximas y mínimas. Este código presenta factores de modificación de las propiedades nominales de los dispositivos para determinar las rigideces.

b) Fuerzas de viento

Para estructuras peruanas las fuerzas de viento se calculan con la Norma E.020 Cargas (SENCICO, 2006). No obstante, la Norma ASCE 7-10 plantea que, a nivel del sistema de aislamiento, debe limitarse el desplazamiento producido por el viento a un valor igual al que se permite en la superestructura.

c) Fuerza de restauración o restitución lateral

El sistema de aislamiento debe ser capaz de producir una fuerza de restauración lateral que le permita recuperar una parte importante del desplazamiento inelástico en un sismo raro, y así evitar desplazamientos residuales. La Norma ASCE 7-10, en su artículo 17.2.4.4, especifica que para asegurar que se producirá dicha fuerza, se deberá cumplir la expresión de la Ec. 5.1:

$$F_{D_{TD}} - F_{50\%D_{TD}} \geq 0.025W \quad (5.1)$$

Donde $F_{D_{TD}}$ es el cortante sísmico en el sistema de aislamiento correspondiente al desplazamiento total de diseño, $F_{50\%D_{TD}}$ es el cortante sísmico correspondiente al 50% de dicho desplazamiento, y W es el peso sísmico de la estructura sobre los dispositivos. El desplazamiento D_{TD} se define en el acápite 5.5.1.

d) Cargas de diseño

Los dispositivos deben ser diseñados para las cargas verticales (máxima y mínima) que actúan cuando el sistema de aislamiento se somete al desplazamiento total máximo, para asegurar su estabilidad. Estas cargas se obtienen al investigar las combinaciones de las Ecs. 5.2 y 5.3.

$$P_{m\acute{a}x} : 1.2D + E + L + 0.2S \quad (5.2)$$

$$P_{m\acute{i}n} : 0.9D - E \quad (5.3)$$

Donde D es la carga muerta, E es la carga de sismo, L es la carga viva y S la carga de nieve. El ASCE 7-10 permite reducir L en 50% cuando la sobrecarga de diseño

no supere a aproximadamente 450 kg/m². E debe considerar el efecto combinado del sismo horizontal, E_h , y vertical, E_v , donde E_h se obtiene a partir de cualquiera de los procedimientos de análisis descritos en el acápite 5.4 y E_v se obtiene con la Ec. 5.4, provista por el ASCE 7-10:

$$E_v = 0.2S_{MS}D \quad (5.4)$$

Donde S_{MS} es el coeficiente sísmico obtenido del espectro de diseño del sismo máximo posible para periodos cortos. Este parámetro es equivalente al coeficiente sísmico que se obtiene en la plataforma del espectro de la Norma E.030 (ver acápite 5.3.1). Al sustituir la Ec. 5.4 en las Ecs. 5.2 y 5.3 se obtienen las combinaciones de las Ecs. 5.5 y 5.6:

$$P_{m\acute{a}x}: 1.2D + (E_h + 0.2S_{MS}D) + L(o\ 0.5L) + 0.2S \quad (5.5)$$

$$P_{m\acute{i}n}: 0.9D - (E_h + 0.2S_{MS}D) \quad (5.6)$$

e) Inspección de dispositivos

De acuerdo al acápite 17.2.4.8 del ASCE 7-10, el proyecto de arquitectura debe incluir accesos al sistema de aislamiento, de tal forma que se puedan inspeccionar los dispositivos ante cualquier eventualidad.

Normalmente se genera un pequeño sótano debajo del sistema de aislamiento (de poca altura), lo cual implica el uso de muros de contención en voladizo alrededor de todo el edificio (Ver Figura 2.7).

5.2.3 Requisitos para el sistema estructural

a) Junta de separación sísmica

El ASCE 7-10 indica que la junta de separación entre el edificio aislado y los muros de contención o cualquier otro elemento que obstaculice su libre movimiento en toda la altura del edificio, no debe ser menor que el desplazamiento D_{TM} .

Además de lo anterior, la Norma Nch2745 comenta lo siguiente:

- Si se tienen dos edificios aislados contiguos y estos no comparten el mismo sistema de aislamiento, la junta de separación no debe ser menor que la suma de los desplazamientos D_{TM} de cada edificio.

- Si se tienen dos edificios aislados contiguos y estos comparten el mismo sistema de aislamiento, se puede tomar como junta sísmica a la que correspondería a estructuras convencionales.
- Si se proyecta un edificio aislado contiguo a otro convencional, la junta de separación entre ambos edificios no debe ser menor que la suma de los desplazamientos totales máximos de cada edificio.

La Norma E.030 indica que la separación entre edificios no debe ser menor que $2/3$ de la suma de los desplazamientos de cada uno de ellos. Esta disposición se aplicaría cuando una estructura convencional se encuentra contigua a otra aislada. En estos casos es poco probable que gobierne el valor mínimo $s = 0.006h$.

Típicamente se obtienen juntas de entre 30 a 50 cm en edificios aislados ubicados en Perú y toda la costa del Pacífico Sur.

b) Diafragmas

El diafragma que se coloque inmediatamente sobre la interfaz de aislamiento debe ser tal que permita conectar a todos los dispositivos, y así lograr continuidad horizontal sobre la interfaz. Además, el diafragma debe tener suficiente resistencia para transmitir las fuerzas sísmicas entre distintas partes del edificio. Aun si el diafragma fuera diseñado para acciones elásticas (sin ninguna reducción), como una seguridad adicional siempre es recomendable instalar ductilidad.

Un diafragma con comportamiento prácticamente rígido para cargas laterales cumple con las condiciones del párrafo anterior. Para que el diafragma sea competente debe ser regular en planta, no debe ocasionar problemas excesivos de torsión, y no debe ser demasiado alargado, limitando alguno de sus lados a menos de 60 m de longitud. Ejemplos de diafragma rígido son las losas de concreto armado.

5.2.4 Elementos que cruzan la interfaz de aislamiento

Los códigos indican que los elementos estructurales y todo componente no estructural que cruza la interfaz de aislamiento deben diseñarse para acomodar el desplazamiento total máximo, D_{TM} .

Aquellos sistemas flexibles como las tuberías e instalaciones deben diseñarse para que puedan desarrollar el desplazamiento que demande el SMP.

Las escaleras no deberían ser continuas a través de la interfaz de aislamiento, por lo que se acostumbra colocarles una junta para que pueda existir desplazamiento relativo entre sus extremos.

Para el caso de los ascensores se acostumbra colocar los aisladores bajo ellos, en el sótano más profundo a donde llegan, para permitir su funcionalidad al cruzar la interfaz de aislamiento principal.

5.3 Solicitaciones sísmicas para estructuras aisladas

5.3.1 Espectro de diseño

El espectro aplicable a las estructuras ubicadas en Perú es el especificado por la Norma E.030. Este espectro se encuentra al nivel del Sismo de Diseño (SD), y define la pseudo aceleración espectral S_a con la Ec. 5.6:

$$S_a = \frac{ZUCS}{R}g \quad (5.7)$$

Donde:

Z : Factor de Zona, representa la máxima aceleración que puede ocurrir en el lugar.

U : Factor de Uso o importancia de la estructura.

S : Factor de suelo. Considera el efecto del perfil de suelo en las ondas sísmicas.

C . Coeficiente de amplificación de las solicitaciones del suelo propia de la estructura.

C es variable con el periodo del modo de vibración de la estructura, según la Ec. 5.8.

$$C = \begin{cases} 2.5, & T \leq T_p \\ 2.5 \frac{T_p}{T}, & T_p \leq T < T_l \\ \frac{2.5 T_p T_l}{T^2}, & T \geq T_l \end{cases} \quad (5.8)$$

T_p y T_l : Periodos característicos del perfil de suelo.

R : Factor de reducción de solicitaciones sísmicas por ductilidad y sobrerresistencia.

g : Aceleración de la gravedad.

El factor de uso, U , para edificios aislados siempre es igual a 1, ya que no es relevante distinguir la importancia del edificio, pues siempre que desea que su desempeño sea tal que continúe operativo luego del sismo raro, con daños muy reducidos. Además, como la dinámica del edificio aislado es controlada por los dispositivos, la incertidumbre en los resultados del análisis sísmico es considerablemente menor que en el análisis de un edificio con base fija.

En estructuras aisladas se trabaja con varios valores de R , uno para cada uno de los siguientes: sistema de aislamiento, subestructura y superestructura. El valor de R para el sistema de aislamiento y la subestructura debe ser 1, porque estos no pueden admitir daños que comprometan la estabilidad de la superestructura. En la superestructura R puede tener un valor igual o menor a 2 para instalar cierto grado de ductilidad, aunque se espera que los elementos estructurales tengan un comportamiento prácticamente elástico durante un sismo.

Las Normas E.030 y ASCE 7-10 especifican que el espectro de diseño debe aplicarse al edificio siguiendo el procedimiento bidimensional. Adicionalmente, el ASCE 7-10 también admite el procedimiento tridimensional, aplicando un 30% del espectro aplicado en la dirección de análisis, en la dirección perpendicular.

5.3.2 Registros de aceleración

Para el análisis Tiempo-Historia, la Norma ASCE 7-10 requiere pares de componentes horizontales del registro de aceleración de al menos tres eventos sísmicos representativos del lugar donde se ubica la estructura, y el tipo de suelo existente. Para el diseño del sistema de aislamiento, se tomarán los resultados del análisis más desfavorable, a menos que se utilicen 7 pares de señales o más, en cuyo caso se podrá emplear el promedio de los resultados del análisis. Si no se cuentan con suficientes registros reales, se permite emplear registros artificiales.

Para complementar, la Norma ASCE 7-16 indica que, para cada par de componentes horizontales de movimientos del suelo, se construirá un espectro de pseudo aceleración tomando la suma vectorial (SRSS) de los valores del espectro de cada componente por separado, con 5% de amortiguamiento. Si los registros son espectro-compatibles, cada par de señales debe ser escalada tal que entre el rango de periodos entre $0.2T_M$, calculado con $K_{M\text{máx}}$, y $1.25 T_M$, calculado con $K_{M\text{mín}}$, la ordenada del espectro de una componente del par debe ser por lo menos el 90% de la correspondiente ordenada del espectro elástico de diseño. Finalmente, el promedio de los espectros SRSS de todos los pares de componentes no debe ser menor que el espectro elástico de diseño.

T_M es el periodo fundamental de la estructura aislada, determinada para el sismo máximo posible, y $K_{M\text{máx}}$ y $K_{M\text{mín}}$ son las rigideces máxima y mínima asociadas a este nivel de demanda sísmica.

5.4 Selección del procedimiento de análisis estructural

Las Normas ASCE 7-10 y NCh2745 indican requisitos complementarios entre sí para seleccionar el procedimiento de análisis estructural, con propósitos de diseño.

5.4.1 Análisis Estático o Fuerzas Equivalentes

Este método solo puede aplicarse a edificios regulares de 5 pisos o con altura menor a 20 metros. Además, la estructura debe encontrarse a más de 10 km de alguna falla activa, y en suelos tipo I y II (rocas y gravas) El sistema de aislamiento debe cumplir los siguientes requisitos adicionales:

- El periodo objetivo del sistema de aislamiento debe ser menor o igual a 3 s
 - La rigidez efectiva del sistema al nivel del desplazamiento de diseño D_D debe ser mayor que $1/3$ de la rigidez efectiva al 20% de D_D .
 - El sistema no debe limitar el desplazamiento del SMP a menos del desplazamiento D_{TM} .
 - La carga lateral de los dispositivos debe ser independiente de la carga vertical actuante sobre ellos, y de la velocidad de aplicación de la carga. Por ejemplo, no se permite emplear este procedimiento cuando los dispositivos son friccionales.
- D_D y D_{TM} se definen en el acápite 5.5.1.

5.4.2 Análisis Espectral

Este método puede aplicarse a cualquier tipo de estructura, siempre que el terreno sea tipo I, II o III (rocas, gravas y arenas no saturadas). Asimismo, el sistema de aislamiento debe cumplir con los requisitos adicionales para el análisis estático.

Adicionalmente, la Norma NCh2745 indica que cuando el suelo de cimentación sea muy blando, cuando la estructura se ubique a menos de 10 Km de una falla activa, o cuando el periodo T_M del sistema de aislamiento sea mayor a 3.5 segundos, se debe emplear espectros de diseño específicos del lugar.

5.4.3 Análisis Tiempo - Historia

Se puede utilizar para el diseño de todo tipo de estructura aislada, incluso las que no cumplen los requisitos adicionales para los análisis estático y espectral.

Los registros de aceleración a utilizar deben ser procesados para su aplicación en este método, de acuerdo a lo indicado en el acápite 5.3.2.

5.5 Desplazamientos laterales y rigideces mínimas

5.5.1 Análisis estático o de la fuerza equivalente

a) Desplazamientos de diseño

El ASCE 7-10 indica que el sistema de aislamiento se debe diseñar para desarrollar, como mínimo, el desplazamiento lateral debido al sismo de diseño (SD) en cada dirección de análisis. Dicho desplazamiento, D_D , corresponde al centro de rigidez (CR) del sistema de aislamiento. De la Norma E.030 se obtiene la Ec.5.9:

$$D_D = \frac{ZUCS T_D^2 g}{4\pi^2 B_D} \quad (5.9)$$

Donde T_D es el periodo del edificio aislado asociado al SD, C se calcula con este periodo, y B_D es el factor de reducción por amortiguamiento para el D_D , el cual se extrae de la tabla 17.5-1 del ASCE 7-10 (Tabla 5.1 en este documento).

Tabla 5.1. Factor de reducción por amortiguamiento del ASCE 7-10

Tabla 17.5-1 Coeficiente de amortiguamiento, B_D o B_M	
Amortiguamiento Efectivo, β_D o β_M	Factor B_D y B_M
≤ 2	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.7
40	1.9
≥ 50	2.0

A partir del desplazamiento de diseño, el periodo T_D del sistema de aislamiento y el peso sísmico W que este soporta, se puede estimar la rigidez efectiva mínima del sistema de aislamiento en la dirección analizada (Ec. 5.10):

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{Dmin} g}} \quad (5.10)$$

b) Desplazamientos máximos

El desplazamiento máximo ocurre en el centro de rigidez (CR) del sistema de aislamiento, bajo la acción del SMP. A partir de la Norma E.030 se obtuvo la Ec.5.11:

$$D_M = \frac{1.5ZUCS T_M^2 g}{4\pi^2 B_M} \quad (5.11)$$

Donde T_M es el periodo del sistema de aislamiento asociado al SMP, C se calcula con este periodo, y B_M se obtiene de la Tabla 5.1. El coeficiente 1.5 refleja que la demanda del SD es 2/3 de la demanda del SMP.

De igual forma que para K_{Dmin} , la rigidez efectiva mínima del sistema de aislamiento, asociada al SMP, se puede estimar con la Ec. 5.12:

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{Mmin} g}} \quad (5.12)$$

c) Desplazamiento Total

El desplazamiento total es aquel que ocurre en cualquier elemento del sistema de aislamiento, que considera el desplazamiento en el centro de rigidez del sistema y el que ocurre debido a las excentricidades en planta en la dirección de análisis. El desplazamiento total, D_{TD} y D_{TM} , se calcula con las Ecs. 5.13 y 5.14.

$$D_{TD} = D_D \left[1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] \quad (5.13)$$

$$D_{TM} = D_M \left[1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] \quad (5.14)$$

Donde:

- “b” y “d” son las dimensiones menor y mayor de la planta del edificio;
- “y” es la distancia entre el centro de rigidez del sistema de aislamiento y el dispositivo de interés, medido perpendicularmente a la dirección de análisis. Suele interesar el dispositivo más alejado del centro de rigidez.
- “e” es la suma de la excentricidad natural y la accidental. Esta última se toma como el 5% de la dimensión en planta perpendicular a la dirección de análisis.

D_{TD} y D_{TM} pueden ser menores que los calculados por las Ecs. 5.13 y 5.14, pero como mínimo deben ser iguales a $1.1D_D$ y $1.1D_M$, respectivamente. La Figura 5.1 muestra gráficamente la aplicación de las Ecs. 5.13 y 5.14.

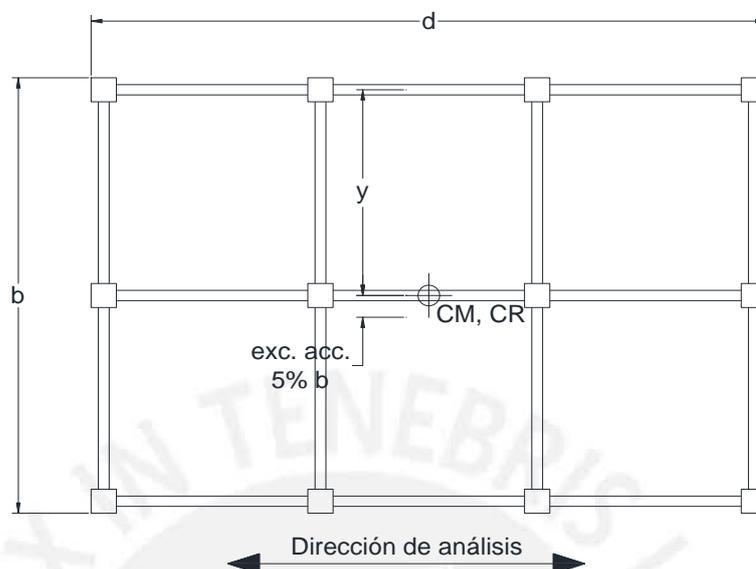


Figura 5.1. Aplicación de las ecuaciones 5.13 y 5.14

5.5.2 Análisis dinámico

La Norma ASCE 7-10 presenta los siguientes requisitos para determinar los desplazamientos del sistema de aislamiento:

- Los desplazamientos se calcularán empleando la suma vectorial de las componentes de la respuesta en cada dirección de análisis, empleando la rigidez mínima de los dispositivos.
- El desplazamiento total de diseño, D_{TD} , no debe ser menor que el 90% del hallado por el método estático. Asimismo, el desplazamiento total máximo, D_{TM} , no debe ser menor que el 80% del hallado por el método estático (Ecs. 5.15 y 5.16).

$$D_{TD \text{ dinámico}} \geq 90\% D_{TD \text{ estático}} \quad (5.15)$$

$$D_{TM \text{ dinámico}} \geq 80\% D_{TM \text{ estático}} \quad (5.16)$$

- Como la flexibilidad de la superestructura disminuye el desplazamiento del sistema de aislamiento calculado con modelos sencillos, para calcular los valores de D_{TD} y D_{TM} provenientes del análisis estático, es posible emplear los valores D'_D y D'_M , en lugar de D_D y D_M , respectivamente (Ecs. 5.17 y 5.18).

$$D'_D = \frac{D_D}{\sqrt{1 + \left(\frac{T}{T_D}\right)^2}} \quad (5.17)$$

$$D'_M = \frac{D_M}{\sqrt{1 + \left(\frac{T}{T_M}\right)^2}} \quad (5.18)$$

Donde T es el periodo de la estructura con base fija.

5.6 Límites para la distorsión o deriva de entrepiso

Los códigos de diseño consultados presentan límites para la deriva de entrepiso de estructuras aisladas, sin embargo, no existe un consenso respecto a este límite. Por ello, se ha preferido fijar un límite aplicable para estructuras peruanas, partiendo de la siguiente disposición del ASCE 7-10:

El factor de reducción R para la superestructura puede tomarse como 3/8 del valor correspondiente a edificios con base fija. R no debe ser menor que 1 ni mayor que 2.

Al aplicar el factor 3/8 a la deriva límite de la Norma E.030, para estructuras de concreto, 0.7%, se obtiene el valor de 0.25%. Este valor es idéntico al que indica la metodología Hazus (Ver acápite 2.3).

5.7 Fuerzas laterales mínimas

A continuación, se muestran los límites en las fuerzas laterales para el diseño del sistema de aislamiento, subestructura y superestructura.

5.7.1 Análisis estático

a) Fuerzas en el sistema de aislamiento y subestructura

El sistema de aislamiento y la subestructura deben diseñarse para que resistan una carga lateral mínima de sismo, V_b , tomando en cuenta todos los requisitos de resistencia, rigidez y ductilidad de una estructura convencional. Esta

fuerza mínima se desarrolla cuando el sistema de aislamiento trabaja con la rigidez efectiva máxima (Ec. 5.19)

$$V_b = K_{Dmax}D_D \quad (5.19)$$

La Norma E.030 establece que la carga lateral debe ser mayor que la obtenida cuando $C/R = 0.125$.

b) Fuerzas en elementos estructurales de la superestructura

La superestructura se debe diseñar para que soporte una fuerza cortante mínima, V_s (Ec. 5.20):

$$V_s = \frac{K_{Dmax}D_D}{R_1} \quad (5.20)$$

Donde R_1 no debe ser mayor que 2 y puede tomarse como 3/8 del valor de R correspondiente a estructuras con base fija. Además, V_s no debe ser menor que:

- El cortante de diseño para una estructura con base fija con el mismo peso sísmico y periodo de la estructura aislada.
- El cortante producido por los efectos del viento
- 1.5 veces la fuerza de activación del sistema de aislamiento (Q_d).

Finalmente, el cortante de diseño también debe ser mayor al obtenido cuando $C/R = 0.125$.

c) Distribución del cortante en la altura

El ASCE 7-10 plantea que la distribución de la fuerza V_s debe realizarse en relación al peso de cada nivel, como se aplicó en el acápite 4.3.3 (Ec. 5.21).

$$F_x = \frac{V_s w_x h_x}{\sum_{i=1}^n w_i h_i} \quad (5.21)$$

Por su parte, La Norma Nch2745 considera que la distribución de la fuerza V_s debe realizarse en forma uniforme en cada nivel.

5.7.2 Análisis dinámico

La fuerza cortante de diseño del sistema de aislamiento, subestructura y superestructura debe ser la que se obtenga en la dirección de análisis, tanto si emplea un procedimiento bidimensional o tridimensional.

El cortante de diseño del sistema de aislamiento y la subestructura no debe ser menor que el 90% del cortante calculado con el análisis estático (Ec. 5.24).

$$V_b \text{ dinámico} \geq 90\%V_b \text{ estático} \quad (5.24)$$

Además, para la superestructura se debe cumplir las Ecs. 5.25 y 5.26:

$$\text{Para estructuras regulares: } V_s \text{ dinámico} \geq 80\%V_s \text{ estático} \quad (5.25)$$

$$\text{Para estructuras irregulares: } V_s \text{ dinámico} \geq V_s \text{ estático} \quad (5.26)$$

5.8 Ensayos de dispositivos

El ASCE 7-10 propone dos tipos de ensayos a realizar con los dispositivos: control de calidad y prototipo. El profesional responsable del diseño deberá programar ensayos de control de calidad para los aisladores, tanto para la fabricación como para la instalación en obra. Los procedimientos de inspección dependen del sistema de aislamiento utilizado. Estos ensayos no son destructivos.

Por otro lado, se deben programar ensayos de dispositivos prototipo, las cuales permiten verificar las características fuerza-deformación y valores de amortiguamiento del sistema de aislamiento empleadas para el proceso de diseño. Estos dispositivos “prototipo” son adicionales a los que se requieren en obra ya que estos ensayos son destructivos. Los ensayos consisten en registrar el diagrama de histéresis para varios ciclos de carga/descarga y para varios incrementos de desplazamiento (Acápite 17.8.2.2 del ASCE 7-10).

Como mínimo, el fabricante debe velar por la calidad de los materiales, ambos tipos de ensayos, adhesivos de goma-acero, pernos y anclajes, procedimientos de instalación, entre otros.

Capítulo 6. METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE EDIFICIOS AISLADOS

En este capítulo se presenta una metodología integral para el diseño de edificaciones con un sistema de aislamiento en su base. La metodología se basa en el desempeño del sistema de aislamiento y el edificio aislado, así, se busca cumplir con tres grandes objetivos:

- Lograr que la estructuración del edificio aislado permita la funcionalidad y la simpleza de acuerdo a los requerimientos arquitectónicos.
- Controlar los parámetros derivados de la respuesta sísmica del edificio, siguiendo las disposiciones presentadas en el capítulo 5.
- Alcanzar los objetivos de desempeño descritos en el acápite 5.1.

La metodología de diseño de edificaciones con un sistema de aislamiento en su base se divide en las etapas mostradas en la Figura 6.1. Estas etapas se presentan en detalle en el diagrama de flujo de la Figura 6.2.

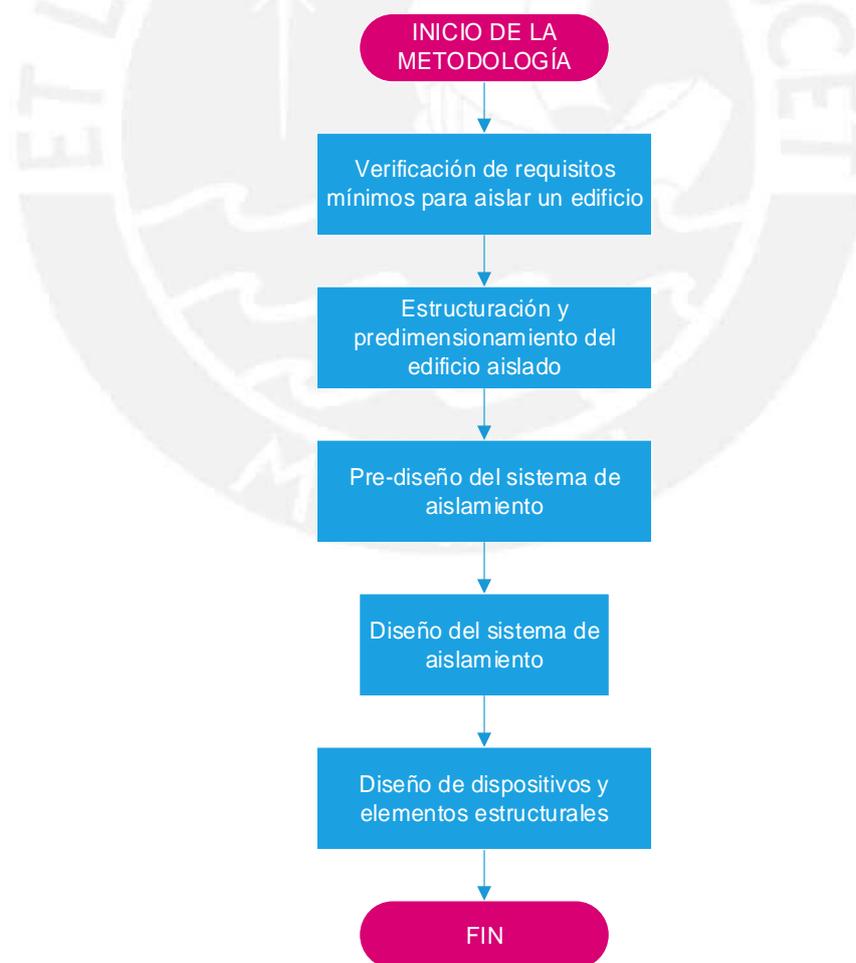


Figura 6.1. Etapas de la Metodología de diseño

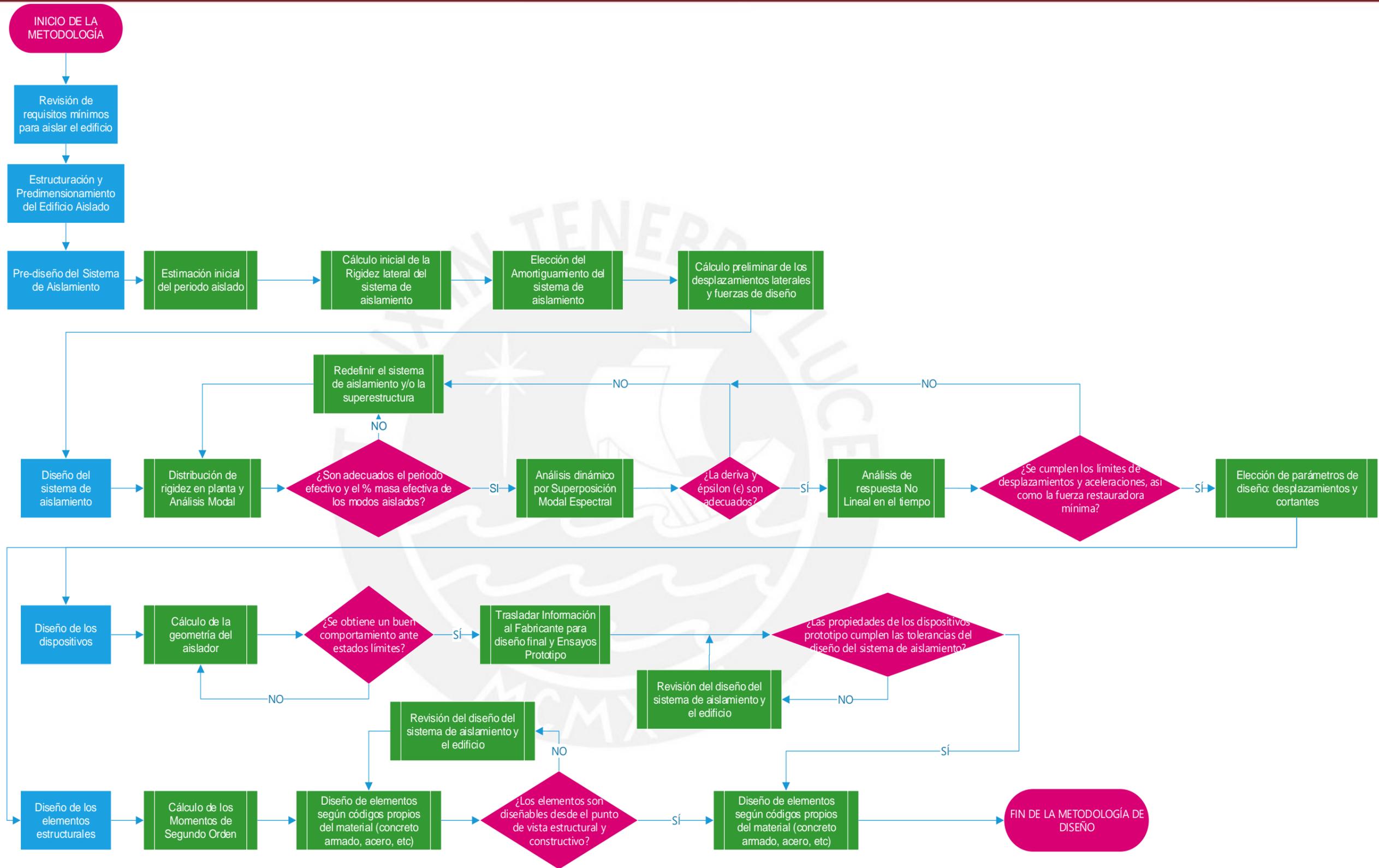


Figura 6.2. Diagrama de flujo de la metodología de diseño de edificios aislados

Como resultado de la metodología de diseño se obtiene los parámetros de diseño del sistema de aislamiento, a partir de los cuales los fabricantes pueden diseñar los dispositivos. Asimismo, se obtienen las fuerzas de diseño de los elementos estructurales del edificio, y los planos de estructuras de los mismos.

En el presente trabajo se hace énfasis en los edificios de concreto armado. Sin embargo, el esquema general de esta metodología es aplicable a cualquier tipo de estructura y dispositivo del mercado nacional, luego de algunas adaptaciones.

6.1 Requisitos mínimos para aislar un edificio

6.1.1 Esbeltez

Los edificios no deberían ser excesivamente esbeltos (relación altura total/mayor ancho de la planta), de manera que no se presenten tracciones en los dispositivos debido al momento volcante que la superestructura le ocasiona al sistema de aislamiento debido a la acción del sismo. Una recomendación práctica para la esbeltez del edificio es que no sea mayor que 3.

Los edificios de gran número de pisos son propensos a presentar esbelteces elevadas. Para resolver este problema se sugiere reducir el número de pisos o incrementar las dimensiones en planta (ensanchar), si fuera factible.

6.1.2 Masa y periodo de vibración del edificio

La masa y el periodo de vibración del edificio condicionan la eficiencia del aislamiento (cociente ϵ) y la rigidez necesaria en un aislador. La masa es un parámetro que no puede modificarse con facilidad, a diferencia de la rigidez.

Los edificios con base fija de elevada masa, como aquellos con muchos pisos y gran altura, generalmente tienen un periodo de vibración relativamente largo (2.5 s a más), el cual se encuentra en una zona espectral de baja sollicitación sísmica. Para aislar estos edificios se requiere rigidizarlos para acortar el periodo con base fija de modo que el aislamiento reduzca las sollicitaciones. La elevada masa obligaría a utilizar dispositivos muy rígidos, que también eleva el costo económico.

Por otro lado, los edificios bajos y poca masa generalmente tienen un periodo corto (0.5 segundos a menos). Para aislar estos edificios se podría plantear que el periodo del edificio aislado sea varias veces el del edificio con base fija para alcanzar la zona espectral de bajas sollicitaciones. Alargar el periodo implicaría colocar dispositivos muy flexibles que no se puedan encontrar en el mercado.

6.2 Estructuración y Predimensionamiento del Edificio Aislado

6.2.1 Estructuración

La estructuración de cualquier edificio consiste en definir el sistema portante a cargas verticales y sísmicas. Además, debe cumplir con los requisitos de funcionalidad, simpleza, economía y arquitectura del proyecto. Las siguientes son algunas recomendaciones para resolver la estructuración de un edificio aislado.

- En cada dirección de análisis del edificio se debe colocar rigidez lateral uniforme para evitar concentraciones de deformaciones en algunos aisladores. Un sistema aporticado es ideal para lograr uniformidad, pues al no tener placas evita que unos pocos elementos concentren la rigidez lateral. Colocar una placa generaría concentración de esfuerzos, lo cual puede generar problemas de estabilidad y tracciones al dispositivo bajo ella.
- Solo si fuera necesario rigidizar el edificio con base fija cuando tiene un sistema aporticado, se pueden considerar placas pequeñas en un número importante y disposición simétrica para elevar la rigidez lateral del edificio, sin que se altere la efectividad al sistema de aislamiento ni que se perjudique la uniformidad de la rigidez. Estas placas deben poder apoyarse en un solo aislador.
- Cuando se emplee un sistema aporticado, se debe procurar que la rigidez lateral resulte similar en ambas direcciones de análisis, para que los periodos de vibración del sistema de aislamiento en cada dirección de análisis no resulten muy diferentes entre sí. Esto se debe a que los dispositivos tienen la misma rigidez lateral para cualquier dirección del desplazamiento. Se recomienda emplear pórticos similares en número y rigidez en cada dirección, columnas con secciones cuadradas o circulares, etc. Se sugiere que, si no se pueden evitar columnas rectangulares, estas se ubiquen en el perímetro de la planta del edificio, y con su mayor dimensión paralela al borde.
- Se debe evitar la concentración de columnas donde se tendrían que colocar varios aisladores muy cercanos, normalmente en cajas de ascensores y escaleras. La concentración de dispositivos genera excentricidad natural en la planta del sistema de aislamiento. Asimismo, desde el punto de vista económico siempre se debe buscar optimizar el número de dispositivos.

La Figura 6.3 muestra un sector de la planta de la losa superior de un edificio aislado, en donde existe concentración de columnas (en rojo). Los pórticos principales se encuentran en azul. Se debería resolver la estructuración evitando las columnas rojas y empleando vigas que puedan soportar al resto de elementos.

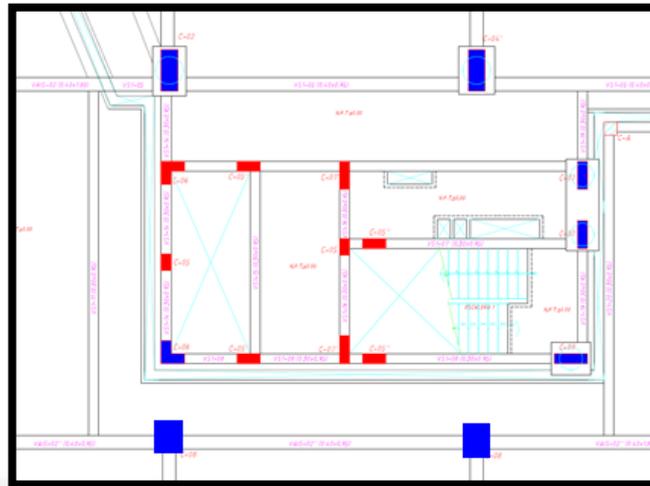


Figura 6.3. Concentración de columnas en caja de ascensor y escaleras.

6.2.2 Predimensionamiento de los elementos estructurales

El predimensionamiento de los elementos de un edificio aislado se realiza de manera similar a un edificio con base fija, considerando solo la carga vertical. No obstante, el dimensionamiento final de los elementos se obtiene luego de realizado el análisis estructural del edificio para el efecto combinado de las cargas gravitacionales y eventuales, tras lo cual se suelen incrementar las dimensiones para poder cumplir con los requisitos de rigidez y resistencia de los códigos de diseño.

Las siguientes son algunas recomendaciones para predimensionar los elementos estructurales de un edificio aislado, cuando son de concreto armado.

a) Vigas

El peralte h de las vigas de concreto armado de la superestructura puede encontrarse en el orden del intervalo de valores de la Ec. 6.1, siendo L_n la luz libre del vano.

$$h = \frac{L_n}{14} \sim \frac{L_n}{12} \quad (6.1)$$

El ancho no debe ser menor que 25 cm según lo indica la Norma E.060 Concreto Armado (SENCICO, 2009) para elementos con responsabilidad sísmica.

b) Columnas

Las dimensiones de las columnas, a diferencia de las vigas, se predimensionan realizando varias iteraciones hasta encontrar las secciones que logren satisfacer los requisitos de rigidez. Para iniciar las iteraciones el autor sugiere predimensionar el área A_c de la sección transversal de las columnas con la Ec. 6.2:

$$A_c = \frac{P_s}{0.30f'_c} \quad (6.2)$$

Donde P_s es la carga en servicio (Carga Muerta + Carga Viva). El factor de 0.3 que acompaña a f'_c busca obtener secciones “generosas” que permitan cumplir los requisitos de rigidez. El ancho de las secciones no debe ser menor que 25 cm, de acuerdo a la Norma E.060.

c) Losas

En estructuras aisladas, pueden utilizarse sistemas de techado que constituyan adecuados diafragmas rígidos. La selección del sistema dependerá de las luces, cargas verticales actuantes, y la facilidad del proceso constructivo.

Como normalmente se plantean luces grandes que obligan a optimizar el número de aisladores, al menos debe considerarse el uso de losas macizas. El espesor de estas losas puede predimensionarse dividiendo el perímetro del paño entre 180 para sobrecargas normales. Este número deja de ser recomendable para sobrecargas altas, del orden de 400 kg/m² a más, y abundantes tabiques.

En el sistema de aislamiento se recomienda utilizar siempre losas macizas, para asegurar una buena conexión entre las vigas de aislamiento.

d) Vigas de Aislamiento

Debido a los esfuerzos elevados que actuarán durante su vida útil, se recomienda que las vigas de la parrilla ubicada en la parte superior del sistema de aislamiento tengan un peralte “generoso”, y que se inicie el análisis considerando un peralte de 90 cm y un ancho entre 30 y 35 cm.

Las vigas de la parrilla inferior de aislamiento estarán menos esforzadas que las superiores, ya que no soportan losas sobre ellas. Se sugiere que se inicie el análisis asumiendo un peralte de al menos 70 cm y un ancho de 30 cm.

e) Pedestales

Las dimensiones del pedestal dependerán del diámetro del aislador que se encuentre bajo o sobre este. En el caso de los aisladores elastoméricos, la tapa de

acero debería quedar inscrita en la sección del pedestal al menos 10 cm. Esta tapa suele quedar circunscrita al aislador entre 7.5 y 10 cm.

La altura del pedestal debería superar en 10 cm al peralte de la viga de aislamiento de la parrilla superior, con la finalidad de descongestionar el nudo al anclar el refuerzo vertical de las columnas en dichos 10 cm.

La Figura 6.4 muestra un detalle general de los pedestales bajo y sobre un aislador típico.

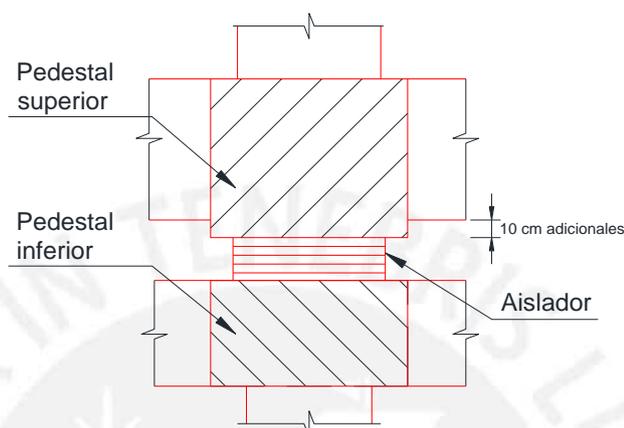


Figura 6.4. Detalle general de pedestales bajo y sobre un aislador

Ejemplo de aplicación

La Tabla 6.1 muestra el predimensionamiento de las secciones del modelo tridimensional del edificio aislado utilizado en el capítulo 4.

Tabla 6.1. Predimensionamiento de elementos estructurales del edificio ejemplo

Elemento	Predimensionamiento		Comentarios
Vigas	Luz Libre (L_n)	Peralte ($L_n/12$)	Se consideró 70 cm de peralte para reducir las derivas de entrepiso.
	6.00 m	0.50 m	
Columnas	$A_c = P_s/0.3f'_c$	Lado = $\sqrt{A_c}$ para sección cuadrada	Se decidió utilizar secciones de 70 cm de lado
	3778 cm ²	61.5 cm	
Losas macizas	Luz libre	Peralte = Perímetro/180	Se consideró 20 cm de espesor en forma conservadora, por las cargas actuantes.
	6 m	15 cm	
Vigas de aislamiento superiores	Peralte (cm)	Ancho (cm)	Dimensiones asumidas inicialmente
	100	35	
Pedestales	Sección	Altura	Dimensiones asumidas inicialmente
	Cuadrada de 1 m de lado	10 cm mayor al de la viga de aislamiento, 110 cm.	

6.3 Pre-diseño del Sistema de Aislamiento

El sistema de aislamiento se pre-diseña, por simplicidad, utilizando el método estático y un modelo de un grado de libertad. El pre-diseño se realiza a nivel del Sismo de Diseño (SD).

6.3.1 Estimación inicial del periodo de vibración aislado

Se realiza el análisis modal del edificio con base fija para obtener los periodos y formas de vibración del mismo. Luego, se estima el periodo del edificio aislado, T_D , como aproximadamente tres veces el periodo con base fija, T_f , de tal manera que el valor del cociente épsilon (ϵ) se encuentre alrededor de 0.1. Un rango aceptable es el mostrado en la Ec. 6.3.

$$T_D = (2.5 \sim 3.5) T_f \quad (6.3)$$

Se recomienda evitar que el sistema de aislamiento tenga un periodo demasiado alto, mayor a 5 segundos, para no tener que utilizar dispositivos demasiado flexibles. Para periodos muy largos no hay estudios suficientes del comportamiento estructural de los sistemas de aislamiento.

6.3.2 Rigidez y Amortiguamiento iniciales

a) Rigidez

Conocido el valor de T_D se determina la rigidez efectiva mínima K_{Dmin} del sistema de aislamiento para el SD, empleando la Ec. 5.10.

Para la rigidez máxima K_{Dmax} se recomienda aceptar, para propósitos de diseño, que esta es 10% mayor que K_{Dmin} . Si además se considera un factor por incertidumbre de 0.9 se obtiene un factor "total" de 1.25 (Mendo, 2015) (Ec. 6.4).

$$K_{Dmax} = 1.25K_{Dmin} \quad (6.4)$$

El proyectista puede asumir el factor según las posibilidades de los proveedores de los dispositivos y por experiencia.

b) Amortiguamiento

Se sugiere asumir este parámetro considerando lo siguiente:

- Un valor pequeño de amortiguamiento logrará que el aislamiento sea más efectivo y eficiente, pero se traduce en mayores solicitaciones de fuerzas y desplazamientos en el edificio.
- Un amortiguamiento excesivo reduce las solicitaciones, pero haría que el edificio tienda a comportarse como si tuviera base fija debido a los pequeños desplazamientos en el sistema de aislamiento, perdiéndose efectividad.

Este parámetro influirá en lo siguiente:

- El tipo de aislador. Por ejemplo, el LRB disipa más energía que el HDRB.
- La altura de los dispositivos y los esfuerzos en las vigas de aislamiento.
- El tamaño de la junta de separación sísmica alrededor del sistema de aislamiento.

6.3.3 Desplazamientos y Fuerzas de diseño iniciales

El desplazamiento de diseño D_D se calcula con la Ec. 5.9 y el desplazamiento total D_{TM} con la Ec. 5.13. Sustituyendo la Ec. 6.4 en la Ec. 5.19 se obtiene una expresión para la fuerza cortante de diseño (Ec. 6.5).

$$V_b = K_{Dmax}D_D = 1.25K_{Dmin}D_D \quad (6.5)$$

6.4 Diseño del sistema de aislamiento

El diseño del sistema de aislamiento consiste en determinar sus parámetros lineales equivalentes (amortiguamiento y rigidez efectiva) cumpliendo con los requisitos de desempeño de los códigos. El diseño debe considerar que los parámetros a determinar puedan lograrse con los dispositivos disponibles en el mercado. El diseño también incluye el posible uso de deslizadores friccionales u otros dispositivos.

Uno de los parámetros sísmicos que debería verificarse, y que no se menciona en los códigos es la aceleración absoluta que ocurriría en cada nivel del edificio aislado y en el sistema de aislamiento. Las aceleraciones excesivas podrían causar daños en el contenido del edificio, por lo que son indeseables.

Los detalles del diseño son la disposición en planta de los distintos tipos de aisladores, la verificación de la fuerza de restauración y la determinación de la junta

de separación sísmica entre el sistema y cualquier obstáculo que impida su libre desplazamiento.

En el presente trabajo se han empleado los niveles de demanda sísmica indicados en el ASCE 7-10. De acuerdo a este código, el diseño debe realizarse utilizando los resultados del análisis del sistema de aislamiento y de la superestructura para el sismo de diseño (SD), y el análisis del sistema de aislamiento para el sismo máximo posible (SMP). Por otro lado, en la versión del ASCE 7-16 se emplea únicamente un nivel de sismo equivalente al SMP, sin embargo, los procedimientos para el diseño son similares a los que se presentan en este trabajo.

El comportamiento de la superestructura estará necesariamente ligado al comportamiento del sistema de aislamiento. Por ello, en este trabajo se propone emplear los métodos de análisis con naturaleza dinámica y modelos tridimensionales, para que el diseño considere la respuesta en conjunto del sistema de aislamiento y la superestructura.

El diseño concluye luego de los ensayos de los dispositivos prototipo. Con los resultados de dichos ensayos se verifican los parámetros nominales del sistema de aislamiento obtenidos del proceso de diseño. Si las propiedades de los ensayos exceden las tolerancias de variación respecto a las propiedades nominales se debe revisar el diseño original para la aceptación de los dispositivos fabricados.

6.4.1 Procedimiento para el Sismo de Diseño

La respuesta del edificio ante el SD permite determinar los tipos de dispositivos y su ubicación en planta. Asimismo, permite definir los parámetros de diseño (desplazamientos y fuerzas) de los elementos estructurales del edificio. Ante este nivel de sismo se verifica la fuerza de restauración del sistema.

Para considerar la variabilidad de las propiedades nominales de los dispositivos (Ver acápite 5.2.2), se sugiere seguir el siguiente procedimiento:

- Realizar el primer análisis modal y espectral con la rigidez mínima de los dispositivos y el amortiguamiento asumido para obtener el diagrama bilineal global del sistema de aislamiento “lower bound”.
- Con el diagrama bilineal, considerando que las rigideces K_1 y K_2 no varían, se estima el amortiguamiento correspondiente a la rigidez máxima.
- Realizar el análisis estático y modal espectral “upper bound” y “lower bound” verificando todos los requisitos de los códigos.

- Realizar el análisis tiempo-historia y determinar los parámetros de diseño.

No obstante, se podría realizar solamente el análisis “lower bound” y considerar una tolerancia en la rigidez efectiva nominal de $\pm 10\%$ ($K_{Dmax} = 1.25K_{Dmin}$), pues los mayores desplazamientos se obtienen de este análisis, y las mayores fuerzas suelen estar gobernadas por las obtenidas del análisis estático. Al finalizar el diseño la rigidez nominal es verificada con los resultados de los ensayos de dispositivos prototipo.

a) Distribución de la rigidez efectiva en cada dispositivo

Se distribuye la rigidez efectiva del análisis estático en cada dispositivo, ajustando las rigideces según los resultados que se obtengan de los siguientes procesos. Se recomienda partir de una distribución equitativa de rigidez para poder identificar aquellos dispositivos que estén generando problemas de torsión en planta.

b) Análisis Modal del edificio aislado

Se analiza el edificio para comprobar el periodo obtenido del análisis estático. Asimismo, se busca verificar el porcentaje de masa efectiva de los modos más importantes y el cociente ϵ .

Las excentricidades natural y accidental en la planta del sistema de aislamiento no favorecen que los modos traslacionales tengan al menos un 90% de masa efectiva. Mediante este análisis se puede ajustar la distribución de rigidez en planta para acercar el centro de rigidez al centro de masa del sistema de aislamiento.

Las Normas ASCE 7-10 y E.030 especifican que la excentricidad accidental debe ser un 5% de la dimensión perpendicular a la de análisis. La excentricidad debe colocarse en la dirección más desfavorable para la dirección de análisis, por lo que en la etapa de diseño debería considerarse varios modelos que arrojen los esfuerzos más desfavorables para cada posición del centro de masas.

Ejemplo de aplicación

Debido a la simetría del edificio ejemplo, solo se realizó el análisis para la dirección X-X. Al modelo tridimensional del capítulo 4 con distribución de rigidez uniforme se le aplicó la excentricidad accidental de 5% en el eje Y positivo. Los resultados del análisis modal se muestran en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2. Resultados del análisis modal

Modo	Periodo (s)	%L ² /M	%L ² /M
		(X-X)	(Y-Y)
1	2.773	87.8%	0
2	2.715	0	99.7%
3	2.379	11.9%	0

De haberse colocado la excentricidad accidental en el sentido Y-Y negativo se habrían obtenido los mismos resultados.

Como el modo torsional tiene ahora un porcentaje de masa importante, se decidió redistribuir las rigideces de los dispositivos, colocando aisladores más rígidos en el perímetro de la planta y los más flexibles en el centro. Se obtuvo la distribución de la Tabla 6.3 y los resultados del análisis modal de la Tabla 6.4. La disposición de los aisladores en planta se muestra en la Figura 6.5.

Tabla 6.3. Nueva distribución de rigideces

Tipo de aislador	Cantidad	k_{Di} (Ton/m)
AS1.- Interiores	9	90.0
AS2.- De borde y esquineros	16	108.5
Total	25	2546

Tabla 6.4. Resultados del análisis modal con la nueva distribución de rigidez

Modo	Periodo (s)	%L ² /M	%L ² /M
		(X-X)	(Y-Y)
1	2.839	90.50%	0%
2	2.788	0%	99.76%
3	2.401	9.25%	0%

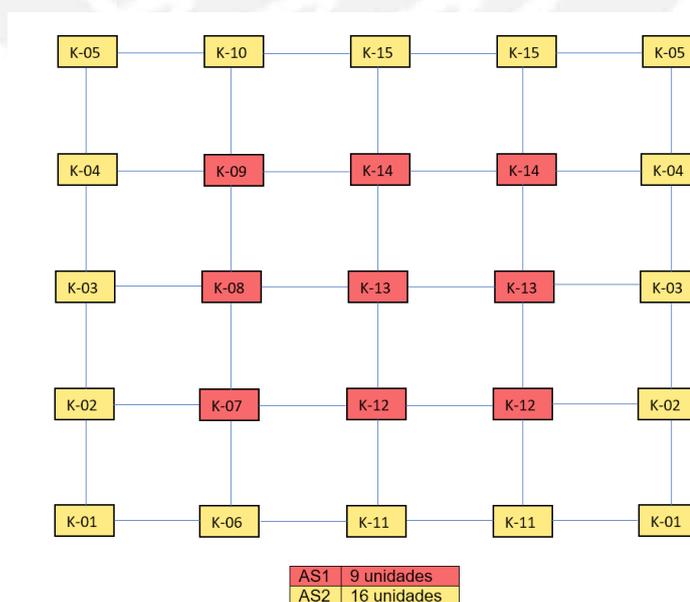


Figura 6.5. Disposición de los aisladores en planta

c) Respuesta Espectral del edificio aislado para el Sismo de Diseño

La respuesta espectral del edificio se obtiene empleando el procedimiento de análisis del acápite 4.7.2 y los requisitos del capítulo 5. Algunas recomendaciones para este proceso son las siguientes:

- Se sugiere emplear los métodos de análisis tridimensional y bidimensional, para luego tomar los resultados más desfavorables con propósitos de diseño.
- El cortante sísmico en el sistema de aislamiento debe representar el mínimo porcentaje posible del peso de la estructura. No obstante, no se debe excederse aumentando el amortiguamiento ni flexibilizando los dispositivos para minimizar dicho porcentaje.
- Cuando no se cumpla alguno de los requisitos de las Normas, se debe revisar la rigidez de la superestructura y el sistema de aislamiento. También se podría revisar el amortiguamiento asumido. Por ende, este proceso también es iterativo.

Ejemplo de aplicación

Para obtener la respuesta espectral del edificio ejemplo, con la distribución de rigideces del acápite anterior, se decidió emplear la reducción espectral del acápite 4.7.2 y los dos métodos tridimensional y bidimensional del acápite 5.3.1. El criterio de combinación de modos fue SRSS.

La deformada del edificio para el sismo en la dirección X-X fue la que muestra la Figura 6.6.

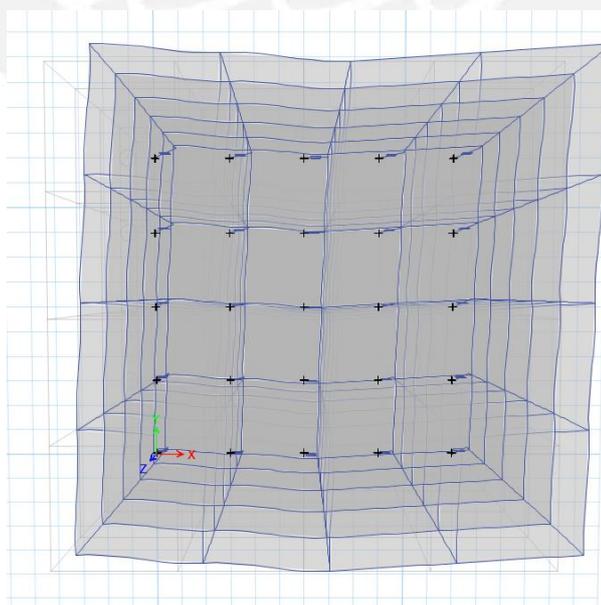


Figura 6.6. Deformada del edificio para el sismo de diseño en la dirección X-X

La respuesta espectral con ambos métodos se presenta en la Tabla 6.5.

Tabla 6.5. Parámetros de respuesta espectral con cada método de análisis

Parámetro	Método tridimensional		Método bidimensional	
	X	Y	X	Y
Desplazamiento de diseño D_D (cm)	16.7	5.7	16.7	0.0
Desplazamiento total de diseño D_{TD} (cm)	22.9	10.2	22.9	8.5
Deriva máxima de entrepiso (‰)	2.48	1.1	2.48	0.9
Desplazamiento del CM de la azotea (cm)	19.2	6.5	19.2	0.0
Desplazamiento de la azotea (cm)	26.3	11.7	26.3	9.7
Aceleración máxima del sistema de aislamiento (g)	0.135	0.067	0.135	0.058
Aceleración máxima de la azotea (g)	0.154	0.077	0.154	0.066
Cortante de diseño del sistema de aislamiento (Ton)	422.3	143.9	422.3	0.0
Cortante de diseño de la superestructura, $R=2$ (Ton)	211.2	72.5	211.2	0.0

La relación entre el desplazamiento total de diseño y el desplazamiento de diseño es de 1.37, valor mayor que el mínimo especificado por la Norma ASCE 7-10, de 1.1.

La relación entre el desplazamiento del centro de masa de la azotea y del sistema de aislamiento es de 1.15, por lo que el cociente épsilon (ϵ) es igual a 0.15. Este valor es cercano al valor recomendado de 0.1. ϵ es similar para los desplazamientos totales máximos que ocurren en dichos niveles.

La fuerza cortante en el sistema de aislamiento es un 9.4% del peso del edificio. La deriva de entrepiso máxima es menor a 2.5% y las aceleraciones no son excesivas (menores a 0.2g). Estos resultados reflejan que el edificio tendrá un buen comportamiento sísmico para el nivel de demanda del Sismo de Diseño.

d) Respuesta No Lineal en el tiempo

Con las propiedades bilineales de los dispositivos, se obtiene la respuesta no lineal del edificio aislado en el tiempo. Se verifica la rigidez y amortiguamiento efectivos utilizados para el análisis elástico del edificio aislado.

Se sugiere que los registros de aceleración cumplan con las disposiciones del ASCE 7-16 (acápito 5.3.2), pues el ASCE 7-10 no especifica requisitos para cuando se usan registros espectro-compatibles.

Los límites de rigidez, fuerzas de diseño y aceleraciones serán los mismos que se aplicaron para el método de respuesta espectral.

Finalmente, se recomienda rehacer el análisis estático y espectral con los parámetros equivalentes obtenidos.

Ejemplo de aplicación

La Tabla 6.6 muestra las propiedades bilineales de los dos tipos de dispositivos, empleando el desplazamiento de diseño, la rigidez efectiva y el amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento provenientes del análisis modal espectral.

Tabla 6.6. Propiedades bilineales de los aisladores

Aislador	D_D (m)	K_{eff} (Ton/m)	ξ_{eff}	Q_d (Ton)	K_2/K_1	K_2 (Ton/m)	K_1 (Ton/m)	F_y (Ton)	D_y (m)
De borde y esquineros	0.168	108.5	15%	4.455	0.1	81.98	819.8	4.95	0.006
Interiores	0.168	90	15%	3.695	0.1	68	680	4.11	0.006

Para el análisis tiempo-historia a nivel del SD, se decidió trabajar solamente con tres pares de registros sísmicos peruanos, de los eventos de 1966, 1970 y 1974. Estos registros se denominan “semillas”.

Las señales “semilla” fueron corregidas utilizando el programa SeismoSignal, empleando las correcciones de Línea Base y Filtrado de Señales, presentadas en el documento “Generación de acelerogramas sintéticos para la costa del Perú” (CISMID-UNI, 2013). Luego, las señales se procesaron para que cumplan las disposiciones del ASCE 7-16 (Ver Anexo 2).

Se aplicaron las componentes N82 en la dirección de análisis X-X, y N08 en la dirección perpendicular Y-Y. Los resultados resultaron iguales cuando se aplican los registros intercambiando las direcciones de análisis pues el edificio es simétrico.

Se mantuvo la excentricidad accidental de 5% en todas las plantas. El amortiguamiento del sistema de aislamiento debe ser nulo, pues la disipación de energía estará representada por los diagramas bilineales de cada dispositivo.

Tras realizar el análisis se obtuvieron las historias de respuesta en el tiempo para cada dirección X-Y, las cuales se muestran en el Anexo 3. Los máximos resultados obtenidos y los más desfavorables se resumen en las Tablas 6.7 y 6.8.

Los desplazamientos y derivas obtenidas son menores que los del análisis espectral, mientras que las aceleraciones de piso son mayores, pero no excesivas.

Como se obtuvieron resultados satisfactorios se procedió con la construcción de los diagramas de histéresis global e individual por dispositivo, para determinar sus propiedades elásticas equivalentes. La muestra el diagrama global del sistema de aislamiento para cada par de componentes.

Tabla 6.7. Resultados del análisis tiempo-historia para la dirección X-X

		Sismo 66	Sismo 70	Sismo 74	Máximo
Dirección X-X	Desplazamiento de diseño (cm)	13.7	11.3	14.7	14.7
	Desplazamiento total de diseño (cm)	15.1	12.4	15.5	15.5
	Desplazamiento del centro de masa de la Azotea (cm)	15.4	13.1	17.0	17.0
	Desplazamiento máximo Azotea (cm)	17.1	14.1	17.9	17.9
	Aceleración máxima del Sistema de aislamiento (g)	0.139	0.194	0.140	0.194
	Aceleración máxima de la Azotea (g)	0.181	0.231	0.197	0.231
	Fuerza cortante de diseño en la base aislada y subestructura (Ton)	342	262	383	383
	Fuerza cortante de diseño en la superestructura, R=2 (Ton)	171	131	192	192
	Deriva máxima (‰)	1.75	1.78	1.93	1.93

Tabla 6.8. Resultados del análisis tiempo-historia para la dirección Y-Y

		Sismo 66	Sismo 70	Sismo 74	Máximo
Dirección Y-Y	Desplazamiento de diseño (cm)	7.3	7.4	6.3	7.40
	Desplazamiento total de diseño (cm)	9.7	7.4	6.3	9.7
	Desplazamiento del centro de masa de la Azotea (cm)	8.4	8.4	7.1	8.4
	Desplazamiento máximo Azotea (cm)	10.9	8.3	7.8	10.9
	Aceleración máxima del Sistema de aislamiento (g)	0.163	0.134	0.143	0.163
	Aceleración máxima de la Azotea (g)	0.164	0.168	0.206	0.206
	Fuerza cortante de diseño en la base aislada y subestructura (Ton)	208	221	191	221
	Fuerza cortante de diseño en la superestructura, R=2 (Ton)	104	111	96	111
	Deriva máxima (‰)	1.38	0.98	1.19	1.38

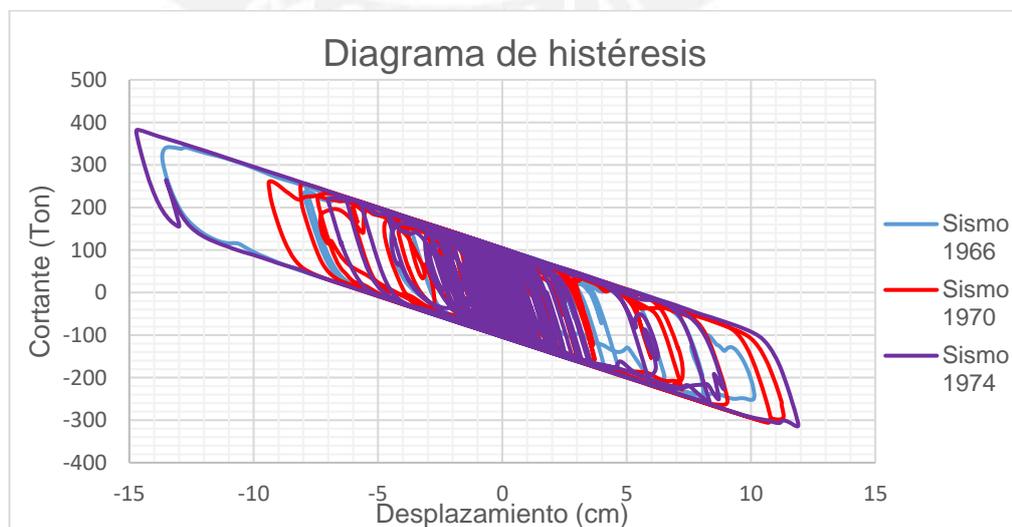


Figura 6.7. Diagrama de histéresis global, para el desplazamiento de diseño

Utilizando las Ecs. 4.23 a 4.25 se calcularon las propiedades lineales equivalentes del sistema de aislamiento, que se muestran en la Tabla 6.9. Los valores de D^+ , D^- , $V_{m\acute{a}x}$, $V_{m\acute{i}n}$ y Q_d se encontraron por simple inspección de los diagramas, y se consideró que D_y no varió y se mantiene en 0.006 m

Tabla 6.9. Parámetros equivalentes globales del sistema de aislamiento

Parámetro	Sismo 1966	Sismo 1970	Sismo 1974
D^+ (cm) =	10.13	11.31	11.90
D^- (cm) =	-13.68	-9.40	-14.72
D (cm) =	13.68	11.31	14.72
$V_{m\acute{a}x}$ (Ton)=	341.94	261.93	382.68
$V_{m\acute{i}n}$ (Ton)=	-252.56	-306.18	-314.80
K_{eff} (Ton/m) =	2497	2744	2620
Q_d (cm)=	103.5	103.5	103.3
D_y (cm) =	0.006	0.006	0.006
ξ_{eff} =	16.78%	19.42%	15.41%

Las rigideces efectivas fueron similares al valor del análisis elástico, 2546 Ton/m. El mayor amortiguamiento efectivo del sistema fue de 19.42%, valor que supera al asumido de 15%.

Dado que el edificio respondió ante el par de señales del Sismo de 1974 con los mayores desplazamientos y fuerzas se tomó la rigidez de 2620 Ton/m y el amortiguamiento de 15.41% con propósitos de diseño.

La fuerza de activación del sistema de aislamiento, Q_d , es de 103 Ton.

Los diagramas histeréticos individuales y sus propiedades equivalentes se muestran en el Anexo 3.

Se ha verificado el cumplimiento de los límites de rigidez y que los resultados del análisis tiempo-historia reflejan las propiedades equivalentes

e) Verificación de la Fuerza restauradora

Es recomendable que esta verificación se realice antes y después de realizado el análisis tiempo-historia. Si, en cualquiera de los casos, no se cumple esta condición se debe reducir el amortiguamiento del sistema de aislamiento o flexibilizarlo, de manera que el desplazamiento total de diseño aumente.

De la Ec. 5.1, la diferencia entre F_{DTD} y $F_{50\%DTD}$ será ΔF (Ec. 6.6):

$$\Delta F = F_{DTD} - F_{50\%DTD} \geq 0.025W \quad (6.6)$$

Del diagrama bilineal del sistema de aislamiento se deduce que $\Delta F = \frac{K_2 D_{TD}}{2}$ (Ec. 6.7).

$$\Delta F = \frac{K_2 D_{TD}}{2} \geq 0.025W \quad (6.7)$$

Las fuerzas involucradas en la Ec. 6.7 se muestran en la Figura 6.8.

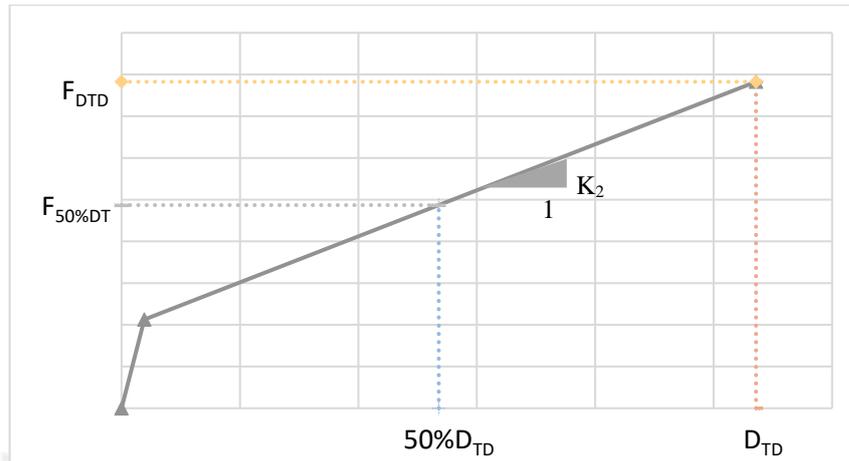


Figura 6.8. Fuerzas involucradas en el límite de la fuerza de restauración

Ejemplo de aplicación

Se verificó el límite para la fuerza de restauración lateral empleando el menor desplazamiento total de diseño, de 15.5 cm sin componente perpendicular. De la se extrajo la a fuerza correspondiente al desplazamiento de 15.5 cm, manteniendo constantes K_1 y K_2 . De acuerdo a la Tabla 6.10 el sistema de aislamiento sí cumple con la fuerza de restauración lateral.

Tabla 6.10. Verificación de la fuerza restauradora

Parámetro		
$F_{D_{TD}}$	397.5	Ton
$F_{50\%D_{TD}}$	250.4	Ton
ΔF	147.1	Ton
$0.025W$	114	Ton
¿Cumple Ec. 6.5?	Sí	

f) Revisión del análisis estático y espectral

Con la nueva rigidez y amortiguamiento efectivos, se vio conveniente revisar el análisis estático de un modelo de 1 GDL y el análisis espectral del modelo

tridimensional. Los resultados del nuevo análisis estático se muestran en la Tabla 6.11.

Tabla 6.11. Resultados del nuevo análisis estático

Rigidez efectiva, K_{Dmin}	2497	Ton/m
Masa del edificio, $M = m_s + m_b$	461.12	Ton.s ² /m
Periodo aislado, T_D	2.7	s
Amortiguamiento Efectivo	15.4	%
Factor de reducción por amortiguamiento, B_D	1.362	-
Seudo aceleración (E.030) reducida por B_D	1.11	m/s ²
Desplazamiento de diseño	0.205	m
Desplazamiento total de diseño	0.236	m
Rigidez efectiva máxima, $K_{Dmax} = 1.25K_{Dmin}$	3121.3	Ton/m
Cortante de diseño sistema de aislamiento	640	Ton
Cortante de diseño superestructura	320	Ton

(*) Para el cálculo del desplazamiento total de diseño solo se empleó la excentricidad accidental de 5% pues no existe excentricidad natural en planta. La dimensión mayor en planta perpendicular a la dirección de análisis es de 24 m y el valor de e es el 5% de esta dimensión, 1.2 m. El valor de “ y ” es la distancia del centro de rigidez al aislador más alejado, perpendicular a la dirección de análisis, e igual a 12 m. La relación entre D_{TD} y D_D es 1.15, mayor que el mínimo de 1.1 según el ASCE 7-10.

Para el análisis modal espectral se utilizó el espectro de diseño reducido por el nuevo factor B_D . La nueva distribución de rigidez se muestra en la Tabla 6.12.

Tabla 6.12. Nueva distribución de rigidez

Tipo de aislador	Cantidad	k_{Di} (Ton/m)
1. Interiores	9	88.2
2. De borde y esquineros	16	106.45
Total	25	2497

El nuevo periodo $T_D = 2.87$ s. En la Tabla 6.13 se muestran los resultados del análisis espectral, solo para el método tridimensional del ASCE 7-10. Los resultados son iguales a los que se obtuvieron para la otra dirección de análisis. Dado que todos los resultados son satisfactorios, se decidió continuar con el siguiente proceso.

Tabla 6.13. Nuevos resultados del análisis espectral

Parámetro	Componente X-X	Componente Y-Y
Desplazamiento de diseño (cm)	16.8	5.7
Desplazamiento total de diseño (cm)	23.06	10.29
Deriva máxima de entrepiso (‰)	2.44	1.08
Desplazamiento del CM de la azotea (cm)	19.24	6.52
Desplazamiento de la azotea (cm)	26.4	11.8
Aceleración máxima del sistema de aislamiento (g)	0.133	0.066
Aceleración máxima de la azotea (g)	0.152	0.076
Cortante de diseño del sistema de aislamiento (Ton)	417	141
Cortante de diseño de la superestructura (R=2) (Ton)	209	70.5

g) Desplazamientos y cortantes para el diseño

La elección de estos parámetros obedece a los límites indicados por el ASCE 7-10. Este documento dispone que cuando se trabaja con métodos de análisis dinámicos, el cortante de diseño y los desplazamientos del sistema de aislamiento estarán limitados por los del análisis estático.

Se recomienda escalar el cortante espectral a los valores elegidos por simplicidad en el proceso de diseño. Con el cortante escalado se obtiene las fuerzas internas de diseño en los elementos estructurales.

Ejemplo de aplicación

En la Tabla 6.14 se presentan las fuerzas obtenidas en todos los análisis, además de los límites presentados en el capítulo 5. Se calcula el factor de escala del cortante espectral para que cumpla los límites mencionados, tanto para la superestructura como el sistema de aislamiento.

Para el cortante de diseño se tomó solo la componente en la dirección de análisis. Para la otra dirección la fuerza será la misma dada la simetría del edificio.

La fuerza de viento se calculó con los lineamientos de la Norma E.020 (Ver Anexo 4)

Tabla 6.14. Selección del cortante de diseño

Datos de los análisis realizados (Ton)	
Peso Sísmico, "P"	4524
Cortante basal del análisis estático	640
Cortante basal del análisis espectral	417
Cortante basal del análisis tiempo-historia	383

Fuerzas de diseño para el sistema de aislamiento y subestructura (Ton)	
Cortante del análisis espectral (R = 1)	417
Cortante del análisis tiempo-historia (R = 1)	383
Cortante estático x 0.9 (R = 1) (ASCE 7-10)	576
Cortante mínimo (ZUCS/R x P, C/R = 0.125) (E.030)	255
Cortante de diseño	576
Factor de escala del cortante espectral en la interfaz de aislamiento	1.38
Fuerzas de diseño para la superestructura (Ton)	
Cortante del análisis espectral (R = 2)	208.5
Cortante del análisis tiempo-historia (R = 2)	191.5
Cortante estático x 0.8 (R = 2) (ASCE 7-10)	256
Cortante mínimo (ZUCS/R x P, C/R = 0.125) (E.030)	255
Fuerza de viento (E.020)	21
Fuerza de activación = 1.5 Q _d	155
Cortante de diseño	256
Factor de escala del cortante espectral en el primer entrepiso	0.82

En la Tabla 6.15 se presenta un resumen de todos los desplazamientos obtenidos para el diseño del edificio aislado, y la suma vectorial de sus componentes para el diseño de los dispositivos. Además, la Tabla 6.16 presenta el cálculo de D_{TD} mínimo para el análisis dinámico, según el ASCE 7-10.

Tabla 6.15. Desplazamientos para el diseño del edificio y dispositivos

	D _D (cm)		D _{TD} (cm)		Suma vectorial	
	X	Y	X	Y	D _D (cm)	D _{TD} (cm)
Análisis Estático	20.5	-	23.6	-	20.5	23.6
Análisis Espectral	16.8	5.7	23.06	10.29	17.7	25.3
Análisis Tiempo - Historia	14.7	7.4	15.5	9.7	16.5	18.3

Tabla 6.16. Cálculo de D_{TD} mínimo (ASCE 7-10)

D _D estático (cm)	20.5
Periodo de base fija T (s)	0.878
Periodo aislado T _D (s)	2.7
D' _D estático (cm) - Ecuación 5.17	19.5
D _{TD} estático (cm) - Ecuación 5.13	22.43
Mínimo D_{TD} dinámico: 90% D_{TD} estático (cm) Ec. 5.15	20.2

La suma vectorial de las componentes del desplazamiento total de diseño más desfavorables es del análisis espectral (25.3 cm), valor que se utiliza para los ensayos de control de calidad de los dispositivos de obra.

El amortiguamiento para el desplazamiento D_D de 16.8 cm es de 15.4% y el intervalo de rigideces efectivas es $[K_{Dmin}, K_{Dmax}] = [24.97, 31.22]$ Ton/cm.

El amortiguamiento es variable y depende del desplazamiento del sistema de aislamiento. Debido a esto se recomienda realizar análisis para determinar las nuevas solicitaciones

6.4.2 Procedimiento para el Sismo Máximo Posible

Mediante el análisis a nivel del SMP se obtienen las fuerzas y desplazamientos de diseño del sistema de aislamiento. Se sugiere seguir el mismo procedimiento sugerido para el Sismo de Diseño (SD) para considerar la variabilidad.

En el presente trabajo se adoptará el factor de 1.5 considerado por el ASCE 7-10 para pasar del nivel del SD al SMP. Sin embargo, debe notarse que dicho valor es dependiente de la sismología o peligro sísmico de cada sitio, por lo que estará sujeto a verificación y optimización en estudios futuros.

a) Análisis estático inicial

El diagrama de histéresis global del sistema de aislamiento, a nivel del desplazamiento de diseño, puede extenderse hasta alcanzar el desplazamiento y la fuerza que demanda el SMP, asumiendo constantes las rigideces K_1 y K_2 (Figura 6.9) El cociente de estos parámetros define la rigidez efectiva K_{Mmin} que debe ser menor que la obtenida para el SD. Con dicha rigidez se puede estimar, asumiendo un modelo de 1 GDL, un mayor periodo T_M , con la misma masa $M = m_s + m_b$.

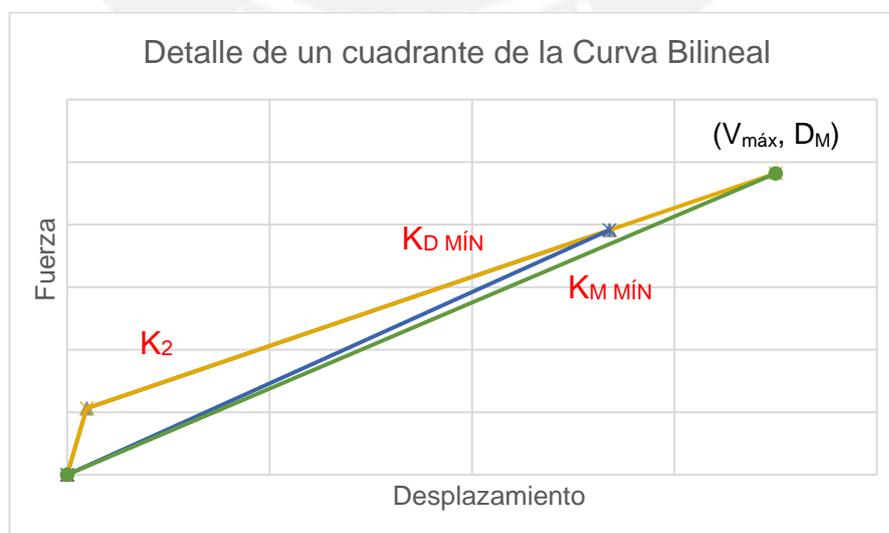


Figura 6.9. Rigideces efectivas K_{Dmin} (azul) y K_{Mmin} (verde).

El desplazamiento D_M se obtiene de manera iterativa con el siguiente proceso:

- Se asume el desplazamiento máximo para el SMP y se obtiene la fuerza máxima, $V_{m\acute{a}x}$, con el diagrama bilineal.
- Del equivalente lineal elástico se obtiene el nuevo porcentaje de amortiguamiento ξ_M . Con este porcentaje se determina el valor del factor de reducción B_M .
- Se calcula el desplazamiento máximo D_M utilizando el espectro de diseño de la Norma E.030 a nivel del SMP.

Al converger los desplazamientos se procede a concluir el análisis estático con el resto de parámetros ya conocidos.

Ejemplo de aplicación

Se requirieron dos iteraciones, las cuales se resumen en la Tabla 6.17.

Tabla 6.17. Iteraciones para obtener el desplazamiento D_M

Propiedad	Unidades	Primera Iteración	Segunda Iteración
Masa del edificio $M = m_s + m_b$	Ton.s ² /m	461.12	
Desplazamiento D_M asumido	cm	30	35.4
Fuerza máxima $V_{m\acute{a}x}$	Ton	672.5	774.9
Rigidez efectiva K_{Mmin}	Ton/m	2241.7	2189.1
Periodo T_M	s	2.85	2.9
Área del diagrama, A_H	Ton.m	121.7	144.1
Porcentaje de amortiguamiento ξ_M	%	9.6	8.36
Factor B_M	-	1.184	1.184
Sa reducido por amortiguamiento	g	0.176	0.171
Desplazamiento D_M calculado	cm	35.4	0.354
¿Converge?	-	NO	SI

La convergencia fue rápida pues para periodos superiores a T_L el desplazamiento espectral de la Norma E.030 es constante. Finalmente, la rigidez máxima K_{Mmin} es de 2189.1 Ton/m y el amortiguamiento ξ_M es de 8.36%.

De acuerdo al ASCE 7-10, la fuerza cortante del método estático es igual a $V_M = K_{Mmax}D_M = 1.25K_{Mmin}D_M = 969$ Ton. El desplazamiento total máximo, D_{TM} , con la ecuación 5.11 es igual a 40.7 cm.

b) Análisis Modal Espectral para el SMP

Para el análisis modal se realiza la distribución de la rigidez máxima K_{Mmin} en cada dispositivo, en forma proporcional a la distribución empleada para el SD. También se considera 5% de excentricidad accidental en planta. Los resultados del análisis modal también serán iguales para cada dirección de análisis dada la simetría del edificio.

El análisis espectral debe realizarse con el mismo criterio de combinación utilizado para el SD, y los procedimientos bidimensional o tridimensional. Se evalúan los desplazamientos y fuerzas de diseño del sistema de aislamiento.

Todas las ordenadas del espectro de diseño utilizado para el SD se multiplican por 1.5 para llevarlas al nivel del sismo máximo.

Ejemplo de aplicación

La Tabla 6.18 muestra la distribución de la rigidez K_{Mmin} en cada dispositivo, en forma proporcional a la distribución de la Tabla 6.12. Los resultados del análisis modal se muestran en la Tabla 6.19.

Tabla 6.18. Distribución de rigideces en los dispositivos, para el SMP

Tipo de aislador	Cantidad	k_{Mi} (Ton/m)
1. Interiores	9	77.33
2. De borde y esquineros	16	93.32
Total	25	2189.1

Tabla 6.19. Resultados del análisis modal para el SMP.

Modo	Periodo (s)	%L ² /M (X-X)	%L ² /M (Y-Y)
1	3.045	90.55%	0
2	2.99	0	99.82%
3	2.575	9.27%	0

Estos resultados son prácticamente proporcionales a los obtenidos para el SD, y se sigue obteniendo un 90% de masa efectiva en el modo fundamental.

Para obtener la respuesta espectral para el SMP se amplificó el espectro de respuesta de la Norma E.030 por 1.5. Luego, se obtuvo la respuesta espectral del sistema de aislamiento solamente para el método tridimensional de la Norma ASCE 7-10 (100% + 30%). Los resultados de este análisis se muestran en la Tabla 6.20.

Tabla 6.20. Respuesta espectral del sistema de aislamiento ante el SMP

Parámetro	Componente X-X	Componente Y-Y
Desplazamiento máximo, D_M (cm)	29.5	10.0
Desplazamiento total máximo, D_{TM} (cm)	40.6	18.3
Aceleración máxima del sistema de aislamiento (g)	0.2	0.102
Cortante máximo del sistema de aislamiento (Ton)	644	219

La relación entre D_{TM} y D_M es de 1.38, similar al obtenido para el SD.

c) Respuesta en el tiempo para el SMP

Mediante este método se verifica la relación fuerza-desplazamiento obtenida de los análisis anteriores. Se determinarán los mismos parámetros del sistema de aislamiento evaluados para el SD.

Para este proceso es posible escalar la aceleración pico de los registros empleados para el SD al valor de $1.5ZSg$ correspondiente al SMP. Como solo se ha multiplicado a los registros por un factor, también se cumplirá que el promedio de los espectros de respuesta de la suma vectorial de cada componente es por lo menos igual al espectro de diseño de la Norma E.030 a nivel del SMP.

Las propiedades no lineales de los dispositivos se obtienen manteniendo constantes los valores de K_1 , K_2 y F_y ya determinados para el SD.

Ejemplo de aplicación

Los registros de aceleración empleados en el acápite 6.4.1 se escalaron a $1.5ZSg$. Todos los pares de registros se presentan en el Anexo 5. Se emplearon los mismos factores para los registros N82 en la dirección X-X y N08 en la dirección Y-Y ($\sqrt{0.55^2 + 0.45^2} \approx 1.1$).

Para definir las propiedades bilineales de los dispositivos, fue suficiente mantener constantes los valores de K_1 , K_2 y F_y de la Tabla 6.6.

Se obtuvieron las historias de desplazamientos, aceleraciones y fuerza cortante en el sistema de aislamiento, las cuales se muestran en el Anexo 6. El resumen de los máximos resultados obtenidos se muestra en las Tablas 6.21 y 6.22:

Tabla 6.21. Respuesta en el tiempo para el SMP en la dirección X-X

		Sismo 66	Sismo 70	Sismo 74	ENVOLVENTE
Dirección X-X	Desplazamiento máximo (cm)	24.7	22.1	17.4	24.7
	Desplazamiento total máximo (cm)	26.8	25.0	17.7	26.8
	Aceleración máxima del Sistema de aislamiento (g)	0.185	0.231	0.168	0.231
	Fuerza cortante máxima en la base aislada (Ton)	525	497	420	525

Tabla 6.22. Respuesta en el tiempo para el SMP en la dirección Y-Y

		Sismo 66	Sismo 70	Sismo 74	ENVOLVENTE
Dirección Y-Y	Desplazamiento máximo (cm)	14.5	15.3	11.7	15.3
	Desplazamiento total máximo (cm)	19.5	16.6	11.9	19.5
	Aceleración máxima del Sistema de aislamiento (g)	0.138	0.123	0.151	0.151
	Fuerza cortante máxima en la base aislada (Ton)	329	348	249	348

La Figura 6.10 muestra el diagrama bilineal global del sistema de aislamiento para el desplazamiento máximo. A partir de él se obtuvieron los parámetros lineales equivalentes de la Tabla 6.23.

Los resultados más desfavorables fueron la rigidez efectiva de 2210 Ton/m y el amortiguamiento de 10.35%. Estos valores son cercanos a los obtenidos mediante el análisis espectral.

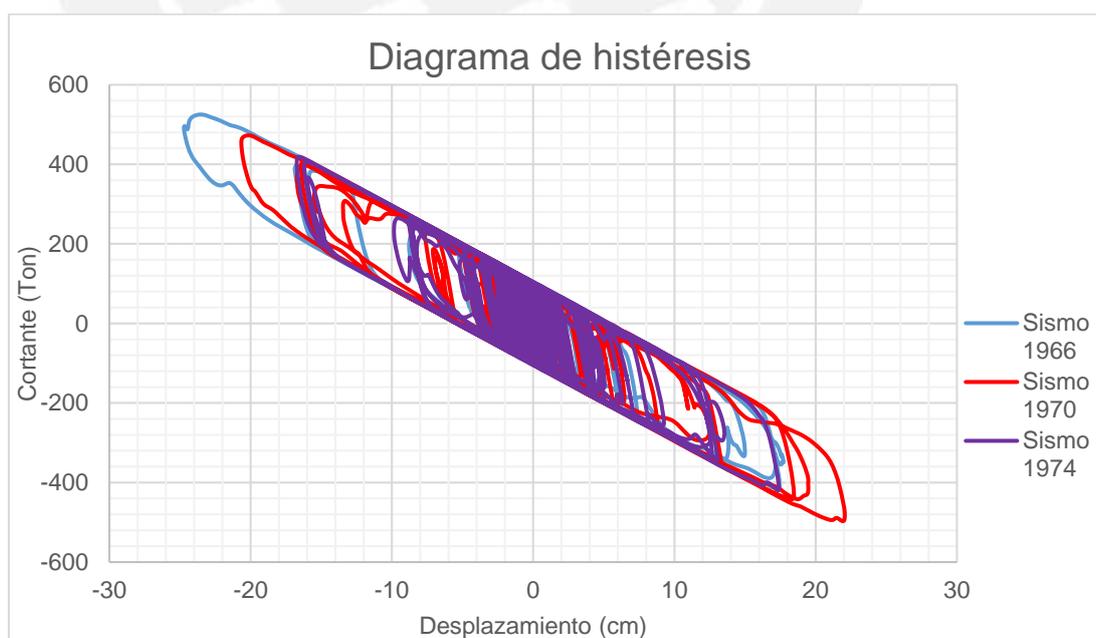


Figura 6.10. Diagrama de histéresis del sistema de aislamiento para el SMP.

Tabla 6.23. Parámetros equivalentes del sistema de aislamiento para el SMP.

Parámetro	Sismo 1966	Sismo 1970	Sismo 1974
D^+ (cm) =	17.72	22.06	17.40
D^- (cm) =	-24.73	-20.67	-16.73
D (cm) =	24.73	22.06	17.40
$V_{máx}$ (Ton)=	525.13	472.74	418.89
$V_{mín}$ (Ton)=	-413.00	-497.26	-419.91
K_{eff} (Ton/m) =	2209.93	2269.96	2456.99
Q_d (cm)=	103.5	103.5	103.3
D_y (cm) =	0.006	0.006	0.006
ξ_{eff} =	10.35%	12.74%	15.08%

d) Recálculo del análisis estático y modal espectral

Como las propiedades obtenidas del análisis tiempo-historia fueron satisfactorias se procedió a recalcular los resultados del análisis estático y modal espectral. Los resultados se muestran en las Tablas 6.24 a 6.27.

Tabla 6.24. Resultados del nuevo análisis estático

Rigidez efectiva, K_{Mmin}	2210	Ton/m
Masa del edificio, $M = m_s + m_b$	461.12	Ton.s ² /m
Periodo aislado, T_M	2.87	s
Amortiguamiento Efectivo	10.2	%
Factor de reducción, B_M	1.206	-
Seudo aceleración reducida por amortiguamiento, $Sa = \frac{1.5ZUCSg}{B_D}$	1.67	m/s ²
Desplazamiento máximo, $D_M = \frac{Sa T_M^2}{4\pi^2}$	0.348	m
Desplazamiento total máximo, $D_{TM} = D_M \left[1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right], \quad \frac{D_{TM}}{D_M} = 1.15$	0.40	m
Rigidez efectiva máxima, $K_{Mmax} = 1.25K_{Mmin}$	2763	Ton/m
Fuerza cortante en la base aislada. $V_b = K_{Mmax} D_M = 1.25K_{Mmin} D_M$	962	Ton

Tabla 6.25. Nueva distribución de rigidez para el SMP

Tipo de aislador	Cantidad	k_{Mi} (Ton/m)
1. Interiores	9	78.07
2. De borde y esquineros	16	94.21
Total	25	2210

Tabla 6.26. Resultados del análisis modal para el SMP.

Modo	Periodo (s)	%L ² /M	%L ² /M
		(X-X)	(Y-Y)
1	3.031	90.55	0
2	2.977	0	99.81
3	2.563	9.27	0

Tabla 6.27. Nuevos resultados del análisis espectral ante el SMP

Parámetro	Componente X-X	Componente Y-Y
Desplazamiento máximo, D_M (cm)	28.6	9.8
Desplazamiento total máximo, D_{TM} (cm)	39.3	17.8
Aceleración máxima del sistema de aislamiento (g)	0.197	0.10
Cortante máximo del sistema de aislamiento (Ton)	629	215

e) Selección de parámetros para diseño de los dispositivos

De los análisis dinámicos se seleccionan el cortante y el desplazamiento más desfavorables para el diseño de los dispositivos, y se verifican los límites de las Normas. Se especifica el amortiguamiento que ocurre ante dicho desplazamiento.

En forma similar al Sismo de Diseño, se recomienda escalar el cortante del análisis espectral para facilitar la obtención de las fuerzas de diseño de los dispositivos.

A partir del desplazamiento total máximo obtenido se determina la junta de separación sísmica que debe existir alrededor de todo el sistema de aislamiento para separarlo de las estructuras aledañas o el terreno circundante.

Ejemplo de aplicación

La Tabla 6.28 muestra la selección del cortante de diseño del sistema de aislamiento a partir de los resultados obtenidos, y el factor de escala del cortante espectral para alcanzar dicho valor.

Tabla 6.28. Selección del cortante de diseño

Datos de los análisis realizados (Ton)	
Peso Sísmico, "P"	4524
Cortante basal del análisis estático	962
Cortante basal del análisis espectral	629
Cortante basal del análisis tiempo-historia	525

Fuerzas de diseño para el sistema de aislamiento (Ton)	
Cortante del análisis espectral (R = 1)	629
Cortante del análisis tiempo-historia (R = 1)	525
Cortante estático x 0.9 (R = 1) (ASCE 7-10)	866
Cortante mínimo (ZUCS/R x P, C/R = 0.125) (E.030)	382
Cortante de diseño	866
Factor de escala del cortante espectral en la interfaz de aislamiento	1.38

En las Tablas 6.29 y 6.30 se presentan los desplazamientos de los distintos análisis realizados y la suma vectorial de sus componentes, para el diseño de los dispositivos. Además, se presenta el mínimo desplazamiento total máximo para el análisis dinámico, según el ASCE 7-10, y los desplazamientos seleccionados para el diseño.

Tabla 6.29. Desplazamientos para el diseño de los dispositivos

	D _M (cm)		D _{TM} (cm)		D _M (SRSS)	D _{TM} (SRSS)
	X	Y	X	Y		
Análisis Estático	34.8	-	40.0	-	34.8	40.0
Análisis Espectral	28.6	9.8	39.3	17.8	30.2	43.1
Análisis Tiempo - Historia	24.7	15.3	26.8	19.5	29.1	33.1

Tabla 6.30. Cálculo de D_{TM} mínimo (ASCE 7-10)

D _M estático (cm)	34.8
Periodo de base fija T (s)	0.878
Periodo aislado T _M (s)	3.031
D' _M estático (cm) - Ecuación 5.15	33.4
D _{TM} estático (cm) - Ecuación 5.11	38.4
Mínimo D_{TM} dinámico: 80% D_{TM} estático (cm) Ecuación 5.13	30.7

El desplazamiento total máximo más desfavorable, en la dirección de análisis, fue de 39.3 cm. Este valor superó al mínimo calculado en la Tabla 6.30, por lo que no requiere escalamiento. Con este valor se determinó la *junta de separación sísmica* del sistema de aislamiento, el cual podrá ser de 45 cm. Se decidió dejar 5 cm adicionales para evitar que posibles desplomes de los muros de contención alrededor del sistema de aislamiento o cualquier otro obstáculo perjudique el libre desplazamiento de los aisladores.

La suma vectorial de las componentes del desplazamiento seleccionado es de 43.1 cm, valor con el que se diseñarán los dispositivos.

El amortiguamiento para el desplazamiento D_M de 28.6 cm es de 10.2% y la rigidez efectiva puede tomar los valores $[K_{Mmin}, K_{Mmax}] = [22.10, 27.63]$ Ton/cm.

6.5 Diseño de los dispositivos

Para el diseño de cada tipo de aislador se requiere conocer las cargas actuantes sobre ellos y el desplazamiento al que estarán sometidos. Se suele considerar para cada tipo de aislador el promedio de las cargas axiales que se investigan con las combinaciones de las Ecs. 5.5 y 5.6. Las cargas axiales pueden determinarse a partir del análisis espectral con el cortante del sistema de aislamiento ya escalado.

Cuando se utiliza la combinación de la Ec. 5.6 es posible obtener tracciones en los dispositivos. Debido a que no se tiene suficiente conocimiento acerca de las deformaciones de los dispositivos en tracción es recomendable evitar este efecto o aceptar tracciones pequeñas, del orden de una sexta parte de la carga máxima en compresión. No obstante, para una combinación donde no se mayoran las cargas de gravedad no debería aparecer tracción debido al efecto del SMP horizontal y vertical.

Cada tipo de aislador tiene sus propios requisitos de desempeño ante distintos casos de carga y estados límites de diseño (estabilidad, volcamiento, etc.). Los requisitos de desempeño se verifican ante cargas de servicio y ante la acción combinada de las cargas de gravedad y cada nivel de sismo (SD y SMP). Cada verificación cuenta con un factor de seguridad que varía de acuerdo a la recurrencia del caso de carga (mayor para cargas de servicio, intermedio para el caso del SD y menor ante el SMP, pero siempre mayor o igual a 1).

Los fabricantes o proveedores son quienes suelen realizar el diseño final de los dispositivos, aplicando sus propias tolerancias y rango de propiedades mecánicas que puedan lograr. Sin embargo, es importante que el proyectista conozca el procedimiento para que pueda revisar el diseño que le entrega el proveedor.

Cuando ya se cuenta con el diseño final de los dispositivos y los resultados de los ensayos prototipo, es necesario realizar una revisión del diseño del sistema de aislamiento y los elementos estructurales, a fin de verificar que no existan variaciones excesivas que perjudiquen el comportamiento del edificio aislado.

En el presente trabajo se decidió presentar solo un diseño preliminar de aisladores HDRB en el Anexo 7.

6.6 Diseño de elementos estructurales

Los elementos estructurales se diseñan siguiendo los requisitos de los códigos específicos para carga material. Para el caso de los edificios aislados, se consideran los efectos de las cargas de gravedad y del Sismo de Diseño (según

ASCE 7-10), además de los efectos de otras cargas cuyos efectos sean importantes sobre los elementos.

Esta etapa de la metodología, si bien se presenta al final de la misma, puede realizarse desde que se concluye el análisis modal espectral del edificio aislado a nivel del SD, pues también es importante realizar un prediseño de los elementos estructurales, para que al final de la metodología de diseño no se tenga que regresar a las etapas iniciales por elementos que no puedan tener un diseño satisfactorio.

Se tienen las siguientes recomendaciones para el diseño de elementos estructurales en un edificio aislado:

- La fuerza axial producto del efecto del sismo vertical a nivel del Sismo de Diseño, influye en mayor medida en la carga axial de diseño de las columnas del edificio aislado, y disminuye su influencia con la altura del edificio. Puede despreciarse el efecto de estas fuerzas en elementos horizontales salvo en voladizos, donde las vibraciones verticales pueden ser importantes.
- Los momentos de segundo orden (P-delta) que aparecen en el sistema de aislamiento se calculan con el desplazamiento que desarrolla cada dispositivo debido al SD y la fuerza axial proveniente de cada caso de carga. En forma práctica puede tomarse un solo desplazamiento D_{TD} para todos los dispositivos.

6.6.1 Combinaciones de carga para el Diseño en Concreto Armado

Para los edificios aislados de concreto armado, el diseño de los elementos estructurales deberá contemplar las cargas de diseño provenientes de las combinaciones de la Norma E.060 Concreto Armado que ya incluyen los efectos del sismo vertical especificados por la Norma ASCE 7-10 (Ecs. 6.8 a 6.10)

$$U = 1.4CD + 1.7L \quad (6.8)$$

$$U = 1.25(D + L) \pm (E_h + 0.2S_{DS}D) \quad (6.9)$$

$$U = 0.9D \pm (E_h + 0.2S_{DS}D) \quad (6.10)$$

Donde: D es la carga muerta o permanente
L es la carga viva o no permanente
 E_h es la carga debido al efecto del sismo horizontal.
 S_{DS} proviene de la Ec. 5.4 pero para el Sismo de Diseño

Cada caso de carga debe incluir los efectos de segundo orden debido al desplazamiento del sistema de aislamiento.

6.6.2 Requisitos de ductilidad para elementos de Concreto Armado

Las columnas y vigas componentes del sistema estructural de todo el edificio aislado deberían ser diseñados para tener un grado de ductilidad que no debería alcanzar a la que los códigos proveen para los sistemas de Pórticos Especiales a Momento, pues estos elementos no deberían llegar a experimentar grandes incursiones inelásticas durante un sismo raro, o bien, deberían mantenerse prácticamente elásticos.

La Norma Nch2745 (2013) indica que, para los elementos con responsabilidad sísmica se debe emplear las exigencias de diseño para Pórticos Intermedios Resistentes a Momento además del criterio de mayor resistencia a flexión instalada en columnas que en vigas concurrentes a un nudo (“columnas fuertes y vigas débiles”).

La Norma E.060 Concreto Armado especifica solo dos niveles de requisitos de ductilidad para elementos con responsabilidad sísmica, por lo que los criterios para los sistemas aporticados o dual tipo II son los que deberían emplearse para los edificios aislados peruanos. Esta recomendación aplica para todos los elementos del edificio: de la subestructura, superestructura y el sistema de aislamiento.

Ejemplo de aplicación

Previo al diseño final de los elementos estructurales se estimó el momento de segundo orden que ocurre debido al desplazamiento del sistema de aislamiento. Este momento se repartió equitativamente entre la plataforma superior de aislamiento y la cimentación del edificio, dado que se emplearon aisladores elastoméricos HDRB. Los valores obtenidos se muestran en el Anexo 8.

Luego, a manera de ejercicio se presenta el diseño final de los siguientes elementos estructurales del edificio ejemplo, empleando los criterios de ductilidad para sistemas aporticados del Capítulo 21 de la Norma E.060.

a) Vigas de aislamiento

La Figura 6.11 muestra la envolvente de resistencias a flexión requeridas en las vigas de aislamiento paralelas a la dirección X-X y la Figura 6.12 muestra la envolvente de resistencias a cortante. Estas envolventes incluyen todas las combinaciones de las ecuaciones 6.8 a 6.10. Se consideró un factor de reducción de fuerzas sísmicas igual a 1.

Nótese que, si bien, la excentricidad accidental de 5% en la dirección Y positiva produjo mayores esfuerzos en la viga de aislamiento sobre el eje 5, se debería obtener lo mismo para la viga sobre el eje 1 si se coloca esta excentricidad en sentido contrario.

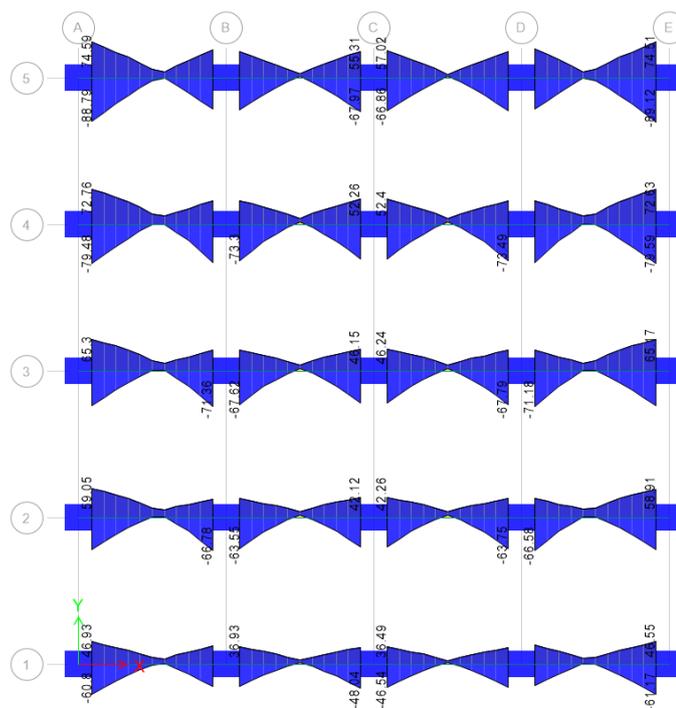


Figura 6.11. Envolvente de resistencias requeridas a flexión en vigas de aislamiento

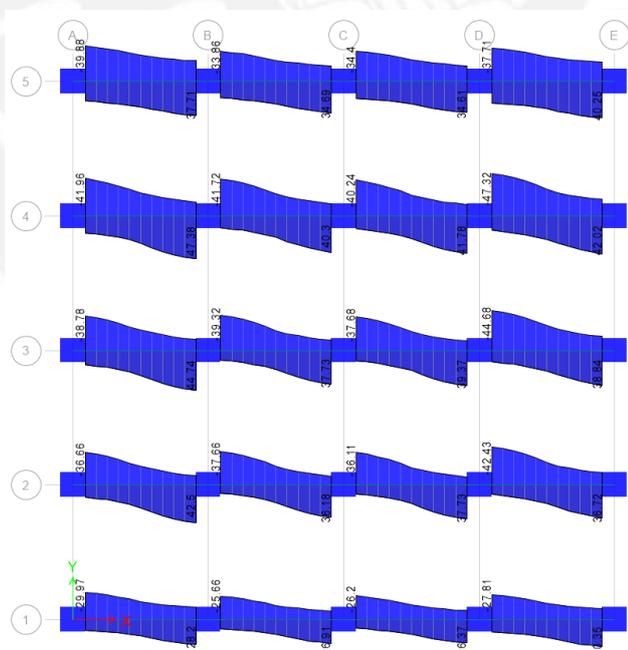


Figura 6.12. Envolvente de resistencias requeridas a fuerza cortante en vigas de aislamiento.

La Figura 6.13 muestra el detalle del refuerzo de la viga más solicitada, el resto de detalles se pueden apreciar en la lámina adjunta E-02.

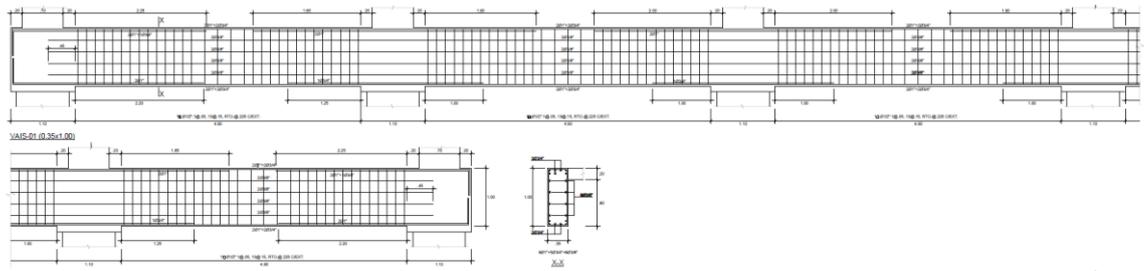


Figura 6.13. Detalle de refuerzo de viga VAIS-01

b) Vigas

Para las vigas de la superestructura se empleó un factor de reducción de fuerzas sísmicas igual a 2. Al igual que con las vigas de aislamiento, se debe colocar la excentricidad accidental también en sentido contrario al considerado en el modelo para obtener los esfuerzos más desfavorables en todas las vigas.

Las Figuras 6.14 y 6.15 muestran la envolvente de resistencias requeridas a flexión y cortante del pórtico con mayores esfuerzos (ejes 1 y 5 para el Sismo en la dirección X-X, y los ejes A y E para el Sismo en la dirección Y-Y). Se aprecia que los esfuerzos debidos al sismo disminuyen en la altura, llegando a ser prácticamente de gravedad en los últimos pisos. En el Anexo 9 se presentan las envolventes para todas las plantas de la superestructura.

La Figura 6.16 muestra el detalle de refuerzo de la viga más solicitada. Los detalles del refuerzo de todas las vigas se presentan en la lámina E-03.

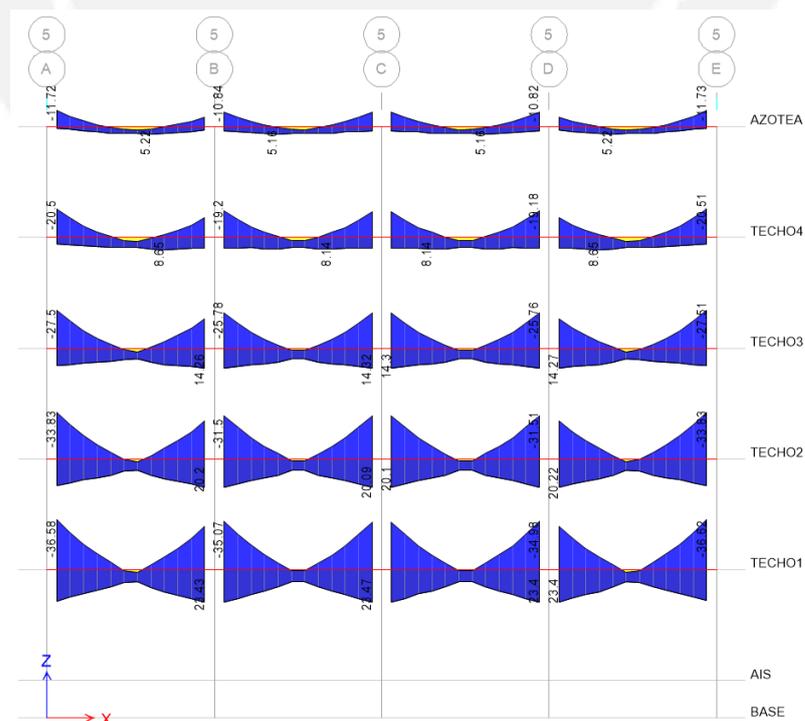


Figura 6.14. Envolvente de resistencias requeridas a flexión en vigas de la superestructura.

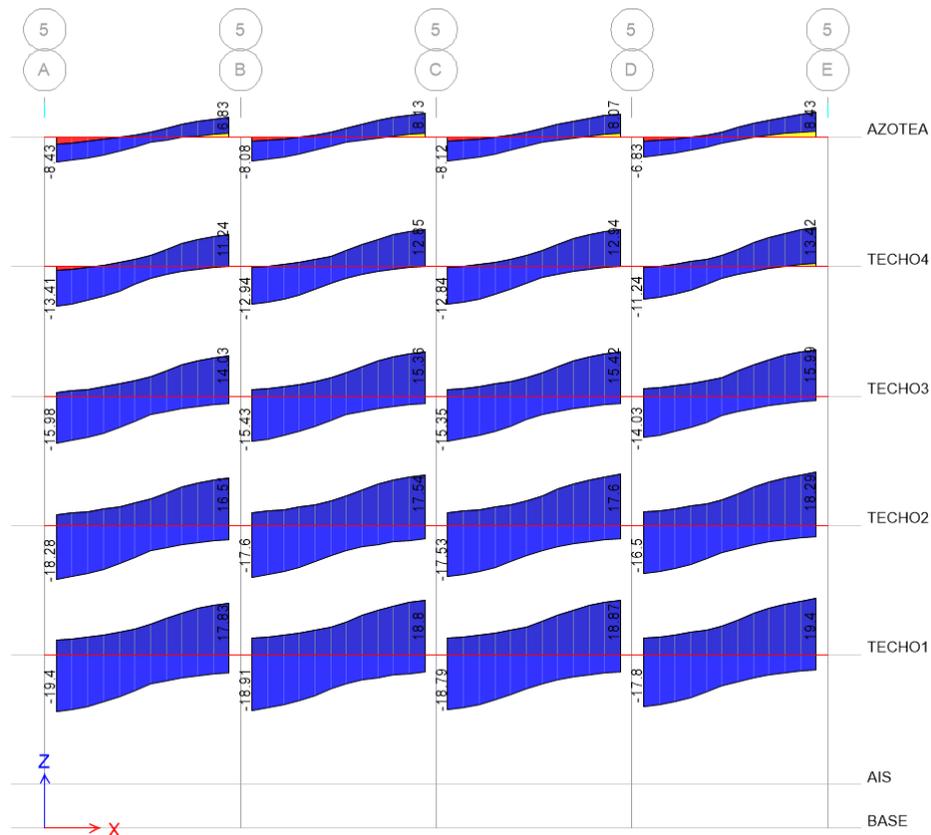


Figura 6.15. Envoltura de resistencias requeridas a fuerza cortante en vigas de la superestructura.

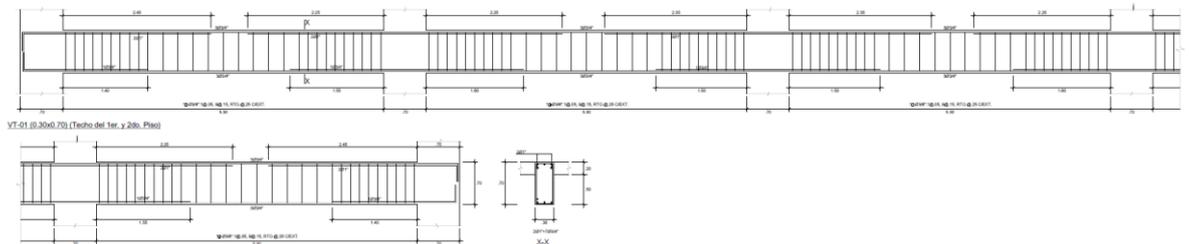


Figura 6.16. Detalle de refuerzo de viga VT-01 (1er. y 2do. piso)

c) Columnas

Las columnas fueron dimensionadas para controlar las derivas de entrepiso. Debido a esto, es válido pensar que estas columnas deberían cumplir con el diseño por resistencia con una cuantía cercana a la mínima de 1% del área de la sección bruta.

La Figura 6.17 muestra el refuerzo mínimo propuesto para todas las columnas del edificio ejemplo (Ver lámina adjunta E-01). Con el refuerzo propuesto se generó el diagrama de interacción de la Figura 6.18. La columna más solicitada resultó la que se ubica en el cruce de ejes 4-B, y sus cargas actuantes se muestran en la Tabla 6.31. Para estas cargas se investigaron las combinaciones de diseño que se muestran en la Tabla 6.32.

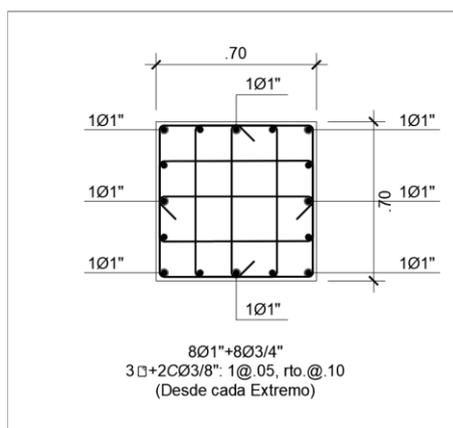


Figura 6.17. Refuerzo propuesto para la columna C-01

Tabla 6.31. Cargas actuantes sobre la columna del cruce de ejes 4-B

Entrepiso	Columna	Caso de Carga	Sección	P	V2	V3	T	M2	M3
			m	Ton	Ton	Ton	Ton-m	Ton-m	Ton-m
TECHO1	C9	DEAD Min	0	-192.47	0.84	-0.84	0.00	-2.29	2.29
TECHO1	C9	DEAD Min	1.65	-190.53	0.84	-0.84	0.00	-0.90	0.90
TECHO1	C9	DEAD Min	3.3	-188.59	0.84	-0.84	0.00	0.49	-0.49
TECHO1	C9	LIVE Min	0	-46.40	0.13	-0.13	0.00	-0.38	0.38
TECHO1	C9	LIVE Min	1.65	-46.40	0.13	-0.13	0.00	-0.16	0.16
TECHO1	C9	LIVE Min	3.3	-46.40	0.13	-0.13	0.00	0.05	-0.05
TECHO1	C9	SISMOXX Max	0	1.62	17.80	6.19	1.71	15.98	49.26
TECHO1	C9	SISMOXX Max	1.65	1.62	17.80	6.19	1.71	5.80	19.91
TECHO1	C9	SISMOXX Min	3.3	1.62	17.80	6.19	1.71	4.55	15.27
TECHO1	C9	SISMOXX Min	0	-23.83	-18.04	-6.25	-1.71	-16.10	-50.21
TECHO1	C9	SISMOXX Min	1.65	-23.61	-18.04	-6.25	-1.71	-5.79	-20.50
TECHO1	C9	SISMOXX Min	3.3	-23.39	-18.04	-6.25	-1.71	-4.47	-15.44

Tabla 6.32. Combinaciones de diseño para la columna 4-B

Entrepiso	Columna	Combinación	Sección	P	V2	V3	T	M2	M3
			m	Ton	Ton	Ton	Ton-m	Ton-m	Ton-m
TECHO1	C9	1.4D+1.7L	Top	348.34	1.406	-1.4	0	0.771	-0.771
TECHO1	C9	1.4D+1.7L	Bottom	348.34	1.406	-1.4	0	-3.852	3.852
TECHO1	C9	1.25(D+L)+SXX	Top	296.97	19.02	4.97	1.71	5.225	14.595
TECHO1	C9	1.25(D+L)+SXX	Bottom	296.97	19.02	4.97	1.71	12.643	52.598
TECHO1	C9	1.25(D+L)-SXX	Top	321.98	-16.8	-7.5	-1.71	-3.795	-16.12
TECHO1	C9	1.25(D+L)-SXX	Bottom	322.42	-16.8	-7.5	-1.71	-19.44	-46.87
TECHO1	C9	1.25(D+L)+SYY	Top	298.59	1.22	-1.2	0	0.675	-0.675
TECHO1	C9	1.25(D+L)+SYY	Bottom	298.59	1.22	-1.2	0	-3.338	3.3375
TECHO1	C9	1.25(D+L)-SYY	Top	298.59	1.22	-1.2	0	0.675	-0.675
TECHO1	C9	1.25(D+L)-SYY	Bottom	298.59	1.22	-1.2	0	-3.338	3.3375
TECHO1	C9	0.9D+SXX	Top	171.61	18.56	5.43	1.71	4.991	14.829
TECHO1	C9	0.9D+SXX	Bottom	171.61	18.56	5.43	1.71	13.919	51.321
TECHO1	C9	0.9D-SXX	Top	196.62	-17.3	-7	-1.71	-4.029	-15.88
TECHO1	C9	0.9D-SXX	Bottom	197.05	-17.3	-7	-1.71	-18.16	-48.15
TECHO1	C9	0.9D+SYY	Top	173.23	0.76	-0.8	0	0.441	-0.441
TECHO1	C9	0.9D+SYY	Bottom	173.23	0.76	-0.8	0	-2.061	2.061
TECHO1	C9	0.9D-SYY	Top	173.23	0.76	-0.8	0	0.441	-0.441
TECHO1	C9	0.9D-SYY	Bottom	173.23	0.76	-0.8	0	-2.061	2.061

Las solicitaciones últimas de carga axial y momento flector de la Tabla 6.32 se ubicaron como puntos del diagrama de interacción (Figura 6.18). Como los puntos se ubicaron dentro del diagrama se concluye que el diseño por flexocompresión fue satisfactorio.

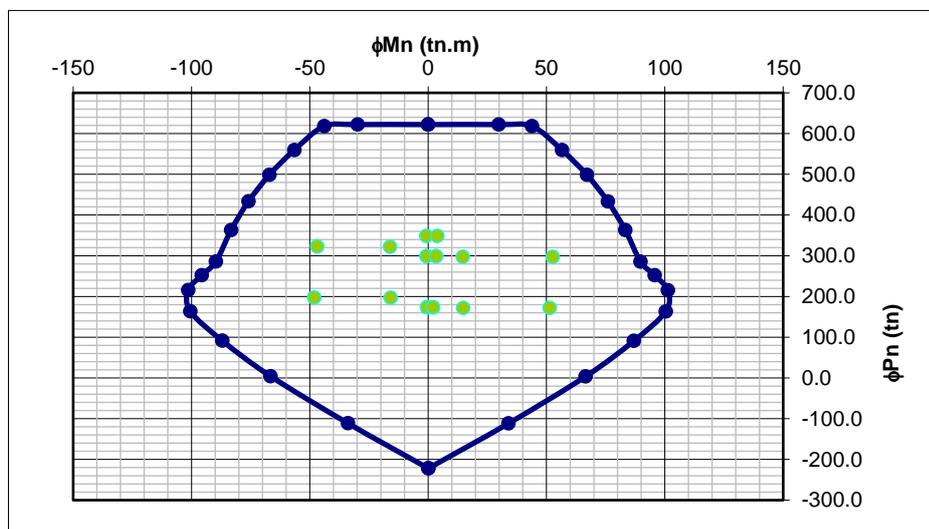


Figura 6.18. Diagrama de interacción para la columna más solicitada

Por otro lado, se observa que la fuerza cortante en la columna es relativamente baja y que puede ser resistida con el refuerzo transversal mínimo indicado en el capítulo 21 de la Norma E.060 para columnas de sistemas aporticados.

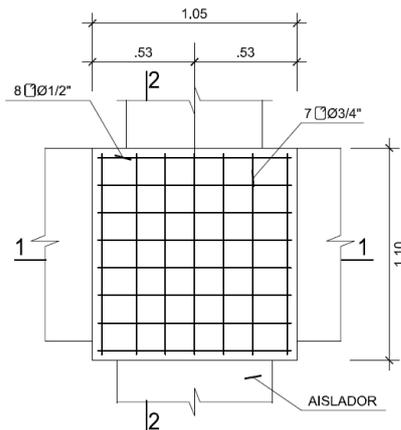
Se realizó el diseño por capacidad del cortante de la columna, sabiendo que el momento probable es de 126.3 Ton-m, y el cortante de diseño igual que 96 Ton. Los estribos propuestos de $\phi 3/8'' @ 10$ cm satisfacen este requerimiento sin exceder el cortante máximo que puede resistir la columna (ϕV_n máx).

Con el refuerzo propuesto, se comprobó que en cada nudo se cumple el criterio de columna fuerte-viga débil (M_n columna $\geq 1.2 M_n$ viga).

d) Pedestales

Los pedestales se diseñaron para resistir los esfuerzos normales, de cortante y flexión que transmite la columna que reciben, así como los momentos de segundo orden debido al desplazamiento del sistema de aislamiento.

El refuerzo vertical del pedestal se colocó como adicional al refuerzo vertical que bajan de las columnas para completar el mínimo de 1%. Al estar el pedestal contenido casi completamente en el encuentro de vigas y columnas se le colocó un refuerzo transversal mínimo según los criterios para nudos de sistemas aporticados del Capítulo 21 de la Norma E.060. En la Figura 6.19 y la lámina E-04 se muestran los detalles del refuerzo para pedestales.



DETALLE DE ARMADURA DE PEDESTAL 1 (AS1)

Figura 6.19. Detalle de armadura de pedestal para aislador AS1

e) Losas

Las losas macizas se diseñaron por flexión y fuerza cortante considerando las cargas de gravedad que actúan sobre ellas. Para el análisis se construyó un modelo bidimensional con elementos finitos, aunque también se podría emplear el método de coeficientes de la Norma E.060. El detalle del refuerzo de las losas se muestra en los encofrados de la lámina E-01 para el sistema de aislamiento y el piso típico. No se obtuvieron deflexiones importantes por lo que no se consideraron contraflechas.

Capítulo 7.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

Las conclusiones derivadas del presente trabajo fueron agrupadas en las siguientes tres categorías.

7.1.1 De la teoría de análisis de edificios aislados

- El análisis estático es útil para realizar una primera estimación del periodo del sistema de aislamiento de un edificio aislado y de su respuesta elástica empleando un modelo de un grado de libertad.
- Para simplificar el análisis de un edificio aislado, se procura que exista un modo de vibración traslacional del sistema de aislamiento en cada dirección de análisis, con más del 90% de porcentaje de masa efectiva.
- Se presentaron tres métodos para representar el amortiguamiento de los dispositivos en un modelo estructural elástico tridimensional. Con los tres métodos se realizó el análisis espectral del edificio ejemplo, y se obtuvieron resultados similares.
- Es práctica común representar al amortiguamiento de los dispositivos empleando el método de reducción del espectro de respuesta, pues facilita el tratamiento de los resultados del análisis para luego pasar a la fase de diseño.
- El análisis espectral arrojó resultados de desplazamientos, aceleraciones y derivas que varían ligeramente en la altura del edificio, mientras que en el sistema de aislamiento se concentra las mayores respuestas de los parámetros antes mencionados.
- Con los métodos dinámicos (espectral y tiempo-historia) para analizar el edificio ejemplo, se obtuvieron resultados menores de fuerzas y desplazamientos en el sistema de aislamiento, que el método estático.
- El método de análisis tiempo-historia no debería omitirse en el diseño de los edificios aislados, pues a partir de este se obtienen valores distintos de respuesta sísmica que no se podrían identificar en un análisis elástico, y pueden no ser favorables para el edificio.
- Las aceleraciones de piso en la altura del edificio aislado no son despreciables. Estas aceleraciones deberían tomarse en cuenta para proteger de daños a los elementos no estructurales y el contenido.

- La máxima respuesta sísmica de cada nivel, de desplazamientos y aceleraciones, relativa al sistema de aislamiento, obtenida mediante el análisis tiempo-historia, varía ligeramente en la altura del edificio, confirmando lo que ya se había obtenido mediante el análisis espectral.
- Para el análisis de edificios aislados de varios pisos, extender el concepto del cociente épsilon (ϵ), deducido para estructuras de dos grados de libertad es una buena aproximación. De esta manera, controlar este cociente en el edificio ejemplo permitió que la respuesta sísmica de desplazamientos, en la altura del edificio, no se incremente excesivamente en relación al sistema de aislamiento.

7.1.2 De la metodología de diseño presentada

- No existe una metodología unificada para el análisis y diseño de los edificios aislados en Perú. La metodología presentada en este trabajo es genérica, pues emplea conceptos teóricos y recomendaciones prácticas, de tal manera que el diseño del edificio cumpla los requisitos establecidos por los códigos.
- Los procedimientos presentados para el diseño de edificios aislados tienen naturaleza iterativa, y no existe una solución estructural única, siempre que todas cumplan con los objetivos de desempeño propuestos en el presente trabajo.
- Inicialmente se debe evaluar ciertos requisitos mínimos para que un edificio sea aislable, como, por ejemplo, la esbeltez y la masa del edificio, la rigidez del mismo edificio pero con base fija, y la junta de separación sísmica disponible.
- El sistema estructural ideal para un edificio aislado es aquel que tenga rigidez lateral uniforme en planta, para evitar concentraciones de esfuerzos y problemas de estabilidad en unos pocos dispositivos. Un edificio aporticado y otro que contenga pequeñas placas distribuidas uniformemente en planta son posibles sistemas a emplear.
- El predimensionamiento de los elementos estructurales horizontales de la superestructura es similar a como se haría en un edificio tradicional, mientras que los elementos verticales deberán tener dimensiones tales que se pueda controlar las derivas de entrepiso después de varias iteraciones.
- Para la parrilla superior de vigas del sistema de aislamiento se recomendó iniciar el análisis con un peralte de 90 cm, debido a que además de los efectos de segundo orden estas vigas tendrán acciones verticales importantes. Para la parrilla inferior se puede considerar un peralte inicial de 70 cm ya que estas no soportan dichas acciones verticales.

- El periodo del sistema de aislamiento debería encontrarse en una zona espectral de bajas solicitaciones, alrededor de los 3 a 4 segundos. No se debe superar los 5 segundos pues en Perú no se tiene información suficiente respecto a la respuesta de estructuras con periodos de vibración muy largos ante terremotos de subducción.
- Para la elección del amortiguamiento del sistema de aislamiento se debe tomar en cuenta que no se debe exceder en este parámetro pues esto provocará que se pierda la efectividad del aislamiento. Es posible aislar un edificio con amortiguamientos bajos (5%) pero no se reducirán las solicitaciones como sí se lograría con valores más altos (10% a más).

7.1.3 Del diseño realizado

- El edificio ejemplo tiene 5 pisos, y es de concreto armado con un sistema estructural aporticado. Se planteó un sistema de aislamiento en base a dispositivos HDRB.
- El predimensionamiento de los elementos estructurales se realizó siguiendo algunas reglas prácticas de los edificios de base fija e incluyendo algunos criterios propios para edificios aislados.
- Para los aisladores, las rigideces que se obtuvieron de entre 84 y 106 Ton/m y los amortiguamientos de entre 10% a 15% son valores normales y esperables que pueden lograrse con los dispositivos HDRB disponibles en el mercado. Sin embargo, esto no implica que no se pueda lograr estos valores con otros dispositivos.
- Del diseño del sistema de aislamiento se obtuvieron solo dos tipos de aisladores HDRB de 80 y 90 cm de diámetro, y una altura para ambos de 48.4 cm. Esto implica que ambos tienen también el mismo número de capas de goma y acero. De esta forma se consiguió optimizar el número de tipos de dispositivos, pues más tipos implican realizar más ensayos, y, por ende, mayores costos.
- Las vigas de aislamiento tienen una sección de 35 cm x 100 cm. La cuantía de refuerzo obtenido para las vigas de aislamiento fue de 1.4% y de 44 cm².
- Las columnas cuadradas tienen 70 cm de lado y las vigas de la superestructura tienen 70 cm de peralte y solo 5.30 m de luz libres. Ambos casos ocurren debido a que estos elementos fueron dimensionados esencialmente para controlar las derivas de entrepiso. Para las columnas cuadradas se obtuvieron cuantías de refuerzo iguales a la mínima que exige la Norma E.060 (1%), y las cuantías de

refuerzo de las vigas de la superestructura disminuyen de 0.977% en el techo del primer piso, a solo 0.46% en la azotea.

- Las vigas y columnas, del sistema de aislamiento y la superestructura, fueron diseñados empleando los criterios de ductilidad para edificios aporricados que se encuentran en la Norma E.060 Concreto Armado. La inclusión de ductilidad a los elementos asegura un mayor nivel de seguridad a pesar de que se espera que para sismos raros el edificio aislado sufrirá daños muy leves.
- El desplazamiento total máximo del edificio fue de 39.3 cm, por lo que se decidió usar una junta de separación sísmica alrededor de todo el sistema de aislamiento de 45 cm. Este tamaño de junta ya se observa en edificios aislados existentes en Perú, como los edificios educativos de la PUCP.
- La deriva de entrepiso del análisis espectral ante el Sismo de Diseño no superó el 2.5%. Según Hazus, con esta deriva los edificios aporricados de concreto armado diseñados con criterios sismorresistentes se mantendrán con un nivel ligero de daño, lo cual es el desempeño que se espera de un edificio aislado a nivel del sismo de diseño.
- La máxima aceleración de piso obtenida fue de 0.25g a nivel del Sismo de Diseño.
- Se verificó que, para el análisis modal espectral ante el Sismo Máximo Posible, los dispositivos no tienen problemas de tracción cuando se considera las cargas de gravedad en servicio junto con los efectos del sismo horizontal y vertical. Sin embargo, para la combinación última "0.9D – S", donde D es la carga muerta y S el sismo horizontal y vertical, el análisis sí arrojó dispositivos en tracción. A nivel del Sismo de Diseño no se obtuvo ningún dispositivo en tracción.

7.2 Recomendaciones

- El factor que relaciona las aceleraciones del Sismo Máximo Posible con las del Sismo de Diseño depende de la sismicidad del sitio en donde se va a ubicar el edificio aislado y/o del factor de seguridad que se le proveerá al sistema de aislamiento. Se recomienda realizar estudios de peligro sísmico en las distintas regiones de Perú para precisar el factor de 1.5 utilizado en el presente trabajo, ya que dicho valor proviene de investigaciones realizadas en los Estados Unidos.
- El factor de reducción por amortiguamiento, B_D o B_M , debería ser calibrado para aplicarlo en estructuras aisladas peruanas.
- Algunos de los procedimientos de diseño presentados utilizan ecuaciones o valores que pueden ser ajustados o calibrados en futuros trabajos. Por ejemplo,

la relación entre las rigideces máxima y mínima del sistema de aislamiento, la relación de esbeltez del edificio, el factor que relaciona las solicitaciones de los niveles de sismo, B_D , etc.

- El límite de la deriva de entrepiso de 2.5‰ a 3‰ forma parte de una sugerencia hecha por Hazus, que debe ser verificada en estudios futuros en Perú
- Dado que, tras el análisis realizado, se obtuvieron diferentes derivas de entrepiso para el análisis espectral y tiempo-historia, se sugiere que, en el código peruano de edificios aislados, se incluyan límites para la deriva de entrepiso dependientes del método de análisis.
- La combinación última $0.9D - S$, empleada para verificar la tracción en un dispositivo, debería revisarse para el caso del diseño de los aisladores, debido a que las cargas de gravedad siempre estarán actuando sobre el edificio.
- Se recomienda realizar estudios para fijar un límite para las aceleraciones de piso en los códigos, para poder establecer un parámetro de control del daño del contenido de los edificios, y por comodidad de los ocupantes.
- Conforme se realicen investigaciones y aparezcan nuevos códigos, la metodología seguirá siendo aplicable luego de ajustar algunas ecuaciones en los procedimientos de diseño. El código ASCE 7-16 propone, por ejemplo, aplicar un solo nivel de sismo de diseño equivalente al Sismo Máximo Posible, ha adoptado nuevos criterios para determinar la variabilidad de las propiedades de los dispositivos y establece nuevas ecuaciones para el cálculo de los cortantes de diseño.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

1. Aguiar, R., Almazán, J., Dechent, P., & Suárez, V. (2006). *Aisladores de Base Elastoméricos y FPS*. Quito: Escuela Politécnica del Ejército.
2. American Society of Civil Engineers. (2010). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. Virginia: American Society of Civil Engineers.
3. American Society of Civil Engineers. (2017). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. Virginia: American Society of Civil Engineers.
4. Arriagada, J. (2005). *Aislación Sísmica de un Edificio de Oficinas de Siete Pisos. (Análisis Comparativo de Casos y Costos con un Edificio Tradicional)*. Valdivia: Universidad Austral de Chile.
5. Blanco Blasco, A. (1994). *Estructuración y Predimensionamiento de Edificios de Concreto Armado*. Lima.
6. Bridgestone. (2013). Seismic isolation product line-up.
7. Castillo, J., & Alva, J. (1993). *Peligro Sísmico en el Perú*. Lima: CISMID.
8. Cheng, F. Y., Hongping, J., & Kangyu, L. (2008). *Smart Structures: Innovative Systems for Seismic Response Control*. Boca Raton: CRC Press.
9. CISMID-UNI. (2013). *Generación de Acelerogramas Sintéticos para la Costa del Perú*. Lima: SENCICO.
10. Computers & Structures Inc. (2015). *CSI Analysis Reference Manual*. Berkeley, California: Computers & Structures Inc.
11. Current World Environment. (s.f.). *Investigation of the Base-Isolation System Effect on Stress and Base-Shear Force of Curved Bridge According to Soil-Structure Interaction*. Obtenido de <http://www.cwejournal.org/vol10nospl-issue-may-2015/investigation-of-the-base-isolation-system-effect-on-stress-and-base-shear-force-of-curved-bridge-according-to-soil-structure-interaction/>
12. Dynamic Isolation Systems Inc. (2017). *Dynamic Isolation Systems*. Obtenido de www.dis-inc.com
13. EPS. (2011). Obtenido de Earthquake Protection Systems: <http://www.earthquakeprotection.com/index.html>

14. FEMA. (2012). *2009 NEHRP Recommended Seismic Provisions: Design Examples*.
15. FEMA. (2012). *Hazus®-MH 2.1 Technical Manual*. Washington, D.C.
16. FIP Industriale. (2015). *Elastomeric Isolators series SI*. Selvazzano Dentro.
17. Instituto Nacional de Normalización. (2013). *Norma Nch2745:2013 - Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica*. Chile.
18. Kelly, J. (1997). *Earthquake-Resistant Design with Rubber*. Richmond: Springer.
19. Kelly, J., & Naeim, F. (1999). *Design of Seismic Isolated Structures From Theory to Practice*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
20. Mendo, A. (2015). *Bases para la Implementación de la Norma Peruana de Análisis y Diseño de Edificios con Aislación Sísmica*. Lima, Perú.
21. Muñoz, A. (2009). *Ingeniería Sismorresistente*. Lima.
22. Nunez, B. (11 de Abril de 2015). *briannunezconstruccion*. Obtenido de <https://briannunezconstruccion.wordpress.com/>
23. Ottazzi, G. (2004). *Apuntes del curso Concreto Armado 1*. Lima: Fondo Editorial PUCP.
24. Saavedra, M. (2005). *Análisis de Edificios con Aisladores Sísmicos Mediante Procedimientos Simplificados*. Valdivia: Universidad Austral de Chile.
25. SEAOC, Vision 2000. (1995). *Performance-Based Seismic Design of Buildings*. San Francisco.
26. Seismosoft Ltd. (2016). SeismoMatch's Help System.
27. Seismosoft Ltd. (2016). SeismoSignal's Help System.
28. SENCICO. (2006). *Norma E.020 Cargas*. Lima.
29. SENCICO. (2009). *Norma E.060 Concreto Armado*. Lima.
30. SENCICO. (2016). *Norma E.030 Diseño Sismorresistente*. Lima.
31. Sirve S.A. (2016). Obtenido de Sirve Seismic Protection Technologies: sirve.cl
32. Skinner, I., Kelly, T., & Robinson, B. (2011). *Seismic Isolation for Designers and Structural Engineers*. Wellington: Robinson Seismic Ltd, Holmes Consulting Group,.

33. Symans, M. D. (s.f.). Instructional Material Complementing FEMA 451, Design Examples.
34. University of California, Berkeley. (2012). *Triple Pendulum Friction Element*. Obtenido de OpenSees: http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Triple_Friction_Pendulum
35. Villagomez, D. (2015). *Lineamientos para el Análisis y Diseño de Estructuras Sísmicamente Aisladas en el Perú*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
36. Wilson, E. L. (2002). *Three Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures*. Berkeley: Computers And Structures, Inc.

