

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**DISEÑO DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO SÍSMICO DE UN
EDIFICIO HOSPITALARIO USANDO DISPOSITIVOS HDR**

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Civil**, que presenta el bachiller:

Brayan Bernabé Janampa Salas

ASESOR: Ing. Juan Alejandro Muñoz Pelaez

Lima, Diciembre de 2018



Quiero agradecer de manera muy especial al Ing. Alejandro Muñoz Pelaez por su constante aporte y apoyo en el desarrollo de este trabajo.



A Dios por brindarme paz y tranquilidad en situaciones difíciles.

A mi madre Celia por su constante preocupación, apoyo y amor incondicional.

A mi padre Bernabé por su incansable apoyo, desprendimiento y ejemplo de solidaridad.

A la memoria de mis abuelos Julia y Zacarías, Sabina y Juan por sus ejemplos de vida.

RESUMEN

En un sismo severo las ondas sísmicas someten a las edificaciones a grandes deformaciones y aceleraciones que generan incursiones inelásticas, y daño en la estructura y el contenido. Para controlar o evitar las incursiones inelásticas surge la alternativa de la aislación basal que consiste en la separación del movimiento del suelo mediante un sistema de elementos flexibles.

El sistema de aislamiento sísmico se ha venido empleando en el mundo desde el año 1969 mientras que en el Perú recién desde el año 2011 se está empezando a usar estos sistemas. Debido a que en el país no existe una norma para el análisis de las edificaciones aisladas, se han venido empleando normas internacionales junto a normas locales y una interpretación ingenieril de la sismicidad peruana.

La dinámica de un edificio aislado logra un nuevo sistema flexible que origina que el periodo fundamental de la estructura incremente, de tal manera que la estructura se encuentre en una zona de menor demanda sísmica. Además, la dinámica logra un aumento de amortiguamiento mayor al 5% únicamente en los modos que originan deformaciones predominantes del sistema de aislamiento.

La curva fuerza desplazamiento de un aislador elastomérico puede ser idealizada por un modelo bilineal que permite caracterizar el comportamiento no lineal de los aisladores. También, el comportamiento del dispositivo se puede representar mediante un modelo lineal con una rigidez equivalente junto a un amortiguamiento equivalente de fluido viscoso que disipe la misma cantidad de energía que el modelo bilineal.

En este trabajo se propone un procedimiento general de diseño de un edificio aislado en base a los requerimientos de diseño propuestos por los códigos internacionales y locales. Se usó como ejemplo un edificio hospitalario representativo de la práctica en Perú. Se realizó el predimensionamiento inicial del sistema de aislamiento empleando el modelo de un grado de libertad. Luego, se hizo un diseño preliminar usando un proceso iterativo de análisis lineal espectral con propiedades nominales que consiste en modificar las propiedades de la estructura y del sistema de aislamiento hasta que se cumpla con los objetivos de diseño propuestos. Se sugirió para el análisis espectral

reducir los límites máximos permitidos por las normas en un 30%; de este modo se deja una holgura para el análisis posterior que debe incluir la variabilidad de los dispositivos. En el diseño definitivo de la estructura aislada se siguió otro proceso iterativo usando análisis tiempo historia no lineal y considerando la variabilidad de las propiedades nominales de los dispositivos.

Finalmente, se realizó el diseño de un elemento no estructural (tabique) usando espectros de piso que muestran la tendencia de los armónicos predominantes que reciben los elementos no estructurales en su base.



TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Título : "Diseño del Sistema de Aislamiento Sísmico de un Edificio Hospitalario Usando Dispositivos HDR"
Área : Estructuras
Asesor : Ing. Alejandro Muñoz Pelaez
Alumno : BRAYAN BERNABE JANAMPA SALAS
Código : 2010.2472.412
Tema N°: # 467
Fecha : Lima, 25 de septiembre del 2018

ANTECEDENTES:

Los sismos severos someten a las edificaciones a grandes deformaciones y aceleraciones que generan incursiones inelásticas, y daño en la estructura y el contenido. Una alternativa para controlar las deformaciones y aceleraciones de las edificaciones es el sistema de aislamiento sísmico. Este sistema se ha venido empleando en el mundo desde el año 1969 mientras en el Perú el primer edificio aislado se construyó recién en el año 2011. A la fecha en Perú se está empezando a usar los sistemas de aislamiento y el gobierno ha dispuesto el uso obligatorio de este sistema de protección para las edificaciones hospitalarias que se encuentren en las zonas sísmicas 4 y 3. Debido a que en el país no existe una norma para el análisis de las edificaciones aisladas, se han venido empleando normas internacionales junto a normas locales y una interpretación Ingeniería de la sismicidad peruana.

OBJETIVOS Y ALCANCES:

Estudiar el comportamiento dinámico de edificios aislados y los procedimientos para su análisis (elástico e inelástico) y diseño.

Proponer un procedimiento para el diseño de edificios aislados y desarrollar un ejemplo de aplicación.

METODOLOGÍA DE TRABAJO:

En principio se estudiará el comportamiento dinámico de edificios aislados y se revisarán los modelos de comportamiento de los dispositivos de aislamiento; se dará mayor énfasis a los aisladores elastoméricos HDR. En base a los requerimientos de diseño propuestos por los códigos internacionales y locales, se propondrá un procedimiento general de diseño de un edificio aislado. Luego, se seleccionará un edificio hospitalario representativo de la práctica en Perú y se desarrollará el diseño del sistema de aislamiento. Finalmente, se redactará la memoria de trabajo.

NOTA

Extensión máxima: 100 páginas.

G. Zava

Tabla de Contenido

Índice de Figuras.....	v
Índice de Tablas.....	viii
Lista de Símbolos y Abreviaturas.....	x
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Sismicidad y Aislamiento Sísmico.....	1
1.2. Edificios Aislados en el Mundo.....	1
1.3. Edificios Aislados en el Perú.....	2
2. AISLAMIENTO SÍSMICO DE EDIFICACIONES.....	4
2.1. Forma Estructural, Arquitectura e Instalaciones en un Edificio Aislado.....	4
2.2. Comportamiento Dinámico de Edificios Aislados.....	8
2.3. Dispositivos de aislamiento.....	11
2.3.1. Aisladores Elastoméricos.....	11
2.3.2. Aisladores de Péndulo Friccionante (FPS).....	12
2.3.3. Aisladores Deslizantes (PTFE).....	13
2.4. Modelos de Comportamiento para los Aisladores Elastoméricos HDR.....	14
2.4.1. Modelo Bilineal.....	14
2.4.2. Modelo Lineal Equivalente.....	15
3. DEMANDA SÍSMICA Y DESEMPEÑO ESPERADO.....	17
3.1. Peligro Sísmico.....	17
3.2. Desempeño esperado.....	17
3.3. Representación de las demandas sísmicas.....	18
3.3.1. Fuerzas Laterales Equivalentes.....	18
3.3.2. Espectros de respuesta.....	18
3.3.3. Registros de aceleraciones.....	18
3.3.3.1. Tratamiento de los Registros de aceleraciones para propósitos de diseño.....	19
4. ANÁLISIS DE EDIFICIOS AISLADOS.....	23
4.1. Modelos Elásticos de Edificios Aislados.....	23
4.1.1. Modelo de un grado de libertad.....	23
4.1.1.1. Análisis modal.....	23
4.1.2. Modelo de dos grados de libertad.....	24
4.1.2.1. Análisis modal.....	25
4.1.2.2. Respuesta espectral.....	28
4.2. Procedimientos de Análisis elástico de un edificio aislado.....	29
4.2.1. Modelo.....	29
4.2.2. Análisis Modal y Amortiguamiento.....	29

4.2.3.	Análisis Tiempo Historia	31
4.2.4.	Análisis Espectral.....	31
4.3.	Procedimientos de Análisis inelástico de un edificio aislado.....	32
4.3.1.	Modelo de los dispositivos.....	32
4.3.2.	Modelo del Sistema de Aislamiento para el sismo máximo considerado (MCEr)	33
4.3.3.	Modelo del sistema de aislamiento para sismos de distintos periodos de retorno	35
5.	NORMA PARA EL ANÁLISIS Y DISEÑO-ASCE7-16	38
5.1.	Sismicidad	38
5.2.	Requisitos generales de diseño.....	38
5.2.1.	Calificación de la regularidad estructural	38
5.2.2.	Sistema de aislamiento.....	39
5.2.2.1.	Fuerza de viento	39
5.2.2.2.	Fuerza restauradora	39
5.2.3.	Combinaciones de carga vertical para cada tipo de aislador.....	40
5.2.4.	Propiedades del sistema de aislamiento	41
5.2.4.1.	Propiedades nominales de un aislador	41
5.2.4.2.	Factores de modificación de las propiedades	41
5.2.4.3.	Límite superior e inferior del comportamiento fuerza-desplazamiento de los componentes del sistema de aislamiento	42
5.2.4.4.	Propiedades del sistema de aislamiento en el desplazamiento máximo. 42	
5.2.4.5.	Límite superior e límite inferior de las propiedades del sistema de aislamiento en el desplazamiento máximo.....	43
5.3.	Definición del movimiento del terreno.....	43
5.3.1.	Registros de aceleración del suelo	43
5.4.	Procedimientos de análisis de estructuras aisladas.....	44
5.4.1.	Análisis de fuerzas estáticas equivalentes.....	44
5.4.1.1.	Desplazamientos lateral mínimos para diseño	44
5.4.1.2.	Fuerzas laterales mínimas para diseño	46
5.4.1.3.	Distribución de la cortante en altura	47
5.4.1.4.	Límites de desplazamiento de entrepiso	48
5.4.2.	Análisis Dinámico.....	48
5.4.2.1.	Análisis de Respuesta Espectral.....	48
5.4.2.2.	Análisis tiempo historia	48
5.4.2.3.	Fuerza laterales mínimas para diseño	49
5.4.2.4.	Límites de desplazamiento de entrepiso	50
6.	PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO	51

6.1.	Influencia de la variabilidad de propiedades del dispositivo en el diseño ..	51
6.2.	Estructuración y diseño preliminar.....	51
6.2.1.	Dimensiones iniciales de la superestructura	52
6.2.2.	Predimensionamiento inicial del sistema de aislamiento	53
6.2.3.	Diseño preliminar usando iterativamente respuesta espectral.....	57
6.3.	Diseño definitivo usando iterativamente análisis tiempo historia no lineal	60
7.	ANÁLISIS Y DISEÑO DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO PARA UN EDIFICIOS HOSPITALARIO PERUANO	64
7.1.	Estructuración y diseño preliminar.....	66
7.1.1.	Dimensiones iniciales de la superestructura	66
7.1.2.	Predimensionamiento inicial del sistema de aislamiento	67
7.2.	Diseño preliminar usando iterativamente respuesta espectral.....	69
7.3.	Diseño definitivo usando iterativamente análisis tiempo historia no lineal	76
7.3.1.	Modelo de los dispositivos.....	77
7.3.2.	Modelo del sistema de aislamiento para el sismo máximo considerado (MCEr)	79
7.3.3.	Respuesta en el Tiempo	80
7.3.4.	Repuesta final de la estructura aislada en el tiempo	89
7.4.	Diseño de algunos elementos de concreto en la interfase de aislamiento ...	90
8.	EVALUACION DE LA RESPUESTA SISMICA DEL EDIFICIO AISLADO	94
8.1.	Demanda y Capacidad sobre los principales elementos estructurales.....	94
8.2.	Comportamiento de componentes sujetas a aceleraciones.....	97
9.	Conclusiones.....	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: <i>Esquema del sistema de aislamiento</i>	4
Figura 2.2: <i>Sistema de aislamiento de una estructura aislada sin sótanos</i>	5
Figura 2.3: <i>Sistema de aislamiento de una estructura aislada con sótanos</i>	5
Figura 2.4: <i>Detalle de la caja de ascensor en una estructura aislada con sótanos</i>	6
Figura 2.5: <i>Relación de esbeltez entre el ancho y la altura</i>	6
Figura 2.6: <i>Detalle de una escalera que atraviesa la interfaz de aislación</i>	7
Figura 2.7: <i>Influencia del aumento del periodo en la demanda de desplazamientos</i>	8
Figura 2.8: <i>Tendencia de deformada de un edificio aislado</i>	8
Figura 2.9: <i>Tendencia de deformada de una estructura convencional</i>	9
Figura 2.10: <i>Influencia del incremento del periodo en la demanda sísmica</i>	9
Figura 2.11: <i>Espectro de la aceleración de México (1985), Perú (1966) escalados a 0.45g</i>	10
Figura 2.12: <i>Cortante de entrepiso de un edificio aislado de 5 pisos</i>	10
Figura 2.13: <i>Aislador elastomérico LDRB y curva histéresis</i>	11
Figura 2.14: <i>Aislador elastomérico HDR y curva de histéresis</i>	12
Figura 2.15: <i>Aislador elastomérico LRB y curva de histéresis</i>	12
Figura 2.16: <i>Aislador FPS y curva de histéresis</i>	13
Figura 2.17: <i>Aislador deslizante y curva de histéresis</i>	14
Figura 2.18: <i>Curva histerética de un aislador HDR</i>	14
Figura 2.19: <i>Esquema del modelo bilineal</i>	14
Figura 2.20: <i>Relación entre la fuerza de amortiguamiento y el desplazamiento</i>	16
Figura 3.1: <i>Corrección por línea base y filtrado de frecuencias</i>	19
Figura 3.2: <i>Espectro de aceleración de la señal de 1966 (N - S) Lima y Callao escalado a 0.45g</i>	21
Figura 3.3: <i>Espectro de aceleración de 1966 (N - S) Lima y Callao compatible al espectro de diseño</i>	21
Figura 3.4: <i>Acelerograma del sismo de Lima y Callao de 1966 N-S compatible al espectro de diseño</i>	22
Figura 4.1: <i>Modelo de un sistema de un grado de libertad</i>	23
Figura 4.2: <i>Modelo de un sistema de dos grados de libertad</i>	24
Figura 4.3: <i>Primera forma de vibración de una estructura aislada</i>	26

Figura 4.4: Segunda forma de vibración de una estructura aislada.....	27
Figura 4.5: Estimación de la respuesta de una estructura de 2gdl.....	29
Figura 4.6: Tres primeros modos de una estructura aislada.....	30
Figura 4.7: Modos superiores al tercer modo de una estructura aislada.....	30
Figura 4.8: Espectro de Respuesta afectado por el factor de modificación.....	31
Figura 4.9: Curva de Comportamiento del sistema de aislamiento.....	35
Figura 4.10: Curva de comportamiento del sistema de aislamiento para el sismo máximo considerado y sismo de diseño.....	37
Figura 5.1: Esquemización de la fuerza restauradora.....	40
Figura 6.1: Representación de la estructura de base fija.....	54
Figura 6.2: Distribución de dos tipos de aisladores en planta.....	57
Figura 6.3: Distribución de dos tipos de aisladores en planta larga.....	58
Figura 6.4: Tendencia del espectro de diseño peruano para las propiedades nominales, límite superior e límite inferior.....	61
Figura 6.5: Efecto P-delta en el sistema de aislamiento en aisladores elastoméricos y deslizadores.....	63
Figura 7.1: Planta de arquitectura típica.....	64
Figura 7.2: Modelo computacional de la estructura.....	66
Figura 7.3: Espectro Pseudo-aceleraciones según la Norma E.030 para amortiguamiento de 5%.....	71
Figura 7.4: Espectro de Pseudo-aceleraciones modificado por el factor de amortiguamiento según la Norma E.030.....	73
Figura 7.5: Desplazamientos de piso obtenidos por las tres formas.....	73
Figura 7.6: Cortantes de entrepiso obtenidas por las tres formas.....	74
Figura 7.7: Espectros de aceleraciones de 1966 N-S y E-W compatibles al espectro de diseño.....	77
Figura 7.8: Propiedades del sistema de aislamiento nominal, límite superior e límite inferior.....	80
Figura 7.9: Historia de desplazamientos del sistema de aislamiento y la azotea (propiedades nominales).....	80
Figura 7.10: Historia de desplazamientos del sistema de aislamiento y la azotea (propiedades del límite superior).....	81
Figura 7.11: Historia de desplazamientos del sistema de aislamiento y la azotea (propiedades del límite inferior).....	81

Figura 7.12: Demandas de desplazamientos en la dirección Y-Y.....	82
Figura 7.13: Historia de aceleraciones máximas absolutas.....	83
Figura 7.14: Historia de fuerza cortante en el sistema de aislamiento.....	84
Figura 7.15: Curva de comportamiento del sistema de aislamiento.....	85
Figura 7.16: Historia de desplazamiento total máximo del sistema de aislamiento....	87
Figura 7.17: Tramo de viga VAIS-25.....	91
Figura 7.18: Diagrama de momentos flectores del tramo de viga VAIS-25.....	91
Figura 7.19: Refuerzo corrido y bastones adicionales del tramo de viga VAIS-25.....	92
Figura 7.20: Diagrama de fuerza cortante del tramo de viga VAIS-25.....	92
Figura 7.21: Detalle del refuerzo del tramo de viga VAIS-25.....	93
Figura 8.1: Demanda total de fuerza cortante del tramo de viga VAIS-25.....	95
Figura 8.2: Demanda total de momento flector en la viga del sistema de aislamiento del tramo de viga VASIS-25.....	96
Figura 8.3: Se muestra el muro de albañilería por metro de longitud.....	98
Figura 8.4: Demanda por fuerza cortante.....	98
Figura 8.5: Espectro de piso del cuarto nivel.....	102
Figura 8.6: Demanda de momento flector en el tabique.....	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 <i>Periodo de retorno y probabilidad de excedencia para varios niveles de sismo</i>	17
Tabla 4.1 <i>Factores de modificación de respuesta por amortiguamiento</i>	32
Tabla 4.2 <i>Cálculo de los parámetros bilineales Q y K_2 a partir de las relaciones de K_1 y K_2</i>	33
Tabla 6.1 <i>Periodos mínimos para distintos tipo de suelo</i>	55
Tabla 7.1 <i>Periodos y masa efectivas de los modos de vibración</i>	67
Tabla 7.2 <i>Periodo y masa efectivas para una excentricidad accidental de 5% en el eje X negativo</i>	70
Tabla 7.3 <i>Periodo y masa efectivas para una excentricidad accidental de 5% en el eje X positivo</i>	70
Tabla 7.4 <i>Periodos y masa efectivas para una excentricidad accidental de 5% en el eje Y negativo</i>	70
Tabla 7.5 <i>Periodos y masa efectivas para una excentricidad accidental de 5% en el eje Y positivo</i>	70
Tabla 7.6 <i>Comparación de resultados por las tres formas</i>	74
Tabla 7.7 <i>Amortiguamiento modal (%)</i>	75
Tabla 7.8 <i>Propiedades nominales de todos los aisladores</i>	77
Tabla 7.9 <i>Factores de modificación máximos y mínimos (proveedores de buena calidad)</i>	78
Tabla 7.10 <i>Factores de modificación máximos y mínimos</i>	78
Tabla 7.11 <i>Propiedades nominales, límite superior e límite inferior de todos los dispositivos</i>	79
Tabla 7.12 <i>Propiedades del sistema de aislamiento nominales, límite superior e límite inferior</i>	79
Tabla 7.13 <i>Derivas de entrepiso máximas en el tiempo para el sismo de 1966</i>	82
Tabla 7.14 <i>Aceleraciones absolutas máximas en el tiempo para el sismo de 1966</i>	83
Tabla 7.15 <i>Comparación de resultados entre las propiedades nominales, límite superior e límite inferior</i>	84
Tabla 7.16 <i>Nuevos modelos equivalentes</i>	86
Tabla 8.1 <i>Fuerza total de la inercia en el tabique para el sismo de 1966</i>	99

Tabla 8.2 <i>Demandas en el tabique del cuarto nivel</i>	101
Tabla 8.3 <i>Demanda de momento flector para el sismo de 1966</i>	104



LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

- *MCEr*: Sismo máximo considerado que corresponde a terremotos de una periodicidad de 2500 años. Equivale a 1.5 veces el nivel de sismo de diseño establecido en la norma peruana E.030.
- *D*: Carga muerta.
- *L*: Carga viva.
- *S*: Carga de nieve.
- Q_E : Carga sísmica horizontal que se representa por el MCEr.
- $0.2S_{MC}$: Carga sísmica vertical.
- $\lambda_{m\acute{a}x}$: Factor de modificación máxima para determinar el máximo valor de una propiedad de aislador, teniendo en cuenta todas las fuentes de variabilidad.
- $\lambda_{m\acute{i}n}$: Factor de modificación máxima para determinar el mínimo valor de una propiedad de aislador, teniendo en cuenta todas las fuentes de variabilidad.
- $\lambda_{ae,m\acute{a}x}$: Factor de modificación máxima debido a las condiciones medio ambientales y envejecimiento.
- $\lambda_{ae,m\acute{i}n}$: Factor de modificación mínima debido a las condiciones medio ambientales y envejecimiento.
- $\lambda_{test,m\acute{a}x}$: Factor de modificación máxima debido a las condiciones de temperatura, velocidad de carga y scragging.
- $\lambda_{test,m\acute{i}n}$: Factor de modificación mínima debido a las condiciones de temperatura, velocidad de carga y scragging.
- $\lambda_{spec,m\acute{a}x}$: Factor de modificación máxima debido a la variabilidad en la fabricación de los aisladores.
- $\lambda_{spec,m\acute{i}n}$: Factor de modificación mínima debido a la variabilidad en la fabricación de los aisladores.
- D_M : Desplazamiento traslacional en el centro de rigidez del sistema de aislamiento, en la dirección de análisis.
- D_M' : Desplazamiento traslacional el centro de rigidez del sistema de aislamiento que incluye la influencia de la flexibilidad de la superestructura, en la dirección de análisis.

- D_{TM} : Desplazamiento total máximo de un elemento del sistema de aislamiento que incluye la traslación en el centro de rigidez y la componente torsional.
- K_M : Rigidez equivalente del sistema de aislamiento asociada al desplazamiento máximo D_M .
- $\xi_{eff.M}$: Amortiguamiento equivalente del sistema de aislamiento para el desplazamiento máximo D_m .
- T_M : Periodo equivalente del sistema de aislamiento para el desplazamiento máximo D_m .
- R_0 : Coeficiente de reducción de las fuerzas sísmicas para la estructura sobre el sistema de aislamiento considerándola como si fuera de base fija según la norma peruana E.030.
- R_1 : Coeficiente de reducción de las fuerzas sísmicas para la estructura sobre el sistema de aislamiento que puede tomarse como 3/8 del valor de R_0 , con un máximo valor de 2 y un mínimo de 1.
- V_b : Fuerza cortante total en el sistema de aislamiento o en los elementos bajo el nivel de base.
- V_{st} : Fuerza cortante no reducida que actúa sobre los elementos por el encima del nivel de base.
- V_s : Fuerza cortante reducida en la base de la estructura sobre el sistema de aislamiento.
- $\sum |F_M^+|$: Sumatoria de los valores absolutos de las fuerzas en todos los aisladores del sistema de aislamiento para un desplazamiento positivo D_M .
- $\sum |F_M^-|$: Sumatoria de los valores absolutos de las fuerzas en todos los aisladores del sistema de aislamiento para un desplazamiento negativo D_M .
- $\sum E_M$: Energía total disipada por el sistema de aislamiento para un ciclo completo de respuesta para el desplazamiento D_M .
- B_M : Factor de modificación de respuesta por amortiguamiento.
- g : Aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2).
- C : Factor de amplificación sísmica según la norma peruana E.030.
- b : Dimensión menor en planta del edificio.
- d : Dimensión mayor en planta del edificio, medida perpendicularmente a la dimensión menor b .

- y : Distancia entre el centro de rigidez del sistema de aislamiento y el elemento de interés, medida perpendicularmente a la dirección de la sollicitación sísmica.
- e : Excentricidad obtenida por la suma de la excentricidad natural y accidental. Esta última, se toma como el 5% de la dimensión mayor en planta perpendicular a la dirección de análisis.
- P_T : Razón entre el periodo traslacional y rotacional del sistema de aislamiento.
- W : Peso sísmico sobre la interfaz de aislamiento.
- W_s : Peso sísmico sobre la interfaz de aislamiento excluyendo el peso del nivel de base.
- F_1 : Fuerza sísmica lateral en el nivel 1, nivel de base.
- F_x : Fuerza sísmica lateral en el nivel x , $x > 1$.
- n : Número de pisos de la estructura sobre la interfaz de aislamiento.
- w_x : Porción del peso W_s que se ubica en el nivel i .
- T : Periodo fundamental de la estructura de base fija.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Sismicidad y Aislamiento Sísmico

Casi la totalidad de los sismos en el mundo se producen por el rozamiento de placas de la corteza terrestre. Cuando los esfuerzos entre las placas son elevados hay una liberación de energía en forma de fricción, compresión y ondas sísmicas que devienen en sacudidas o movimientos bruscos de la corteza. En un sismo severo las ondas sísmicas someten a las edificaciones a grandes deformaciones que generan incursiones inelásticas y por ende daños en la estructura.

La mayoría de los terremotos registrados en el Perú son generados por la interacción de dos placas tectónicas: la placa de nazca se introduce por debajo de la placa Sudamericana. Este fenómeno es conocido como borde de subducción, dando lugar así a una de las zonas de mayor sismicidad en el mundo. Por esta razón, se debe lograr que edificaciones esenciales, tal es el caso de los establecimientos de salud, queden operativas después de un terremoto. La importancia de salvaguardar estos lugares radica en los siguientes aspectos: las personas afectadas no tendrían a dónde acudir, el costo de la tecnología de los hospitales es elevado, entre otros.

Para lograr controlar o evitar las incursiones inelásticas surge la alternativa de la aislación basal, que consiste en aislar la estructura del suelo. Este sistema origina una reducción notable de las vibraciones hacia el sistema estructural, por lo tanto hay una disminución de los desplazamientos y las aceleraciones. En resumidas cuentas, el sistema de aislamiento sísmico se basa en la separación del movimiento producido por el suelo mediante un sistema de elementos flexibles, el cual separa la estructura de la cimentación.

1.2. Edificios Aislados en el Mundo

Durante los últimos 45 años se ha venido empleando los sistemas de aislamiento sísmico en edificaciones. El primer edificio aislado en el mundo fue la escuela de Pestalozzi de tres pisos en Yugoslavia (1969), la cual cuenta con bloques de caucho.

El primer edificio aislado en Nueva Zelanda fue William Clayton Building, Wellington en 1981, este edificio cuenta con 4 pisos y se emplearon aisladores con núcleo de plomo (LRB).

El primer edificio aislado en Japón fue Yachiyodai Residential Dwelling en 1982, tiene 2 pisos y se emplearon aisladores elastoméricos y amortiguadores de fricción.

Foothill Communities Law and Justice Centre fue el primer edificio aislado en Estados Unidos en 1985, cuenta con 4 pisos y se emplearon aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (HDR). El edificio “Los Angeles City Hall” de 32 pisos (138m) es uno de los más altos en el mundo con sistemas de aislamiento sísmico.

Como consecuencia del gran desempeño de los edificios aislados en los terremotos de Kobe (Japón, 1995) y Northridge (Estados Unidos, 1994) la demanda en la construcción de las nuevas edificaciones con sistemas de aislamiento creció de una manera exponencial. En Japón antes del terremoto de 1985 habían 85 edificios con aislamiento basal, en la actualidad hay más de 600 edificios con aisladores (Aguar, 2008).

En Sudamérica, Chile es el primer país que incorpora los aisladores sísmicos en edificios y en redactar una norma de aislación sísmica: norma chilena Nch2745-2003 que es una adaptación de la UBC-1997 a la realidad de este país. La primera edificación chilena con estos dispositivos está ubicada en la comunidad Andalucía (1992), cuenta con 4 pisos soportados con 6 aisladores elastoméricos sin núcleo de plomo. El centro médico San Carlos de Apoquindo (2001) de la Universidad Católica de Chile fue el primer edificio aislado en la categoría salud, tiene 6 pisos, 22 aisladores con núcleo de plomo (LRB) y 30 apoyos elastoméricos de alto amortiguamiento (HDR) (Aguar, 2008). El edificio de mayor envergadura aislado es Placa Técnica del nuevo Hospital Militar (2004) que tiene 164 aisladores sísmicos.

1.3. Edificios Aislados en el Perú

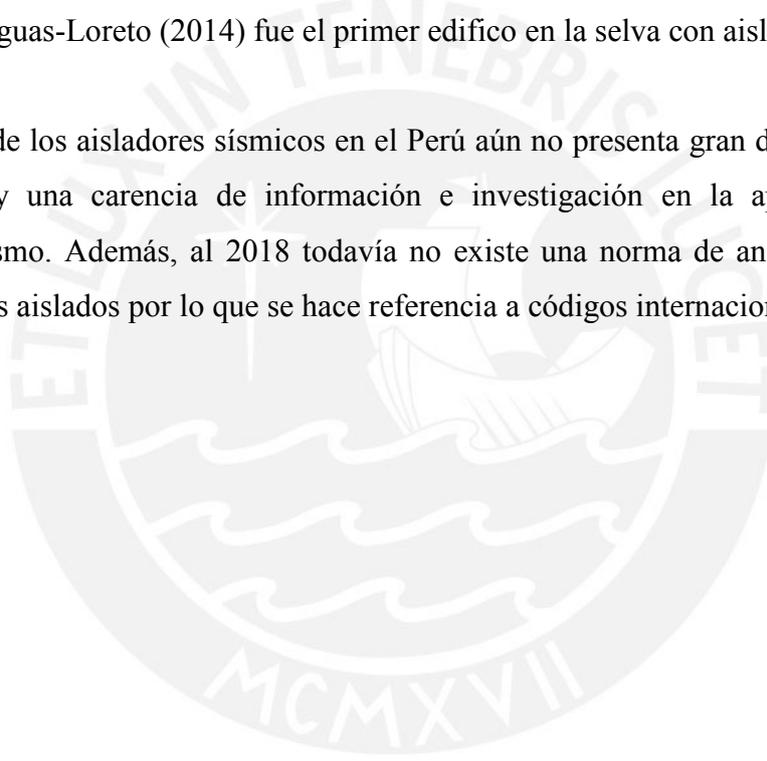
El primer edificio aislado fue la biblioteca del Campus Villa en Chorrillos (2011) de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), tiene 3 pisos, 26 aisladores de alto amortiguamiento y 15 deslizadores.

La primera edificación tipo oficina con aisladores sísmicos fue Edificio Corporativo GyM de la empresa Graña y Montero (2012). Esta oficina cuenta con 7 pisos empleando 28 aisladores elastoméricos y 8 deslizadores.

El edificio Atlantik Ocean (2013) Tower fue construido por el grupo inmobiliaria Labok y fue el primer edificio de vivienda con aislación basal. Además, es el más alto que se ha aislado, cuenta con 15 pisos y 4 sótanos.

El hospital Regional de Moquegua (2014) fue el primero en la categoría establecimiento de salud con aislación sísmica. El hospital Santa Gema en Yurimaguas-Loreto (2014) fue el primer edificio en la selva con aisladores sísmicos.

El uso de los aisladores sísmicos en el Perú aún no presenta gran demanda, debido a que hay una carencia de información e investigación en la aplicación de este mecanismo. Además, al 2018 todavía no existe una norma de análisis y diseño de edificios aislados por lo que se hace referencia a códigos internacionales.



2. AISLAMIENTO SÍSMICO DE EDIFICACIONES

2.1. Forma Estructural, Arquitectura e Instalaciones en un Edificio Aislado

Forma Estructural

El aislamiento sísmico aísla el movimiento de la estructura del suelo, por lo que en un sismo el suelo se mueve y el edificio prácticamente permanece casi quieto.

La porción de la estructura ubicada sobre el sistema de aislamiento se denomina superestructura, mientras que la que se ubica por debajo tiene el nombre de subestructura. El sistema de aislamiento está conformado por todos los aisladores y elementos estructurales que transfieren fuerzas entre la superestructura y subestructura. La interfaz de aislamiento es el espacio generado por el sistema de aislamiento, limitado en su parte superior por la superestructura y en su parte inferior por la subestructura. En la Figura 2.1 se muestra los detalles mencionados.

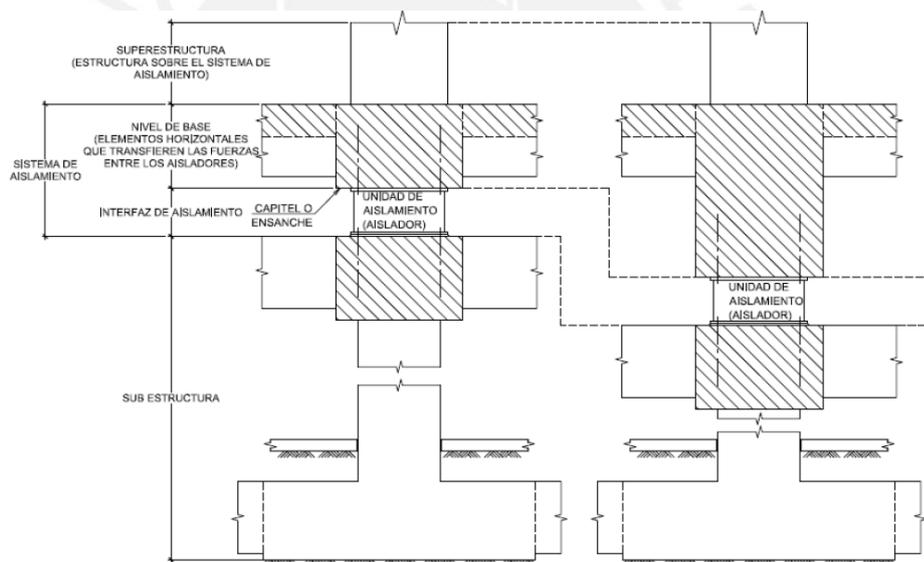


Figura 2.1: Esquema del sistema de aislamiento

Fuente: Proyecto de norma técnica E.031 aislamiento sísmico, 2018

Una estructura aislada sin sótanos requiere una losa adicional en la parte superior de los dispositivos. La losa adicional se apoya en una parrilla de vigas, de una gran sección transversal, que descansan en elementos muy rígidos llamados dados de concreto, bajo estos dados se encuentran los dispositivos. Finalmente, los dispositivos se apoyan sobre la cimentación. (Figura 2.2).



Figura 2.2: Sistema de aislamiento de una estructura aislada sin sótanos

En un edificio con sótanos aislado desde el primer piso, la losa del primer piso descansa sobre una parrilla de vigas y dados de concreto. En la parte inferior de los dados de concreto se encuentran los dispositivos, los cuales se apoyan en otros dados de concreto, los mismos que sirven para unir las columnas de los sótanos con otra parrilla de vigas (Figura 2.3).



Figura 2.3: Sistema de aislamiento de una estructura aislada con sótanos

La caja del ascensor en un edificio aislado con sótanos no puede ser cortada por el plano de aislamiento, por ello la interfaz de aislamiento debe envolver la caja del ascensor (Figura 2.4). El ascensor, en la zona del sótano, forma parte de toda la estructura, por lo que oscila junto con la estructura aislada. La caja del ascensor para cargas de gravedad se apoya en aisladores elastoméricos o deslizadores.

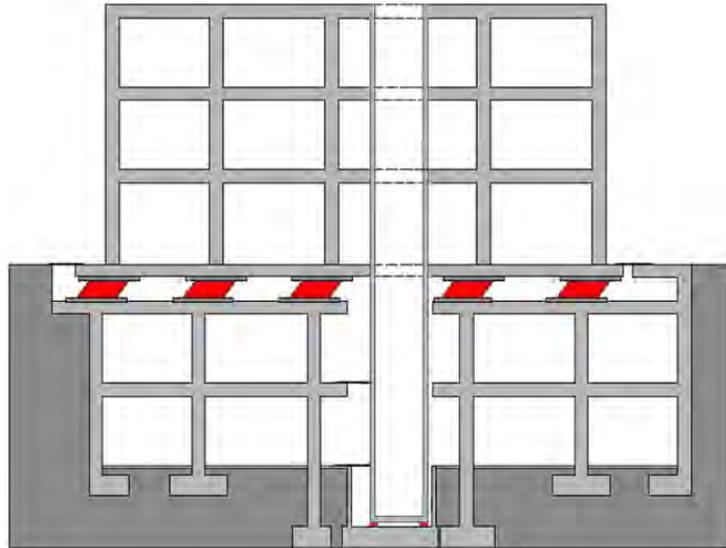


Figura 2.4: Detalle de la caja de ascensor en una estructura aislada con sótanos

Consideraciones Arquitectónicas

- **Relación de esbeltez:** se recomienda que los edificios mantengan una relación de esbeltez ($\frac{H}{B}$) menor a 3 (Figura 2.5). Esta restricción está dirigida a reducir las cargas axiales en los aisladores producidas por el momento volcante, con el fin de eliminar las posibles fuerzas de tracción.

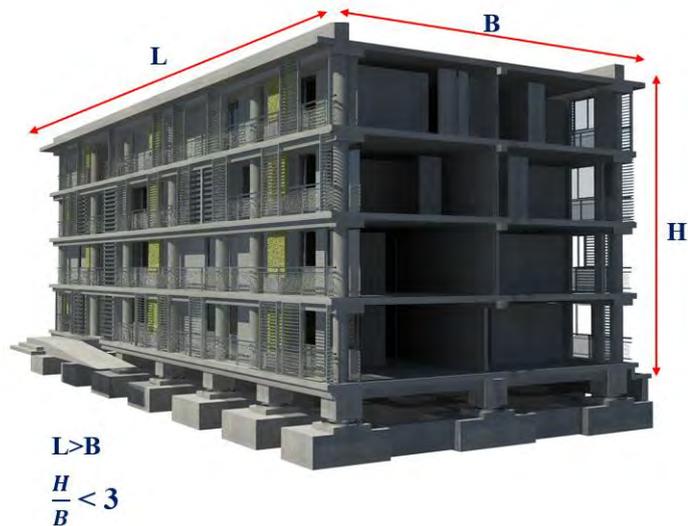


Figura 2.5: Relación de esbeltez ente el ancho y la altura

Fuente: Revista del colegio de ingenieros del Perú, 2012

- **Juntas de separación:** se deben dejar juntas circundantes al edificio, debido al importante desplazamiento relativo del edificio aislado respecto del suelo,

con la finalidad de evitar cualquier tipo de impacto. En el Perú, en la zona de mayor sismicidad, se espera que el desplazamiento relativo entre suelo y edificio aislado este entre 25 a 40 cm según el tipo de suelo y para los amortiguamientos que comúnmente tienen los dispositivos de aislamiento.

- **Juntas de separación en escaleras que cruzan la interfaz de aislamiento:** se debe separar la porción de la escalera que cruzan la interfaz de aislamiento de la superestructura mediante juntas. En la Figura 2.6 se muestran las juntas en las escaleras que atraviesan la interfaz de aislamiento.



Figura 2.6: Detalle de una escalera que atraviesa la interfaz de aislamiento

- **Fácil acceso:** algunos códigos de diseño exigen que se haga una inspección periódica de los dispositivos para determinar el estado en que se encuentran. También, existe la posibilidad de que a futuro se requiera reemplazar los dispositivos, por lo que se debe proporcionar un acceso fácil para las inspecciones y maniobras de sustitución si fuese necesario.

Instalaciones

- **Conexiones que atraviesan la interfaz de aislamiento:** debido al desplazamiento relativo importante entre el suelo y la superestructura, las instalaciones, tal es el caso de las redes de agua, alcantarillado, electricidad, gas, entre otros, deben tener conexiones flexibles al cruzar la interfaz de aislamiento.

2.2. Comportamiento Dinámico de Edificios Aislados

La dinámica de un edificio aislado logra:

1) Nuevo sistema flexible

Los dispositivos de aislamiento originan un nuevo sistema flexible, el cual tiene un periodo más grande T_a en relación al de base fija T_F . El aumento del periodo en el sistema flexible origina a un incremento de desplazamiento del techo (Figura 2.7)

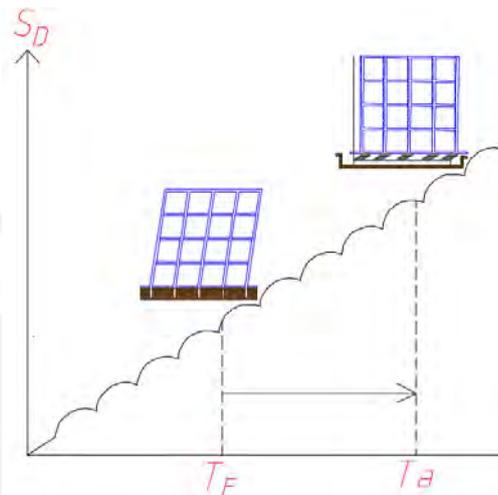


Figura 2.7: Influencia del aumento del periodo en la demanda de desplazamientos

En el edificio aislado gran parte del desplazamiento de la azotea respecto del suelo D_T se concentra en la interfaz de aislamiento (Figura 2.8). Consecuentemente, la superestructura permanece casi sin deformaciones. Esta tendencia se puede interpretar como un piso blando controlado en la plataforma de aislamiento.

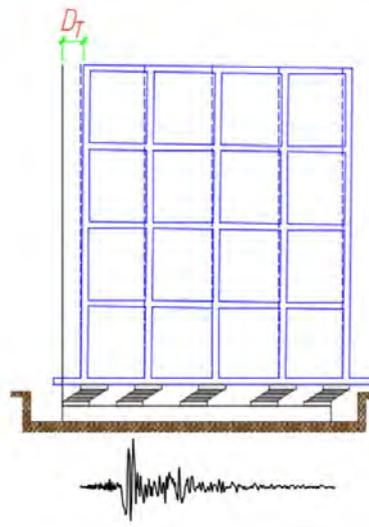


Figura 2.8: Tendencia de deformada de un edificio aislado

En el caso de una estructura convencional el desplazamiento de la azotea se distribuye prácticamente linealmente entre todos los entre pisos y por ende hay daño repartido en todos los niveles (Figura 2.9).

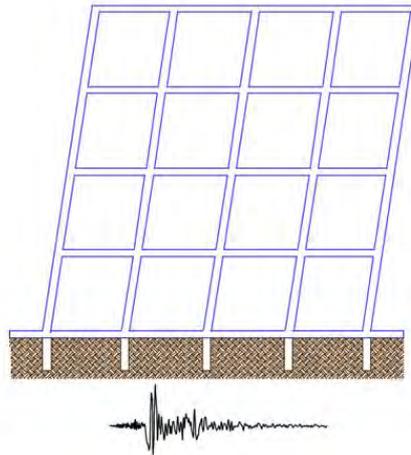


Figura 2.9: Tendencia de deformada de una estructura convencional

El incremento del periodo del sistema debe originar que la estructura se encuentre en una zona de menor demanda sísmica de fuerzas (Figura 2.10).

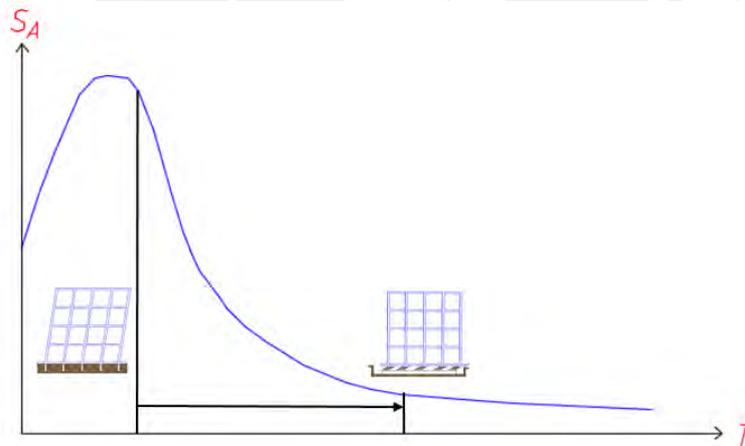


Figura 2.10: Influencia del incremento del periodo en la demanda sísmica

La flexibilización del nuevo sistema debe platearse según el tipo de suelo en que se apoya el edificio aislado. Por ejemplo, el suelo de la ciudad de México tiene una condición excepcional, ya que está conformado por arcillas blandas que originan espectros de aceleración con amplificaciones importantes para periodos altos. En estos casos, el aislamiento debería llevar a la estructura a un periodo considerablemente mayor que el del suelo.

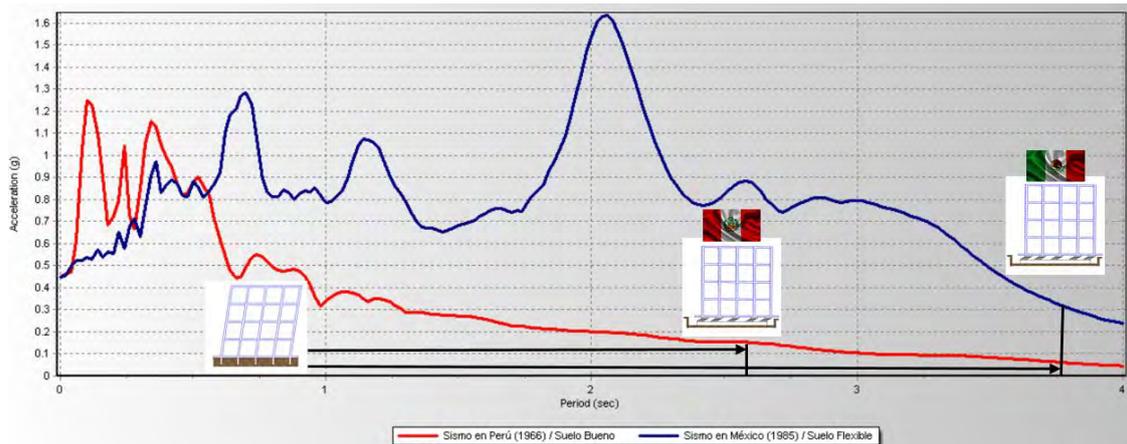


Figura 2.11: Espectro de aceleración de México (1985) y de Perú (1966), escalados a 0.45g

2) Amortiguamiento en el Sistema de Aislamiento

Los dispositivos de aislamiento originan un aumento de amortiguamiento mayor al 5% únicamente en el sistema de aislamiento y no en toda la estructura.

El aumento de amortiguamiento reduce el desplazamiento que se produce en la plataforma de aislamiento; sin embargo, esta reducción no implica que haya una disminución de las derivas y aceleraciones de la estructura.

Un aumento excesivo del amortiguamiento origina una mayor capacidad de arrastre del sistema de aislamiento sobre la estructura, por lo que se origina un aumento de las aceleraciones y derivas. La Figura 2.12 muestra cortantes de entrepiso para distintos niveles de amortiguamiento, se aprecia que un aumento de amortiguamiento genera mayor cortante de entrepiso originando mayores derivas y aceleraciones.

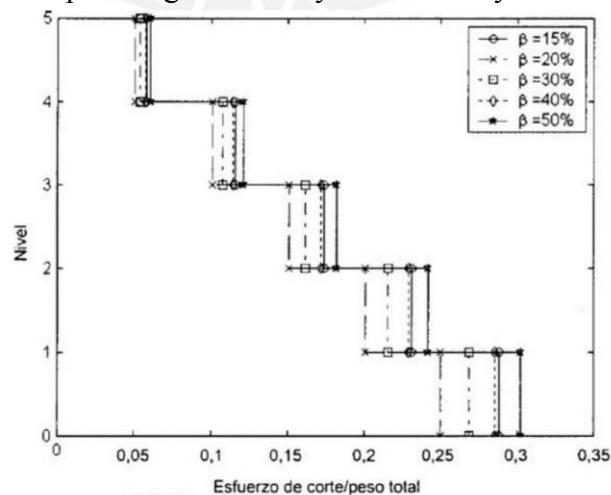


Figura 2.12: Cortante de entrepiso de un edificio aislado de 5 pisos
Fuente: Norma NCH2745, 2013

2.3. Dispositivos de aislamiento

2.3.1. Aisladores Elastoméricos

Los aisladores elastoméricos están conformados por un conjunto de láminas de caucho y placas de acero intercaladas y vulcanizadas unas sobre otras. Las placas de acero proporcionan rigidez vertical al dispositivo de casi la misma magnitud de una columna de concreto armado que descansa sobre el aislador, mientras que las láminas de caucho proporcionan flexibilidad horizontal.

Los aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LDRB) están hechos de goma natural (Figura 2.13.a). Durante el movimiento, estos dispositivos disipan poca energía que se puede representar por un amortiguamiento equivalente del orden de 2-5% (Figura 2.13.b). Los LDRB se usaban en conjunto con amortiguadores a nivel de la interfaz de aislamiento.

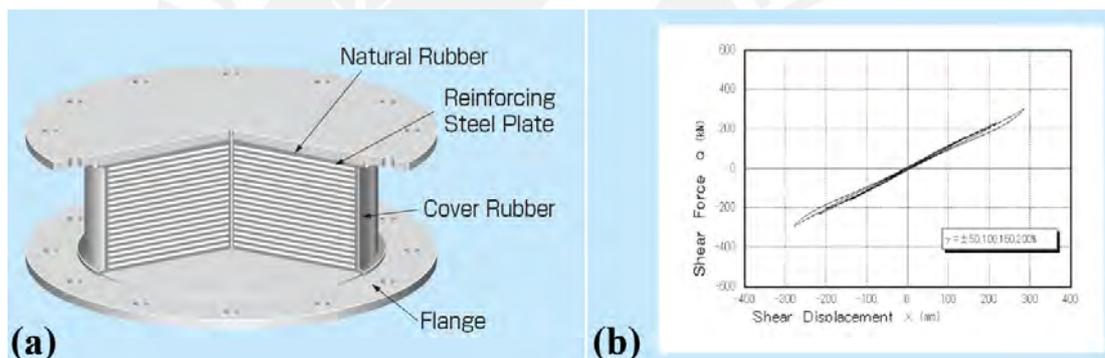


Figura 2.13: Aislador elastomérico LDRB y curva histéresis

*Fuente: Seismic isolation product line-up
[BRIDGESTONE, 2013]*

Los aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (HDR) están hechos con láminas de caucho con aditivos químicos como carbón, aceites, y resinas (Figura 2.14.a). Los aditivos permiten incrementar la disipación de energía que se puede representar por un amortiguamiento equivalente del orden de 10-20% (Figura 2.14.b). La inclusión de estos aditivos químicos en la goma origina que los dispositivos sean sensibles a los cambios de temperatura y frecuencia, lo que puede originar una reducción de la rigidez y el amortiguamiento.

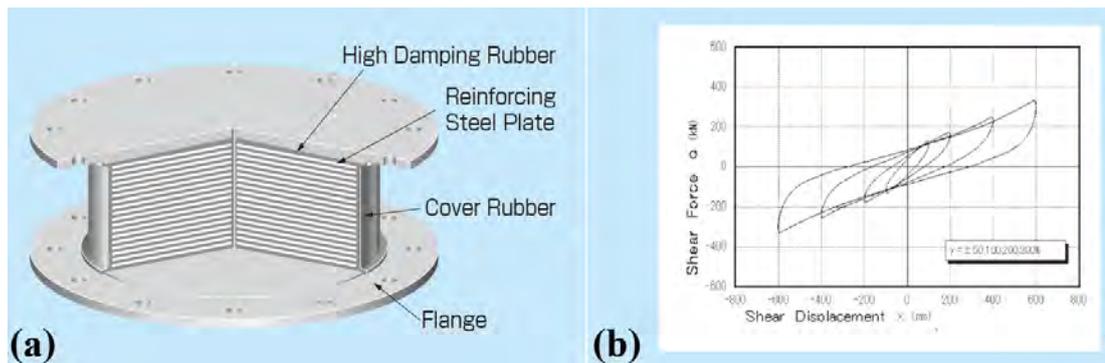


Figura 2.14: Aislador elastomérico HDR y curva de histéresis

*Fuente: Seismic isolation product line-up
[BRIDGESTONE, 2013]*

Los aisladores de núcleo de plomo (LRB) tienen goma natural y en el centro del aislador posee un núcleo de plomo (Figura 2.15.a). El núcleo de plomo permite aumentar la disipación de energía que se puede representar por un amortiguamiento equivalente del orden de 25-30% (Figura 2.15.b). Durante el movimiento, el núcleo de plomo fluye y disipa energía en forma de calor. Cuando termina el sismo, el núcleo de plomo se recristaliza y vuelve a las condiciones iniciales para soportar un nuevo sismo.

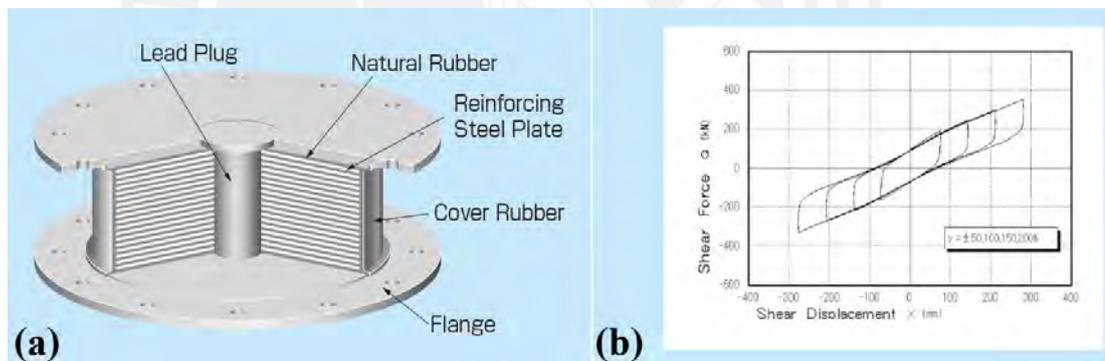


Figura 2.15: Aislador elastomérico LRB y curva de histéresis

*Fuente: Seismic isolation product line-up
[BRIDGESTONE, 2013]*

2.3.2. Aisladores de Péndulo Friccionante (FPS)

Los aisladores de péndulo friccionante (FPS) tienen un deslizador articulado, revestido con polietra fluoro etileno (PTFE) o teflón, que se desplaza en una superficie cóncava de acero inoxidable (Figura 2.16.a). El deslizador tiene un movimiento pendular que varía en función del coeficiente de fricción μ y el peso W que actúa en el aislador. Durante el movimiento, la componente del peso origina una fuerza restauradora que permite centrar al aislador en su posición inicial. El desplazamiento del péndulo sobre la superficie disipa energía en forma de fricción entre el deslizador y la superficie

cóncava (Figura 2.16.b). La fuerza total en el dispositivo depende de dos factores: la fuerza de fricción asociada al contacto entre las superficies y la fuerza restitutiva originada por el peso desplazado de su posición de equilibrio (Figura 2.12).

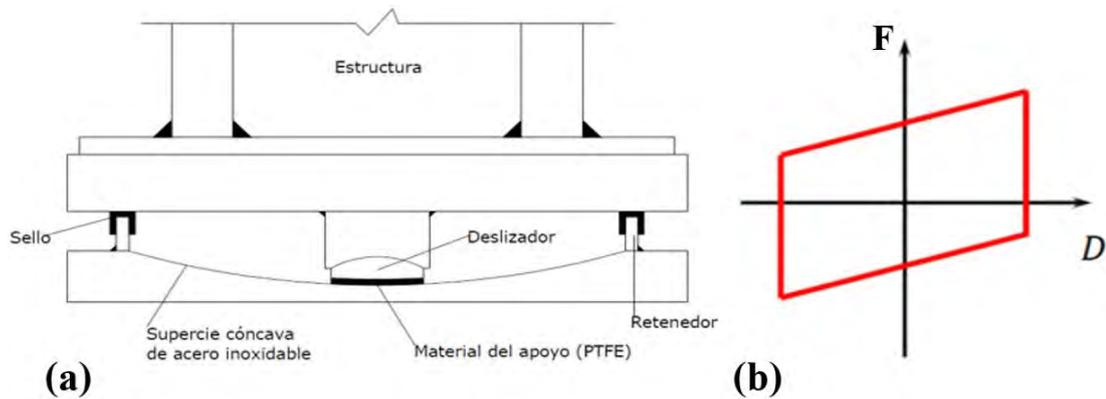


Figura 2.16: Aislador FPS y curva de histéresis
Fuente: Aisladores de base elastoméricos y FPS
 [Aguilar, 2008]

2.3.3. Aisladores Deslizantes (PTFE)

Los aisladores deslizantes están hechos de una plataforma de acero inoxidable plana sobre la que desliza una placa de acero revestida con polietra fluoro etileno (PTFE) (Figura 2.17.a).

En el instante que las fuerzas laterales superen a la fuerza de fricción estática, los deslizadores no impiden el desplazamiento relativo de las superficies en contacto, por lo que carecen de una fuerza restitutiva que permita retornar al aislador a la posición inicial. Los aisladores deslizantes deben ser combinados con otros dispositivos como los aisladores elastoméricos con o sin núcleo de plomo que si tienen restauración. En la Figura 2.17.b se muestra la relación entre la fuerza y el desplazamiento de un aislador deslizante, se asume que la fuerza μW del dispositivo permanece constante para cualquier desplazamiento.

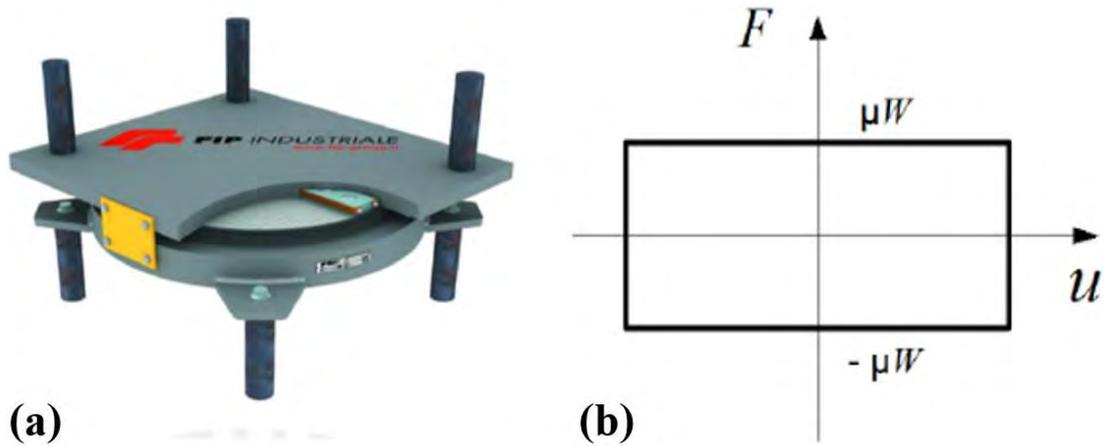


Figura 2.17: Aislador deslizante y curva de histéresis

Fuente: FIP INDUSTRIALE, 2015

2.4. Modelos de Comportamiento para los Aisladores Elastoméricos HDR

En la Figura 2.18 se muestra la curva fuerza desplazamiento experimental de un aislador elastomérico, en cada ciclo se produce un trabajo que es representado por el área bajo el lazo de histéresis.

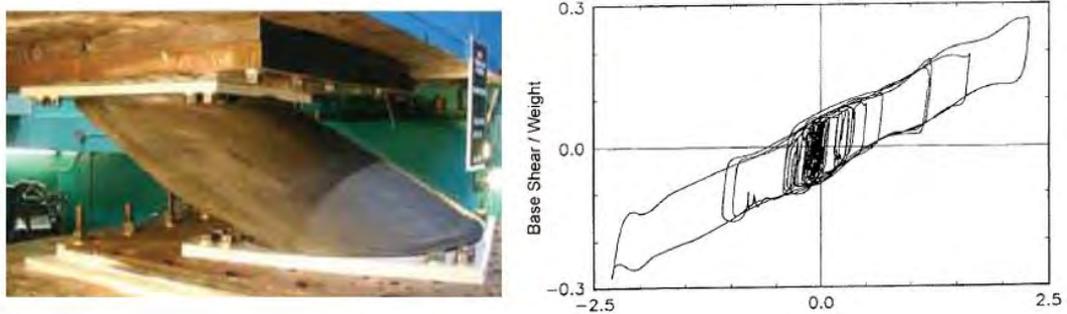


Figura 2.18: Curva histerética de un aislador HDR

*Fuente: Design of seismic isolated structures
[F. Naeim and J. M. Kelly, 1999]*

2.4.1. Modelo Bilineal

La curva histerética puede ser idealizada por una aproximación bilineal que permite caracterizar el comportamiento no lineal de los aisladores de una manera sencilla (Figura 2.19).

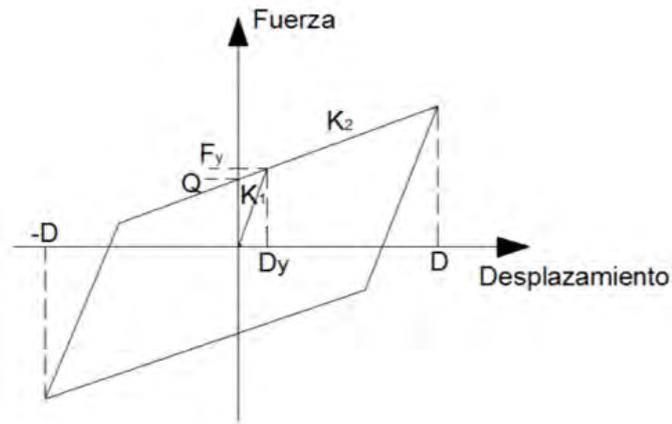


Figura 2.19: Esquema del modelo bilineal

Este modelo implica que la rigidez del dispositivo se representa por dos rigideces: la elástica K_1 y la de fluencia K_2 . Asimismo, el desplazamiento y fuerza de fluencia (D_y , F_y) representa un punto donde se origina el cambio de rigidez. La fuerza asociada a un desplazamiento nulo se representa por Q .

La energía disipada W_D corresponde al área dentro del lazo de histéresis. La energía se obtiene según la Ec. (2.8).

$$W_D = 4Q(D - D_y) \quad (2.8)$$

2.4.2. Modelo Lineal Equivalente

El comportamiento del dispositivo se puede representar mediante un dispositivo elástico con una rigidez equivalente K_{eff} (asociada únicamente en un ciclo de desplazamiento máximo del modelo inelástico) junto a un amortiguamiento equivalente de fluido viscoso ξ_{eff} que disipe la misma cantidad de energía que el modelo bilineal.

En la Figura 2.20 se muestra la relación entre la fuerza de amortiguamiento F_D y el desplazamiento D . El área encerrada por la elipse representa la energía disipada por el amortiguamiento viscoso W_D .

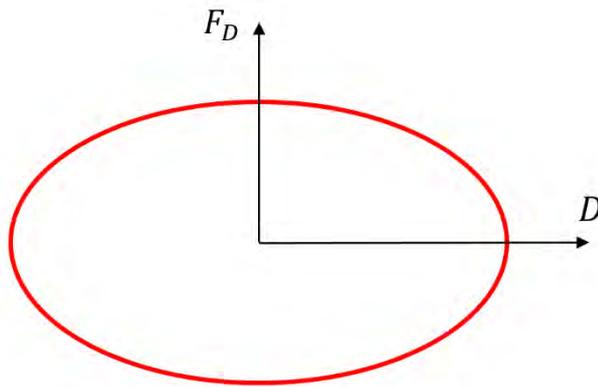


Figura 2.20: Relación entre la fuerza de amortiguamiento y el desplazamiento

La energía disipada se obtiene según la Ec. (2.1).

$$W_D = A = \pi F_D D \quad (2.1)$$

El coeficiente de amortiguamiento C se relaciona con la Fuerza de amortiguamiento F_D y la velocidad V según la Ec (2.2) o en función del amortiguamiento crítico C_{CR} según la Ec (2.3)

$$F_D = CV = CD\omega \quad (2.2)$$

$$C = C_{CR} \xi_{eff} \quad (2.3)$$

Donde:

$$C_{CR} = 2 \sqrt{M K_{eff}} \quad y \quad \omega = \sqrt{\frac{K_{eff}}{M}} \quad (2.4)$$

Por lo que la energía disipada será:

$$W_D = 2\pi D^2 \xi_{eff} K_{eff} \quad (2.5)$$

3. DEMANDA SÍSMICA Y DESEMPEÑO ESPERADO

3.1. Peligro Sísmico

El peligro sísmico se define usando un conjunto de eventos de distintos periodos de retorno T_R o por la correspondiente probabilidad de excedencia durante el tiempo de vida de una obra civil, según se muestra en la Tabla 3.1. Se denomina sismos frecuentes, ocasionales y raros a los de periodo de retorno de 45, 75 y 475 años respectivamente. El sismo muy raro corresponde a eventos de 1000 años de periodo de retorno y el sismo máximo considerado a terremotos de una periodicidad de 2500 años.

Tabla 3.1 Periodo de retorno y probabilidad de excedencia para varios niveles de sismo

Sismo	Periodo de retorno (años)	Probabilidad de excedencia en 50 años (%)
Sismos frecuentes	45	69
Sismos ocasionales	75	50
Sismos raros	475	10
Sismos muy raros	970	5
Sismo Máximo Considerado	2500	2

3.2. Desempeño esperado

El desempeño de un edificio se mide por el comportamiento de la estructura y los elementos no estructurales frente a eventos sísmicos de distintos periodos de retorno.

Se espera que los edificios aislados queden sin daño en sismos de hasta 475 años de periodo de retorno (estructura elástica y todas las componentes operando), y que tengan un daño muy pequeño en los elementos estructurales y no estructurales para sismos de hasta 2500 años de periodo de retorno.

Para lograr los objetivos del desempeño, se debe reducir las distorsiones de entrepiso con la finalidad de disminuir el daño de los elementos estructurales y no estructurales. También, se deben reducir las aceleraciones de piso a fin de controlar el daño en los elementos no estructurales sensibles a las aceleraciones como los equipos médicos.

3.3. Representación de las demandas sísmicas

3.3.1. Fuerzas Laterales Equivalentes

La demanda sísmica se puede representar por un conjunto de fuerzas y momentos torsores aplicadas en los centros de gravedad de cada nivel.

La fuerza total actuante (cortante basal) sobre el edificio se obtiene del espectro de diseño y el periodo fundamental de la estructura aislada, luego esta fuerza total debe distribuirse en la altura del edificio desde el diafragma inmediatamente sobre los dispositivos adoptando algún criterio o forma modal del edificio aislado, como lo establecen las normas internacionales.

3.3.2. Espectros de respuesta

La demanda sísmica se puede representar por espectros de respuesta, los cuales se construyen a partir de acelerogramas representativos de la ubicación geográfica y del tipo de suelo del lugar del proyecto.

Generalmente en las estructuras convencionales de concreto o acero los espectros de diseño consideran un 5% de amortiguamiento. En el caso de las estructuras aisladas existen dos niveles de amortiguamiento: el de la superestructura y el del sistema de aislamiento. Estos diferentes valores de amortiguamiento pueden incorporarse en el espectro de diseño como se explicará en el ítem 4.2.4.

3.3.3. Registros de aceleraciones

Cada registro de aceleración está conformado por tres componentes de aceleración: dos corresponden a las componentes horizontales y la tercera corresponde al movimiento vertical del suelo.

La demanda sísmica para cada periodo de retorno se debe representar por un juego de registros representativos en magnitud y condiciones de sitio del movimiento del suelo donde se apoyará la estructura.

En el Perú no se cuenta con registros suficientes, en especial los correspondientes a terremotos grandes (T_R mayor a 475 años); sin embargo, se puede utilizar registros de las regiones con sismicidad similar.

Para el análisis de estructuras aisladas se debe emplear un número mínimo de registros (que suele ser siete en algunos códigos). En caso que no se cuenten con el número mínimo de registros, las normas permiten utilizar señales artificiales que se crean en base a los posibles terremotos que pueden ocurrir en el sitio en función de las características sismotectónicas y del tipo de suelo.

En general, con los registros disponibles se deben hacer ajustes con el fin de hacerlos representativos de la magnitud y condicionales locales. Estos ajustes se detallan a continuación.

3.3.3.1. Tratamiento de los Registros de aceleraciones para propósitos de diseño

Si bien para representar la sismicidad es necesario contar con un juego de registros para cada periodo de retorno, para efectos de diseño se elige un solo sismo.

El sismo de diseño en este trabajo de tesis es el sismo máximo considerado que tiene una periodicidad de 2500 años. En el Perú, no se cuenta con registros instrumentales de terremotos de 2500 años, por lo que será necesario manipular los registros disponibles para hacerlos representativos a la sismicidad de diseño.

En principio, los registros deben corregirse por línea base y filtrado simple de frecuencias (Figura 3.1). La corrección de la línea base o corrección de ceros es necesaria cuando los valores del acelerograma se encuentran desplazados respecto a la línea cero de aceleración. El filtrado de las señales consiste en eliminar armónicos de muy alta y muy baja frecuencia que está relacionados al equipo de registro, ruido ambiental, paso de maquinaria pesada, etc.

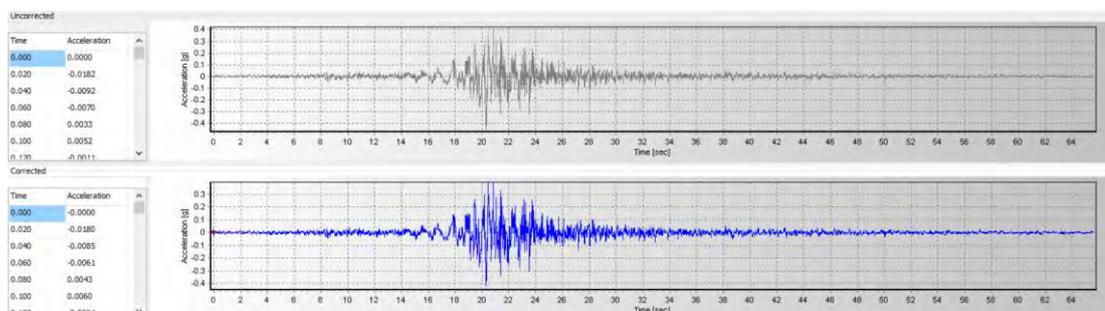


Figura 3.1: Corrección por línea base y filtrado de frecuencias

Luego del proceso de corrección, los juegos de registros se tienen que modificar para que puedan cumplir el siguiente requisito:

- Con cada componente horizontal de un registro se construye un espectro de aceleraciones, luego los espectros de ambas componentes se combinan según la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados para obtener un espectro representativo del registro (espectro SRSS). Finalmente, el promedio del juego de los “n” espectros SRSS (obtenidos de los “n” registros) debe cumplir la condición de igualar o estar por encima al espectro de diseño en un rango de periodos definido.

Para que el promedio de los espectros SRSS esté por sobre el espectro de diseño, las normas estipulan dos procedimientos para modificar el registro: escalamiento de amplitud y escalamiento en frecuencias.

Escalamiento de amplitud

El escalamiento de amplitud preserva el contenido de frecuencias del registro original, ya que consiste en aplicar un único factor de escala a todos los valores del acelerograma con la finalidad de que calce con el espectro de diseño en un rango de periodos establecido. Este rango de periodos suele ser de 0.2 a 1.25 veces el periodo del edificio aislado.

Al usar un único factor de escala se puede exceder significativamente, generalmente en la zona de periodos cortos, los valores espectrales en comparación al espectro de diseño.

Escalamiento en frecuencias

El escalamiento en frecuencias modifica el peso de los armónicos del acelerograma original, y en algunos casos se agregan o restan algunos armónicos con la finalidad de obtener un nuevo espectro de aceleraciones que se asemeje al espectro objetivo. De este modo, no se preserva el contenido de frecuencias del registro original.

Cuando se realiza independientemente el escalamiento en frecuencias de cada componente horizontal de aceleraciones para hacerlas espectro compatible, los

acelerogramas correspondientes se deben usar con factores de escala de 90 % y 44 % para que la acción simultanea de las dos componentes, combinadas según SRSS, represente al espectro de diseño.

La Figura 3.2 muestra la componente (N-S) de la señal de 1966 escalado a un valor de 0.45g y el espectro de diseño establecido en la Norma Peruana E030 (zona 4 y suelo tipo S_1). Para la zona de periodos muy cortos, se consideró una rampa ascendente en el rango $T < 0.2 T_p$.

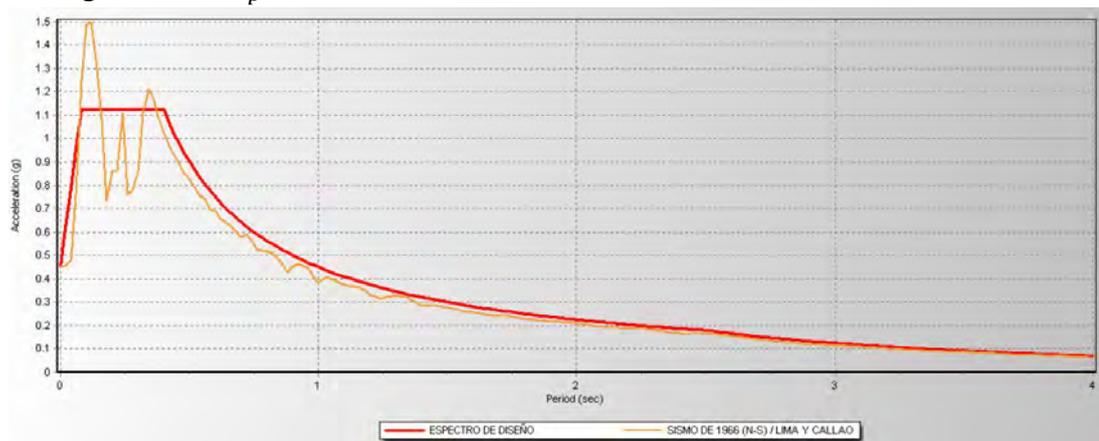


Figura 3.2: Espectro de aceleración de la señal de 1966 (N-S) Lima y Callao escalado a 0.45g

La Figura 3.3 muestra el nuevo espectro de aceleraciones compatible al espectro de diseño mediante el procedimiento de escalamiento de frecuencias; para este propósito se usó el programa SeismoMatch. Se aprecia que hubo un incremento en la aceleración máxima del suelo que pasó de un valor de 0.45g a 0.55g y que el espectro de aceleraciones calza completamente con el espectro de diseño para periodos largos.

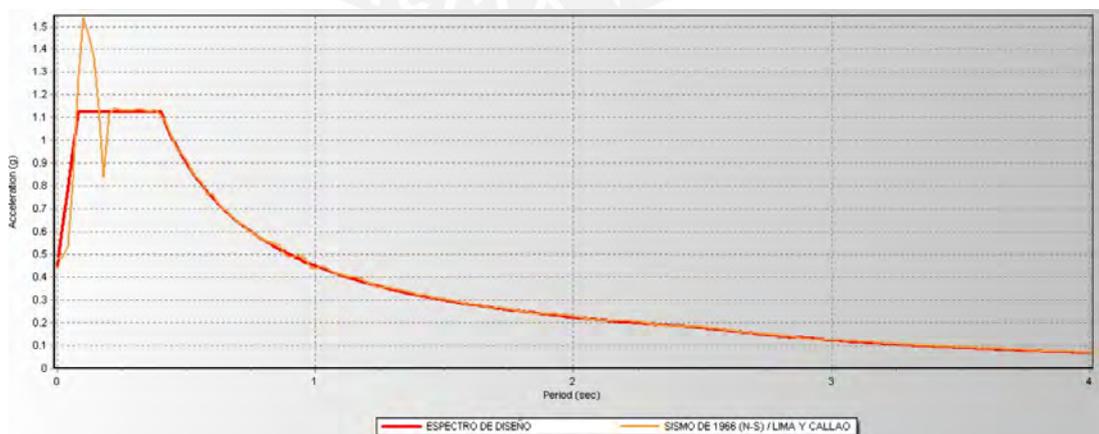


Figura 3.3: Espectro de aceleración de 1966 (N-S) Lima y Callao compatible al espectro de diseño.

El acelerograma corregido y compatibilizado que se obtiene se muestra a continuación:

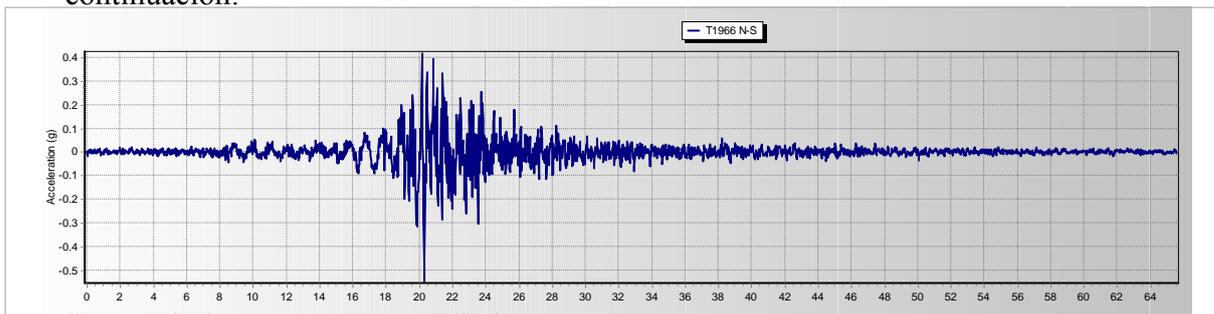


Figura 3.4: Acelerograma del sismo de Lima y Callao de 1966 N-S compatible al espectro de diseño



4. ANÁLISIS DE EDIFICIOS AISLADOS

4.1. Modelos Elásticos de Edificios Aislados

4.1.1. Modelo de un grado de libertad

El modelo de un grado de libertad es una idealización bastante simple que considera que la rigidez de la superestructura K_s es mucho más grande que la del sistema de aislamiento K_b ($K_s \gg K_b$). Esta consideración implica que la superestructura es indeformable, por lo que no hay desplazamientos relativos entre la superestructura y la plataforma de aislamiento (movimiento tipo bloque rígido). De este modo, se genera un sistema de un grado de libertad y una masa actuante m_s+m_b , donde m_s y m_b son la masa de la superestructura y del nivel base respectivamente. La rigidez y la constante de amortiguamiento de este sistema dependen únicamente de los dispositivos. La Figura 4.1 muestra los detalles mencionados.

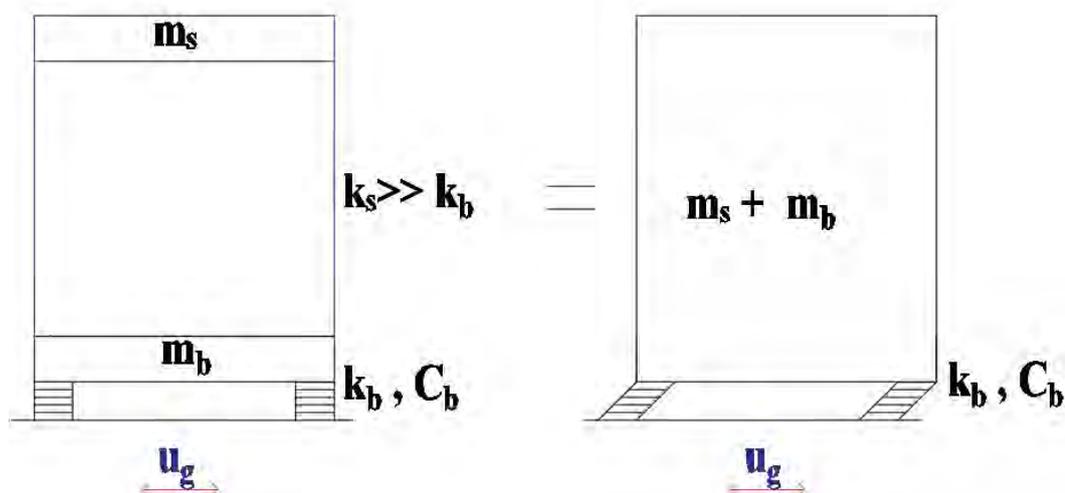


Figura 4.1: Modelo de un sistema de un grado de libertad

4.1.1.1. Análisis modal

Al considerar que la superestructura es indeformable o infinitamente rígida, el periodo fundamental del sistema de aislamiento T_b se calcula como:

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

La constante de amortiguamiento del sistema de aislamiento C_b se relaciona con el amortiguamiento crítico C_{CR} y la fracción de amortiguamiento equivalente ξ_b según la Ecs (4.2).

$$C_b = C_{CR}\xi_b \quad (4.2)$$

Además:

$$C_{CR} = 2\sqrt{(m_s + m_b)k_b} \quad (4.3)$$

Por lo que:

$$C_b = 2\xi_b\sqrt{(m_s + m_b)k_b} \quad (4.4)$$

4.1.2. Modelo de dos grados de libertad

Una estructura aislada de un piso se modela como un sistema que tiene 2 grados de libertad dinámicos: en el nivel base y en la azotea. Consecuentemente, se distinguen dos masas, donde m_b es la masa del nivel base y m_s es la masa de la superestructura. La rigidez y el amortiguamiento de la superestructura son representados por K_s y C_s , y la rigidez y la constante de amortiguamiento del sistema de aislamiento por k_b y C_b (Naeum y Kelly, 1999). La Figura 4.2 muestra los detalles mencionados.

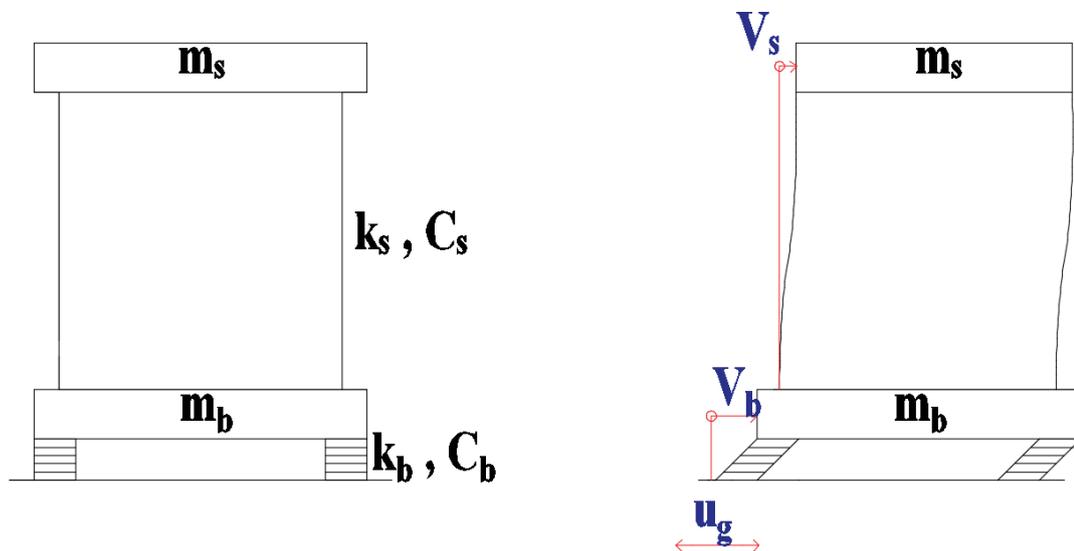


Figura 4.2: Modelo de un sistema de dos grados de libertad

Se opta por un sistema de coordenadas, donde V_b es el desplazamiento de la plataforma respecto del suelo y V_s es el desplazamiento de la superestructura respecto a la

plataforma. Cuando la estructura se someta a una aceleración en su base u_g , la ecuación de equilibrio dinámico queda definida de la siguiente manera:

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

Además:

$$\underline{V} = \begin{Bmatrix} V_b \\ V_s \end{Bmatrix}, \quad \underline{r} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

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

Donde:

$\underline{\hat{M}}$: matriz de masas

$\underline{\hat{C}}$: matriz de amortiguamiento

$\underline{\hat{K}}$: matriz de la rigidez lateral

$\underline{\hat{r}}$: vector de *dirección del movimiento del suelo*

4.1.2.1. Análisis modal

En vibración libre la ecuación de equilibrio dinámico se reduce a:

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

Asumiendo una posible solución armónica:

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

$$\ddot{\underline{V}} = -\omega^2 A \text{ sen}(\omega t) \underline{\phi} \quad (4.8)$$

Donde ω es la frecuencia asociada a la forma de vibración y A es una constante.

Reemplazando la Ec. (4.7) y la Ec. (4.8) en la Ec. (4.6) se tiene:

$$(\underline{\hat{K}} - \omega^2 \underline{\hat{M}}) \underline{\phi} = 0 \quad (4.9)$$

La Ec. (4.9) tiene solución únicamente cuando la determinante de la matriz de coeficientes es nulo, es decir:

$$|\underline{\hat{K}} - \omega^2 \underline{\hat{M}}| = 0 \quad (4.10)$$

Se debe encontrar los valores propios (frecuencias ω), y los vectores propios (modos de vibración) que satisfagan la ecuación Ec. (4.9). Asimismo, si se considera en la solución valores pequeños de ϵ se tiene:

$$\lambda_1 = \omega_1^2 = \omega_b^2(1 - \epsilon\gamma) \quad (4.11)$$

$$\lambda_2 = \omega_2^2 = \frac{1+\epsilon\gamma}{1-\gamma} \omega_s^2 \quad (4.12)$$

Además:

$$\omega^2 = \lambda \quad \gamma = \frac{m_s}{m_b+m_s} \quad \epsilon = \left(\frac{\omega_b}{\omega_s}\right)^2 = \left(\frac{T_f}{T_b}\right)^2$$

Donde T_f es el periodo de estructura de base fija.

Las formas de vibración Φ aproximadas son las siguientes:

Modo 1:

El periodo de vibración T_1 y forma modal $\underline{\phi}_1$ del modo 1 se obtienen:

$$T_1 = T_b \frac{1}{\sqrt{1-\epsilon\gamma}} \quad \underline{\phi}_1 = \begin{Bmatrix} 1 \\ \epsilon \end{Bmatrix}$$

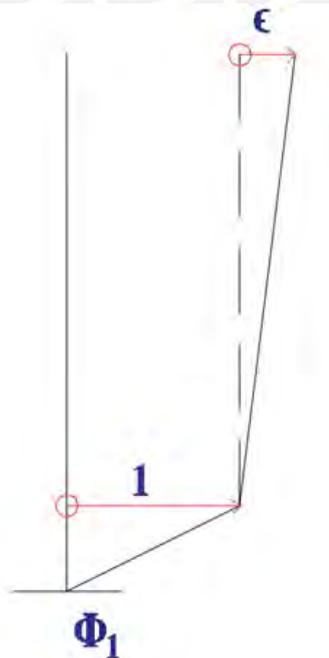


Figura 4.3: Primera forma de vibración de una estructura aislada

El factor de participación $\frac{L_1^*}{M_1^*}$ y el amortiguamiento ξ_1 del modo 1 se obtienen:

$$\frac{L_1^*}{M_1^*} = 1 - \gamma \epsilon \quad (4.13)$$

$$\xi_1 = \xi_b \left(1 - \frac{3}{2} \gamma \epsilon\right) \quad (4.14)$$

En la Figura 4.3 se observa que valores pequeños de ϵ originan que la superestructura tenga un menor desplazamiento respecto a la plataforma.

El factor $\frac{1}{\sqrt{1-\epsilon\gamma}} > 1$ corrige la suposición de que la superestructura es indeformable.

Consecuentemente, el periodo del modo 1 de la estructura aislada T_1 , que considera la flexibilidad de la superestructura, es mayor al periodo que involucra la superestructura infinitamente rígida T_b (modelo de un grado de libertad).

El amortiguamiento del modo 1 ξ_1 es ligeramente menor al amortiguamiento ξ_b obtenido por un modelo de un grado de libertad.

Modo 2:

El periodo de vibración T_2 y forma modal $\underline{\phi}_2$ del modo 2 se obtienen:

$$T_2 = T_f \sqrt{\frac{1-\gamma}{1+\gamma\epsilon}} \quad \underline{\phi}_2 = \begin{Bmatrix} 1 \\ -\frac{1}{\gamma}[1 - (1-\gamma)\epsilon] \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 \\ -\frac{1}{\gamma} \end{Bmatrix}$$

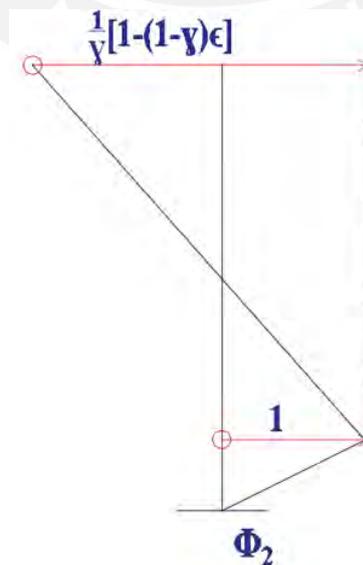


Figura 4.4: Segunda forma de vibración de una estructura aislada

El factor de participación $\frac{L_1^*}{M_1^*}$ y el amortiguamiento ξ_2 del modo 2 se obtienen:

$$\frac{L_2^*}{M_2^*} = \gamma \epsilon \quad (4.15)$$

$$\xi_2 = \frac{1}{\sqrt{1-\gamma}} (\xi_s + \gamma \epsilon^{1/2} \xi_b) \left(1 - \frac{\gamma \epsilon}{2}\right) \quad (4.16)$$

El periodo de la estructura de base fija T_f es mayor al del segundo modo T_2 . Esta tendencia se origina debido a que los periodos de los modos de base fija sufren una transformación y tienden a reducirse cuando se aísla una estructura.

En la Figura 4.4 se observa que la segunda tendencia del edificio genera que el desplazamiento de la superestructura respecto a la plataforma sea mayor que el desplazamiento de la plataforma respecto del suelo. Sin embargo, el aporte del segundo modo a la respuesta está tremendamente reducido debido al factor de participación. Por consiguiente, valores pequeños de ϵ origina que la segunda tendencia del edificio sea irrelevante, por lo que la respuesta sísmica de la estructura queda definida por la primera tendencia de vibración.

Se deduce que el amortiguamiento del modo 2 ξ_2 es mayor al amortiguamiento de la estructura de base fija ξ_f . Asimismo, se observa que ξ_2 depende del valor de ξ_b , de este modo se entiende que el amortiguamiento del sistema de aislamiento “tropa” favoreciendo el amortiguamiento del segundo modo.

Esta tendencia de este sistema puede hacerse extensivo a un sistema de varios grados de libertad.

4.1.2.2. Respuesta espectral

Debido a que el modo fundamental de la estructura aislada de 2gdl es el modo 1, la respuesta final de la estructura se puede estimar razonablemente únicamente con este modo (Figura 4.5).

$$\underline{V} = V_1 = \frac{L_i^*}{M_i^*} \underline{\phi}_i S_D = (1 - \gamma\epsilon) \left\{ \begin{matrix} 1 \\ \epsilon \end{matrix} \right\} S_D(T_1, \xi_1) \quad (4.17)$$

Donde S_D es el desplazamiento máximo relativo.

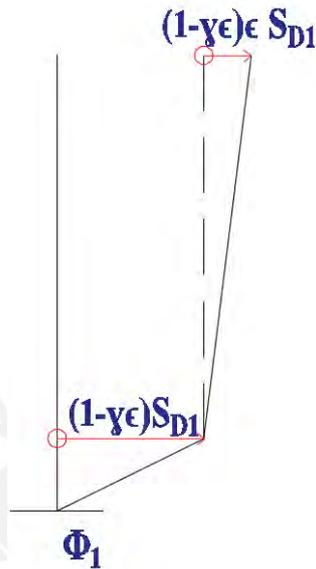


Figura 4.5: Estimación de la respuesta de una estructura de 2gdl

4.2. Procedimientos de Análisis elástico de un edificio aislado

4.2.1. Modelo

En un edificio aislado de n pisos se tiene $n + 1$ diafragmas debido a la losa adicional en el nivel base. El edificio tiene 3 GDL por nivel, por lo que hay $3(n+1)$ modos de vibración.

El modelo para este análisis implica que la superestructura es elástica con un amortiguamiento de 5 %, y que el sistema de aislamiento está conformado por dispositivos que se consideran lineales. Por ende, los dispositivos se representan por una rigidez elástica y un amortiguamiento equivalente de fluido viscoso.

4.2.2. Análisis Modal y Amortiguamiento

Los tres primeros modos (dos traslacionales y uno rotacional) de una estructura aislada generan deformaciones predominantes en el sistema de aislamiento y que la superestructura permanezca casi sin deformaciones (Figura 4.6). De esta forma, se puede atribuir a estos modos el amortiguamiento del sistema de aislamiento.

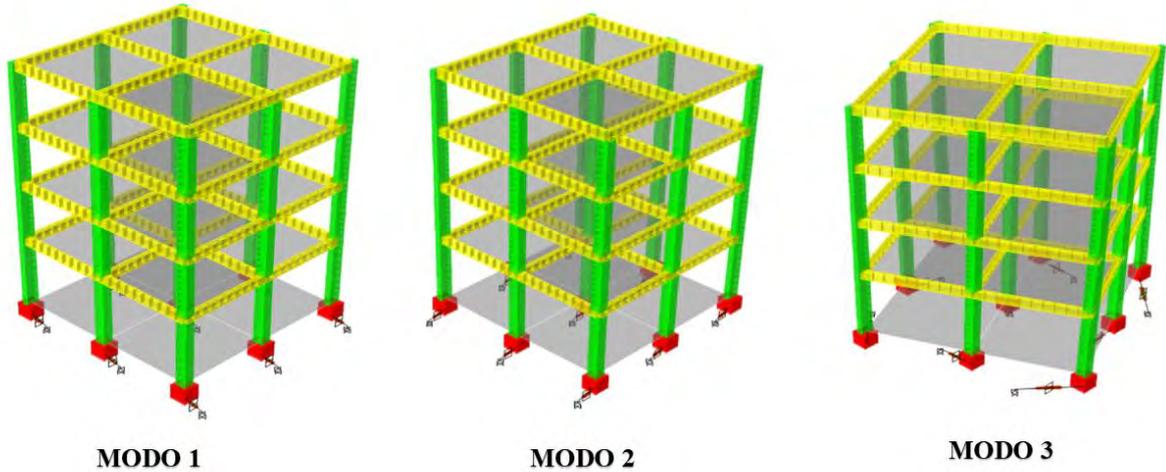


Figura 4.6: Tres primeros modos de una estructura aislada

En los modos superiores al tercer modo (modos 4,5,...) predominan las deformaciones de la superestructura (Figura 4.7). El amortiguamiento modal de estos modos tiene que ser consistente con aquellos valores de una estructura de base fija (5%).

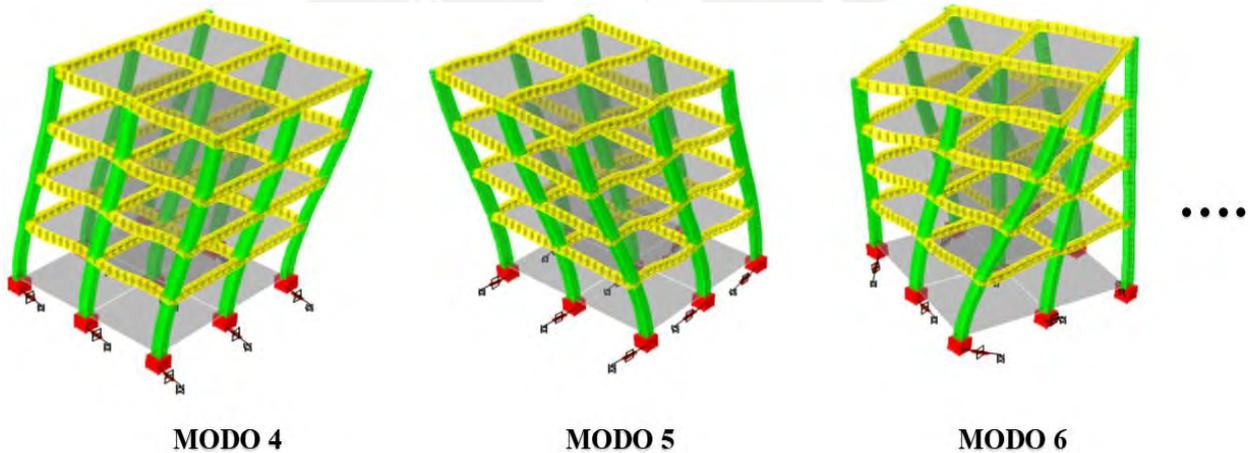


Figura 4.7: Modos superiores al tercer modo de una estructura aislada

Se puede representar la fracción del amortiguamiento equivalente del sistema de aislamiento ξ_b de dos formas:

-La primera forma consiste en distribuir la constante de amortiguamiento del sistema de aislamiento C_b en los dispositivos.

-La segunda forma implica definir directamente la fracción del amortiguamiento equivalente del sistema de aislamiento en los 3 primeros modos de la estructura aislada y para el resto de modos un amortiguamiento típico de 5 %.

4.2.3. Análisis Tiempo Historia

El modelo para este análisis implica que la superestructura es elástica con un amortiguamiento de 5 %, y que el sistema de aislamiento está conformado por dispositivos que se consideran elásticos con amortiguamiento equivalente de fluido viscoso que puede representarse indicando la constante de amortiguamiento de cada dispositivo o estableciendo la fracción de amortiguamiento de cada modo.

4.2.4. Análisis Espectral

El modelo para este análisis contempla la superestructura y el sistema de aislamiento elásticos. A diferencia que el análisis tiempo historia, en el análisis espectral se puede usar una tercera forma para representar el efecto del amortiguamiento equivalente de fluido viscoso.

-La tercera forma consiste en preparar un espectro donde se reduzcan los valores espectrales asociados a los modos preponderantes del sistema de aislamiento (modo 1,2 y 3) debido al aumento de amortiguamiento. Para el resto de modos se debe mantener los valores espectrales típicos de un 5 % de amortiguamiento, ya que estos modos originan deformaciones predominantes en la superestructura.

Se puede usar un factor de modificación sísmica por amortiguamiento inmediatamente antes del periodo del tercer modo (Figura 4.8). En la Tabla 4.1 se detalla los valores estipulados en la norma ASCE7-16 para el factor de modificación de respuesta sísmica para distintos valores de amortiguamiento.

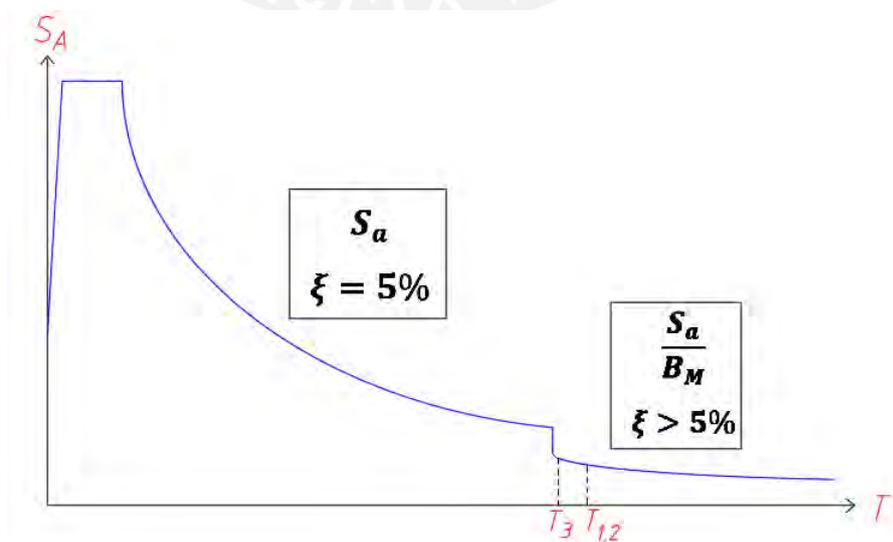


Figura 4.8: Espectro de Respuesta afectado por el factor de modificación

Tabla 4.1 Factores de modificación de respuesta por amortiguamiento

Amortiguamiento efectivo, $\xi_{eff.M}$ (fracción del amortiguamiento crítico)	Factor B_M
≤ 2	0.8
5	1
10	1.2
20	1.5
30	1.7
40	1.9
≥ 50	2

4.3. Procedimientos de Análisis inelástico de un edificio aislado

El modelo para este análisis implica que la superestructura es elástica con un amortiguamiento de 5 %, y que el sistema de aislamiento está conformado por dispositivos inelásticos cuyo comportamiento se puede idealizar por una aproximación bilineal.

Al elaborar los modelos bilineales se esta representando el proceso de disipación de energía del sistema de aislamiento . Para calcular la respuesta final de la estructura se debe asignar un amortiguamiento nulo a los tres primero modos y para el resto de modos de 5%.

4.3.1. Modelo de los dispositivos

Los parámetros que caracterizan al modelo bilineal, descritos en la sección 2.4.1, se relacionan a través de las siguientes ecuaciones:

$$K_2 = K_{eff} - \frac{Q}{D} \quad (4.18)$$

$$K_1 = \frac{Q}{D_y} + K_2 \quad (4.19)$$

$$F_y = Q + K_2 D_y \quad (4.20)$$

Al igualar la energía disipada por el modelo bilineal y lineal equivalente se obtiene la siguiente ecuación:

$$4Q(D - D_y) = 2\pi D^2 \xi_{eff} k_{eff} \quad (4.21)$$

Se puede tener una nueva ecuación que relaciona las rigideces de K_1 y K_2 . Los fabricantes recomiendan valores de α entre 8 y 15.

$$K_1 = \alpha K_2 \quad (4.22)$$

Para encontrar una solución al sistema de cinco ecuaciones se necesita partir de unos datos de entrada: desplazamiento, amortiguamiento equivalente, rigidez equivalente y una relación de rigideces K_1 y K_2 .

A manera de ejemplo, se asumirán relaciones distintas entre K_1 y K_2 , y se evaluará las variaciones de los parámetros Q y K_2 . Se partió como datos de entrada un amortiguamiento equivalente de 10 %, rigidez equivalente de 60 ton/m y un desplazamiento de 34.94 cm.

En la Tabla 4.2 se observa que los valores de K_2 y Q prácticamente permanecen iguales para distintos valores asumidos de $\frac{K_1}{K_2}$ (entre 8 y 15). Se obtuvo una variación máxima para el valor de Q y K_2 de 1.5% y 0.28 % respectivamente.

Tabla 4.2 Cálculo de los parámetro bilineales Q y K_2 a partir de las relaciones de K_1 y K_2

K_1/K_2	8	10	15
K_1 (ton/m)	402.52	503.71	756.69
K_2 (ton/m)	50.31	50.37	50.45
Q (ton)	3.39	3.37	3.34

4.3.2. Modelo del Sistema de Aislamiento para el sismo máximo considerado (MCEr)

En principio, para la construcción del modelo del sistema de aislamiento, se debe definir el modelo de los dispositivos. Para este propósito, se debe asumir un desplazamiento, amortiguamiento equivalente, rigidez equivalente y una relación de rigideces entre K_1 y K_2 . Luego, mediante una sumatoria de cada curva histerética de cada dispositivo se obtiene el diagrama total de histéresis del sistema de aislamiento.

La curva de comportamiento del sistema de aislamiento prácticamente permanece constante para relaciones de rigidez entre 8 y 15 (parámetros K_2 y Q prácticamente similares). Consecuentemente, la respuesta final de la estructura aislada frente a sismos grandes también será semejante para distintas relaciones de rigidez.

En sismos pequeños la estructura responde con el tramo de rigidez K_1 que es considerablemente mayor a la rigidez K_2 . En este instante la resistencia de la superestructura debe ser significativamente mayor a la fuerza de activación del sistema de aislamiento Q , caso contrario la estructura colapsará antes que se active el sistema de aislamiento. A medida que el sismo tenga una mayor magnitud, la estructura responde con un cambio de rigidez de K_1 a K_2 , en ese instante se activa el sistema de aislamiento y la estructura se “suelta”.

A continuación, se detalla el procedimiento para la construcción del modelo del sistema de aislamiento:

-La fuerza de activación del sistema de aislamiento Q se obtiene según la Ec. (4.23), donde Q_i y Q_j son la fuerza a cero deformación de cada dispositivo elastomérico y deslizador respectivamente. Para cada deslizador el valor de Q_j es igual al producto de la fuerza normal N (carga axial) por el coeficiente de fricción u_e , $Q_j = Nu_e$.

$$Q_{Total} = \sum_1^i Q_i + \sum_1^j Q_j \quad (4.23)$$

-La rigidez post fluencia del sistema de aislamiento K_2 se obtiene según la Ec. (4.24), donde K_{2i} es la rigidez inelástica de cada dispositivo elastomérico. La rigidez post fluencia de los deslizadores es nula.

$$K_{2Total} = \sum_1^i K_{2i} \quad (4.24)$$

-La rigidez equivalente del sistema de aislamiento se obtiene según la Ec. (4.25). Donde K_{effi} es la rigidez de cada dispositivos elastomérico. En el caso de cada deslizador se define una rigidez ficticia K_{effj} que se obtiene dividiendo la fuerza de

fricción (igual al producto de la fuerza normal N por el coeficiente de fricción u_e) entre el desplazamiento D , $\frac{Nu_e}{D}$.

$$K_{eff\ Total} = \sum_1^i K_{effi} + \sum_1^j K_{effj} \quad (4.25)$$

Resultados del análisis tiempo historia no lineal

En base al desplazamiento máximo y el diagrama de histéresis del sistema de aislamiento que se obtiene del análisis tiempo historia no lineal, se puede construir un nuevo modelo elástico equivalente que puede diferir del modelo equivalente asumido inicialmente.

En el caso de que el desplazamiento demandado mediante el análisis tiempo historia sea menor al desplazamiento que se usó en el modelo equivalente inicial, el nuevo modelo equivalente tendrá una mayor rigidez equivalente y mayor amortiguamiento equivalente de fluido viscoso, en comparación al modelo equivalente inicial.

La curva de comportamiento del sistema de aislamiento (parámetros K_2 y Q) que se obtiene del análisis tiempo historia no lineal, para cada registro de aceleración, serán prácticamente similares. En la Figura 4.9 se muestra la curva de comportamiento del sistema de aislamiento.

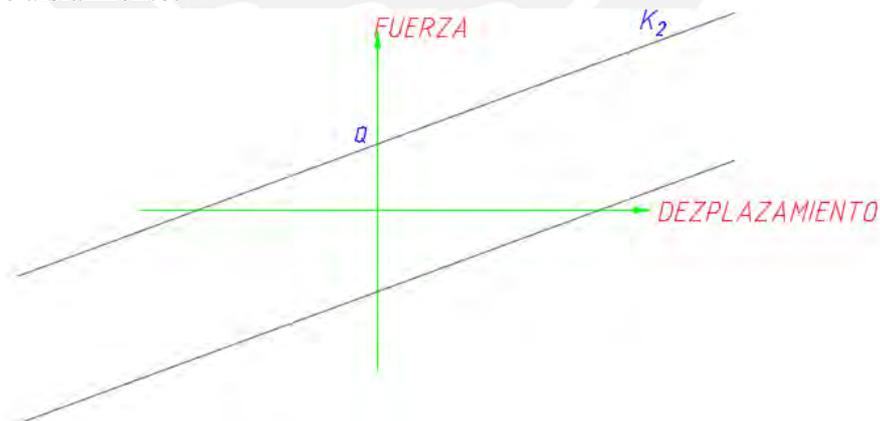


Figura 4.9: Curva de Comportamiento del sistema de aislamiento

4.3.3. Modelo del sistema de aislamiento para sismos de distintos periodos de retorno

Si bien para representar la sismicidad es necesario contar con un juego de registros para cada periodo de retorno, para efectos de diseño se elige un solo sismo.

En el caso que se requiera calcular la respuesta del sistema de aislamiento para sismos de distintos periodos de retorno, se puede partir de la curva de comportamiento del sistema de aislamiento (fuerza desplazamiento) definido en el sismo máximo considerado MCEr.

A manera de ejemplo, se detalla el procedimiento iterativo para calcular el modelo lineal equivalente (amortiguamiento de fluido viscoso) para el sismo de periodicidad de 500 años definido como sismo de diseño SDI para las estructuras convencionales. Para este propósito, se debe tener en cuenta que:

- Los parámetros Q y K_2 permanecen constantes en el sismo de diseño y sismo máximo considerado.
- El modelo lineal equivalente para el sismo de diseño tendrá un menor desplazamiento, mayor rigidez equivalente, menor periodo equivalente y mayor amortiguamiento equivalente en comparación al modelo lineal equivalente del sismo máximo considerado.

Como punto de partida se debe asumir un valor del factor de reducción por amortiguamiento B_D , este proceso culminará cuando converja este valor asumido. A continuación, se detalla el procedimiento:

-Se asume un valor de B_D y se calcula el D_D . Para periodos $T_D > T_L$ el desplazamiento de diseño D_D , para la sismicidad peruana, se calcula según la Ec. (4.26).

$$D_D = \frac{2.5 T_P T_L Z S}{4\pi^2 B_D} \quad (4.26)$$

-La fuerza máxima $F_{M\acute{A}X.D}$ para el sismo SDI se calcula según la Ec. (4.27).

$$F_{M\acute{A}X.D} = F_{M\acute{A}X.M} - K_2(D_M - D_D) \quad (4.27)$$

-Luego se calcula la rigidez equivalente $K_{eff.D}$ y el amortiguamiento equivalente $\xi_{eff.D}$ del sistema de aislamiento para el sismo de diseño según la Ec. (4.28) y Ec. (4.29) respectivamente.

$$K_{eff.D} = \frac{F_{M\acute{A}X.D}}{D_D} \quad (4.28)$$

$$\xi_{eff.D} = \frac{4Q(D_D - D_Y)}{2\pi K_{eff.D} D_D^2} \quad (4.29)$$

-Finalmente con el amortiguamiento equivalente se calcula el valor de B_D , para este propósito se puede usar la Tabla 4.1. El proceso iterativo culmina cuando el valor asumido B_D converja.

En la Figura 4.10 se muestra esquemáticamente los parámetros descritos en el procedimiento.

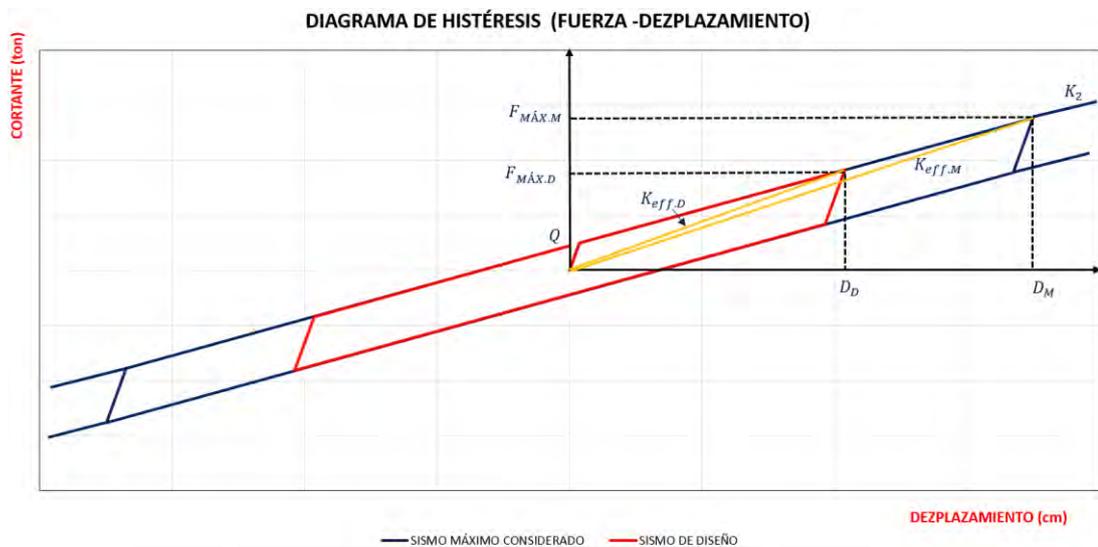


Figura 4.10: Curva de comportamiento del sistema de aislamiento para el sismo máximo considerado y sismo de diseño

Donde:

D_M : Desplazamiento el sistema de aislamiento para el sismo máximo considerado.

$F_{MÁX.M}$: Fuerza máxima en el sistema de aislamiento para el sismo máximo considerado.

$K_{eff.M}$: Rigidez equivalente del sistema de aislamiento para el sismo máximo considerado.

T_D : Periodo equivalente del sistema de aislamiento para el sismo de diseño.

T_M : Periodo equivalente del sistema de aislamiento para el sismo máximo considerado.

5. NORMA PARA EL ANÁLISIS Y DISEÑO-ASCE7-16

La norma peruana E.030 Diseño Sismorresistente establece que para el diseño de edificios aislados se cumpla, en la medida que sea posible, los requisitos de la siguiente norma internacional:

- “Minimum Design Loads for Building and Other Structures “ , ASCE/SEI 7-10, American Society of Civil Engineers, 2010”

Cabe mencionar que, la norma ASCE/SEI 7-10 tuvo una actualización en el año 2016. Es así que, en este trabajo se usará como referencia para el análisis y diseño de edificios aislados los requisitos de la norma ASCE/SEI 7-16 (versión del 2016). Además, se tendrá en cuenta los límites de deriva estipulado en el proyecto peruano de la Norma Técnica de Aislamiento Sísmico E.031.

5.1. Sismicidad

El ASCE7-16 define una sismicidad de diseño con una periodicidad de 2500 años, al cual le denomina sismo máximo considerado (MCEr). Este sismo de diseño tiene una probabilidad de excedencia de 2% para estructuras de 50 años de vida útil.

El MCEr es equivalente a 1.5 veces el nivel de sismo de diseño establecido en la norma peruana E.030 que tiene un periodo de retorno de 475 años.

El MCEr se emplea para el cálculo de la respuesta y diseño de la subestructura y superestructura, además para el cálculo de la demanda de desplazamientos y verificación de estabilidad de los dispositivos.

5.2. Requisitos generales de diseño

5.2.1. Calificación de la regularidad estructural

Se debe clasificar a la estructura sobre el sistema de aislamiento (superestructura) como regular o irregular. El proyecto peruano de la Norma Técnica de Aislamiento Sísmico E.031 establece para los edificios aislados solo se debe analizar las siguientes irregularidades:

- Irregularidad de rigidez de piso blando.
- Irregularidad de resistencia de piso débil.

- Irregularidad de rigidez extrema de piso blando.
- Irregularidad de resistencia extrema de piso débil.
- Irregularidad por discontinuidad extrema en los sistemas resistentes.
- Irregularidad torsional extreme en planta.

El Proyecto de norma E031 establece que en las categorías de edificaciones esenciales e importantes en las zonas sísmicas 4 y 3 no se permiten irregularidades extremas, para las zonas sísmicas 2 y 1 no hay restricciones. En la categoría de edificaciones comunes en las zona sísmica 4 no se permiten irregularidad extremas, para las zonas 3,2 y 1 no hay restricciones.

5.2.2. Sistema de aislamiento

5.2.2.1. Fuerza de viento

Las edificaciones aisladas en el Perú deben resistir fuerzas de viento en todos los niveles sobre la interfaz de aislamiento, según lo estipulado en la norma peruana E.020 Cargas.

En la interfaz de aislamiento se debe limitar el desplazamiento producido por las cargas laterales de viento a un valor igual al que se permite en los entrepisos de la superestructura.

5.2.2.2. Fuerza restauradora

El sistema de aislamiento debe ser capaz de reservar una fuerza de restitución lateral que permita que la estructura regrese a su posición inicial cuando culmine el evento sísmico. La fuerza restauradora se debe verificar para el sismo máximo (MCEr). La norma americana limita que esta fuerza debe ser mayor a 2.5 % del peso sobre la interfaz de aislamiento W :

$$\Delta F = F_{D_M} - F_{0.5 D_M} \geq 0.025W$$

De esta ecuación se entiende que la fuerza restauradora se obtiene de una resta entre la fuerza asociada al desplazamiento máximo y la fuerza correspondiente a la mitad del desplazamiento máximo (Figura 5.1).

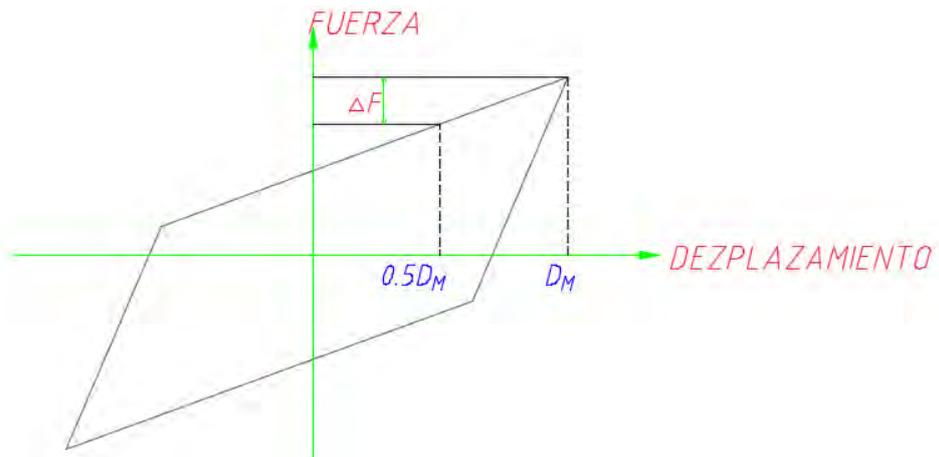


Figura 5.1: Esquematización de la fuerza restauradora

5.2.3. Combinaciones de carga vertical para cada tipo de aislador

La carga vertical en cada tipo de aislador, deben ser calculados para el sismo máximo considerado MCEr según las siguientes combinaciones de carga:

- a) Carga vertical promedio
 $1.0 D + 0.5 L$
- b) Carga vertical máxima
 $(1.2 + 0.2S_{MC})D + Q_E + L + 0.2S$
- c) Carga vertical mínima
 $(0.9 - 0.2S_{MC})D + Q_E$

Donde:

D : Carga muerta

L : Carga viva

S : Carga de nieve

Q_E : Carga sísmica horizontal

$0.2S_{MC}$: Carga sísmica vertical

La carga sísmica vertical, en base a la sismicidad peruana, se calcula según la Ec. (5.1).

$$0.2S_{MC} = 0.2 * 1.5 * 2.5 * Z * S \quad (5.1)$$

5.2.4. Propiedades del sistema de aislamiento

Cada dispositivo del sistema de aislamientos se debe clasificar y agrupar según el tipo y tamaño del aislador.

5.2.4.1. Propiedades nominales de un aislador

Las propiedades nominales de diseño de cada tipo de aislador están basadas en las propiedades promedio de tres ciclos de ensayo de los prototipos.

Si los valores medidos de rigidez efectiva y amortiguamiento efectivo, basados en las pruebas cíclicas del aislador, para la carga vertical promedio indicado en el ítem 5.2.3 difieren en menos de 15% del promedio de los valores de las tres combinaciones de carga vertical definidos en 5.2.3, las propiedades de diseño nominal deben ser calculadas solo para la combinación de carga vertical promedio.

5.2.4.2. Factores de modificación de las propiedades

Existe variación en las propiedades nominales de los dispositivos debido a los efectos de velocidad de carga, scragging y recuperación, variación debido al movimiento dinámico cíclico, variación debido al proceso de fabricación, temperatura, envejecimiento, exposición ambiental y contaminación

La variabilidad de las propiedades de los dispositivos se define mediante factores de modificación máximos y mínimos ($\lambda_{m\acute{a}x}$ y $\lambda_{m\acute{i}n}$) que afectan a las propiedades nominales de los dispositivos K_2 y Q .

Si los datos de ensayo de cualificación de un fabricante son aprobados por el ingeniero de diseño responsable, estos pueden ser empleados para calcular los factores de modificación. Caso contrario, se deben usar para los factores de modificación los límites de las Ec. (5.2) y Ec. (5.3).

$$\lambda_{max} = \left(1 + \left(0.75 * (\lambda_{ae,max} - 1)\right)\right) \lambda_{test,max} \lambda_{spec,max} \geq 1.8 \quad (5.2)$$

$$\lambda_{min} = \left(1 - \left(0.75 * (1 - \lambda_{ae,min})\right)\right) \lambda_{test,min} \lambda_{spec,min} \leq 0.6 \quad (5.3)$$

Donde:

$\lambda_{ae,max}$: Factor de modificación máxima debido a las condiciones medio ambientales y envejecimiento.

$\lambda_{ae,min}$: Factor de modificación mínima debido a las condiciones medio ambientales y envejecimiento.

$\lambda_{test,max}$: Factor de modificación máxima debido a las condiciones de temperatura, velocidad de carga y scragging.

$\lambda_{test,min}$: Factor de modificación mínima debido a las condiciones de temperatura, velocidad de carga y scragging.

$\lambda_{spec,max}$: Factor de modificación máxima debido a la variabilidad en la fabricación de los aisladores.

$\lambda_{spec,min}$: Factor de modificación mínima debido a la variabilidad en la fabricación de los aisladores.

5.2.4.3. Límite superior e inferior del comportamiento fuerza-desplazamiento de los componentes del sistema de aislamiento

Se debe desarrollar un modelo matemático independientemente para el límite superior e inferior del comportamiento histerético (fuerza-desplazamiento) de cada tipo de dispositivo del sistema de aislamiento utilizando los factores de modificación indicados en el ítem 5.2.4.2.

5.2.4.4. Propiedades del sistema de aislamiento en el desplazamiento máximo

La rigidez efectiva del sistema de aislamiento K_M asociada al desplazamiento máximo D_M , se debe calcular usando los límites superiores e inferiores de cada tipo de aislador según la Ec. (5.4).

$$K_M = \frac{\sum |F_M^+| + \sum |F_M^-|}{2D_M} \quad (5.4)$$

El amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento $\xi_{eff,M}$ asociado al desplazamiento máximo D_M , se debe calcular usando los límites superiores e inferiores de cada tipo de aislador según la Ec. (5.5).

$$\xi_{eff.M} = \frac{\sum E_M}{2\pi K_M D_M^2} \quad (5.5)$$

Donde:

$\sum |F_M^+|$: Sumatoria de los valores absolutos de las fuerzas en todos los aisladores del sistema de aislamiento para un desplazamiento positivo D_M .

$\sum |F_M^-|$: Sumatoria de los valores absolutos de las fuerzas en todos los aisladores del sistema de aislamiento para un desplazamiento negativo D_M .

$\sum E_M$: Energía total disipada por el sistema de aislamiento para un ciclo completo de respuesta para el desplazamiento D_M .

5.2.4.5. Límite superior e límite inferior de las propiedades del sistema de aislamiento en el desplazamiento máximo.

El análisis de la estructura aislada se hace por separado para las propiedades del límite superior e inferior, y se debe utilizar para el diseño el caso más desfavorable para cada parámetro de respuesta de interés. Además, en análisis debe cumplir con lo siguiente:

- Las variables definidas en el procedimiento de fuerzas estáticas equivalentes, y para los propósitos de establecer fuerzas laterales mínimas de diseño y desplazamientos mínimos de diseño para el análisis dinámico, se deben calcular de forma independiente para los límites superiores e inferiores del sistema de aislamiento.

5.3. Definición del movimiento del terreno

5.3.1. Registros de aceleración del suelo

Para el movimiento del terreno se debe emplear un conjunto mínimo de 7 registros cuando se use el análisis de respuesta tiempo historia. Los juegos de registros deben ser representativos en magnitud con el sismo máximo considerado y con las condiciones de sitio del movimiento del suelo donde se apoyará la estructura.

Los juegos de registros se tienen que modificar mediante un escalamiento de amplitudes o escalamiento de frecuencias para que cumplan el requisito que se detalló en el ítem 3.3.3.1.

Cada par de componentes horizontal se deben escalar, de modo que en el rango de periodos $0.75 T_M$ usando el límite superior y $1.25 T_M$ usando el límite inferior, debe cumplir la condición de igualar o estar por encima al espectro de diseño.

En el escalamiento de frecuencias cada par de componentes horizontales se deben escalar, de modo que en el rango de periodos $0.2 T_M$ usando el límite superior y $1.25 T_M$ usando el límite inferior, debe cumplir la condición de que el espectro de respuesta de la componente en la dirección de análisis no sea menor al 90% del espectro de diseño.

5.4. Procedimientos de análisis de estructuras aisladas

El ASCE7-16 permite modelos lineales o no lineales de los dispositivos para el análisis y diseño de estructuras aisladas.

El análisis estático lineal o de fuerzas estáticas equivalentes está sujeta a varias restricciones para su uso.

El análisis espectral mediante modelos lineales tiene menos restricciones que el análisis estático, mientras que el análisis tiempo historia no lineal no tiene ninguna restricción para su uso.

5.4.1. Análisis de fuerzas estáticas equivalentes

5.4.1.1. Desplazamientos lateral mínimos para diseño

Desplazamiento máximo

El sistema de aislamiento, para la sismicidad peruana, debe ser capaz de desarrollar en las dos direcciones por lo menos el desplazamiento traslacional en el centro de rigidez D_M , calculado según las Ec. (5.6).

$$D_M = \frac{1.5 ZCS T_M^2 g}{4\pi^2 B_M} \quad (5.6)$$

Donde:

T_M : Periodo del sistema de aislamiento

B_M : Factor de modificación de respuesta por amortiguamiento

g: Aceleración de la gravedad (9.81 m/s²)

C: Factor de amplificación sísmica

El factor de amplificación sísmica C se interpreta como la amplificación que realiza la estructura respecto a la aceleración del suelo. El valor asociado a este parámetro depende de periodo de la estructura aislada según Ec. (5.7).

$$\begin{aligned} T < T_P & C = 2,5 \\ T_P < T < T_L & C = 2,5 \cdot \left(\frac{T_P}{T}\right) \\ T > T_L & C = 2,5 \cdot \left(\frac{T_P \cdot T_L}{T^2}\right) \end{aligned} \quad (5.7)$$

El espectro peruano para periodos largos ($T > T_L$) tiene una curva tipo hipérbola de la forma $\frac{1}{T^2}$, esta forma origina que el desplazamiento espectral sea constante para periodos mayores al periodo largo. En este caso, el desplazamiento máximo no depende del periodo del sistema de aislamiento y se calcula según la Ec. (5.8).

$$D_M = \frac{1.5 \cdot 2.5 \cdot Z \cdot T_P \cdot T_L \cdot S \cdot g}{4 \cdot \pi^2 \cdot B_M}, \quad T > T_L \quad (5.8)$$

Periodo efectivo del sistema de aislamiento

El periodo efectivo del sistema de aislamiento T_M asociado al desplazamiento máximo D_M , se calcula según la Ec. (5.9).

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_M g}} \quad (5.9)$$

Donde:

W: Peso sísmico por encima de la interfaz de aislamiento

K_M : Rigidez efectiva del sistema de aislamiento

Desplazamiento total máximo

El desplazamiento total máximo incluye desplazamientos adicionales debido a la torsión natural y accidental para la ubicación menos favorable del centro de masa, se obtiene con la Ec. (5.10).

$$D_{TM} = D_M \left(1 + \frac{Y}{P_T^2} * \frac{12e}{b^2+d^2} \right) \quad (5.10)$$

Donde:

b: Dimensión menor en planta del edificio

d: Dimensión mayor en planta del edificio, medida perpendicularmente a la dimensión menor *b*.

y: Distancia entre el centro de rigidez del sistema de aislamiento y el elemento de interés, medida perpendicularmente a la dirección de la sollicitación sísmica.

e: Excentricidad obtenida por la suma de la excentricidad natural y accidental. Esta última, se toma como el 5% de la dimensión mayor en planta perpendicular a la dirección de análisis.

P_T : Razón entre el periodo traslacional y rotacional del sistema de aislamiento.

El desplazamiento total máximo D_{TM} debe ser por lo menos 1.15 veces el desplazamiento máximo D_M .

5.4.1.2. Fuerzas laterales mínimas para diseño

Sistema de aislamiento y elementos estructurales bajo el nivel base

El sistema de aislamiento y los elementos estructurales por debajo del nivel de base deben ser diseñados para resistir una fuerza lateral mínima sísmica V_b según las Ec. (5.11) .

$$V_b = K_M D_M \quad (5.11)$$

Elementos estructurales sobre el nivel de base

La estructura por encima del nivel de base debe ser diseñada para resistir una fuerza lateral mínima sísmica V_s según las Ec. (5.12) .

$$V_s = \frac{V_{st}}{R_I} \quad (5.12)$$

Donde:

R_I : Coeficiente de reducción de las fuerzas sísmicas.

V_{st} : Cortante no reducida que actúa en los elementos estructurales por encima del nivel de base.

El coeficiente R_I puede tomarse como 3/8 del valor de R_o que corresponde a estructuras de base fija según la norma peruana E.030, con un máximo valor 2 y un mínimo de 1. El valor de V_s no debe ser menor que:

- La fuerza cortante mínima de una estructura de base fija con el mismo peso (excluyendo el peso del nivel de base) y periodo de la estructura aislada según la norma peruana E030.
- La cortante asociada a los efectos de viento.
- 1.5 veces la fuerza de activación del nivel de aislamiento.

La cortante no reducida que actúa en los elementos por encima del nivel de base V_{st} se calcula según la Ec. (5.13).

$$V_{st} = V_b \left(\frac{W_s}{W} \right)^{1-2.5\xi_{eff.M}} \quad (5.13)$$

Donde:

W : Peso sísmico sobre la interfaz de aislamiento.

W_s : Peso sísmico sobre la interfaz de aislamiento excluyendo el peso del nivel de base.

$\xi_{eff.M}$: Amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento para el desplazamiento traslacional D_m .

5.4.1.3. Distribución de la cortante en altura

La fuerza V_s debe distribuirse en cada nivel sobre el sistema de aislamiento usado las siguientes ecuaciones:

$$F_I = \frac{V_b - V_{st}}{R_I} \quad (5.14)$$

$$F_X = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} V_s \quad (5.15)$$

$$k = 14 \xi_{eff.M} T \quad (5.16)$$

Donde:

F_1 : Fuerza sísmica lateral en el nivel 1, nivel de base.

F_x : Fuerza sísmica lateral en el nivel x , $x > 1$

n : Número de pisos de la estructura sobre la interfaz de aislamiento

w_x : Porción del peso W_s que se ubica en el nivel i

T : Periodo fundamental de la estructura de base fija

5.4.1.4. Límites de desplazamiento de entrepiso

La máxima deriva por encima del nivel de base no debe exceder de 0.0035, este límite se calcula multiplicando los resultados del análisis lineal elástico por R_I .

5.4.2. Análisis Dinámico

5.4.2.1. Análisis de Respuesta Espectral

Para el análisis espectral se debe usar un valor de amortiguamiento modal para el modo fundamental, en la dirección de interés, no mayor que el menor de:

- El amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento
- 30% del amortiguamiento crítico.

Los valores de amortiguamiento modal para los otros modos deben ser consecuentes a los usados en una estructura de base fija.

El análisis modal espectral debe realizarse con la acción simultánea sobre el modelo de 100% la dirección de interés más un 30 % de un eje ortogonal a la dirección anterior. El desplazamiento máximo del sistema de aislamiento se calcula según la suma vectorial de los desplazamientos ortogonales.

5.4.2.2. Análisis tiempo historia

El análisis tiempo historia se podrá usar para el diseño de cualquier estructura con aislación sísmica.

Los registros de aceleración deben ser escalados mediante el escalamiento de frecuencias o escalamiento de amplitudes según se explicó en el ítem 3.3.3.1.

El análisis tiempo historia debe realizarse con la acción simultánea de cada par de componentes. El desplazamiento máximo del sistema de aislamiento se calcula según la suma vectorial de los desplazamientos ortogonales para cada instante de tiempo.

Se debe calcular los parámetros de interés para cada par de componentes (7 registros), luego se debe usar para diseño el valor promedio de los parámetros de respuesta de interés.

5.4.2.3. Fuerza laterales mínimas para diseño

Sistema de aislamiento y elementos estructurales bajo el nivel base

La fuerza lateral de diseño para el sistema de aislamiento y los elementos estructurales bajo la interfaz de aislamiento debe ser mayor que el 90% de V_b , según la Ec. (5.11).

$$V_b \text{ dinámico} \geq 90\% V_b \text{ estático mínimo}$$

El desplazamiento total máximo del sistema de aislamiento debe ser mayor que el 80% de D_{TM} , según la Ec. (5.10) pudiendo utilizar $D_{M'}$ en lugar de D_M .

$$D_{TM} \text{ dinámico} \geq 80\% D_{TM} \text{ estático mínimo}$$

$$D'_M = \frac{D_M}{\sqrt{1 + \left(\frac{T}{T_M}\right)^2}} \quad (5.17)$$

Estas modificaciones del desplazamiento se realizan de tal manera de incluir la influencia de la flexibilidad de la superestructura. El periodo T es de la estructura con base fija.

Elementos estructurales sobre el nivel de base

Para el análisis modal espectral, la fuerza cortante de diseño en cualquier nivel debe ser mayor a la fuerza de corte que resulta de la distribución de fuerzas según la Ec. (5.15) y un valor V_b igual a la cortante basal obtenida por el análisis espectral.

Para el análisis tiempo historia la fuerza de corte de diseño V_b de una estructura regular debe ser mayor que el 80% de V_b , según especifica la Ec. (5.11). Además, el valor de V_s debe ser mayor al 100 % de V_s , según especifica la Ec. (5.12).

$$V_b \text{ dinámico} \geq 80\%V_b \text{ estático mínimo}$$

$$V_s \text{ dinámico} \geq 100\%V_s \text{ estático mínimo}$$

Para el análisis tiempo historia la fuerza de corte de diseño V_b de una estructura irregular debe ser mayor que el 100% de V_b , según especifica la Ec. (5.11) Además, el valor de V_s debe ser mayor al 100 % de V_s , según especifica la Ec. (5.12).

$$V_b \text{ dinámico} \geq 100\%V_b \text{ estático mínimo}$$

$$V_s \text{ dinámico} \geq 100\%V_s \text{ estático mínimo}$$

5.4.2.4. Límites de desplazamiento de entrepiso

Para el análisis modal espectral la máxima deriva por encima del nivel de base no debe exceder de 0.0035, este límite se calcula para un factor de reducción $R_I = 1$.

Para el análisis tiempo historia la máxima deriva por encima del nivel de base no debe exceder de 0.0050, este límite se calcula para un factor de reducción $R_I = 1$.

6. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO

6.1. Influencia de la variabilidad de propiedades del dispositivo en el diseño

Existe variación en las propiedades nominales de los dispositivos debido a los efectos de velocidad de carga, scragging y recuperación, variación debido al proceso de fabricación, temperatura, envejecimiento, exposición ambiental y contaminación.

La variabilidad de las propiedades de los dispositivos se define mediante factores de modificación máximos y mínimos ($\lambda_{m\acute{a}x}$ y $\lambda_{m\acute{i}n}$) que afectan a las propiedades nominales de los dispositivos. Para el diseño se debe revisar los factores λ que establecen los fabricantes; luego se debe elegir un rango de valores λ lo más amplio posible para permitir la concurrencia del mayor número de proveedores posibles.

En principio, se recomienda emplear un análisis lineal de la estructura aislada mediante propiedades nominales de los dispositivos, para este propósito se deben establecer límites de derivas considerablemente menor a los máximos aceptados por las normas; de este modo se tendrá una holgura para el análisis posterior que incluye la variabilidad de los dispositivos. Finalmente, se debe verificar mediante un análisis no lineal del sistema de aislamiento, considerando los factores de modificación máximos y mínimos, que se están satisfaciendo los objetivos de diseño propuestos (deriva máxima y aceleración máxima).

6.2. Estructuración y diseño preliminar

El objetivo de esta etapa es definir la geometría estructural y las propiedades elásticas tentativas del sistema de aislamiento.

Para edificios sencillos y de mediana altura, el sistema portante de la superestructura frente a cargas verticales y sísmicas es un sistema aporticado (vigas y columnas). Este sistema logra que las fuerzas sísmicas en los elementos verticales, en la base del edificio aislado, sean similares entre sí evitando momentos flectores elevados en algunos elementos que podrían introducir demandas elevadas en los aisladores.

El proceso de estructuración y predimensionamiento se inicia con el dimensionamiento inicial de la superestructura y del sistema de aislamiento. Luego, se construye un

modelo con el cual se desarrolla un proceso iterativo, mediante análisis espectral, en el cual se van modificando las propiedades de la estructura o del sistema de aislamiento hasta que se cumpla con los límites de derivas y aceleraciones establecidos.

6.2.1. Dimensiones iniciales de la superestructura

El predimensionamiento se desarrolla considerando que el sistema estructural debe tener competencia para cargas de gravedad y también para controlar la deriva de entrepiso .

Para el predimensionamiento de los elementos estructurales de un edificio aislado apoticado puede usarse la luz libre para las vigas y la carga última para las columnas.

Vigas de la superestructura

El peralte h de las vigas continuas se puede estimar en función de su luz libre , L_n , según la Ec. (6.1) y para las vigas en voladizo según la Ec. (6.2).

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

$$h = \frac{L_n}{4} \quad (6.2)$$

El ancho de las vigas sísmicas debe ser de por lo menos 25 cm según la Norma E060 concreto armado.

Columnas de la superestructura

El predimensionamiento de las columnas se hace con el fin de obtener columnas de dimensiones generosas que contribuyan a satisfacer los requisitos de rigidez frente a cargas laterales. El área transversal de la columna se puede estimar según la Ec (6.3).

$$A = \frac{P_u}{0.35f_{tc}} \quad (6.3)$$

Donde:

A : Área transversal de la columna

P_U : Carga última actuante en la columna obtenida de las combinaciones de carga muerta y carga viva

f'_c : Resistencia a la compresión del concreto

Se recomienda que los lados de las columnas perimetrales sean suficientes para permitir el anclaje del refuerzo con gancho estándar de las vigas.

Vigas del sistema de aislamiento

Las vigas del sistema de aislamiento deben ser lo suficientemente rígidas como para reducir el giro en el nudo y evitar demandas elevadas sobre los aisladores.

Debido a que estas vigas estarán sometidas a esfuerzos elevados, se recomienda un peralte generoso, con un mínimo de 90 cm, que se puede estimar según la Ec (6.4)

$$h = \frac{Ln}{7} \quad (6.4)$$

El ancho de estas vigas debe ser de por lo menos 35 cm para facilitar el acomodo del refuerzo.

6.2.2. Predimensionamiento inicial del sistema de aislamiento

Para desarrollar el predimensionamiento del sistema de aislamiento se necesita conocer el periodo fundamental de la estructura de base fija para lograr que el periodo de la estructura aislada se aleje lo más posible del de base fija, T_F .

Periodo de la estructura de base fija, T_F

Para este modelo de base fija se supone las columnas conectadas en su base a las vigas del sistema de aislamiento en un nudo al que puede suponerse simplemente apoyado en el suelo. (Figura 6.1).

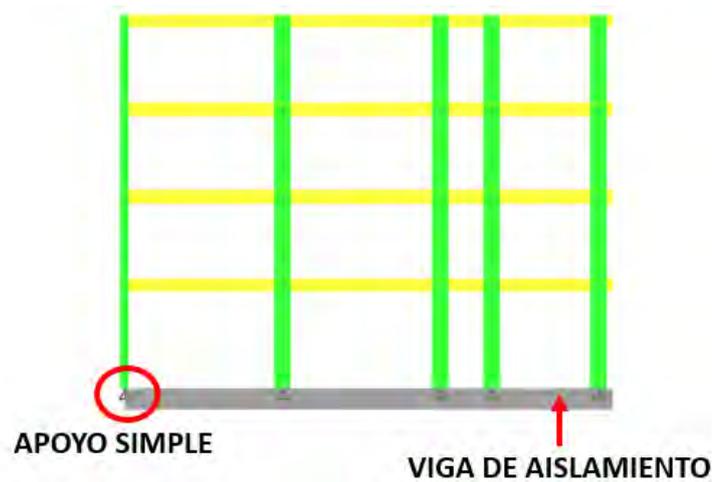


Figura 6.1: Representación de la estructura de base fija

Periodo Objetivo del Sistema de Aislamiento, T_b

En base al periodo fundamental de la estructura de base fija T_f se puede fijar un periodo objetivo del sistema de aislamiento T_b ; tal que el cociente $\frac{T_b}{T_f}$ sea por lo menos de 2.5.

Para un cociente de $\frac{T_b}{T_f} > 3$, el desplazamiento de la superestructura respecto a la plataforma es menor a 0.10 veces el desplazamiento de la plataforma respecto del suelo.

Las normas de aislamiento establecen que la fuerza cortante en la base de la estructura sobre el sistema de aislamiento V_s no debe ser menor que la fuerza cortante mínima de una estructura de base fija con el mismo periodo y peso de la estructura aislada (el peso de la estructura aislada excluyendo el peso del nivel base).

En el caso de ser posible se recomienda un periodo mínimo del sistema de aislamiento T_v que permita que el diseño se realice con una fuerza cortante mínima. En el Perú, el valor de $\frac{C}{R}$ deberá ser mayor que:

$$\frac{C}{R} \geq 0.11$$

Cuando el $T > T_L$ se tiene:

$$C = \frac{2.5 T_P T_L}{T^2}$$

De esta forma:

$$T_v = \sqrt{\frac{2.5 T_P T_L}{0.11 R}} \quad (6.5)$$

En la Tabla 6.1 se muestra periodos mínimos T_v correspondientes a un sistema aporticado ($R_o = 8$) y distintos tipos de suelo según la norma peruana E.030.

Tabla 6.1 Periodos mínimos para distintos tipo de suelo

	T_v (s)
S₁	1.69
S₂	1.85
S₃	2.13

Normalmente resulta sencillo lograr periodos de la estructura aislada superiores a los mostrados en la Tabla 6.1; sin embargo, el diseño no necesariamente se realiza con la fuerza cortante mínima, como se explicará en el ítem 6.3.

Rigidez y Constante de Amortiguamiento Preliminar del Sistema de Aislamiento

Para el predimensionamiento del sistema de aislamiento se puede partir del sistema de un grado de libertad indicado el acápite 4.1.1. En este sistema la masa total corresponde a la masa de la superestructura más la del nivel base ($m_s + m_b$). A partir de la masa y el periodo objetivo del sistema de aislamiento se puede calcular la rigidez del sistema de aislamiento según la Ec. (6.6).

$$k_b = \frac{4\pi^2}{T_b^2} (m_s + m_b) \quad (6.6)$$

Un valor moderado de la fracción de amortiguamiento equivalente del sistema de aislamiento ξ_b permite reducir las aceleraciones y derivas a pesar que el desplazamiento en la plataforma de aislamiento puede ser mayor. Se debe elegir un valor de la fracción de amortiguamiento para calcular la constante de amortiguamiento según la Ec. (6.7).

$$C_b = 2 \xi_b \sqrt{(m_s + m_b) k_b} \quad (6.7)$$

Se recomienda valores de la fracción de amortiguamiento entre 10 y 20 %.

Distribución de la Rigidez y Amortiguamiento del Sistema de Aislamiento

Las normas establecen que se ensayen dos prototipos por cada tipo de aislador que se use en el diseño final, por lo que se opta por tener el menor número posible de tipos. Los fabricantes no producen dispositivos de muy baja rigidez, por esta razón se recomienda un valor mínimo de 60 ton/m para tener una variedad de proveedores.

A continuación, se detalla algunos criterios para distribuir la rigidez y la constante de amortiguamiento:

-El primer criterio consiste en distribuir uniformemente la rigidez y la constante de amortiguamiento entre el total de dispositivos N . La rigidez efectiva y la constante de amortiguamiento de todos los aisladores se obtienen mediante la Ec. (6.8) y Ec. (6.9) respectivamente.

$$K_{bi} = \frac{K_b}{N} \quad (6.8)$$

$$C_{bi} = \frac{C_b}{N} \quad (6.9)$$

Para empezar el proceso de iteración se sugiere utilizar esta distribución que tiene la ventaja de no reducir de manera importante la rigidez torsional en el sistema de aislamiento y que se requeriría un solo juego de ensayos de prototipos al usar un único tipo de dispositivo.

- El segundo criterio consiste en distribuir la rigidez del dispositivo en proporción a su carga axial, para esto se forman grupos de dispositivos de carga axial similar. Mediante la carga axial de cada grupo y el número de dispositivos que conforman cada grupo N_i se calcula la rigidez y la constante de amortiguamiento de cada dispositivo que conforma el grupo según la Ec. (6.10) y (6.11) respectivamente.

$$K_{Dispositivo} = \frac{1}{N_i} \left(\frac{PESO_{c/grupo}}{\sum PESO} \right) K_b \quad (6.10)$$

$$C_{Dispositivo} = \frac{1}{N_i} \left(\frac{PESO_{c/grupo}}{\sum PESO} \right) C_b \quad (6.11)$$

Donde:

$PESO_{c/grupo}$: carga axial total por grupo.

$(\sum PESO)$: carga axial total de todos los grupos (igual al peso total de la superestructura y el nivel de base en conjunto).

Se recomienda agrupar los dispositivos en dos grupos: grupo de aisladores perimetrales y grupo de aisladores centrales (Figura 6.2). La distribución del segundo criterio origina que los aisladores perimetrales tengan menor rigidez respecto a los aisladores centrales.

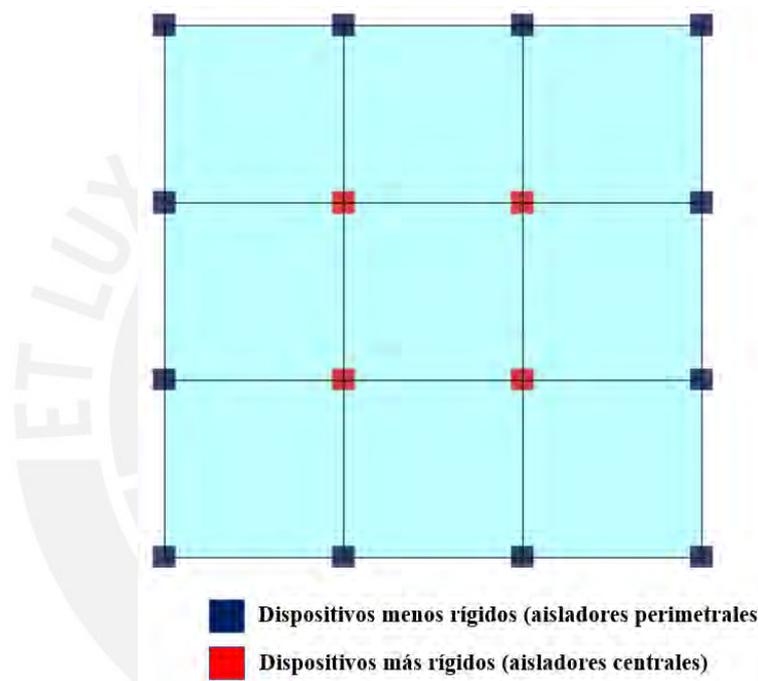


Figura 6.2: Distribución de dos tipos de aisladores en planta

Esta distribución permite que los dispositivos perimetrales sean más pequeños que los centrales lo que constituye una mejora desde el punto de vista económico; sin embargo, se reduce la rigidez torsional en el sistema de aislamiento.

Una vez que se opta por cualquier criterio de distribución de la rigidez y la constante de amortiguamiento se pasa al proceso iterativo usando análisis espectral.

6.2.3. Diseño preliminar usando iterativamente respuesta espectral

Con las dimensiones iniciales y el predimensionamiento inicial del sistema de aislamiento se desarrolla un modelo con el cual se realiza un proceso iterativo usando

análisis espectral que consiste en modificar las propiedades de la estructura y del sistema de aislamiento hasta que se cumpla con los objetivos de diseño propuestos.

En cada ciclo de iteración, se calcula la respuesta de la estructura mediante un análisis espectral (estructura y dispositivos elásticos). Luego, se verifica que las derivas sean considerablemente menores a los límites especificados en las normas; de este modo se deja una holgura para el análisis posterior que debe incluir la variabilidad de los dispositivos. Se sugiere que los límites máximos permitidos por las normas se reduzcan por un factor de 0.70. En el caso que no se cumplan con los límites mencionados se debe cambiar las propiedades de la estructura o del sistema de aislamiento o de ambos.

A continuación se detalla algunas recomendaciones para el ajuste en la estructura y el sistema de aislamiento antes de comenzar un nuevo ciclo de iteración.

Recomendaciones para el ajuste de la estructura y sistema de aislamiento

- Si el edificio tiene problemas de torsión en el sistema de aislamiento, generalmente en plantas largas, se recomienda realizar una distribución de la rigidez del sistema de aislamiento de tal forma que los dispositivos perimetrales sean más rígidos que los centrales a pesar que en proporción a la carga axial podrían haber sido menos rígidos (Figura 6.3). Para este propósito, se sugiere iniciar un nuevo ciclo de iteración, en el cual los dispositivos perimetrales sean un 50 % más rígido que los centrales.

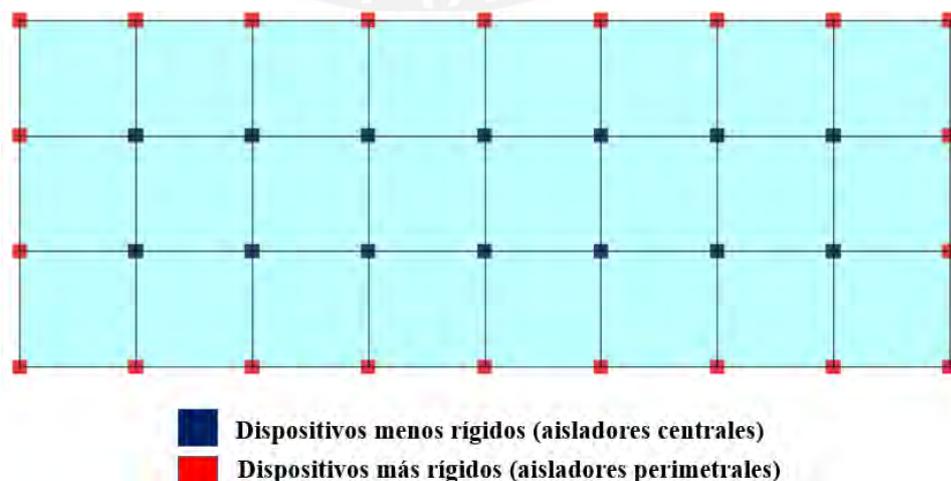


Figura 6.3: Distribución de dos tipos de aisladores en planta larga

- En el caso que la superestructura tenga poca rigidez torsional, se recomienda rigidizar los pórticos del perímetro aumentando el peralte de las vigas y columnas. De ser posible, se sugiere que los lados de las columnas perimetrales sean suficientes para asegurar el anclaje del refuerzo con gancho estándar de las vigas.
- En el caso que no se cumplan con el límite de deriva se debe aumentar la rigidez de la superestructura o flexibilizar el sistema de aislamiento. De este modo, se logra obtener una mayor separación entre los periodos de la estructura de base fija y aislada lo que origina que la superestructura tenga un menor desplazamiento respecto al de la plataforma como se explicó en el ítem 4.1.2.1.

Recomendaciones para reducir aceleraciones

- Se logran reducir las aceleraciones de piso disminuyendo el amortiguamiento del sistema de aislamiento, razón por la cual la reducción del amortiguamiento es una buena alternativa para controlar las aceleraciones.
- Con una mayor separación entre los periodos de base fija T_f y el de la estructura aislada T_b se logra reducir las aceleraciones de piso. Para este propósito, se debe flexibilizar el sistema de aislamiento o aumentar la rigidez de la superestructura.
- Se aconseja flexibilizar el sistema de aislamiento en lugar de incrementar la rigidez de la superestructura.
- En caso que se rigidice la superestructura sin modificar la rigidez del sistema de aislamiento, para la sismicidad peruana, hay una tendencia al aumento de las aceleraciones espectrales asociados a los modos que originan deformaciones predominantes en la superestructura (modos superiores al tercer modo), ya que estos modos podrían encontrarse en la zona de periodos cortos. Esta tendencia del incremento de las aceleraciones debido al aumento de la rigidez de la superestructura podría ser compensada o no con una mayor separación entre los periodos de la estructura de base fija T_f y aislada T_b .

6.3. Diseño definitivo usando iterativamente análisis tiempo historia no lineal

Este proceso se inicia con el sistema estructural y el sistema de aislamiento obtenido como resultado del proceso iterativo empleando análisis espectral con propiedades nominales. Las derivas en la última iteración espectral deben estar por debajo de los límites establecidos por las normas (se sugirió al 70 % de los límites).

En el diseño definitivo de la estructura aislada se sigue otro proceso iterativo usando análisis tiempo historia no lineal (estructura elástica y dispositivos inelásticos) y considerando la variabilidad de las propiedades nominales de los dispositivos, tendiendo como objetivo no exceder el valor admisible de deriva establecido para el análisis tiempo historia, como se vio en el ítem 5.4.2.4.

Propiedades del sistema de aislamiento

En el diseño definitivo se debe confirmar un rango de valores para los dispositivos que permita cumplir con los objetivos de diseño propuestos de derivas y aceleraciones. Además, este rango de variabilidad debe ser lo más amplio posible para permitir la mayor cantidad posible de proveedores.

Los fabricantes o proveedores deben proporcionar dispositivos con propiedades que se encuentren dentro del rango de diseño cuando se incluyan sus valores específicos de λ .

Las propiedades del límite superior del rango (usando el factor de modificación máximo $\lambda_{m\acute{a}x}$) originan que el sistema de aislamiento sea menos eficiente, ya que hay un incremento en las derivas de la superestructura debido a que el cociente $\frac{T_f}{T_b}$ aumenta.

Las propiedades del límite inferior del rango (usando el factor de modificación mínimo $\lambda_{m\acute{i}n}$) originan que el sistema de aislamiento sea más eficiente, ya que habrá una reducción en las derivas de la superestructura debida a que el cociente $\frac{T_f}{T_b}$ se reduce.

Sin embargo, para las propiedades del límite inferior las dimensiones de las juntas de aislamiento se incrementan.

Para la sismicidad peruana, los desplazamientos máximos del sistema de aislamiento D_M y los amortiguamientos equivalentes del sistema de aislamiento ξ_b , obtenidos para

las propiedades nominales, límite superior e límite inferior, son prácticamente similares entre sí. Esta tendencia se origina cuando el desplazamiento máximo del sistema de aislamiento no depende del periodo del sistema de aislamiento ($T_M > T_L$).

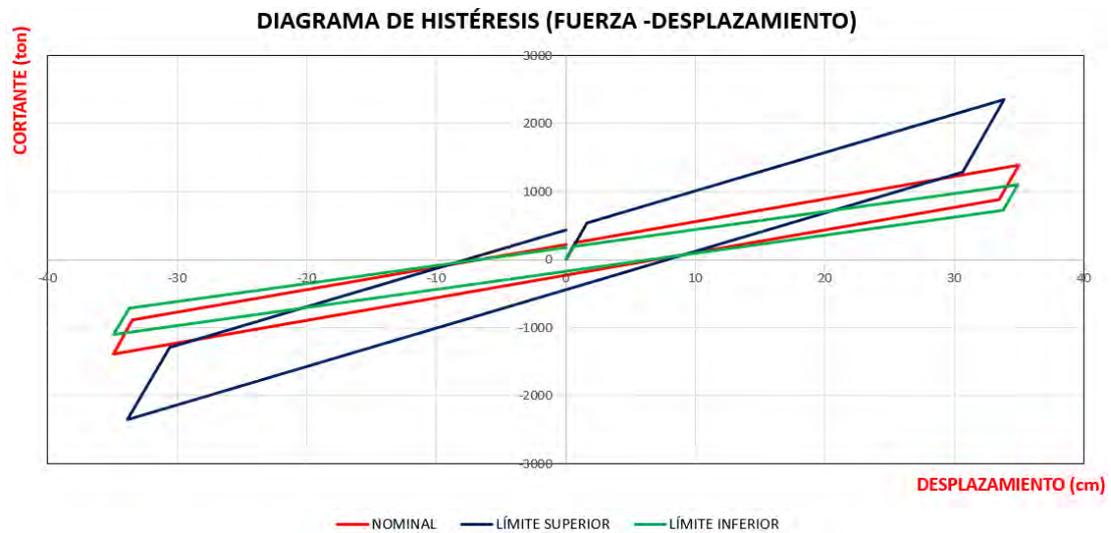


Figura 6.4: Tendencia del espectro de diseño peruano para las propiedades nominales, límite superior e límite inferior

Tracción en los dispositivos

La resistencia a tracción de los dispositivos es del orden de 0.10 a 0.15 veces de la de compresión. Razón por la cual, se debe hacer un seguimiento especial a aquellos dispositivos que estén sometidos a cargas axiales de tracción elevadas que podrían originar el levantamiento de los dispositivos.

Se recomienda tracciones pequeñas en los dispositivos, del orden del 15 % de la carga axial de compresión en estado de servicio. Para evaluar si los dispositivos estarán sujetos a tracciones se debe tener en cuenta que:

- La carga axial de compresión mínima (o tracción si fuese el caso) se obtiene para el caso de carga vertical mínima (ítem 5.2.3).

$$\text{Carga vertical mínima: } (0.9-0.2S_{MC}) D+Q_E$$

Cortante de diseño para el sistema de aislamiento y la superestructura

Se debe definir la cortante de diseño para el sistema de aislamiento V_b y para la superestructura V_s . Para este propósito, se debe considerar las propiedades del límite superior y el caso más desfavorable entre las fuerzas laterales mínimas de diseño del método estático (ítem 5.4.2.3) y los resultados de los análisis dinámicos.

El diseño de los elementos estructurales usando los resultados del análisis tiempo historia es muy laborioso y ocupa demasiado tiempo, por lo que se sugiere usar análisis espectral empleando para el sistema de aislamiento las propiedades del límite superior y escalando los resultados al caso más desfavorable de los siguientes valores mínimos de cortante:

Cortante mínimas de diseño para el sistema de aislamiento, V_b

- La cortante en el sistema de aislamiento V_b obtenida por el análisis tiempo historia.
- La cortante de diseño para el sistema de aislamiento de una estructura regular debe ser mayor que el 80% de la cortante mínima de diseño del método estático V_b , según la Ec. (5.11), para una estructura irregular debe ser mayor que el 100% de V_b , según la Ec. (5.11).

Cortante mínimas de diseño para la superestructura, V_s

- La cortante en la superestructura V_s obtenida por el análisis tiempo historia.
- La cortante de diseño para la superestructura debe ser mayor que el 100% de la cortante mínima de diseño del método estático V_s , según la Ec. (5.12).
- La fuerza cortante mínima de una estructura de base fija con el mismo peso (excluyendo el peso del nivel de base) y periodo de la estructura aislada según la norma peruana E030.
- La cortante asociada a los efectos de viento.
- 1.5 veces la fuerza de activación del nivel de aislamiento.

Si la fuerza cortante en el sistema de aislamiento o en la superestructura determinada por el análisis espectral es menor a los mínimos indicados anteriormente, se debe escalar proporcionalmente las fuerzas en los elementos de la estructura.

Efecto P-delta en el sistema de aislamiento

El efecto de carga P-delta en las estructuras aisladas pueden ser muy significativo debido a la carga axial de compresión en los dispositivos y al gran desplazamiento de la plataforma de aislamiento respecto del suelo. En la Figura 6.5 se muestra las recomendaciones de FEMA P-751 para distribuir el momento adicional P-delta en los aisladores elastoméricos y deslizantes.

En los aisladores elastoméricos el momento adicional P-delta ($M_{P-\Delta}$) se distribuye equitativamente entre la parrilla superior e parrilla inferior del sistema de aislamiento (o cimentación, si no existe la parrilla inferior).

En los aisladores deslizantes el momento adicional P-delta ($M_{P-\Delta}$) se distribuye completamente en la parrilla superior o en la parrilla inferior (o cimentación, si no existe la parrilla inferior) dependiendo de la orientación de la superficie deslizante.

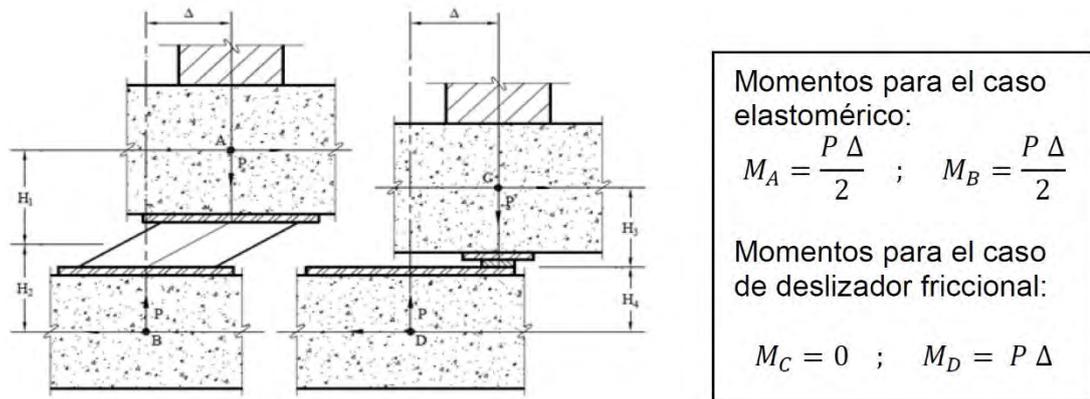


Figura 6.5: Efecto P-delta en el sistema de aislamiento en aisladores elastoméricos y deslizadores.

Fuente: Fema P-751, 2009

Para el cálculo del momento adicional P-delta ($M_{P-\Delta}$) se debe tener en cuenta que:

- La carga axial máxima de compresión en el dispositivo, se obtiene para el caso de carga vertical máxima (ítem 5.2.3).

$$\text{Carga vertical máxima: } (1.2+0.2S_{MC}) D+Q_E+L+0.2S$$

- El desplazamiento de la plataforma de aislamiento está dado por el desplazamiento total máximo del análisis estático considerando la torsión accidental D_{TM} .

Juntas Circundantes

Las dimensiones de las juntas circundantes al edificio no deben ser menores al desplazamiento total máximo del análisis estático considerando la torsión accidental (D_{TM}) empleando las propiedades del límite inferior de los dispositivos.

7. ANÁLISIS Y DISEÑO DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO PARA UN EDIFICIOS HOSPITALARIO PERUANO

Características del edificio

En este trabajo se analizará uno de los bloques de un hospital ubicado en la ciudad de Lima-Perú. La importancia de aislar esta edificación radica en que los equipos médicos queden prácticamente sin daño luego de un sismo. Cabe mencionar que, el costo de los equipos médicos podría ser superior al de la propia estructura.

El bloque hospitalario tiene 4 pisos, la altura del primer piso es de 5m y la altura del resto de pisos de 4m. Para proporcionar fácil acceso a las inspecciones y maniobras de sustitución de los dispositivos aisladores existe un sótano a media altura.

El bloque hospitalario cuenta con 4 escaleras ubicadas en cada esquina, y ascensores ubicados en el centro de la planta. La planta está dividida por 11 ejes verticales y 7 ejes horizontales separados cada 7.20 m (Figura 7.1).

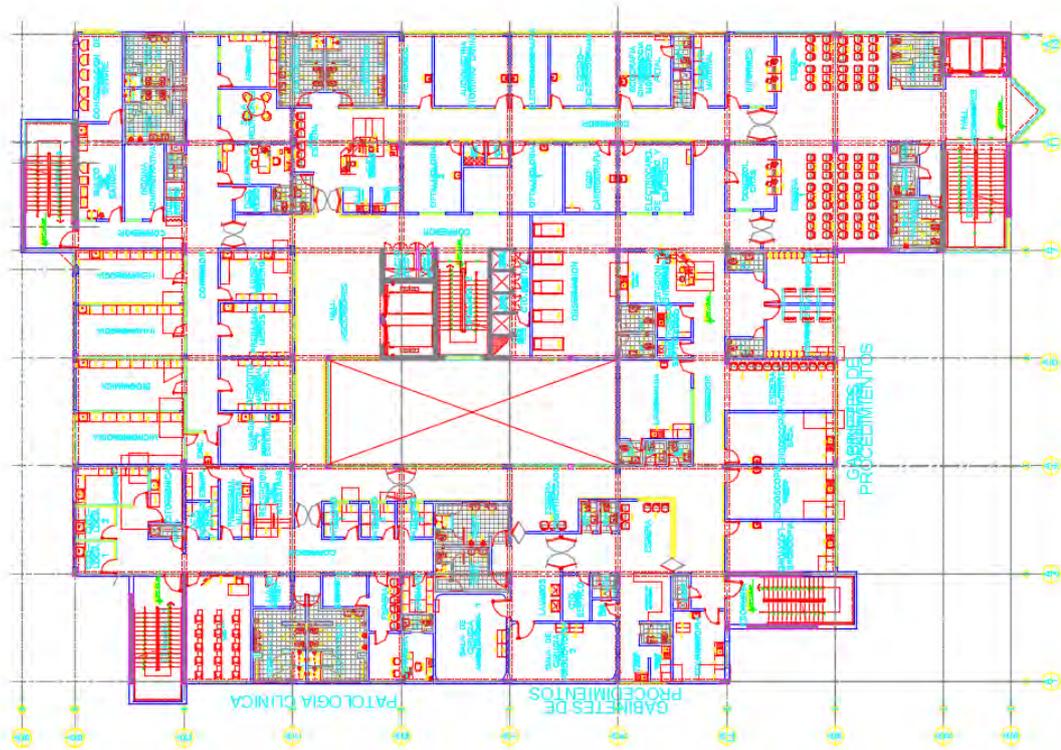


Figura 7.1: Planta de arquitectura típica

Cargas de gravedad actuantes en el edificio hospitalario

Las solicitaciones de gravedad actuantes en el edificio hospitalario se determinaron de acuerdo a la norma peruana E.020 Cargas. Las sobrecargas y cargas muertas de diseño son las siguientes:

Carga viva

Sobrecarga en sala de operaciones, laboratorios y zonas de servicio 0.30 ton/m²

Sobrecarga en cuartos: 0.20 ton/m²

Sobrecarga en corredores y escaleras 0.40ton/m²

Sobrecarga en azotea: 0.10 ton/m²

Carga muerta

Peso propio de la losa maciza (20cm de espesor): 0.48ton/m²

Peso de piso terminado: 0.10 ton/m²

Peso de tabiquería: 0.30 ton/m²

Consideraciones para el modelamiento del edificio hospitalario

Para el análisis estructural se elaboró el modelo tridimensional en el programa de computación CSI-ETABS.

Las losas macizas constituyen adecuados diafragmas rígidos, por lo que se emplearon tres coordenadas dinámicas por nivel: 2 traslacionales y un giro. Se consideraron a las losas como elementos tipo Membrane ; de este modo se despreció la rigidez de las losas por lo que actúan únicamente como transmisores de fuerzas.

Las vigas y columnas se modelaron como elementos unidimensionales tipo Frame. Se consideró brazos rígidos en las conexiones entre las vigas y columnas, y se rótulo los extremos de las vigas donde los lados de las columnas no son suficientes para permitir el anclaje del refuerzo con gancho estándar de las vigas. La Figura 7.2 muestra el modelo tridimensional del edificio hospitalario.

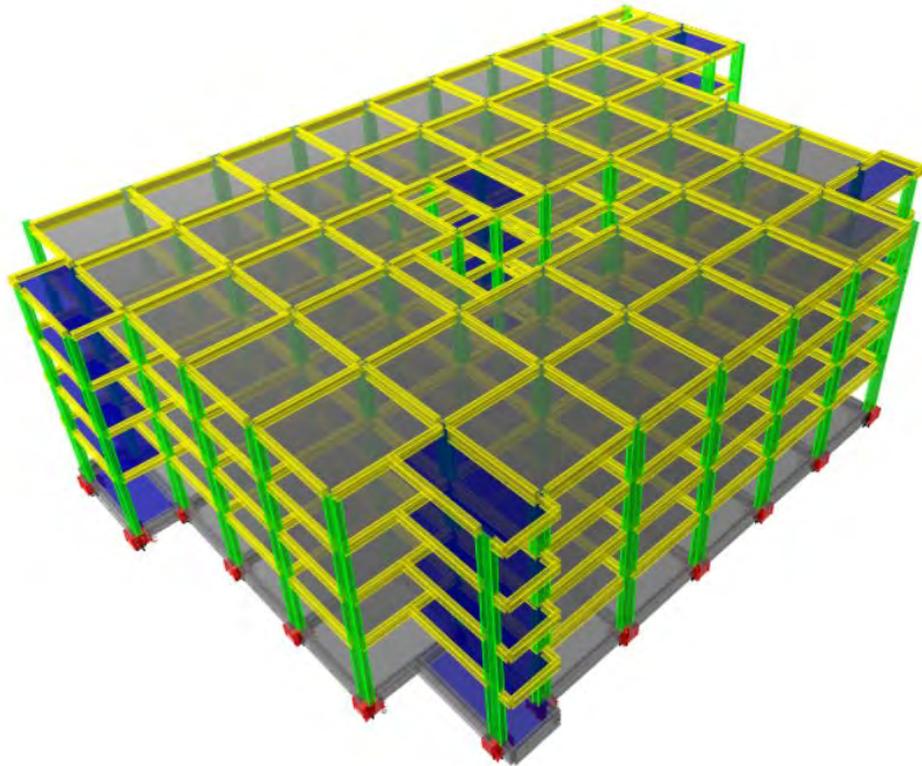


Figura 7.2: Modelo computacional de la estructura

7.1. Estructuración y diseño preliminar

7.1.1. Dimensiones iniciales de la superestructura

El sistema portante de la superestructura frente a cargas verticales está conformado por un sistema aporticado (vigas y columnas). A continuación, se detalla el predimensionamiento de los elementos estructurales:

Vigas y Columnas

El peralte de las vigas se puede estimar según la Ec. (6.1) y el área transversal de las columnas según la Ec. (6.3).

$$h = \frac{Ln}{12} = \frac{6.5}{12} = 0.55 \text{ m}$$

$$A = \frac{Pu}{0.35f_c} = \frac{400}{10 \cdot 0.35 \cdot 210} = 0.54 \text{ m}^2, \text{ Lado} = \sqrt{0.54} = 0.72 \text{ m}$$

Se consideró que los porticos interiores esten conformados por vigas de 0.30mx0.60m y columnas de 0.70mx0.70m. Se aumento la rigidez de los porticos permitrales para reducir las derivas de entrepiso empleando vigas de 0.30mx0.90m y columnas de 0.40mx1.0m.

Vigas y dados de concreto del sistema de aislamiento

El peralte de las vigas del sistema de aislamiento se puede estimar según la Ec. (6.4).

$$h = \frac{Ln}{7} = \frac{6.5}{7} = 0.93 \text{ m}$$

Se consideró que el nivel de aislación este conformado por dados de concreto de 1.20mx1.20m sobre y debajo de cada aislador, y vigas peraltadas de 0.40mx1.0m que conectan los dados sobre el aislador.

Losas

El sistema de techado consiste en losas macizas de 0.20m de espesor.

7.1.2. Predimensionamiento inicial del sistema de aislamiento

Periodo de la estructura de base fija, T_E

En la Tabla 7.1 se muestra los periodos y masas efectivas (expresadas como un porcentaje de la masa total) de los modos de vibración del edificio de base fija. El periodo fundamental de la estructura de base fija en la dirección de análisis X-X y Y-Y es de 0.90 s y 1.05 s respectivamente.

Tabla 7.1 Periodos y masa efectivas de los modos de vibración

MODO	PERIODO	UX (%)	UY(%)	RZ(%)
1	1.05	0.005	85.040	1.560
2	0.90	88.860	0.020	0.240
3	0.81	0.230	1.700	85.990
4	0.28	0.001	10.080	0.170
5	0.25	8.460	0.005	0.040
6	0.22	0.080	0.090	9.250
7	0.13	0.002	2.580	0.020
8	0.13	1.950	0.003	0.020
9	0.11	0.030	0.002	2.280
10	0.08	0.370	0.000	0.010
11	0.08	0.000	0.480	0.000
12	0.06	0.010	0.000	0.420

Periodo objetivo del sistema de aislamiento, T_b

El edificio hospitalario tiene un periodo de base fija de $T_f=1.05s$. En principio se asumió una relación de periodos de estructura de base fija y aislada de 3; sin embargo, el sistema estructural no cumplía con el límite de deriva permisible por lo que se optó

por flexibilizar el sistema de aislamiento. Finalmente, se fijó la relación de periodos en 3.5, de este modo el periodo del sistema de aislamiento que considera la superestructura indeformable fue de $T_b=3.67$ s (modelo de un grado de libertad).

Rigidez y constante de amortiguamiento preliminar del sistema de aislamiento

La masa de todos los niveles de la superestructura:

$$m_s = \sum_i^n m_i = 1033.44 \text{ Ton. s}^2$$

La masa del nivel base:

$$m_b = 317.14 \text{ Ton. s}^2/\text{m}$$

La masa total actuante corresponde a la masa de la superestructura más la del nivel base:

$$m_s + m_b = 1350.68 \text{ Ton. s}^2/\text{m}$$

La rigidez total efectiva del sistema de aislamiento se puede estimar según la Ec. (6.6).

$$k_b = \frac{4\pi^2}{T_b^2} (m_s + m_b) = 3960 \text{ Ton/m}$$

Se optó por una fracción de amortiguamiento equivalente de $\xi_b = 10\%$. De este modo, la constante de amortiguamiento se calcula según la Ec. (6.7).

$$C_b = 2 \xi_b \sqrt{(m_s + m_b)k_b} = 462.54 \text{ Ton. s/m}$$

Distribución de la rigidez y amortiguamiento del sistema de aislamiento

Inicialmente se distribuyó la rigidez y el amortiguamiento del sistema de aislamiento en proporción a la carga axial de los dispositivos (dispositivos perimetrales menos rígidos que los centrales). Sin embargo, con esta distribución los modos fundamentales (modos 1 y 2) tuvieron menos influencia en la respuesta final de la estructura (menos porcentaje de masa efectiva junto a un incremento de la masa efectiva del tercer modo

rotacional). Razón por la cual, se optó por distribuir uniformemente la rigidez y constante de amortiguamiento entre el total de los dispositivos.

La rigidez efectiva de cada dispositivo se puede calcular mediante la Ec. (6.8).

$$K_{bi} = \frac{K_b}{N} = \frac{3960}{66} = 60.00 \text{ Ton/m}$$

La constante de amortiguamiento equivalente de cada dispositivo se obtiene según la Ec. (6.9).

$$C_{bi} = \frac{C_b}{N} = \frac{462.54}{66} = 7.01 \text{ Ton. s/m}$$

7.2. Diseño preliminar usando iterativamente respuesta espectral

Se recomendó para este análisis considerar las propiedades nominales de los dispositivos y establecer una deriva admisible del orden de 0.70 veces la deriva máxima especificada en los códigos. Consecuentemente, se tendrá una holgura para análisis posteriores que incluyen la variabilidad de los dispositivos.

El proyecto peruano de la Norma Técnica de Aislamiento Sísmico E.031 establece que la máxima deriva por encima del nivel de base no debe exceder de 0.0035. De este modo, la deriva admisible queda definida como:

$$\text{Deriva admisible} = 0.70 * 0.0035 = 0.0025$$

Análisis Modal

Para cada dirección de análisis, la excentricidad accidental debe ser un 5% de la dimensión en la dirección perpendicular a la dirección de análisis.

Las masas efectivas de los modos fundamentales (modo 1 y 2) se reducen considerablemente debido a la excentricidad accidental. En las Tablas 7.2, 7.3, 7.4 y 7.5 se muestran las masas efectivas (expresadas como un porcentaje de la masa total) de los modos fundamentales para las 4 posiciones posibles de la excentricidad accidental. Cabe mencionar que, para el análisis y diseño se debe considerar para cada dirección de análisis el caso más desfavorable de la excentricidad accidental.

Tabla 7.2 Periodos y masa efectivas para una excentricidad accidental de 5% en el eje X negativo

MODO	PERIODO	UX (%)	UY (%)
1	3.97	0.020	79.260
2	3.76	99.910	0.030
3	3.32	0.010	20.600

Tabla 7.3 Periodos y masa efectivas para una excentricidad accidental de 5% en el eje X positivo

MODO	PERIODO	UX (%)	UY (%)
1	3.93	0.030	81.510
2	3.76	99.910	0.040
3	3.35	0.010	18.340

Tabla 7.4 Periodos y masa efectivas para una excentricidad accidental de 5% en el eje Y negativo

MODO	PERIODO	UX (%)	UY (%)
1	3.86	80.660	1.770
2	3.79	1.910	97.950
3	3.39	17.370	0.170

Tabla 7.5 Periodos y masa efectivas para una excentricidad accidental de 5% en el eje Y positivo

MODO	PERIODO	UX (%)	UY (%)
1	3.85	81.310	2.110
2	3.79	2.260	97.590
3	3.40	16.370	0.190

Distribuyendo uniformemente la rigidez efectiva del sistema de aislamiento en los dispositivos, se logró que las masas efectivas de los modos fundamentales, para las cuatro posiciones posibles de excentricidad accidental, sean alrededor del 80 % de la masa total del edificio. Por otra parte, evidentemente los periodos de los modos fundamentales de la estructura aislada que consideran la flexibilidad de la superestructura son mayores al periodo que considera la superestructura indeformable $T_b=3.67$ s (modelo de un grado de libertad).

Cargas Sísmicas

La carga sísmica será representada por 1.5 veces el espectro pseudo-aceleraciones estipulado en la norma peruana E030 Diseño Sismorresistente (Figura 7.3). La carga sísmica se debe aplicar con la acción simultánea sobre el modelo de 100% la dirección de interés más un 30 % de un eje ortogonal a la dirección anterior.

Los parámetros quedan definidos según la norma peruana E030 y el ítem 5 como:

$Z = 1.5 * 0.45$ Coeficiente válido para la Zona 4 del mapa sísmico del Perú.

$U = 1.0$ Edificaciones con aislación sísmica.

$S = 1.0$ Suelo muy rígido.

$T_P = 0.4$ Periodo que define la plataforma del espectro.

$T_L = 2.5$ Periodo largo.

$R = 1$ Coeficiente de reducción para la subestructura

Espectro Pseudo-aceleraciones

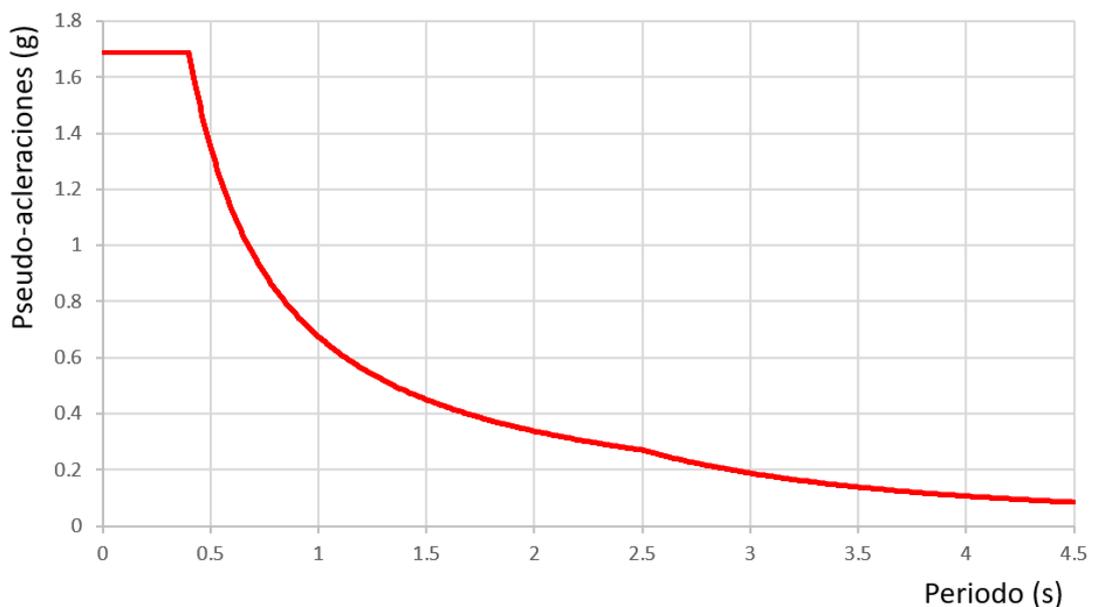


Figura 7.3: Espectro pseudo-aceleraciones según la Norma E.030 para amortiguamiento de 5%

Se calculará la respuesta espectral del edificio aislado, en la dirección de análisis Y-Y, empleando las tres formas de representar la fracción de amortiguamiento equivalente del sistema de aislamiento (ítem 4.2).

a) Primera Forma

Se distribuyó la constante de amortiguamiento del sistema de aislamiento entre el total de dispositivos empleado las constantes C_{bi} de cada dispositivo. Se asignó un amortiguamiento modal nulo para los tres primeros modos, y para el resto de modos de un 5%. De esta forma se evitaron amortiguamientos modales adicionales que podrían reducir la respuesta. Finalmente, la respuesta de la estructura se obtuvo para el espectro de pseudo-aceleraciones con un amortiguamiento típico de 5%.

b) Segunda Forma

Se asignó la fracción de amortiguamiento equivalente de 10% directamente en los tres primeros modos, y para el resto de modos un 5%. Se asignó una constante de amortiguamiento de cada dispositivo C_{bi} nula. De esta forma se evitaron amortiguamientos modales adicionales que podrían reducir la respuesta. Finalmente, la respuesta de la estructura se obtuvo para el espectro de pseudo-aceleraciones con un amortiguamiento típico de 5%.

a) Tercera forma

Se representó la fracción de amortiguamiento equivalente del sistema de aislamiento (10%) mediante un espectro modificado donde se redujeron los valores espectrales inmediatamente antes del periodo del tercer modo de vibración (3.32s). Se usó el valor de 1.2 para el factor de modificación sísmica por amortiguamiento según la Tabla 4.1. Se asignó una constante de amortiguamiento de cada dispositivo C_{bi} nula y un amortiguamiento modal de 5% para todos los modos. De esta forma se evitaron amortiguamientos modales adicionales que podrían reducir la respuesta. Finalmente, la respuesta de la estructura se obtuvo para el espectro modificado de pseudo-aceleraciones, al cual se le asignó amortiguamiento típico de 5% (Figura 7.4).

Espectro Pseudo-aceleraciones

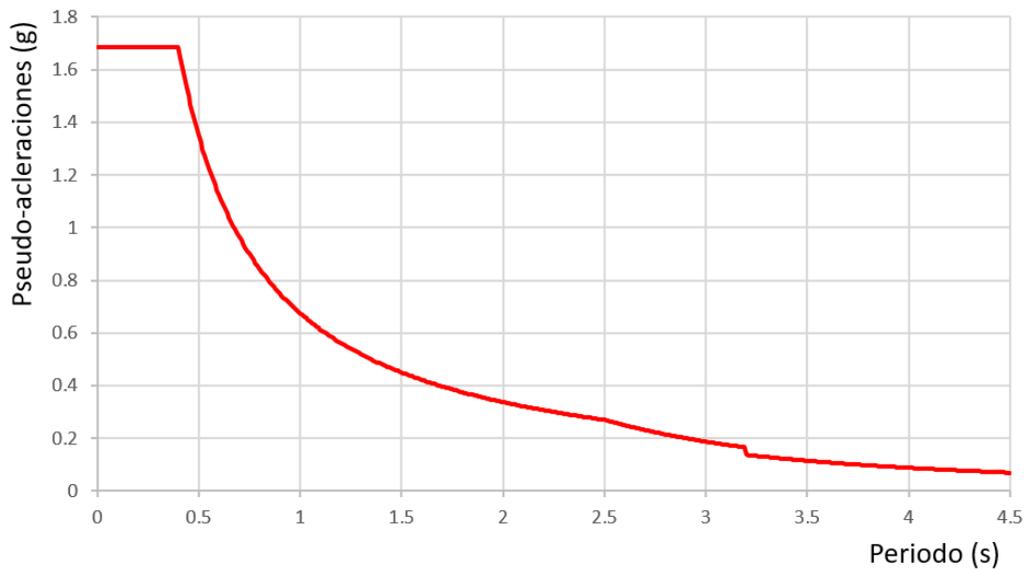


Figura 7.4: Espectro de pseudo-aceleraciones modificado por el factor de amortiguamiento según la Norma E.030

Resultados Obtenidos

En la Figura 7.5 se observa que las respuestas de desplazamientos obtenidas por las tres formas de representar la fracción de amortiguamiento equivalente son muy similares entre sí. Los desplazamientos en el nivel de base varían en un 9% entre la primera forma (31.12 cm) y tercera forma (28.51 cm).

DESPLAZAMIENTO DE PISO

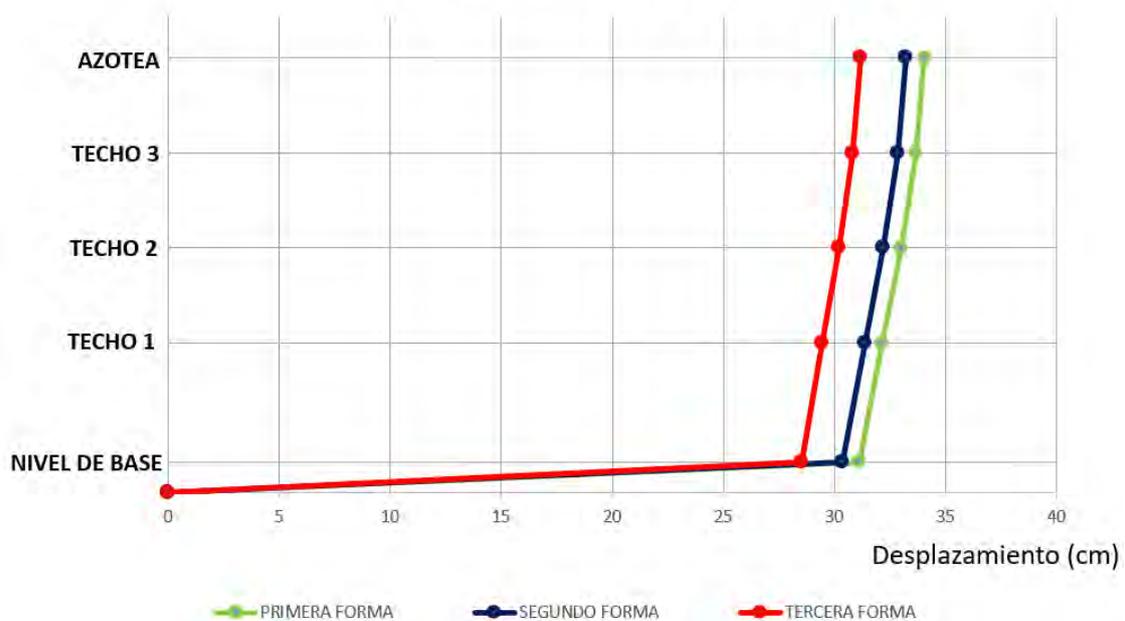


Figura 7.5: Desplazamientos de piso obtenidos por las tres formas

En la Figura 7.6 se observa que las respuestas de cortantes de entrepiso obtenidas por las tres formas son muy similares en todos los pisos. Las fuerzas cortantes en el sistema de aislamiento varían en un 10% entre la primera forma (1202 ton) y tercera forma (1087 ton).

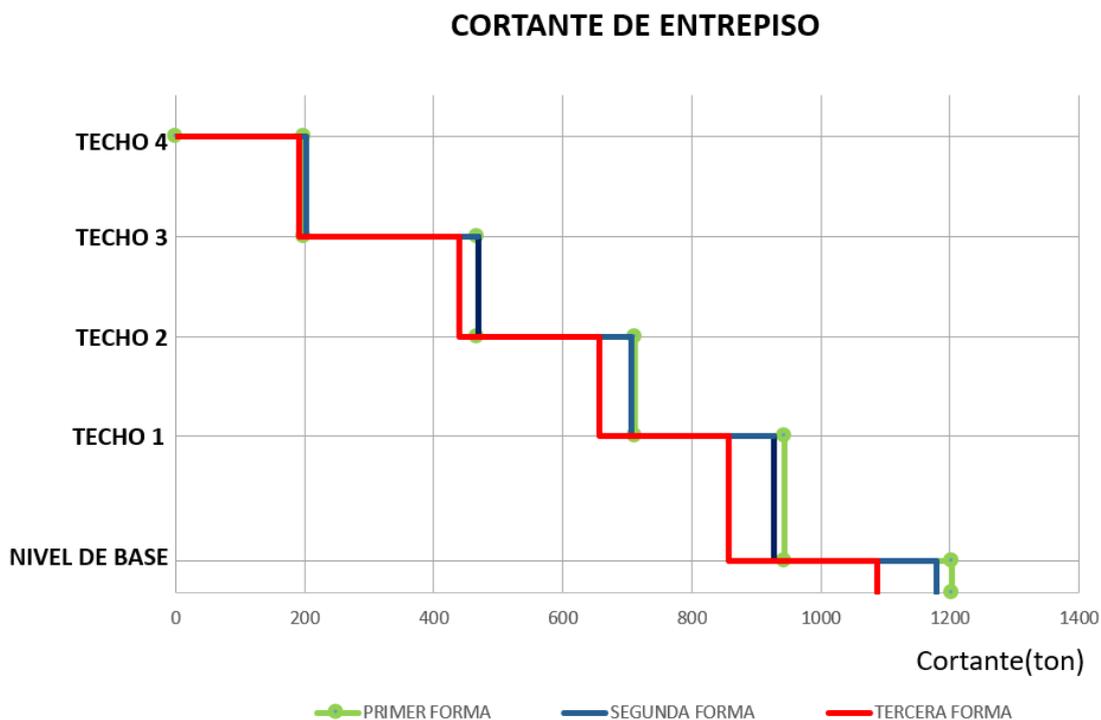


Figura 7.6: Cortantes de entrepiso obtenidas por las tres formas

Los resultados del análisis espectral empleando las tres formas se resumen en la Tabla 7.6.

Tabla 7.6 Comparación de resultados por las tres formas

		Primer Forma	Segunda Forma	Tercera Forma
U2(Y-Y)	Desplazamiento en el nivel base (cm)	31.12	30.38	28.51
	Desplazamiento en la azotea (cm)	34.06	33.24	31.17
	ϵ (%)	9.45	9.41	9.33
	Deriva máxima de entrepiso (1/1000)	2.46	2.49	2.47
	Aceleración absoluta máxima (g)	0.137	0.141	0.140
	Cortante de entrepiso, V_b (ton)	1202.67	1178.83	1086.72

Las derivas máximas obtenidas por las tres formas son muy similares, y además menores a 0.0025 (valor recomendado para el análisis espectral con propiedades nominales). Éstas varían en un 1.2% entre la segunda forma (0.00249) y primera forma (0.00246).

Los coeficiente épsilon (ϵ) obtenidos por las tres formas son prácticamente idénticos. Este coeficiente relaciona el desplazamiento de la superestructura con el desplazamiento del nivel de base. Empleando la primera forma, el desplazamiento de la superestructura respecto al nivel de base (2.94 cm) es del orden de 9.45 % veces el desplazamiento del nivel de base respecto del suelo (31.12) cm.

El coeficiente épsilon (ϵ) se puede estimar empleando el modelo de dos grados de libertad como:

$$\epsilon(\%) = \left(\frac{T_f}{T_b}\right)^2 * 100 = \left(\frac{T_f}{3.5T_f}\right)^2 * 100 = 8.16 \%$$

De los valores obtenidos en la Tabla 7.6 se observa que, empleando la primera forma, el coeficiente ϵ es de alrededor de 9.45%. Este valor es cercano al estimado de la relación de periodos de base fija T_f y asilada T_b de 8.16 %.

En la Tabla 7.7 se observa que la primera forma de representar el amortiguamiento equivalente del sistema de aislamiento incrementa artificialmente el amortiguamiento (mayor a 5%) de los modos que originan deformaciones predominantes en la superestructura (modos 4,5,..). Esta tendencia provoca que al emplear la primera forma se obtenga menores derivas y aceleraciones respecto a la segunda y tercera forma.

Tabla 7.7 Amortiguamiento modal (%)

MODO	PRIMERA FORMA	SEGUNDA FORMA	TERCER FORMA
1	8.86	10	5
2	9.39	10	5
3	10.56	10	5
4	7.78	5	5
5	7.48	5	5
6	7.67	5	5
7	5.8	5	5
8	5.72	5	5
9	5.83	5	5
10	5.2	5	5
11	5.16	5	5
12	5.22	5	5
13	5.03	5	5
14	5.03	5	5
15	5.05	5	5

Comparación entre el análisis respuesta espectral y los mínimos estáticos

El periodo del sistema de aislamiento que considera la superestructura indeformable es mayor al periodo largo ($T_b > T_L$); de esta forma el desplazamiento estático mínimo del sistema de aislamiento se puede calcular mediante la Ec. (5.8).

$$D_M = \frac{1.5 * 2.5 * Z * T_P * T_L * S g}{4 * \pi^2 * B_M} = 34.94 \text{ cm}$$

La cortante estática mínima V_b se obtiene según la Ec. (5.11).

$$V_b = K_M * D_M = 1383.77 \text{ ton}$$

En la Tabla 7.6 se observa que los desplazamientos y cortantes obtenidos por las tres formas son ligeramente menores a los mínimos del desplazamiento estático y cortante estática de 34 cm y 1383 ton respectivamente. Esta tendencia se debe a la flexibilidad de la superestructura.

De los resultados obtenidos entre el análisis espectral y los mínimos del análisis estático, se podría interpretar que el modelo de un grado de libertad ofrece estimaciones rápidas y apropiadas.

7.3. Diseño definitivo usando iterativamente análisis tiempo historia no lineal

En el proceso iterativo empleando análisis tiempo historia no lineal se definirá un rango de diseño aceptable para la variabilidad de las propiedades de los dispositivos.

A continuación, se detallará la respuesta de la estructura frente a la carga sísmica representada por el registro de 1966. Cabe mencionar que, la respuesta final de la estructura, para los 7 registros, se detalla en el Anexo 2.

Cargas Sísmicas

La carga sísmica será representada por el registro de 1966 que fue modificado mediante el escalamiento de frecuencias para hacerla espectro compatible a 1.5 veces el espectro de diseño estipulado en la norma peruana E030 Diseño Sismorresistente (Figura 7.7). La carga sísmica se debe aplicar con la acción simultánea sobre el modelo de 0.90 veces la componente 1966 N-S en la dirección de interés más 0.44 veces la componente 1966 E-W de un eje ortogonal a la dirección anterior.

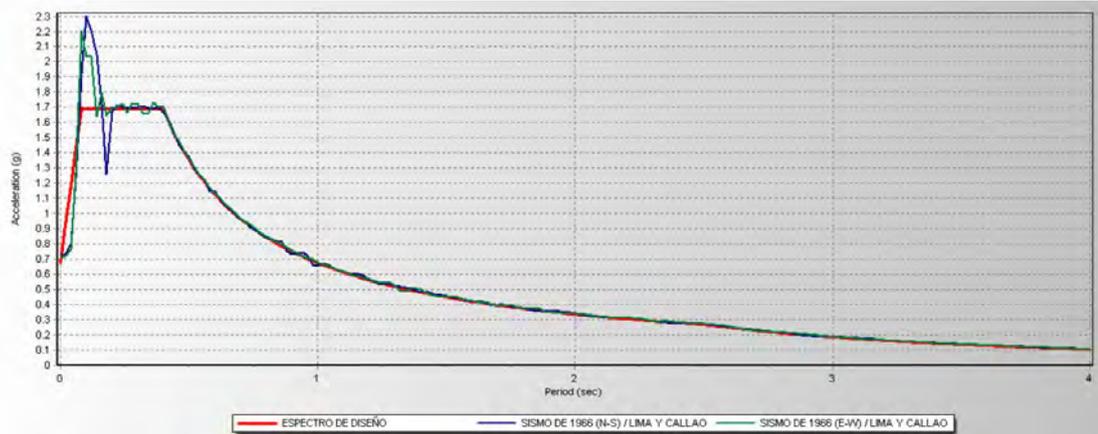


Figura 7.7: Espectros de aceleraciones de 1966 N-S y E-W compatibles al espectro de diseño.

7.3.1. Modelo de los dispositivos

Propiedades nominales

Para el cálculo de los parámetros que caracterizan al modelo bilineal se emplearon los siguientes datos de entrada:

Rigidez equivalente K_{eff} : 60 ton/m

Amortiguamiento equivalente ξ_{eff} : 10%

Desplazamiento estático mínimo D_m : 34.94 cm

$\frac{K_1}{K_2}$: 10

En la Tabla 7.8 se observa los parámetros nominales del modelo bilineal de todos los dispositivos.

Tabla 7.8 Propiedades nominales de todos los aisladores

AISLADORES CENTRALES Y PERIMETRALES	
K_{eff}(ton/m)	60
Energía Disipada (tonxm)	4.60
Q (ton)	3.36
K_2(ton/m)	50.37
K_1(ton/m)	503.71
F_y(ton)	3.74
K_2/K_1	0.10

Propiedades del Límite superior y del Límite inferior

En la Tabla 7.9 se aprecia los factores de modificación máximos y mínimos ($\lambda_{m\acute{a}x}$ y $\lambda_{m\acute{i}n}$) que recomienda la Norma ASCE/SE 7-16 para fabricantes de buena calidad.

Tabla 7.9 Factores de modificación máximos y mínimos (proveedores de buena calidad)

HIGH-DAMPING RUBBER (QUALITY MANUFACTURERS)		
	K_2	Q_D
λ (ae,máx)	1.2	1.2
λ (ae,mín)	1	1
λ (spec,máx)	1.15	1.15
λ (spec,mín)	0.85	0.85
λ (test,máx)	1.3	1.5
λ (test,mín)	0.95	0.95
λ max	1.72	1.98
λ min	0.81	0.81

En la Tabla 7.10 se muestra los factores de modificación que se emplearon en este trabajo para modificar las propiedades nominales de los dispositivos K_2 y Q .

Tabla 7.10 Factores de modificación máximos y mínimos

	K_2	Q_D
λ max	1.70	2.00
λ min	0.80	0.80

Empleando los factores de modificación descritos en la Tabla 7.10, se construyó la curva de comportamiento de los dispositivos para las propiedades del límite superior e límite inferior. Para este propósito, se realizó un proceso iterativo, en el cual se asumió como punto de partida un desplazamiento estático mínimo. Luego, empleando la curva de comportamiento se calculó el amortiguamiento equivalente para el desplazamiento asumido. Finalmente, se calculó un nuevo desplazamiento estático mínimo dividiendo el desplazamiento espectral para un amortiguamiento de 5 % entre el factor de reducción por amortiguamiento B_M . El proceso iterativo culminó cuando el desplazamiento asumido converge con el desplazamiento calculado.

En la Tabla 7.11 se observa las propiedades nominales, límite superior e límite inferior de los dispositivos centrales y perimetrales.

Tabla 7.11 Propiedades nominales, límite superior e límite inferior de todos los dispositivos

	NOMINAL	LÍMITE SUPERIOR	LÍMITE INFERIOR
K_{eff}(ton/m)	60.00	105.53	48.02
Energía Disipada (tonxm)	4.60	8.67	3.69
Q (ton)	3.36	6.73	2.69
K₂(ton/m)	50.37	85.63	40.30
K₁(ton/m)	503.71	503.71	503.71
F_y(ton)	3.74	8.11	2.93
K₂/K₁	0.10	0.17	0.08

7.3.2. Modelo del sistema de aislamiento para el sismo máximo considerado (MCEr)

La curva histerética del sistema de aislamiento se obtiene mediante una sumatoria de curvas de cada dispositivo. En la Tabla 7.12 se muestra las propiedades nominales, límite superior e límite inferior del sistema de aislamiento

Tabla 7.12 Propiedades del sistema de aislamiento nominales, límite superior e límite inferior

	NOMINAL	LÍMITE SUPERIOR	LÍMITE INFERIOR
K_{eff}(ton/m)	3960.00	6964.92	3169.02
Energía Disipada (tonxm)	303.82	572.25	243.71
Q (ton)	222.08	444.16	177.66
K₂(ton/m)	3324.46	5651.59	2659.57
K₁(ton/m)	33244.98	33244.98	33244.98
F_y(ton)	246.76	535.13	193.11
D_y (m)	0.0074	0.016	0.0058
K₂/K₁	0.10	0.17	0.08
V_b (ton)	1383.77	2355.50	1105.16
D_m (cm)	34.94	33.82	34.87
Amortiguamiento (ξ%)	10.00	11.43	10.06
T(s)	3.67	2.77	4.10

En la Figura 7.8 se muestra gráficamente las propiedades del sistema de aislamiento descritos en la anterior tabla.

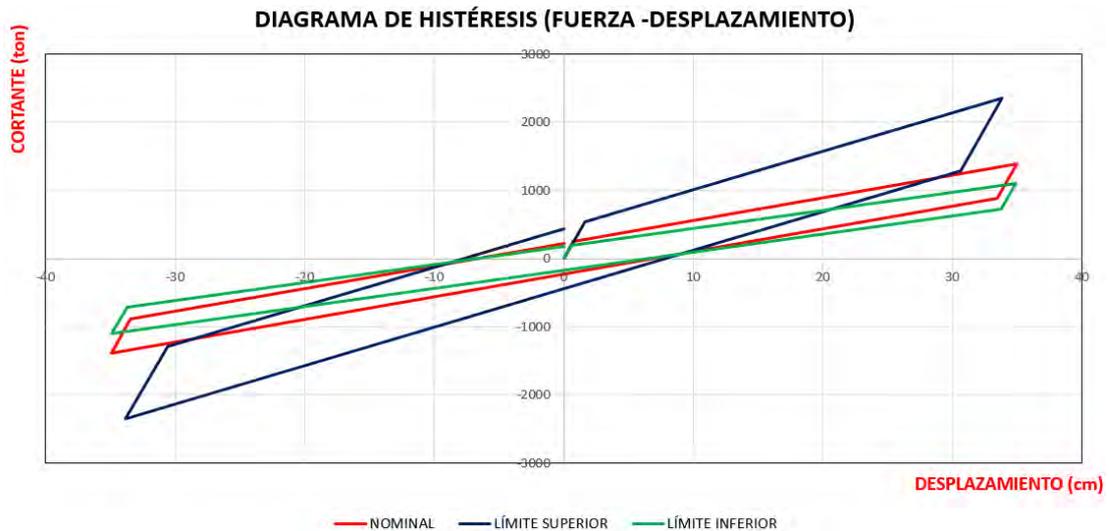


Figura 7.8: Propiedades del sistema de aislamiento nominal, límite superior e límite inferior.

7.3.3. Respuesta en el Tiempo

A continuación se detalla la respuesta del edificio aislado para la dirección de análisis Y-Y.

Desplazamientos

En la Figura 7.9 se muestra la historia de desplazamiento del sistema de aislamiento y la azotea en base a las **propiedades nominales** de los dispositivos. El desplazamiento máximo en el tiempo del sistema de aislamiento es de 25.10 cm, mientras que en la azotea es de 27.85 cm, ambos valores ocurren para el instante de 23.88 s. Además, de esta figura se puede obtener el valor de ϵ para cada instante tiempo restando las dos curvas y normalizando a la unidad el desplazamiento del sistema de aislamiento. De este modo, para el instante 23.88 s se obtuvo un valor de ϵ de 10.96%.

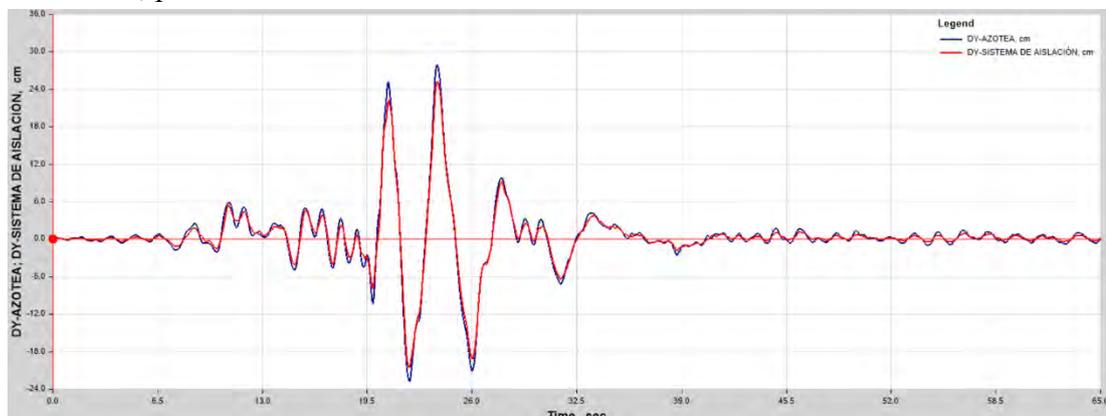


Figura 7.9: Historia de desplazamientos del sistema de aislamiento y la azotea (propiedades nominales)

En la Figura 7.10 se muestra la historia de desplazamiento del sistema de aislamiento y la azotea en base a las **propiedades del límite superior** de los dispositivos. El desplazamiento máximo en el tiempo del sistema de aislamiento es de 24.31 cm, mientras que en la azotea es de 28.02 cm, ambos valores ocurren para el instante de 21.96 s. Además, de esta figura se puede obtener el valor de ϵ para cada instante tiempo restando las dos curvas y normalizando a la unidad el desplazamiento del sistema de aislamiento. De este modo, para el instante 21.96 s se obtuvo un valor de ϵ de 15.26%.

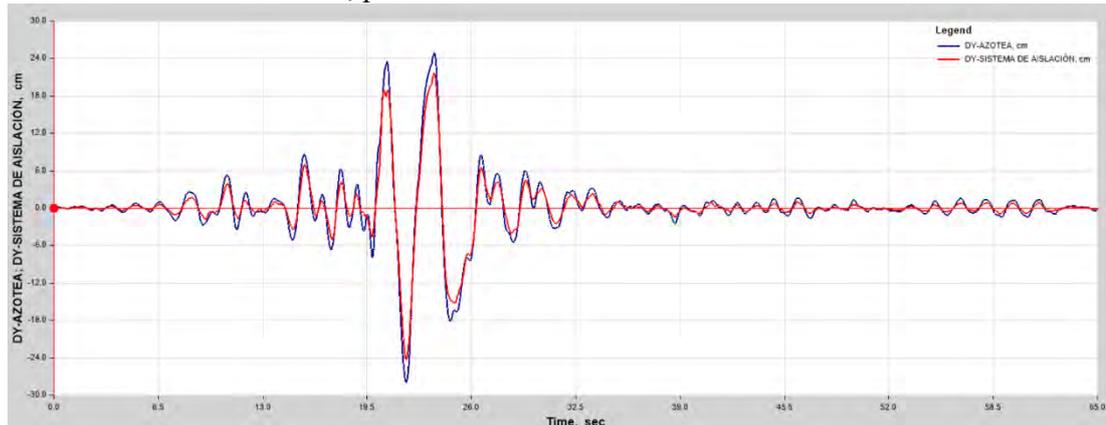


Figura 7.10: Historia de desplazamientos del sistema de aislamiento y la azotea (propiedades del límite superior)

En la Figura 7.11 se muestra la historia de desplazamiento del sistema de aislamiento y la azotea en base a las **propiedades del límite inferior** de los dispositivos. El desplazamiento máximo en el tiempo del sistema de aislamiento es de 22.10 cm, mientras que en la azotea es de 24.46 cm, ambos valores ocurren para el instante de 20.85s. Además, de esta figura se puede obtener el valor de ϵ para cada instante tiempo restando las dos curvas y normalizando a la unidad el desplazamiento del sistema de aislamiento. De este modo, para el instante 20.85 s se obtuvo un valor de ϵ de 10.68%.

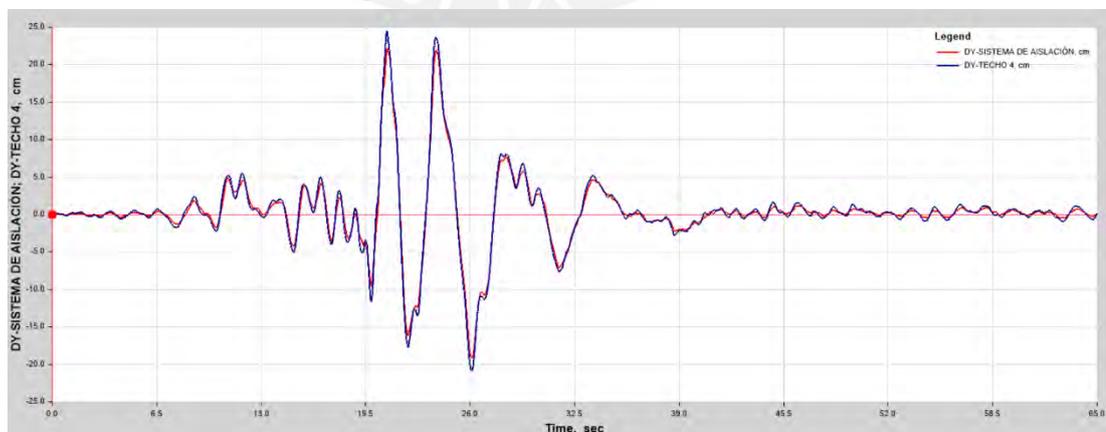


Figura 7.11: Historia de desplazamientos del sistema de aislamiento y la azotea (propiedades del límite inferior)

En la Figura 7.12 se observa la respuesta de desplazamientos máximos en el tiempo obtenidas por las propiedades nominales, límite superior e límite inferior. Los desplazamientos en el sistema de aislamiento varían en un 13% entre las propiedades nominales (25.10cm) y las propiedades del límite inferior (22.10 cm).



Figura 7.12: Demandas de desplazamientos en la dirección Y-Y

Derivas

El proyecto peruano de la Norma Técnica de Aislamiento Sísmico E.031 establece que la máxima deriva por encima del nivel de base no debe exceder de 0.0050.

En la Tabla 7.13 se muestra las derivas máximas en el tiempo considerando las propiedades nominales, límite superior e límite inferior de los dispositivos.

Tabla 7.13 Derivas de entrepiso máximas en el tiempo para el sismo de 1966

DEMANDAS DE DERIVAS (1/1000) PARA EL SISMO DE 1966				
NIVEL	NOMINAL	LÍMITE SUPERIOR	LÍMITE INFERIOR	ESTADO
NIVEL DE BASE	-----	-----	-----	
TECHO 1	2.19	3.31	1.75	Estable
TECHO 2	2.65	4.1	2.12	Estable
TECHO 3	2.17	3.51	1.73	Estable
AZOTEA	1.48	2.45	1.2	Estable

Aceleraciones Absolutas

Se estableció en este trabajo, como punto de partida, que la aceleración absoluta máxima de piso no exceda el valor de 0.30 g. Cabe mencionar que, se sugiere emplear espectros de piso para el diseño de los elementos no estructurales susceptibles de daño por aceleraciones, como se explicará en el ítem 8.2.

En la Tabla 7.14 se muestra las aceleraciones máximas en el tiempo considerando las propiedades nominales, límite superior e límite inferior de los dispositivos para todos los niveles del edificio hospitalario.

Tabla 7.14 Aceleraciones absolutas máximas en el tiempo para el sismo de 1966

DEMANDAS DE ACELERACIONES (g) PARA EL SISMO DE 1966				
NIVEL	NOMINAL	LÍMITE SUPERIOR	LÍMITE INFERIOR	ESTADO
NIVEL DE BASE	0.17	0.29	0.14	Estable
TECHO 1	0.12	0.20	0.09	Estable
TECHO 2	0.11	0.18	0.08	Estable
TECHO 3	0.13	0.21	0.1	Estable
AZOTEA	0.18	0.31	0.15	Aceptable

En la Figura 7.13 se observa las historias de aceleraciones máximas absolutas en la azotea obtenida por las propiedades nominales, límite superior e límite inferior.

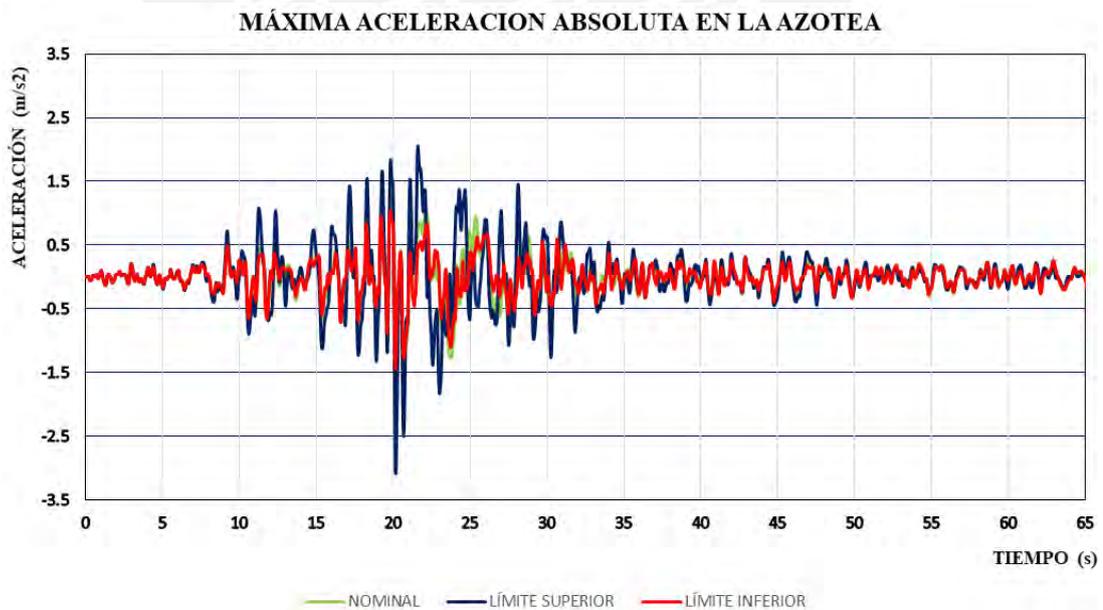


Figura 7.13: Historia de aceleraciones máximas absolutas

Fuerza Cortante

En la Figura 7.14 se muestra la historia de fuerza cortante del sistema de aislamiento para el sismo de 1966 considerando las propiedades nominales, límite superior e límite inferior de los dispositivos.

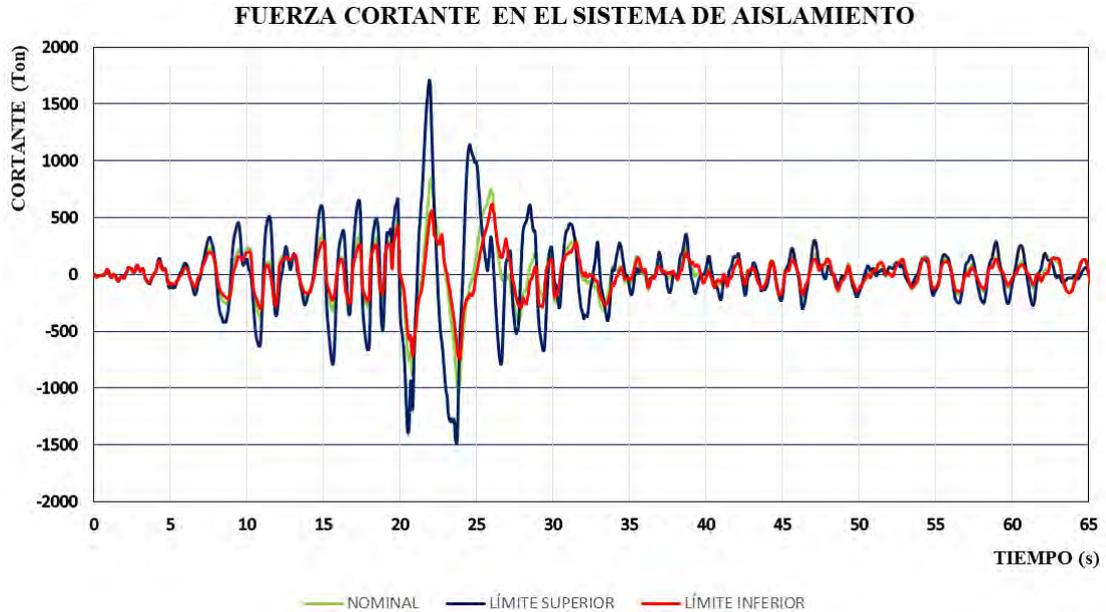


Figura 7.14: Historia de fuerza cortante en el sistema de aislamiento

Los resultados máximos en el tiempo del análisis tiempo historia empleando las propiedades nominales, límite superior e límite inferior de los dispositivos se resumen en la Tabla 7.15.

Tabla 7.15 Comparación de resultados entre las propiedades nominales, límite superior e límite inferior

		Nominal	Límite Superior	Límite Inferior
U2(Y-Y)	Desplazamiento en el nivel base (cm)	25.30	24.31	22.10
	Desplazamiento en la azotea (cm)	27.85	28.02	24.46
	ϵ (%)	10.96	15.26	10.68
	Deriva máxima de entrepiso (1/1000)	2.65	4.10	2.12
	Aceleración absoluta máxima (g)	0.18	0.31	0.15
	Cortante de entrepiso, V_b (ton)	1032.52	1712.30	747.28

Empleando las propiedades nominales de los dispositivos, se aprecia de la Tabla anterior y la Tabla 7.6 que la respuesta de aceleraciones varía en un 28% entre el análisis espectral lineal (0.14g) y tiempo historia no lineal (0.18g). Esta variación se debe a que el modelo elástico con amortiguamiento equivalente de fluido viscoso se construye únicamente en el ciclo que corresponde al desplazamiento máximo del

modelo inelástico, por lo que el modelo equivalente no lograr representar adecuadamente el proceso de disipación de energía a lo largo de todo el movimiento

Se aprecia en la Tabla anterior que las propiedades del límite superior originan que el sistema de aislamiento sea menos eficiente respecto a las propiedades del límite inferior.

Nuevos modelo elástico equivalente obtenido mediante el análisis tiempo historia

En base al desplazamiento máximo y diagrama de histéresis del sistema de aislamiento obtenido mediante el análisis tiempo historia no lineal, se construirá un nuevo modelo elástico equivalente.

En la Figura 7.15 se muestra el diagrama de histéresis del sistema de aislamiento considerando las propiedades nominales, límite superior e límite inferior de los dispositivos.

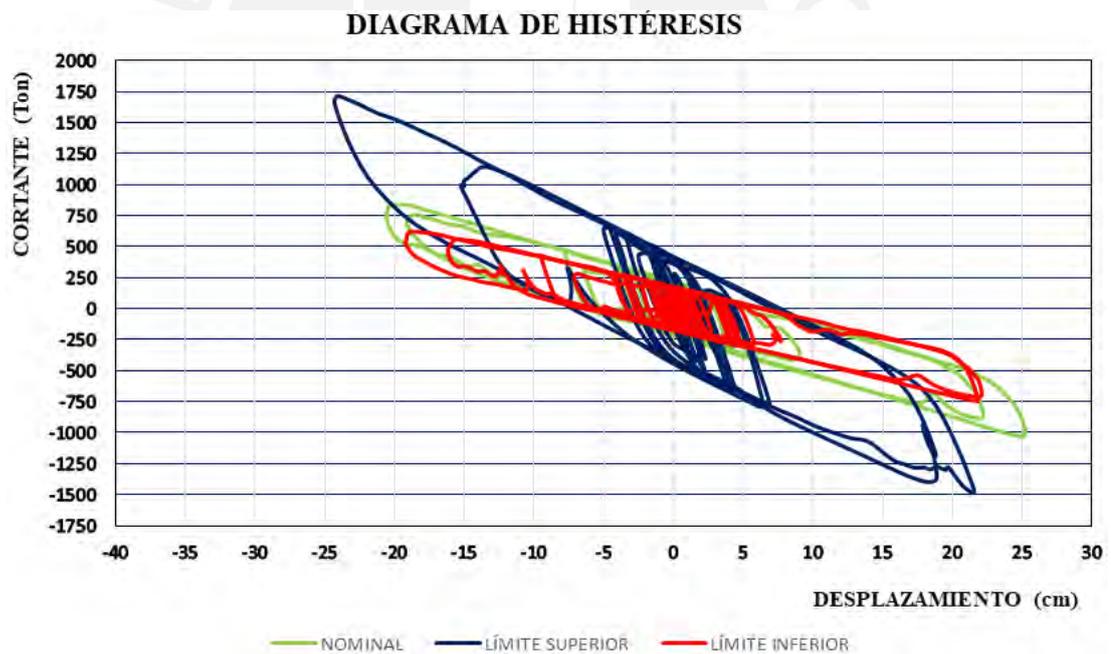


Figura 7.15: Curva de comportamiento del sistema de aislamiento

En la Tabla 7.16 se muestra el nuevo modelo equivalente para las propiedades nominales, límite superior e límite inferior de los dispositivos.

Tabla 7.16 Nuevos modelos equivalentes

	NOMINAL	UPPER	LOWER
D máx + (cm)	25.10	21.33	22.10
D máx - (cm)	-20.57	-24.31	-19.22
D (cm)	22.88	22.94	20.66
F máx + (ton)	840.48	1712.30	620.42
F máx - (ton)	-1032.52	-1483.18	-747.28
F (ton)	936.50	1597.74	683.85
Q (ton)	222.08	444.16	177.66
Keff (ton/m)	4092.44	7001.05	3309.65
Dy (m)	0.0074	0.016	0.0058
Amortiguamiento (ξ %)	14.61	16.45	16.07
T(s)	3.61	2.76	4.01

Se aprecia en la Tabla anterior que los nuevos modelos equivalentes, para las propiedades nominales, límite superior e límite inferior, tienen menores desplazamientos, menores periodos, mayores rigideces y mayores amortiguamientos en comparación a los modelos equivalentes iniciales mostrado en la Tabla 7.11.

El aumento de amortiguamiento de los nuevos modelos equivalentes podría complicar que se cumpla con el requisito para la fuerza de restitución lateral que permite que la estructura regrese a su posición inicial cuando culmina el evento sísmico.

Fuerza Restauradora

La fuerza de restitución lateral empleando las propiedades nominales de los dispositivos se obtiene como:

$$\Delta F = F_{D_M} - F_{0.5 D_M} \geq 0.025W = 1032.52 - 609.17 \geq 331.25 \text{ ton}$$

$$420.19 \geq 318.26 \text{ ; ESTABLE!}$$

La fuerza de restitución lateral empleando las propiedades del límite superior de los dispositivos se obtiene como:

$$\Delta F = F_{D_M} - F_{0.5 D_M} \geq 0.025W = 1712.30 - 1083.22 \geq 331.25 \text{ ton}$$

$$420.19 \geq 318.26 \text{ ; ESTABLE!}$$

La fuerza de restitución lateral empleando las propiedades del límite inferior de los dispositivos se obtiene como:

$$\Delta F = F_{D_M} - F_{0.5 D_M} \geq 0.025W = 747.28 - 429.21 \geq 318.26 \text{ ton}$$

$318.07 \leq 318.26$; ACEPTABLE!

Desplazamiento total máximo

Para determinar el desplazamiento total máximo se debe tener en cuenta la excentricidad natural y accidental para el caso más desfavorable del centro de masa.

El caso que originó mayores desplazamientos, para la carga sísmica en la dirección Y-Y, fue cuando el centro de masa acumulado del sistema de aislamiento se movió a la izquierda. El desplazamiento total máximo estuvo dado por el elemento del sistema de aislamiento ubicado en la esquina superior izquierda de la planta. En la Figura 7.16 se muestra la historia del desplazamiento total máximo del sistema de aislamiento en base a las propiedades nominales, límite superior e límite inferior de los dispositivos.

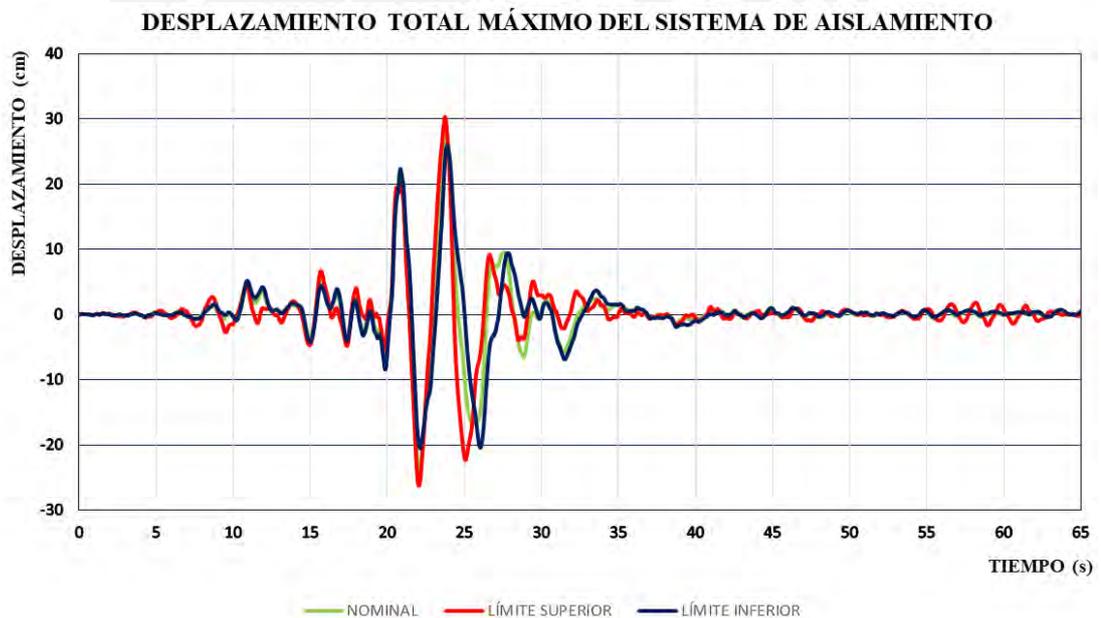


Figura 7.16: Historia de desplazamiento total máximo del sistema de aislamiento
Juntas Circundantes

Las dimensiones de las juntas circundantes al edificio no deben ser menores al desplazamiento total máximo del análisis estático considerando la torsión accidental(D_{TM}).

El desplazamiento total máximo del análisis estático del sistema de aislamiento se debe calcular mediante la Ec. (5.10).

$$D_{TM} = D'_M \left(1 + \frac{Y}{P_T^2} * \frac{12e}{b^2+d^2} \right)$$

Donde:

$$b = 43.50 \text{ m}$$

$$d = 65.70 \text{ m}$$

$$y = 34.79 \text{ m}$$

$$e = 30.91 - 30.64 + 0.05 * 65.70 = 3.55 \text{ m}$$

Para el cálculo del desplazamiento total máximo se podrá usar D'_M el lugar de D_M obtenido según la Ec. (5.17).

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

Empleando las propiedades nominales de los dispositivos se obtiene:

$$P_T = \frac{3.67}{3.32} = 1.11, \quad \left(\frac{T}{T_M}\right)^2 = \left(\frac{1.05}{3.67}\right)^2 = 8.16 \%$$

$$D_{TM} = 40.18 \text{ cm}$$

Empleando las propiedades del límite superior de los dispositivos se obtiene:

$$P_T = \frac{2.77}{2.56} = 1.08, \quad \left(\frac{T}{T_M}\right)^2 = \left(\frac{1.05}{2.77}\right)^2 = 14.41 \%$$

$$D_{TM} = 38.09 \text{ cm}$$

Empleando las propiedades del límite inferior de los dispositivos se obtiene:

$$P_T = \frac{4.10}{3.70} = 1.11, \quad \left(\frac{T}{T_M}\right)^2 = \left(\frac{1.05}{4.10}\right)^2 = 6.56 \%$$

$$D_{TM} = 40.36 \text{ cm}$$

El caso que gobierna para la dimensión de la junta circundante al edificio, para la dirección Y-Y es el desplazamiento total máximo del análisis estático empleando las propiedades del límite inferior de los dispositivos. La separación mínima entre la estructura aislada y los muros de contención debe ser de por lo menos 41 cm.

7.3.4. Repuesta final de la estructura aislada en el tiempo

La respuesta final del edificio hospitalario se detalla en el ANEXO 1.

Los desplazamientos (promedio de los 7 registros) en el extremo del sistema de aislamiento obtenidos del análisis tiempo historia empleando las propiedades del límite inferior e superior (28.77 cm y 26.29 cm respectivamente) fueron menores al 80 % de los desplazamientos totales máximos del análisis estático empleando las propiedades del límite inferior e superior (32.29cm y 30.47 cm respectivamente). Consecuentemente, el rango de diseño aceptable para la rigidez equivalente de cada dispositivo debe estar asociado al 80% del desplazamiento total máximo del análisis estático. Sin embargo, debido a que los desplazamientos máximos del análisis estático empleando las propiedades del límite inferior e superior (34.87 cm y 33.82 cm respectivamente) son ligeramente mayores al 80% del desplazamiento total máximo del análisis estático, se optó conservadoramente por definir el rango diseño para la rigidez equivalente de cada dispositivo entre 48 ton/m y 106 ton/m (valores asociados al modelo equivalente inicial del sistema de aislamiento para las propiedades del límite inferior e superior).

El caso que gobierna para la dimensión de la junta circundante al edificio es el desplazamiento total máximo del análisis estático empleando las propiedades del límite inferior de los dispositivos. La separación mínima entre la estructura aislada y los muros de contención para la dirección X-X y Y-Y debe ser de por lo menos 37 cm y 41 cm respectivamente.

En base a los resultados obtenidos del análisis tiempo historia empleando las propiedades del límite superior e inferior se puede afirmar que las propiedades del límite superior originan que el sistema de aislamiento sea menos eficiente respecto a las propiedades del límite inferior, ya que hay un incremento en el amortiguamiento equivalente, en la cortante de diseño del sistema de aislamiento y la superestructura, en las derivas de la superestructura y en las aceleraciones de la superestructura. Consecuentemente, el caso que gobierna para el diseño de los elementos estructurales del sistema de aislamiento y la superestructura es el análisis del edificio hospitalario empleando las propiedades del límite superior.

La cortante de diseño para el sistema de aislamiento y la superestructura, para los dos direcciones de análisis X-X y Y-Y, debe ser por lo menos 1884.40 ton y 972.79 ton respectivamente.

7.4. Diseño de algunos elementos de concreto en la interfase de aislamiento

El diseño de los elementos estructurales usando los resultados del análisis tiempo historia es muy laborioso y ocupa demasiado tiempo, por lo que se sugiere usar análisis espectral empleando para el sistema de aislamiento las propiedades del límite superior.

Se escalará la cortante del sistema de aislamiento del análisis espectral a la cortante mínima de diseño del sistema de aislamiento detallada en el ANEXO 1, de este modo se representará el mismo nivel de fuerza sísmica.

El diseño de los elementos estructurales se realizará de acuerdo a los lineamientos de la norma peruana E-060 de Concreto Armado. Se investigaron las siguientes combinaciones de cargas que establece la norma peruana:

Combo1: $1.4D + 1.7L$

Combo2: $1.25D + 1.25L \pm Q_E$

Combo3: $0.9D \pm Q_E$

Donde:

D : Carga muerta

L : Carga viva

Q_E : Carga sísmica horizontal

A continuación se muestra, como ejemplo, el diseño de un tramo de la viga VAIS-25 ubicada sobre el eje "I" y entre los ejes "6" y "7" (Figura 7.17). Esta viga tiene una sección transversal de 40 cm x 100 cm.

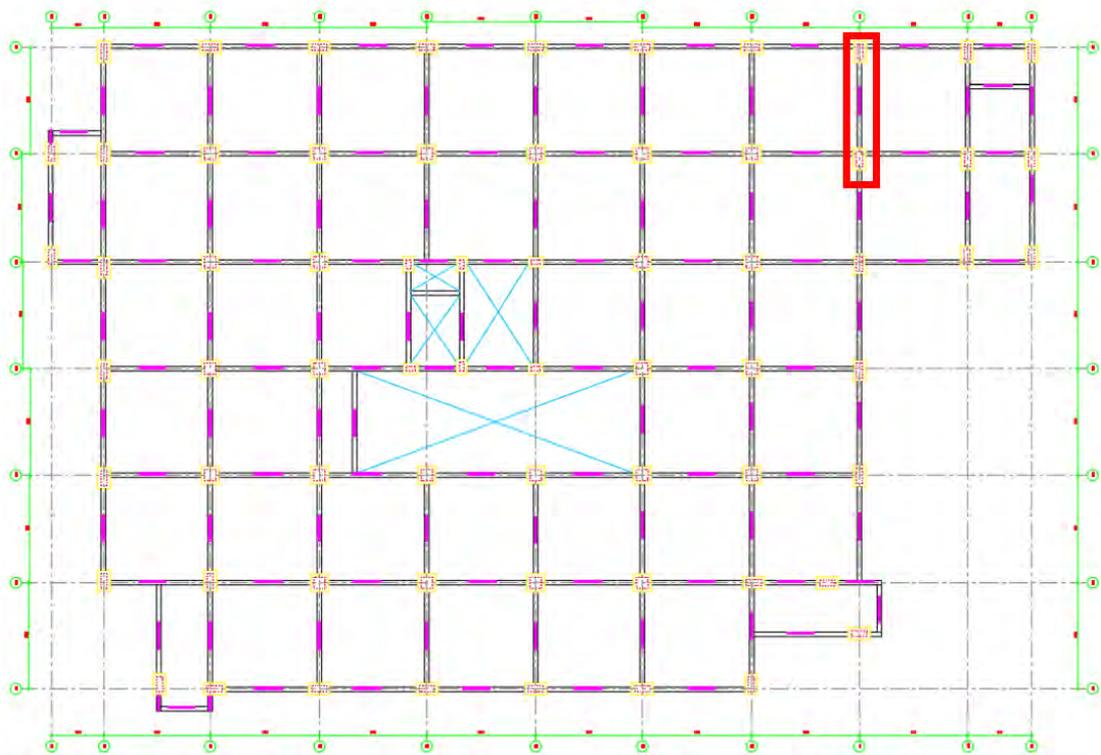


Figura 7.17: Tramo de viga VAIS-25

Diseño de viga 0.40mx1.00m

Datos: B = 0.40m H = 1.0m $f'c=210 \text{ Kg/cm}^2$ $f_y=4,200\text{Kg/cm}^2$

Diseño por flexión

En la Figura 7.18 se muestra el diagrama de momentos flectores de la envolvente de todas las combinaciones de diseño para el tramo mencionado.



Figura 7.18: Diagrama de momentos flectores del tramo de viga VAIS-25

Colocando un refuerzo corrido de $4\phi 1''$ en la parte superior e inferior de la viga, se provee a la viga de una resistencia de $\phi Mn = 66.82 \text{ Ton}\cdot\text{m}$. Dado que los máximos momentos M_u (-172.06.16 tonxm y -148.33 tonxm en la esquina superior derecha e izquierda respectivamente) exceden a la resistencia proporcionada por el refuerzo corrido será necesario colocar bastones adicionales en los extremos de la viga.

Los bastones negativos de $7\emptyset 1''$ y $6\emptyset 1''$ en conjunto con el refuerzo corrido, e fierro corrido inferior de $4\emptyset 1''$ proveen a la viga de una resistencia de -174.48 tonxm y -160.01 tonxm en la esquina superior derecha e izquierda respectivamente. Se concluye que el diseño por flexión es satisfactorio, ya que la resistencia proporcionada a la viga es mayor a los máximos momentos M_u .

En la Figura 7.19 se muestra el refuerzo corrido y los bastones adicionales en cada cara de la viga.

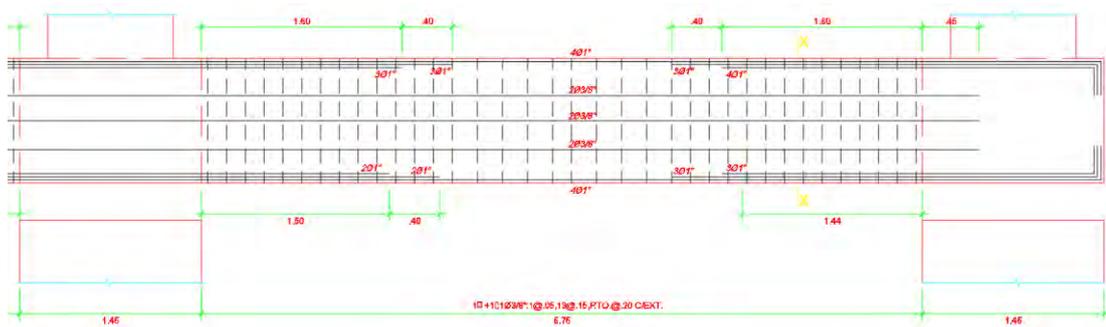


Figura 7.19: Refuerzo corrido y bastones adicionales del tramo de viga VAIS-25

Diseño por cortante

En la Figura 7.20 se muestra el diagrama de fuerza cortante de la envolvente de todas las combinaciones de diseño para el tramo mencionado.

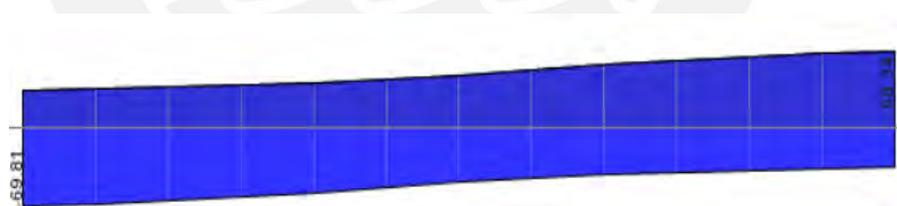


Figura 7.20: Diagrama de fuerza cortante del tramo de viga VAIS-25

Dado que la fuerza cortante máxima V_u (-69.81 ton en el extremo izquierdo) excede a la resistencia que el concreto provee a la viga de $\emptyset V_c = 24.02 \text{ ton}$ será necesario colocar estribos para que la viga resista las sollicitaciones requeridas.

El valor de la fuerza cortante máxima se obtuvo en base al diseño por capacidad estipulado en la Norma peruana E.060. De este modo, se proporciona a la viga una resistencia a fuerza cortante mayor que la que generaría la rotulación de la viga en

flexión. Para el diseño por capacidad, para edificios aporticado, se debe tomar la cortante menor de los siguientes dos casos:

a) La cortante asociada a 1.25 veces los momentos nominales cruzados adicionando la cortante isostática en servicio amplificada en 1.25

$$V_u = \frac{1.25 * (M_{ni} + M_{nd})}{L} + 1.25 V_{servicio}$$

b) La cortante asociada a las combinaciones de carga con una amplificación del sismo en 2.5

Combo1: 1.4D + 1.7L

Combo2: 1.25D + 1.25L +/- 2.5 Q_E

Combo3: 0.9D +/- 2.5 Q_E

La cortante última V_u considerando las cargas de gravedad actuantes y los refuerzos longitudinales instalados es de 91.02 ton. Proponiendo una distribución de estribos $\phi 1/2''$ 1@.05, 13@.15 y Resto @.20m desde cada extremo se provee a la viga de una resistencia de $\phi V_n = 108.76$ ton para los estribos espaciados a cada 15 cm y de 87.58 ton para los estribos espaciados cada 20 cm. Se puede concluir que el tramo de la viga con $21\phi 1'' + 6\phi 3/8''$ y con estribos $\phi 1/2''$ 1@.05, 13@.15 y Resto @.20m cuenta con la capacidad suficiente para soportar los esfuerzos producidos por cargas de gravedad y sísmicas. El desarrollo de la viga se detalla en el Anexo 2.

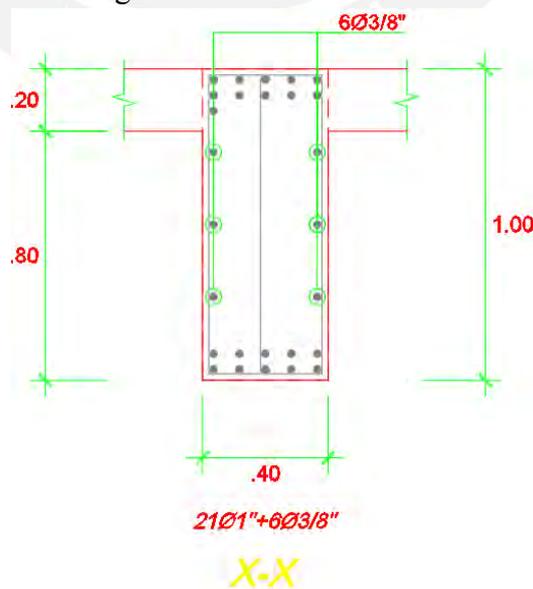


Figura 7.21: Detalle del refuerzo del tramo de viga VAIS-25

8. EVALUACION DE LA RESPUESTA SISMICA DEL EDIFICIO AISLADO

8.1. Demanda y Capacidad sobre los principales elementos estructurales

La demanda total en cualquier elemento estructural se obtiene mediante la superposición de la carga muerta, viva y sísmica en condición de servicio. La carga sísmica se representará por un registro de aceleración, para la respuesta se tomará el esfuerzo máximo en el tiempo.

Las cargas sísmicas descritas en la norma peruana E030 se encuentran a nivel de resistencia. Consecuentemente, estas cargas deben reducirse en un 80% para llevarlas a condición de servicio y combinarlas con las acciones de gravedad (carga muerta y carga viva).

A continuación se muestra, como ejemplo, la demanda total del tramo de la viga más esforzada del sistema de aislamiento ubicada sobre el eje "I" y entre los ejes "6" y "7". Las Figuras 8.1 y 8.2 muestran la demanda total de fuerza cortante y momento flector respectivamente; la carga sísmica se representó por el registro de aceleración de 1966.

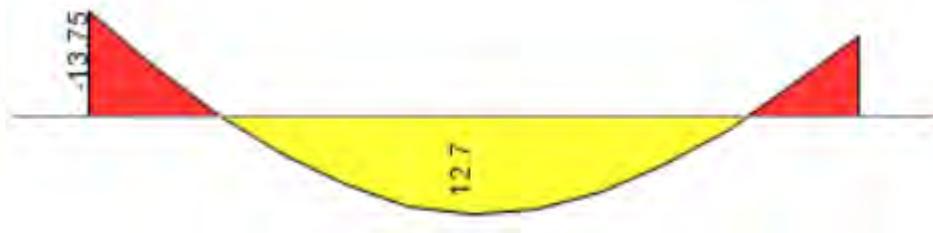


Diagrama de Fuerza Cortante por carga muerta

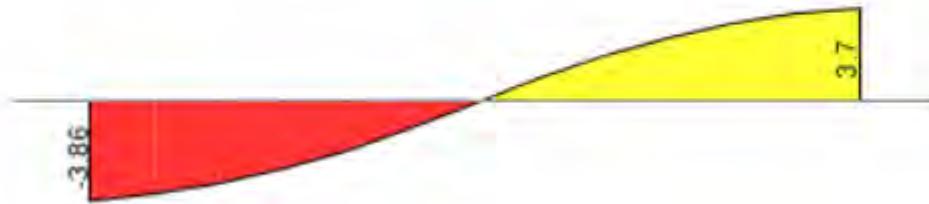


Diagrama de Fuerza Cortante por carga viva

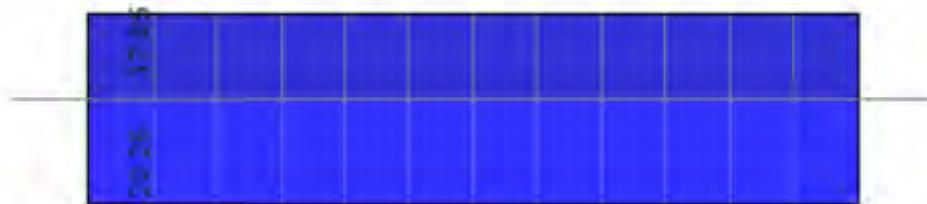


Diagrama de Fuerza Cortante por carga sísmica representada por el registro de 1966

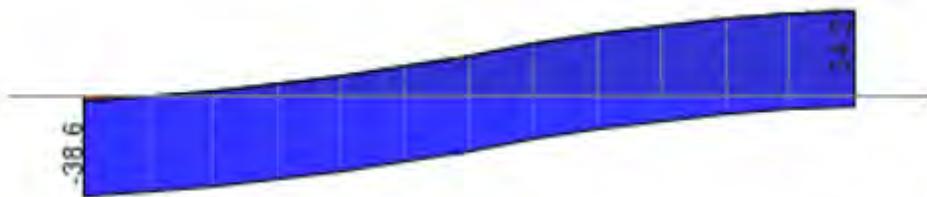


Figura 8.1: Demanda total de fuerza cortante del tramo de viga VAIS-25

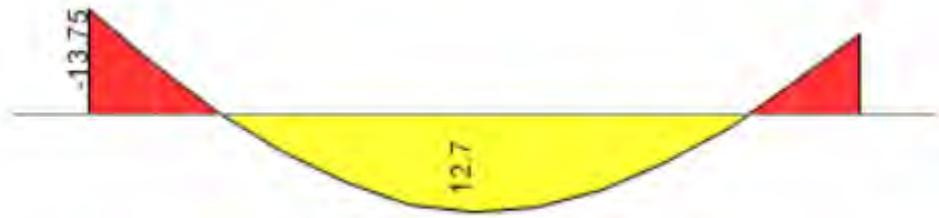


Diagrama de Momentos Flectores por carga muerta

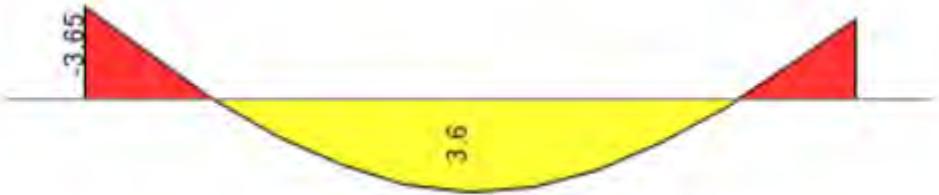


Diagrama de Momentos Flectores por carga viva



Diagrama de Momentos Flectores por carga sísmica representada por el registro de 1966



Figura 8.2: Demanda total de momento flector en la viga del sistema de aislamiento del tramo de viga VAIS-25

En la Figura 8.1 se observa que la demanda en la viga por fuerza cortante, en estado de servicio, se encuentra por debajo de la resistencia instalada (108.76 ton para los estribos espaciados a cada 15 cm y de 87.58 ton para los estribos espaciados cada 20 cm).

$$V_{servicio} = 38.6 \text{ ton} < \phi V_n = 87.58 \text{ ton}$$

En la Figura 8.2 se observa que la demanda en la viga por momento flector, en estado de servicio, se encuentran por debajo de la resistencia instalada de diseño (-174.48 tonxm y -160.01 tonxm en la esquina superior derecha e izquierda respectivamente).

$$M_{esquina\ superior-izquierda} = -70.67 \text{ ton} - m < \phi M_n = -160.01 \text{ ton} - m$$

$$M_{esquina\ superior-derecha} = -71.37 \text{ ton} - m < \phi M_n = -174.48 \text{ ton} - m$$

8.2. Comportamiento de componentes sujetas a aceleraciones

En este ítem se analiza un tabique (muro no portante) el cual está sujeto en la parte superior y apoyado en la parte inferior. Cabe mencionar que, el tabique no tiene un aporte significativo a la rigidez lateral del edificio, únicamente aporta masa. Se evaluará las demandas en el tabique, para la dirección Y-Y, frente a la carga sísmica representada por el acelerograma de 1966.

Las propiedades de la albañilería son las siguientes:

Albañilería

Resistencia Característica	$f'_m = 35 \text{ kg/cm}^2$
Resistencia al Corte	$v'_m = 5.1 \text{ kg/cm}^2$
Módulo de Elasticidad	$E = 17,500 \text{ kg/cm}^2$
Peso Específico	$\gamma = 1,800 \text{ kg/m}^3$

En el modelo tridimensional de la estructura se modeló 1m de longitud de tabique ubicado sobre el eje "6" y entre los ejes "E" y "F" (Figura 8.3). Se utilizó el comando

“Releases” para desacoplar el tabique de la estructura debido a que no tiene empotramiento en su base.

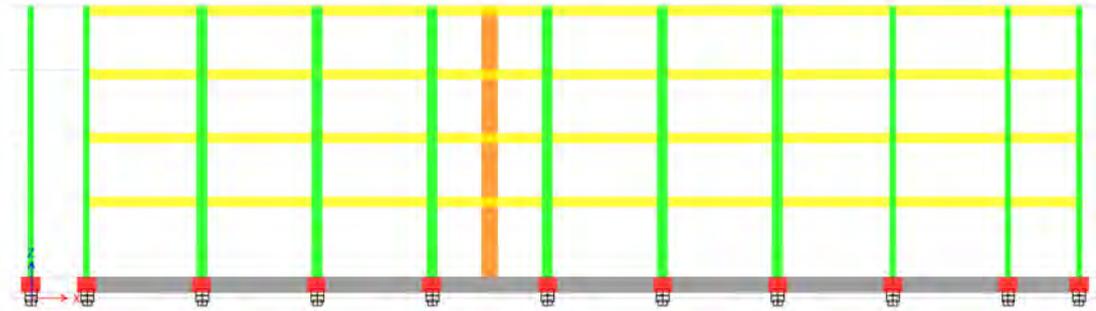


Figura 8.3: Se muestra el muro de albañilería por metro de longitud

La Figura 8.4 muestra la cortante en el muro de albañilería en todos los niveles, para tener valores más exactos se dividió el tabique en altura cada 0.50 m.

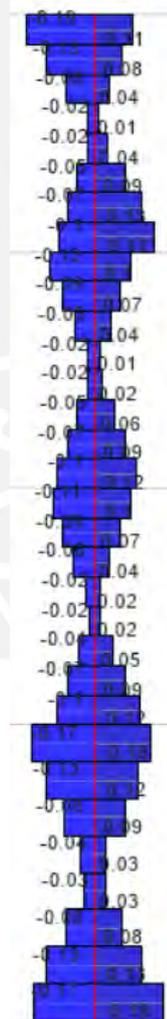


Figura 8.4: Demanda por fuerza cortante

En la Tabla 8.1 se muestran la fuerza total de inercia en el tabique para cada nivel. Las aceleraciones se calcularon asumiendo que el tabique se mueve como un sólido rígido.

Tabla 8.1 Fuerza total del inercia en el tabique para el sismo de 1966

CORTANTE EN EL MURO DE ALBAÑILERIA		
Nivel	FUERZA DE INERCIA (Ton)	ACELERACIÓN(g)
Primer Piso	0.36	0.16
Segundo Piso	0.23	0.13
Tercer piso	0.24	0.13
Cuarto piso	0.35	0.20

Comparación de resultados

A fin de comparar los valores obtenidos por el programa de cómputo se calculará la aceleración y la cortante en el tabique del cuarto piso asumiendo una forma de vibración.

El tabique esta simplemente apoyado en los extremos, por lo que la forma de vibración se puede aproximar a $\phi_{(x)} = \sin \frac{x\pi}{L}$ (normalizada a 1 en el tramo medio).



La masa distribuida, m , es un valor constante debido a que la sección transversal es constante en toda la altura. De este modo, la masa participante, (L^*), y la masa generalizada, (M^*) se obtendrán con las siguientes formulas:

$$L^* = \int_0^L m \sin \frac{x\pi}{L} dx = \frac{2mL}{\pi}$$

$$M^* = \int_0^L m \left(\sin \frac{x\pi}{L} \right)^2 dx = \frac{mL}{2}$$

A partir de la aceleración máxima que recibe el tabique en su base, $a_{m\acute{a}x}$, y el factor de amplificación dinámico, D , se puede calcular la aceleración espectral de un tabique de igual periodo y aceleración en su base que el tabique de masa distribuida (oscilador equivalente de un grado de libertad), como:

$$S_a = a_{m\acute{a}x} D$$

Además, el factor de amplificación dinámica se obtiene:

$$D = \frac{1}{\sqrt{(1 - \beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}}$$

Donde $\beta = \frac{\varpi}{\omega}$, es la relación de frecuencias de la estructura, ϖ , y el tabique, ω .

La aceleración absoluta máxima en el tabique de masa distribuida se obtiene según:

$$\ddot{Y}_{abs} = S_a * \frac{L^*}{M^*}$$

La cortante basal en el tabique será:

$$V = \frac{L^{*2} S_a}{M^*}$$

La rigidez generalizada, (K^*), es:

$$K^* = \int_0^L EI \left(\frac{\pi}{L}\right)^4 \sin^2 \frac{\pi X}{L} dx = \frac{EI\pi^4}{2L^3}$$

Una aproximación al periodo fundamental, T , del tabique se puede obtener según:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M^*}{K^*}}$$

En la tabla 8.2 se muestra la demanda en el tabique del cuarto nivel.

Tabla 8.2 Demandas en el tabique del cuarto nivel

DEMANDA EN EL TABIQUE	
B (m)	1.00
H(m)	0.25
L(m)	4.00
E (ton/m²)	175000.00
EI (ton.m²)	227.86
m (m.ton.s²)	0.05
L*	0.12
M*	0.09
K*	173.41
T_{tabique} (s)	0.14
T_{estructura} (s)	3.05
ξ (%)	0.05
β	0.05
a_{máx} (m/s²)	2.06
S_a (m/s²)	2.06
ÿ_{abs} (m/s²)	2.63
V (ton)	0.31

En la Tabla 8.1 se observa que la cortante en base del tabique en el cuarto nivel es de 0.31 ton, mientras que la obtenida por el software es de 0.35 Ton. La variación entre ambos resultados es de un 11.4 %.

La masa que interviene para el cálculo de la cortante es de alrededor el 81% de la masa total del tabique.

$$\%M.E = \frac{L^{*2}}{M^{*} \text{ Masa Total}} * 100 = 81\%$$

Espectro de piso

En el caso de un hospital donde el contenido termina siendo más caro que la propia estructura se debe garantizar que los equipos médicos tengan un adecuado desempeño (no se dañen o sufran un desajuste en su calibración) frente a las sollicitaciones sísmicas. También, se debe asegurar que los elementos no estructurales (tabiques) no sufran daños importantes que afecten a la funcionalidad del edificio. Por estas razones, se debe realizar un diseño más óptimo y realista de los elementos no estructurales mediante espectros de piso que muestran la tendencia de los armónicos que reciben los

elementos en su base. En la Figura 8.5 se muestra el espectro de piso de aceleraciones en la base del tabique en el cuarto nivel.

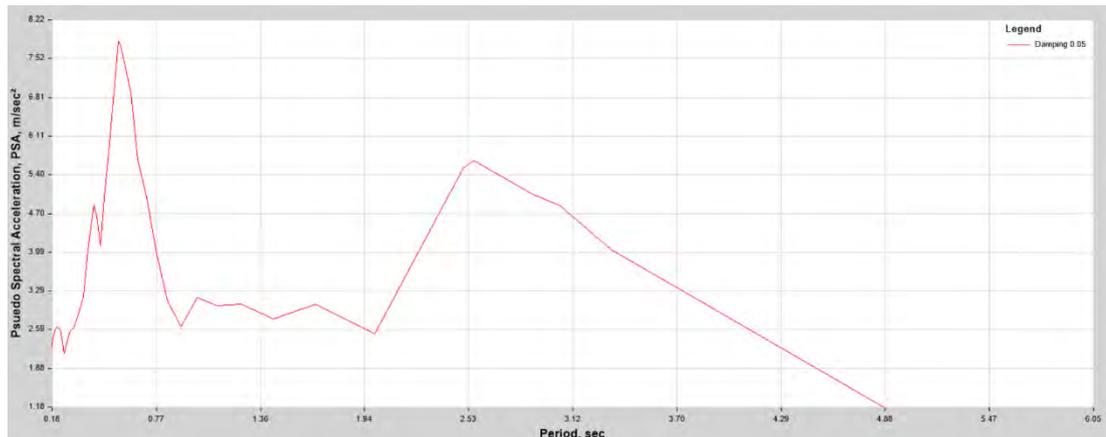


Figura 8.5: Espectro de piso del cuarto nivel

En la Figura 8.5 se observa que el espectro de piso tiene picos cercanos a los periodos de la estructura en vibración libre. Esta tendencia se debe que en la base del tabique del cuarto nivel predominan armónicos con periodos cercanos a la estructura. Cabe mencionar que, se debe realizar un seguimiento especial a aquellos elementos no estructurales que tengan periodos cercanos a los picos del espectro.

Para el tabique de periodo de 0.14 s, la aceleración espectral S_a es de 2.25 m/s^2 y la cortante basal de 0.33 ton. El tabique al tener un periodo muy pequeño origina que la aceleración espectral (2.25 m/s^2) prácticamente tienda a la aceleración máxima del piso del cuarto nivel de la estructura (2.06 m/s^2).

Tabla 8.3 Esfuerzos en el tabique

MOMENTOS FLECTORES EN EL MURO DE ALBAÑILERIA			
Nivel	MOMENTO (tonxm)	Esfuerzo (kg/cm2)	Estado
Primer piso	0.18	1.73	ACEPTABLE
Segundo Piso	0.09	0.86	ESTABLE
Tercer piso	0.09	0.86	ESTABLE
Cuarto piso	0.15	1.44	ESTABLE

Se aprecia en la Tabla anterior que se excede el esfuerzo admisible en tracción por flexión en el primer en un 14 %; sin embargo, este exceso no es tan significativo por lo que se puede clasificar el esfuerzo del tabique a flexión como aceptable.



9. Conclusiones

En base a los resultados del análisis de la estructura hospitalaria frente a sismos de subducción, usando aisladores de alto amortiguamiento, se obtuvieron las siguientes conclusiones presentadas por temas:

Respecto a los parámetros del modelo del sistema de aislamiento

- Los parámetros que caracterizan al modelo bilineal Q y K_2 permanecen casi constantes para relaciones de rigideces ($\frac{K_1}{K_2}$) entre 8 y 15. Para una relación de rigidez de 8, los parámetros K_2 y Q variaron en 1.5% y 0.27 % respectivamente, con respecto a una relación de rigidez de 15.
- En base al desplazamiento máximo y diagrama de histéresis del sistema de aislamiento obtenido mediante el análisis tiempo historia no lineal, se puede construir un nuevo modelo elástico equivalente que puede diferir del modelo equivalente utilizado inicialmente. Para el registro de Lima y callao 1966 se obtuvo un desplazamiento (25.1 cm) menor al desplazamiento que se usó en el modelo equivalente inicial (34.9 cm). Consecuentemente, la rigidez efectiva y amortiguamiento efectivo del nuevo modelo equivalente fueron mayores en 4% y 46 % respectivamente, en comparación al modelo equivalente inicial.

Respecto al proceso iterativo de diseño

- En el proceso iterativo de diseño, usando análisis tiempo historia no lineal se observó que al reducir el amortiguamiento equivalente del sistema de aislamiento hubo mayor desplazamiento de la plataforma respecto del suelo; sin embargo, las aceleraciones de piso y las derivas de entrepiso en la superestructura se redujeron.
- En el proceso iterativo de diseño, se observó que una distribución de dispositivos perimetrales menos rígidos que los centrales produjo que los modos fundamentales (modos 1 y 2) tengan menor influencia en la respuesta

final de la estructura (menor porcentaje de masa efectiva junto a un incremento de la masa efectiva del tercer modo rotacional).

Respecto al modelo elástico e inelástico

- Las aceleraciones absolutas de piso, en la superestructura, obtenidas por el modelo elástico fueron menores a las aceleraciones del modelo inelástico. Empleando las propiedades nominales de los dispositivos, las aceleraciones varían en un 22% entre el análisis espectral lineal (0.14g) y tiempo historia no lineal (0.18g).
- La aceleración absoluta máxima, en la plataforma de aislamiento, obtenidas por el modelo elástico fueron menores a las aceleraciones del modelo inelástico. Empleando las propiedades nominales de los dispositivos, las aceleraciones difieren en un 23% entre el análisis espectral lineal (0.13g) y tiempo historia no lineal (0.17g).
- Las derivas de entrepiso, en la superestructura, obtenidas por el modelo elástico fueron menores a las derivas del modelo inelástico. Empleando las propiedades nominales de los dispositivos, las derivas varían en un 11% entre el análisis espectral lineal (0.0024) y tiempo historia no lineal (0.0027).
- El desplazamiento total máximo en la plataforma de aislamiento usando un modelo elástico es casi similar al desplazamiento del modelo inelástico. Empleando las propiedades del límite superior de los dispositivos, en el análisis espectral lineal y tiempo historia no lineal se obtuvieron desplazamientos máximos de 31.1 cm y 25.3 cm respectivamente, la variación ente los análisis mencionados es de alrededor de 18%.
- Se considera que las diferencias de los resultados entre el modelo elástico e inelástico con respecto a las aceleraciones y derivas en la superestructura se debe a que el modelo elástico con amortiguamiento equivalente de fluido viscoso no logra representar adecuadamente el proceso de disipación de

energía a lo largo de todo el movimiento. Esto podría atribuirse a que el modelo equivalente se construye únicamente en el ciclo que corresponde al desplazamiento máximo del modelo inelástico.

- Se considera que la similitud de desplazamiento en la plataforma de aislamiento entre el modelo elástico e inelástico se debe a que el modelo elástico con amortiguamiento equivalente representa adecuadamente la disipación de energía en el ciclo de desplazamiento máximo del modelo inelástico.
- En el análisis elástico de un edificio aislado se puede representar la fracción del amortiguamiento equivalente del sistema de aislamiento ξ_b mediante una distribución de la constante de amortiguamiento del sistema de aislamiento C_b en los dispositivos. En este caso, se debe tener en cuenta que el amortiguamiento del sistema de aislamiento incrementa artificialmente el amortiguamiento de los modos que corresponden a deformaciones predominantes en la superestructura (modos 4,5,...), lo que provoca que haya una reducción en las derivas de entrepiso y aceleraciones de piso.

Respecto a la influencia de la variabilidad de propiedades del dispositivo

- Según el procedimiento de diseño del sistema de aislamiento se debe definir un rango de variación para las propiedades nominales de los dispositivos mediante factores de modificación máximos y mínimos ($\lambda_{m\acute{a}x}$ y $\lambda_{m\acute{i}n}$). En este trabajo se emplearon factores de modificación máximos y mínimos de 1.70 y 0.8 para la rigidez K_2 , y de 2 y 0.8 para la fuerza de activación del sistema de aislamiento Q . En base a los factores mencionados, se definió un rango de diseño aceptable para la rigidez equivalente entre 48 ton/m y 106 ton/m.
- Empleando las propiedades del límite superior e inferior de los dispositivos, se observó que las aceleraciones absolutas máximas y derivas de entrepiso obtenidas por el modelo inelástico fueron mayores a las del modelo elástico.

- Las propiedades del límite superior del rango originan que el sistema de aislamiento sea menos eficiente respecto a las propiedades nominales, ya que hay un incremento en el amortiguamiento equivalente y en las derivas de la superestructura debido a que el cociente $\frac{T_f}{T_b}$ aumenta. En el análisis tiempo historia no lineal, para el registro de Lima y callao 1966, con propiedades nominales y propiedades del límite superior de los dispositivos se obtuvieron derivas máximas de 0.0026 y 0.0041 respectivamente (incremento del 58% respecto al nominal). También, hay una variación en las aceleraciones de piso, la aceleración máxima difiere en un 72% entre las propiedades con límite superior (0.31g) y nominal (0.18g).
- Las propiedades del límite inferior del rango originan que el sistema de aislamiento sea más eficiente respecto a las propiedades nominales, ya que hay una reducción en el amortiguamiento equivalente y en las derivas de la superestructura debido a que el cociente $\frac{T_f}{T_b}$ se reduce. En el análisis tiempo historia no lineal, para el registro de Lima y callao 1966, con propiedades nominales y propiedades del límite inferior de los dispositivos se obtuvieron derivas máximas de 0.0026 y 0.0021 respectivamente (reducción del 19% respecto al nominal). También, hay una variación en las aceleraciones de piso, la aceleración máxima difiere en un 17% entre las propiedades con límite inferior (0.15g) y nominal (0.18g).
- El periodo equivalente del sistema de aislamiento con propiedades del límite superior (3.04s) varió en un 45 % respecto al periodo equivalente con propiedades del límite inferior (4.41s).
- En base a los resultados obtenidos en el análisis tiempo historia con propiedades del límite superior, para el registro de Lima y callao 1966, el desplazamiento de la superestructura respecto a la plataforma (3.7 cm) es del orden de **0.15 veces** el desplazamiento de la plataforma respecto del suelo (24.3) cm. Empleando las propiedades del límite inferior el desplazamiento de

la superestructura respecto a la plataforma (2.4 cm) es del orden de **0.11 veces** el desplazamiento de la plataforma respecto del suelo (22.1) cm.

Respecto a los elementos no estructurales

- El diseño del sistema de aislamiento permitió cuidar los elementos no estructurales susceptibles de daño por desplazamientos de entrepiso y aceleraciones máximas de piso.
- Los resultados del estudio indican (promedio de los 7 registros) que las derivadas de entrepiso y las aceleraciones máximas de piso varían en los extremos del intervalo de 0.0020 a 0.0038 y 0.16g a 0.28g respectivamente.
- Se sugiere realizar un diseño de los elementos no estructurales usando espectros de piso que muestran la tendencia de los armónicos predominantes que reciben los elementos no estructurales en su base (armónicos cercanos a los periodos de la estructura aislada en vibración libre). Al evaluar un tabique de periodo corto (0.14s) se observó que la aceleración espectral fue muy similar a la aceleración máxima del piso y que el tabique permanecería elástico. Cabe mencionar que, esta tendencia no puede ser extensiva para elementos no estructurales que tengan periodos cercanos a los picos del espectro lo que reafirma la necesidad de usar para el diseño de estos elementos los espectros de piso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar Falconí, R., Almazán, J. L., Dechent, P., & Suárez, V. (2008). Aisladores de Base Elastoméricos y FPS.
- Naeim, F., & Kelly, J. M. (1999). Design of seismic isolated structures: from theory to practice. John Wiley & Sons.
- Chopra, A. K. (2017). Dynamics of Structures. Theory and Applications to. Earthquake Engineering.
- Muñoz Peláez, Alejandro. Ingeniería Sismorresistente. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, 1999.
- Blasco, A. B. (1997). Estructuración y diseño de edificaciones de concreto armado. Colegio de Ingenieros del Perú. Consejo Departamental de Lima. Capítulo de Ingeniería Civil.
- Ottazzi Pasino, G. (2012). Apuntes del curso concreto armado 1. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Departamento de Ingeniería, Sección Ingeniería Civil.
- American Society of Civil Engineers. (2010). Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. Virginia: American Society of Civil Engineers.
- American Society of Civil Engineers. (2016). Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. Virginia: American Society of Civil Engineers.
- Building Seismic Safety Council (US), & Applied Technology Council. (1997). NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings (Vol. 1). Federal Emergency Management Agency.
- Council, B. S. S. (2012). NEHRP Recommended Seismic Provisions: Design Examples: FEMA P-751.
- (PrNCh2745), 2013. Versión Final Comité- PrNCh2745 Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica.
- Reglamento Nacional de Edificaciones. Norma E.020, Cargas (2006). Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, Lima-Perú.
- Reglamento Nacional de Edificaciones. Norma E.030, Diseño Sismorresistente (2017). Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, Lima-Perú.
- Reglamento Nacional de Edificaciones. Proyecto de Norma E.031, Aislamiento Sísmico (2018). Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, Lima-Perú.

- Reglamento Nacional de Edificaciones. Norma E.060, Concreto Armado (2009). Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, Lima-Perú.
- Morales-Soto, N., & Sato-Onuma, J. (2008). Vulnerabilidad sísmica del componente organizativo y funcional de grandes hospitales. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica*, 25(2), 225-229.
- Krauskopf, R. B., Inostroza, M. A., & Urzúa, C. O. (1996). Capacidad de respuesta de hospitales ante desastres sísmicos: Aspectos no estructurales. Chile. Universidad de Chile. Departamento de Ingeniería Civil.
- Saavedra, M. (2005). Análisis de edificios con aisladores sísmicos mediante procedimientos simplificados (Tesis de pregrado). Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile
- Bonilla, L. (2012). Teoría del aislamiento sísmico para edificaciones (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Oviedo, J. A., & del Pilar Duque, M. (2013). Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones. *Revista EIA*, 3(6), 105-120.
- Sarrazin, M., Moroni, M. O., Romo, D., Quintana, J., & Soto, P. (2002). Respuesta sísmica de puentes chilenos con apoyos aislantes. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 2(2), 31.
- BRIGGESTONE. (2013). Seismic isolation product line-up. In Bridgestone (Ed.).
- Cámara Chilena de la Construcción-Corporación de Desarrollo Tecnológico, CTD. (Noviembre de 2011). Protección Sísmica de Estructuras "Sistemas de Aislación Sísmica y Disipación de Energía". Documentos técnicos-Corporación de Desarrollo Tecnológico, CTD. Recuperado el 24 de noviembre de 2015, de Corporación de Desarrollo Tecnológico, CTD.