

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



Análisis y diseño de un edificio con aisladores sísmicos en  
Guatemala

Trabajo de graduación presentado por José Antonio Letona  
Samayoa para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería  
Civil

Guatemala

2018



# Análisis y diseño de un edificio con aisladores sísmicos en Guatemala

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



Análisis y diseño de un edificio con aisladores sísmicos en  
Guatemala

Trabajo de graduación presentado por José Antonio Letona  
Samayoa para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería  
Civil

Guatemala

2018


Vo. Bo:

(f)   
Ing. Mario Enrique Rosada Orozco

Tribunal Examinador:

(f)   
Ing. Mario Enrique Rosada Orozco

(f)   
Ing. Roberto Godo Levensen

(f)   
Ing. Luis Alberto Díaz Coto

Fecha de aprobación: Guatemala, 6 de diciembre de 2018

## PREFACIO

Esta investigación nació del interés del autor por lograr una comprensión más profunda sobre el uso de “aisladores elastoméricos” como una alternativa para reducir la rigidez de una estructura, con el propósito de lograr un mejor desempeño sismo-resistente de la edificación y un mejor control de daños durante un sismo, así como por su relativa simplicidad y su bajo costo en comparación con otros sistemas de protección sísmica.

A pesar que Guatemala se ubica en el límite tectónico entre la placa del Caribe y la de Norte América y que a lo largo de la franja costera suroccidental en el Pacífico la placa de Cocos empuja contra la del Caribe, originando zonas de alto riesgo en todo el país, la norma de construcción aún considera la ductilidad de los materiales para deformarse inelásticamente y así evitar el colapso de las edificaciones ante sismos severos.

Esta tecnología de finales de los años 60 y principios de los 70 está siendo reemplazada en muchos países alrededor del mundo potencialmente expuestos a un desastre sísmico. La posibilidad que un terremoto de gran magnitud ocurra en nuestro país es objeto de reflexión y debate, razón por la cual el autor pretende con esta investigación exponer las ventajas que los “aisladores elastoméricos” brindan como nueva técnica constructiva.

Es así como el presente Trabajo de Graduación procura dar al lector espacio para la discusión sobre la manera de mitigar los efectos que los terremotos producen en edificios y más allá de prevenir su colapso y evitar la pérdida de vidas humanas, se centre en mantener la funcionalidad de la estructura después del sismo, cuya finalidad es la que se persigue con esta investigación.

# ÍNDICE

PREFACIO .....	v
LISTA DE CUADROS .....	viii
LISTA DE FIGURAS .....	ix
RESUMEN .....	xiii
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. OBJETIVOS .....	3
A. General.....	3
B. Específicos .....	3
III. JUSTIFICACIÓN .....	5
IV. ANTECEDENTES .....	7
V. MARCO TEÓRICO .....	11
A. Normas de seguridad estructural de edificaciones .....	11
1. Concepto .....	11
2. Normas y códigos internacionales .....	12
3. Normas nacionales .....	15
B. SISMOLOGÍA.....	16
1. Concepto .....	16
2. Ondas sísmicas.....	17
3. Magnitud e intensidad de los sismos .....	21
C. ESTRUCTURAS SISMO-RESISTENTES .....	26
1. Concepto .....	26
2. Comportamiento sísmico de las estructuras.....	27
3. Períodos de vibración de las edificaciones.....	30
4. Efecto del amortiguamiento en la respuesta de las edificaciones .....	35

5.	Espectros de respuesta y de diseño .....	37
6.	Desplazamientos y derivas horizontales.....	40
D.	AISLADORES SÍSMICOS DE BASE .....	41
1.	Concepto .....	41
2.	Eficiencia de la aislación sísmica de base .....	42
3.	Tipos de aisladores sísmicos de base .....	44
4.	Consideraciones de diseño .....	49
5.	Consideraciones económicas .....	55
VI.	METODOLOGÍA .....	61
A.	CRITERIOS DE DISEÑO SÍSMICO .....	61
1.	Marco de referencia .....	61
2.	Descripción del edificio .....	61
3.	Criterios de análisis.....	64
B.	ANÁLISIS Y CÁLCULO ESTRUCTURAL DEL EDIFICIO .....	77
1.	Análisis del edificio sin aisladores elastoméricos .....	77
2.	Análisis del edificio con aisladores elastoméricos .....	88
3.	Análisis del edificio en Ciudad de Guatemala.....	101
VII.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	109
VIII.	CONCLUSIONES .....	115
IX.	RECOMENDACIONES.....	117
X.	BIBLIOGRAFÍA .....	119
XI.	ANEXOS .....	123
XII.	GLOSARIO .....	135



## LISTA DE CUADROS

Cuadro No. 1 Escala de Mercalli Modificada .....	22
Cuadro No. 2 Escala EMS .....	23
Cuadro No. 3 Propiedades de ingeniería para un aislador con núcleo de plomo .....	48
Cuadro No. 4 Propiedades de ingeniería para un aislador con núcleo de plomo .....	49
Cuadro No. 5 Masas correspondientes a cada nivel del edificio .....	63
Cuadro No. 6 Clases de importancia y factores de importancia $\gamma_I$ recomendados – EC 8 .....	65
Cuadro No. 7 Categoría de riesgo y factores de importancia $I_e$ recomendados – ASCE 7-10 .....	65
Cuadro No. 8 Categorías de ocupación y factores $K_d$ recomendados – AGIES NSE (2017) .....	66
Cuadro No. 9 Comparación de la clasificación y de los factores recomendados.....	66
Cuadro No. 10 Carga de ocupación – AGIES NSE (2017) .....	67
Cuadro No. 11 Tipo de suelo y sus propiedades a 30 metros – EC 8 .....	68
Cuadro No. 12 Clase de sitio y sus propiedades a 30 metros – ASCE 7-10 .....	69
Cuadro No. 13 Clase de suelo y sus propiedades a 30 metros – AGIES NSE (2017) .....	69
Cuadro No. 14 Comparación de tipo de suelo / clase de sitio.....	70
Cuadro No. 15 Comparación de sismicidad .....	72
Cuadro No. 16 Proporciones de masas de participación modal para el edificio con base fija.....	81
Cuadro No. 17 Derivas últimas máximas tolerables .....	87
Cuadro No. 18 Factor $B_D$ o $B_M$ .....	95
Cuadro No. 19 Proporciones de masas de participación modal para edificio con base aislada...	97
Cuadro No. 20 Comparación entre periodos de la estructura base fija y aislada .....	101
Cuadro No. 21 Estado de daño - Deformación de entrepiso.....	107
Cuadro No. 22 Estado de daño - Costo de reparación.....	107
Cuadro No. 23 Relación del Índice de daño - Costo de reparación .....	108

## LISTA DE FIGURAS

Figura No. 1 Normas ASCE .....	12
Figura No. 2 Eurocódigo 8 .....	14
Figura No. 3 NSE 3: Diseño Estructural de Edificaciones 2017 .....	15
Figura No. 4 Amplitud de onda .....	18
Figura No. 5 Período de la onda.....	18
Figura No. 6 Amplitud y período de onda respecto hipocentro .....	18
Figura No. 7 Trayectoria y amplitud de onda.....	19
Figura No. 8 Periodos y frecuencia en relación a tipo de suelo .....	19
Figura No. 9 Tipos de onda y su movimiento característico.....	21
Figura No. 10 Amplitud y $\Delta t$ en ondas P y S .....	24
Figura No. 11 Nomograma para cálculo de Magnitud Richter .....	24
Figura No. 12 Momento sísmico .....	25
Figura No. 13 Relación entre Magnitud de momento y otras magnitudes .....	26
Figura No. 14 Periodo de vibración de un sistema de 1 grado de libertad.....	28
Figura No. 15 Distintas respuestas de un edificio según su periodo de vibración .....	29
Figura No. 16 Modos de vibración de un edificio.....	29
Figura No. 17 Aceleración en función de los períodos de oscilación del edificio y del sismo.....	30
Figura No. 18 Relación entre aceleración, distancia al epicentro y periodo de la estructura.....	31
Figura No. 19 Péndulos invertidos de distinta altura .....	31
Figura No. 20 Edificio de tres niveles y sus modos de vibrar .....	32
Figura No. 21 Edificio como péndulo con masas concentradas.....	32
Figura No. 22 Modos de vibración y fuerzas inerciales .....	33
Figura No. 23 Variación de amplitud, periodo y distancia a epicentro .....	34
Figura No. 24 Amplificación de amplitud para depósito de suelo blando .....	34
Figura No. 25 Amortiguamiento de la vibración de un péndulo invertido .....	37
Figura No. 26 Respuesta de edificio ante la aceleración por sismo.....	37
Figura No. 27 Respuesta de un sistema idealizado ante una excitación sísmica.....	38
Figura No. 28 Espectro de respuesta .....	38
Figura No. 29 Espectro de diseño formado por tres espectros de respuesta .....	39
Figura No. 30 Espectro de diseño normalizado.....	39
Figura No. 31 Espectro de diseño y fuerzas actuantes en edificación.....	40

Figura No. 32 Derivas de piso .....	41
Figura No. 33 Comportamiento de edificio con base fija y aislada.....	43
Figura No. 34 Disminución de la aceleración con aislamiento sísmico.....	43
Figura No. 35 Esquema de un aislador deslizante .....	44
Figura No. 36 Ensayo de un aislador elastomérico .....	46
Figura No. 37 Aislador de caucho de bajo amortiguamiento.....	46
Figura No. 38 Aislador de caucho de alto amortiguamiento.....	47
Figura No. 39 Aislador de núcleo de plomo.....	48
Figura No. 40 Propiedades técnicas de un aislador con núcleo de plomo.....	48
Figura No. 41 Interfaz de aislamiento en primer nivel .....	50
Figura No. 42 Interfaz de aislamiento en cimentación.....	50
Figura No. 43 Interfaz colocada sobre pilotes .....	50
Figura No. 44 Sección esquemática de un aislador .....	51
Figura No. 45 Nakanoshima Festival Tower.....	52
Figura No. 46 Aislador con manta ignífuga.....	53
Figura No. 47 Aislador con caja protectora al fuego.....	53
Figura No. 48 Torre del edificio aislada en el primer entrepiso .....	54
Figura No. 49 Torre del edificio totalmente aislada .....	54
Figura No. 50 Edificio totalmente aislado .....	54
Figura No. 51 Torre del edificio parcialmente aislada .....	55
Figura No. 52 Distribución óptima de sistema híbrido .....	57
Figura No. 53 Tipos de disipadores sísmicos.....	58
Figura No. 54 (a) Amortiguadores (b) Disipadores de fricción .....	58
Figura No. 55 Edificio Torre del Sol.....	60
Figura No. 56 Planta típica y planta de sótanos del edificio a utilizar .....	62
Figura No. 57 Sección transversal del edificio a utilizar .....	63
Figura No. 58 Mapa de peligro sísmico de Europa .....	71
Figura No. 59 Mapa de peligro sísmico de Estados Unidos.....	71
Figura No. 60 Mapa de zonificación sísmica de Guatemala .....	72
Figura No. 61 Componentes para configuración del espectro de diseño – EC 8 .....	73
Figura No. 62 Espectro de respuesta para distintos tipos de suelo .....	74
Figura No. 63 Espectro de diseño obtenido según Eurocódigo 8 .....	74
Figura No. 64 Componentes para configuración del espectro de diseño – ASCE 7-10 .....	75

Figura No. 65 Espectro de diseño obtenido según ASCE 7-10 .....	76
Figura No. 66 Espectro de diseño obtenido según AGIES NSE (2017).....	77
Figura No. 67 Modelo 3D del edificio.....	81
Figura No. 68 Posición de la interfaz de aislamiento.....	88
Figura No. 69 Ubicación de los aisladores .....	89
Figura No. 70 Representación del aislador con vigas de amarre – ETABS 2016.....	90

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico No. 1 Cortante basal dirección X e Y para edificio con base fija .....	82
Gráfico No. 2 Desplazamiento X en Eje C6 para edificio con base fija .....	83
Gráfico No. 3 Desplazamiento Y en Eje C6 para edificio con base fija .....	83
Gráfico No. 4 Deriva X en Eje C6 para edificio con base fija .....	84
Gráfico No. 5 Deriva Y en Eje C6 para edificio con base fija .....	84
Gráfico No. 6 Deriva última X en Eje C6 para edificio con base fija .....	85
Gráfico No. 7 Deriva última Y en Eje C6 para edificio con base fija .....	85
Gráfico No. 8 Cortante basal en dirección X e Y para edificio con base aislada .....	97
Gráfico No. 9 Desplazamiento X para edificio con base aislada .....	98
Gráfico No. 10 Desplazamiento Y para edificio con base aislada .....	98
Gráfico No. 11 Deriva X en eje C6 para edificio con base aislada .....	99
Gráfico No. 12 Deriva Y en eje C6 para edificio con base aislada .....	99
Gráfico No. 13 Deriva última Y en eje C6 para edificio con base aislada .....	100
Gráfico No. 14 Deriva última Y en eje C6 para edificio con base aislada .....	100
Gráfico No. 15 Cortante basal para edificio en Ciudad de Guatemala .....	102
Gráfico No. 16 Desplazamiento X para edificio en Ciudad de Guatemala .....	103
Gráfico No. 17 Desplazamiento Y para edificio en Ciudad de Guatemala .....	103
Gráfico No. 18 Deriva X en eje C6 para edificio en Ciudad de Guatemala .....	104
Gráfico No. 19 Deriva Y en eje C6 para edificio en Ciudad de Guatemala .....	104
Gráfico No. 20 Deriva última X en eje C6 para edificio en Ciudad de Guatemala .....	105
Gráfico No. 21 Deriva última Y en eje C6 para edificio en Ciudad de Guatemala .....	105
Gráfico No. 22 Costo de inversión inicial para edificio en Ciudad de Guatemala .....	106
Gráfico No. 23 Costo total proyectado para edificio en Ciudad de Guatemala .....	108

## RESUMEN

Las recientes tecnologías de protección sísmica para edificios involucran novedosos sistemas que aíslan la estructura, amortiguan las vibraciones y disipan la energía generada por los movimientos tectónicos, mejorando la seguridad estructural del edificio y previendo su funcionalidad después del sismo. Entre ellos, el “aislamiento sísmico” separa la edificación de los movimientos del suelo mediante la colocación de dispositivos flexibles entre la estructura y su cimentación.

Los “aisladores elastoméricos” permiten un gran desplazamiento horizontal y ofrecen una alta rigidez vertical; son dispositivos formados básicamente por láminas de caucho natural intercaladas con placas de acero, vulcanizadas entre sí. Se fabrican a medida para cada proyecto conforme la rigidez horizontal, rigidez vertical, desplazamiento, capacidad de carga y la capacidad de amortiguamiento requerida.

Esta investigación analiza el comportamiento sísmico, con y sin aisladores elastoméricos de base, de un edificio de seis niveles ubicado en la ciudad de Guatemala, asistiéndose del software ETABS 2016 para la modelación y el análisis de estructuras, con el objeto de medir la respuesta de la edificación al impacto sísmico en cada caso, comparar sus resultados, determinar las ventajas del uso de aisladores en relación a la demanda sísmica y los costos de ambos diseños estructurales.

# I. INTRODUCCIÓN

Guatemala es uno de los países alrededor del mundo más vulnerables ante la probable ocurrencia de un evento sísmico de considerable intensidad. La permanente amenaza sísmica que en cualquier momento podría impactar al territorio nacional, el incremento de edificaciones construidas en sitios improvisados o zonas de alto riesgo, la acostumbrada construcción empírica y/o de manera negligente de viviendas, el repetido uso de los sistemas constructivos tradicionales de mampostería bajo condiciones inadecuadas de diseño y construcción, el habitual empleo de materiales de mala calidad y la falta de obligatoriedad de una normativa de construcción nacional, son factores acumulativos que incrementan las posibilidades de exposición a un inminente desastre.

Mundialmente, las tecnologías de vanguardia en el campo de la aislación sísmica de base han ido posicionándose en el mercado de la construcción, ofreciendo un sistema de protección sísmica confiable y económico frente a otras posibilidades tecnológicas de mayor desarrollo. La continuidad en el funcionamiento de las instalaciones vitales después de un terremoto y la inmediata recuperación de las actividades civiles, comerciales y productivas, requieren que ciertas edificaciones puedan continuar funcionando inmediatamente después de un movimiento telúrico. A pesar de lo vulnerable que son las edificaciones en nuestro país por el elevado riesgo sísmico, la actual práctica constructiva y las normativas de construcción no consideran el uso de tecnologías de aislamiento sísmico con el objeto de proteger sísmicamente a las estructuras.

Una de las finalidades de esta investigación es aportar fundamentos teóricos que consideren y promuevan el uso de esta tecnología en Guatemala, para que además de emplearse en el diseño estructural de nuevos edificios, se adapte en edificios ya existentes, estructuras antiguas que no fueron construidas con bases sísmicas o para rescatar y preservar monumentos históricos. Para ello, se presenta un análisis comparativo de las normativas de construcción europea EN 1998 (2004), estadounidense ASCE 7-10 y nacional AGIES NSE (2017), a partir del diseño de un edificio de base fija y luego con aislamiento sísmico de base. El estudio se enfoca metodológicamente en estudiar las similitudes y diferencias en los procesos de evaluación y cálculo de la respuesta sísmica entre normativas, pero principalmente, en el análisis de los métodos, consideraciones y criterios de diseño sísmico integrando el aislamiento sísmico de base en el diseño del edificio.

Finalmente, según los resultados obtenidos y de acuerdo al criterio del autor, la mayor aportación de esta investigación es proponer la adopción de dispositivos de asilamiento sísmico para aumentar la tolerancia sobre los niveles de riesgo sísmico del país y recomendar, además de la obligatoriedad de las normativas de construcción, que las mismas, junto a una práctica constructiva proactiva, adopten el uso de tecnologías de aislamiento sísmico para proteger sísmicamente a las estructuras, con el fin de proteger la vida, pero al mismo tiempo, proveer un mínimo de calidad estructural que permita resistir las fuerzas de un considerable terremoto, sin que aparezcan daños que limiten su uso y funcionalidad.



## II. OBJETIVOS

### A. General

- Profundizar en el estudio y la aplicación de las nuevas tecnologías de control sísmico orientadas a incrementar la capacidad de las edificaciones para resistir el impacto de los terremotos, a fin de mejorar su seguridad estructural, con el objeto de resguardar su total funcionalidad después del sismo.

### B. Específicos

- Conocer cómo funcionan los distintos tipos de “aisladores sísmicos de base” a fin de mejorar la respuesta dinámica y el comportamiento sismo-resistente de las edificaciones aplicando solamente medios mecánicos, junto al análisis comparativo del comportamiento estructural y de las diferencias en los costos entre los sistemas constructivos con cimentación de base fija y el uso de aisladores elastoméricos.

- Presentar cómo los “aisladores elastoméricos” proveen la suficiente flexibilidad que permite aumentar el período natural de la edificación no aislada y disminuir la aceleración sobre la edificación aislada, facilitando de esta forma la reducción de cortante en la superestructura, el amortiguamiento y la absorción de vibraciones, reduciendo así las deformaciones de la edificación.

- Contribuir con esta investigación a promover el uso de esta tecnología en Guatemala, para que además de emplearse en el diseño estructural, se adapte en edificios ya existentes, estructuras antiguas que no fueron construidas con bases sísmicas o para rescatar y preservar monumentos históricos.



### III. JUSTIFICACIÓN

En los últimos años una gran cantidad de investigaciones alrededor del mundo han sido desarrolladas con el fin de implementar métodos constructivos que logren mitigar con efectividad los efectos devastadores provocados por los terremotos, de hecho, hoy en día existen monumentales estructuras en algunos de los países más susceptibles a sufrir de fenómenos sísmicos, construidas y/o reforzadas empleando distintas tecnologías innovadoras en el diseño sismo-resistente.

A pesar que la adopción de estos sistemas de protección sísmica en el diseño de la estructura representa un costo adicional, éste debe considerarse como una inversión sumamente conveniente, no sólo por la reducción de los posibles daños que el sismo pudiera ocasionarle a la edificación en sí y su contenido, sino también porque aumenta la seguridad y las probabilidades de sobrevivencia de las personas que permanecen dentro o transitan en sus alrededores.

Guatemala, por encontrarse en el denominado “Cinturón de Fuego del Pacífico”, es un país altamente propenso a las catástrofes sísmicas (hechos que vienen documentándose desde mediados del siglo XVI), razón por la que ingenieros, inversionistas y empresarios del sector de la construcción deben fomentar una “cultura de prevención sísmica” que implemente la adopción de sistemas y dispositivos de protección sísmica, no solo para mejorar el comportamiento de las edificaciones y reducir el riesgo de su colapso, sino también para asegurar la completa funcionalidad del edificio después del sismo.

En este sentido, el propósito de esta investigación se justifica en el hecho que, a pesar de la vulnerabilidad de las edificaciones por el elevado riesgo sísmico en nuestro país, la práctica constructiva actual no considera la aplicación de nuevas tecnologías con el objeto de aislar la estructura, amortiguar las vibraciones y disipar la energía generada por los movimientos tectónicos, lo cual motiva al autor a realizar un estudio a fin de presentar las ventajas que brindan los aisladores sísmicos elastoméricos para modificar las características dinámicas y el comportamiento sismo-resistente de las edificaciones en nuestro país, enfocándose tal estudio, en la ciudad de Guatemala.

Con esta propuesta, el autor espera contribuir a fomentar el interés por los aisladores de base, para que además de innovar el actual diseño sísmico de estructuras de concreto para edificios en Guatemala, se convierta en una práctica constructiva que, incluso bajo condiciones sísmicas severas, asegure primordialmente la vida de las personas y disminuya el daño en elementos estructurales. Beneficiándose así, a un gran segmento de la población urbana y de nuestras ciudades, al mismo tiempo que el sector de la construcción se verá favorecido por lograr la edificación de estructuras más esbeltas, readecuar o reparar las ya existentes y en relación con los costos de reparación, lograr estructuras más eficientes y económicas.

Finalmente, como un estudio de referencia en cuanto al uso de aisladores elastoméricos para el diseño sísmico de edificios en Guatemala, la presente investigación se apoyará en las distintas normas y códigos internacionales y en la búsqueda de fuentes bibliográficas especializadas en las más recientes tecnologías de aislamiento sísmico de base que han demostrado su eficiencia en edificaciones alrededor del mundo y que actualmente están disponibles en el mercado internacional, así como en la indagación de proveedores locales, regionales e incluso globales, a fin de conocer los tipos de aisladores que mejor se adapten a las condiciones particulares de nuestro territorio.

## IV. ANTECEDENTES

Históricamente el hombre ha aprovechado los materiales disponibles y la tecnología de la época para concebir colosales edificaciones y fantásticos monumentos. Desde la fundación de las primeras ciudades hasta finales del siglo XIX, la estabilidad de los edificios se lograba en base al grosor y al peso propio de sus elementos estructurales; el surgimiento de nuevos materiales y la evolución de los sistemas constructivos en los inicios del siglo XX posibilitaron la construcción de imponentes rascacielos en muchas de las modernas metrópolis del mundo.

El concreto reforzado, una innovación de mediados del siglo pasado, tuvo una súbita demanda por su capacidad para soportar esfuerzos de compresión, tensión, corte y torsión, su resistencia al fuego y su alto grado de durabilidad además de requerir muy poco mantenimiento. Aunque principalmente, esto fue por su formidable adaptabilidad a diversas formas y configuraciones arquitectónicas, a pesar que la industrialización de los perfiles metálicos a finales del XIX había permitido alcanzar mayores alturas con estructuras más ligeras.

El acelerado avance tecnológico y el continuo mejoramiento de mezclas dosificadas con menos cemento, pero de mejor calidad, al igual que el uso de refuerzos de alta resistencia con menor peso y de avanzados métodos de cálculo, han permitido la construcción masiva de edificaciones de concreto eliminando muros y elementos estructurales sobredimensionados y pesados. Todo esto permite aligerar la estructura del edificio, disminuir su costo y obtener un mayor espacio edificable, aunque el peso del mismo siempre será más crítico conforme a su altura.

Por otra parte, las edificaciones son sometidas a diversos esfuerzos durante su vida útil, unos resultantes de las cargas propias del edificio y otros producidos por fenómenos naturales como los terremotos. Durante un sismo, la energía liberada se propaga por el suelo y es transmitida a la estructura; la disipación de tal energía se produce por la interacción suelo-cimentación, así como por la fricción interna de los elementos. Cuando los elementos ya no son capaces de disipar la energía se generan deformaciones y, si éstas son muy grandes, pueden ocasionar daños en muros, vigas, columnas, losas y otros elementos estructurales, e incluso, pudiendo llegar al colapso del edificio.

En Guatemala, el diseño sismo-resistente de edificios se basa en la capacidad de la estructura para absorber y disipar la energía del sismo mediante deformaciones inelásticas, con la intención que la edificación sufra daños, pero sin que llegue a colapsar. Estas deformaciones se vuelven más críticas conforme mayor es la carga sísmica y el tiempo que ésta dure; cuando un sismo es muy severo, una inminente falla en el concreto reforzado provocaría que el edificio experimente un daño estructural irreversible, e incluso, irreparable.

Alrededor del mundo, las nuevas tecnologías de protección sísmica buscan mejorar el comportamiento de las edificaciones más allá de la “prevención del colapso”, con el objeto de resguardar su total funcionalidad después del sismo. Estas procuran disminuir las fuerzas inducidas sobre el edificio durante el sismo, logrando que la estructura continúe esencialmente en el rango elástico durante los terremotos de gran magnitud. Se diferencian de los métodos actuales que buscan aumentar las capacidades de resistencia y deformación de los elementos estructurales.

Países como Nueva Zelanda, Japón y Estados Unidos, durante las últimas décadas han dedicado notables esfuerzos a la investigación de diversos sistemas para modificar las características dinámicas y el comportamiento sismo-resistente de las edificaciones. Entre ellos se puede mencionar el “aislamiento sísmico de base”, el cual separa el edificio de los movimientos del suelo mediante la colocación de dispositivos flexibles entre la estructura y su cimentación, con el objeto de amortiguar las vibraciones y disipar la energía generada por los sismos.

Tales dispositivos buscan reducir los esfuerzos inducidos por el sismo y las deformaciones de la estructura; a diferencia de otras técnicas de control sísmico, reducen notablemente la rigidez del sistema estructural y proveen la suficiente flexibilidad horizontal, haciendo que el período de vibración de la estructura aislada sea mucho mayor (aproximadamente tres veces más) que el de la misma estructura sin sistema de aislamiento. Esto logra obtener una aceleración menor sobre la edificación aislada que con la edificación con base fija.

El “aislamiento sísmico de base” actualmente es utilizado en muchos países para la protección sísmica de diversos tipos de estructuras. Además de emplearse en el diseño estructural de nuevas edificaciones, es especialmente útil para el reacondicionamiento de edificios ya existentes, la rehabilitación de estructuras antiguas que no fueron construidas con bases sísmicas o para reforzar y proteger monumentos y construcciones con un gran valor histórico, patrimonial o arquitectónico que requieran ser rescatados y/o preservados.

Un tipo de estos dispositivos son los “aisladores elastoméricos”, los cuales permiten un gran desplazamiento horizontal y ofrecen una alta rigidez vertical aplicando solamente medios mecánicos. Estos son dispositivos formados básicamente por láminas de caucho natural intercaladas con placas de acero, vulcanizadas entre sí. Se fabrican a la medida para cada proyecto conforme la rigidez horizontal, rigidez vertical, desplazamiento, capacidad de carga y la capacidad de amortiguamiento requerida.





## V. MARCO TEÓRICO

### A. Normas de seguridad estructural de edificaciones

#### 1. Concepto

Las normativas de diseño sismo-resistente para edificaciones a nivel mundial han sido desarrolladas con el propósito de regular los procesos constructivos e incluir metodologías de análisis y cálculo que mejoren la respuesta estructural de un edificio ante un sismo; una norma de esta naturaleza es un código que provee los criterios esenciales y los estándares mínimos para mantener y mejorar la calidad y la seguridad de la edificación. Las nuevas tecnologías de protección sísmica apuestan por la total funcionalidad del inmueble después del sismo más allá de la prevención del colapso; prospectiva que está innovando los códigos de construcción en el mundo.

Las primeras normativas que empezaron a incorporar criterios para el diseño de estructuras con aislamiento sísmico de base, las hicieron el “Instituto de Arquitectura del Japón (IAJ)” y la “Asociación de Ingeniería Estructural de California, EE.UU.” en 1986 y el “International Building Code (IBC)” en 2000, siendo estos dos países los principales precursores en el uso de tecnologías de protección sísmica como mecanismos de control estructural y prevención de daños. Estas dos líneas de pensamiento y las recomendaciones de diseño sísmico que ambos han desarrollado, ha causado un paulatino y profundo interés por la implementación de este tipo de técnicas en el diseño de nuevas construcciones y en proyectos de reparación y/o restauración de edificios, monumentos y otras construcciones ya existentes.

Los continuos avances en el campo del análisis sísmico de estructuras, análisis por computadora y simulaciones en mesas vibratorias, pruebas reales de ensayo y error, el desarrollo de nuevos mecanismos de amortiguamiento y el uso de nuevos materiales, sitúan a los sistemas de aislamiento sísmico de base como la alternativa más viable y económica de protección sísmica para países con alto riesgo de sismicidad.

Hoy en día, el uso de estas tecnologías busca reducir substancialmente los daños en la estructura y resguardar su total funcionalidad después del sismo más allá de la prevención del colapso. Este replanteamiento es la razón por la que varios países alrededor del mundo las contemplan en sus normativas de diseño sismo-resistente.

## 2. Normas y códigos internacionales

Hoy en día, la Ingeniería Sísmica ha desarrollado tecnologías con el propósito de proteger a las estructuras de los devastadores efectos provocados por los terremotos. Países como Japón, Estados Unidos, Nueva Zelanda, Corea del Sur, China, Canadá y la Unión Europea, entre otros, han incluido en sus normativas sismo-resistentes los dispositivos de asilamiento sísmico de base para el diseño y construcción de edificios. A continuación, se presentan las normativas consideradas en este trabajo:

### a. American Society of Civil Engineers (ASCE):

La Sociedad Americana de Ingenieros Civiles de EE.UU., promueve desde 1852 las especialidades técnicas de ingeniería civil. Es una fuente acreditada de códigos y normas y el editor de contenido de ingeniería civil más grande del mundo. Impulsa la innovación tecnológica y la aplicación práctica de la investigación adaptadas a la construcción, a través del Instituto de Ingeniería Estructural (SEI), creado en 1996 (ASCE, 2016).

Figura No. 1 Normas ASCE



Fuente: ASCE, 2016

El SEI publica y actualiza normas técnicas con el objeto de promover la seguridad estructural, la productividad y la eficiencia en la construcción de edificios, puentes y otras obras de ingeniería civil. Los estándares de diseño sismo-resistente para edificios y los relacionados a la evaluación sísmica y restauración de edificios existentes, están contenidos en las siguientes normas:

- ASCE/SEI 7-10. Contiene estándares para el diseño general y el diseño sismo-resistente de estructuras.
- ASCE/SEI 7-16. Define y aclara criterios relacionados al ASCE/SEI 7-10.
- ASCE/SEI 41-17. Describe procedimientos para evaluar y reacondicionar edificios existentes de forma que puedan resistir los efectos de los terremotos.
- TIER 1 CHECKLISTS. Establecen la metodología para la evaluación de 15 tipos de construcciones utilizando una colección de 34 listas de verificación.

Respecto a los sistemas de protección sísmica, la norma ASCE/SEI 7-10, capítulo 17, especifica los estándares de diseño para estructuras con aisladores sísmicos de base.

Además, define (literalmente) los siguientes conceptos (ASCE, 2010):

«SISTEMA DE AISLAMIENTO: La colección de elementos estructurales que incluye todas las unidades aislantes individuales, todos los elementos estructurales que transfieren fuerza entre los elementos del sistema de aislamiento y todas las conexiones a otros elementos estructurales. El sistema de aislamiento también incluye el sistema de protección contra el viento, los dispositivos de disipación de energía y/o el sistema de restricción de desplazamiento si dichos sistemas y dispositivos se utilizan para cumplir los requisitos de diseño de este capítulo.»

«UNIDAD DE AISLAMIENTO: Un elemento estructural horizontalmente flexible y verticalmente rígido del sistema de aislamiento que permite grandes deformaciones laterales bajo la carga sísmica de diseño. Se permite el uso de una unidad de aislamiento ya sea como parte, o como complemento, del sistema de soporte del peso de la estructura.»

#### b. Eurocode 8 (EC 8):

En 1990, la Unión Europea (UE) inició la emisión de los Eurocódigos, un conjunto de diez normas estructurales individuales cuyo propósito fue unificar y estandarizar criterios y normativas de construcción. Es un código modelo de adopción obligatoria para países miembros UE y es aprobado por el Comité Europeo de Normalización (CEN), el organismo responsable de impulsar la economía, el bienestar de los ciudadanos europeos y proteger el medio ambiente. Denominado EN 1998 (European Norm y el año de su publicación), el EC 8 se aplica al diseño y construcción de edificios y otras obras de ingeniería civil en regiones sísmicas. Su propósito es proteger la vida humana, procurar un daño limitado y asegurar que las estructuras esenciales para la protección civil continúen operativas después de un violento terremoto (JRC, 2011).

Figura No. 2 Eurocódigo 8



Fuente: JRC, 2011

“EC 8 - Design of structures for earthquake resistance”, se divide en 6 Partes. La “Parte 1 - Normas generales, acciones sísmicas y normas para edificios”, se constituye como la esencial, ya que contiene conceptos básicos y estándares para el diseño y construcción de edificios con distintos tipos de materiales estructurales.

En relación a los sistemas de protección sísmica, la “Sección 10 - Base isolation”, de la Parte 1 mencionada anteriormente, contiene los estándares y otros requerimientos de diseño y de seguridad relativos al aislamiento sísmico de base para edificios y otras estructuras.

Además, define los siguientes conceptos (CEN, 2004):

«SISTEMA DE AISLAMIENTO: colección de componentes utilizados para proporcionar aislamiento sísmico, los cuales están dispuestos sobre la interfaz de aislamiento.»

«UNIDADES AISLANTES: elementos que forman el sistema de aislamiento».»

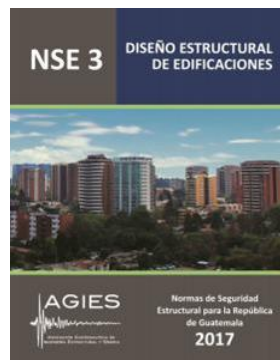
«INTERFAZ DE AISLAMIENTO: superficie que separa la subestructura y la superestructura y donde se ubica el sistema de aislamiento».»

### 3. Normas nacionales

Fundada en 1996, la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (AGIES), es una entidad privada que se dedica a la publicación de reglamentaciones técnicas de diseño estructural con el objeto de producir obras de ingeniería civil seguras y económicas; asimismo, promueve y estimula la investigación científica y tecnológica en el campo de las estructuras y contribuye a la divulgación e intercambio de conocimientos técnicos. Publica además otros documentos entre manuales, guías de diseño e información para el correcto empleo de estas normativas.

AGIES impulsa la aplicación de normas estructurales para el diseño y la construcción de edificaciones en todo el territorio nacional, proyecto que inició en 1986 con motivo del décimo aniversario del terremoto de 1,976. Sus esfuerzos no han logrado darles carácter oficial y legal, pese a que en 2,007 fueron adoptadas por el Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda. En 2010, el nombre "Normas Recomendadas", fue reemplazado por el de "Normas de Seguridad Estructural (NSE)", posándose como la base para el diseño sismo-resistente de las edificaciones en el país. Su objetivo persigue proteger la vida, proveer un mínimo de calidad estructural y proveer protección razonable contra daños causados por amenazas naturales (AGIES, 2017).

Figura No. 3 NSE 3: Diseño Estructural de Edificaciones 2017



Fuente: AGIES, 2017

Las NSE no son de aplicación obligatoria, son disposiciones generales de tipo técnico cuyo objetivo es establecer regulaciones, especificaciones, métodos y procedimientos aplicables al proceso constructivo de edificaciones. En general, estas normas han sido adoptadas por instituciones públicas y empresas privadas como la base del diseño y construcción de edificios y otras obras de ingeniería civil. Los estándares de diseño sismo-resistente para edificios están contenidos en las siguientes Normas AGIES:

- a. NSE 2, Demandas estructurales, condiciones de sitio y niveles de protección.
- b. NSE 3, Diseño Estructural de Edificaciones.

La versión 2017 de estas Normas utilizó como norma modelo el documento ASCE/SEI 7-10 y las disposiciones contenidas en el documento UBC 1997. En cuanto a los sistemas de protección sísmica, las Normas AGIES no incluyen estándares de diseño para estructuras con aisladores sísmicos de base (AGIES, 2017).

## B. SISMOLOGÍA

### 1. Concepto

El estudio de los terremotos y de todos aquellos aspectos relacionados con la recurrencia y las causas que originan los sismos se denomina “Sismología”. Como una rama de la geofísica, analiza el movimiento de las placas tectónicas e investiga sobre la propagación de las ondas sísmicas que viajan en la superficie y profundidades de la Tierra. Incluye el estudio de maremotos, tsunamis, la predicción de terremotos y erupciones volcánicas.

La investigación sismológica se centra en comprender y determinar el origen y la propagación de los sismos con el objeto de elaborar modelos objetivos y acertados que contribuyan a la predicción de terremotos. Por su parte, el estudio de las ondas sísmicas busca medir y evaluar el daño potencial que podría llegar a causar un sismo, según el comportamiento, las características y los rasgos distintivos conforme al medio material que atraviesan. Se basa en la observación y medición de las vibraciones inducidas por los movimientos sísmicos y otras perturbaciones naturales del terreno, así como de las señales sísmicas generadas de forma artificial para la exploración de subsuelos en el caso de la geología, geotecnia y arqueología, entre otras. Es una herramienta conveniente para el estudio de la estructura interna de la Tierra a distintas escalas y profundidades y es una técnica valiosa en la búsqueda de petróleo y minerales (Sauter, 1990).

## 2. Ondas sísmicas

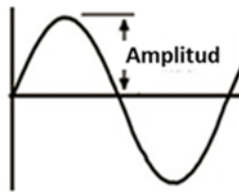
Los sismos y los terremotos se producen cuando las tensiones acumuladas por la deformación de los estratos rocosos de la Litósfera, la capa sólida y superficial de la Tierra, se liberan bruscamente. El manto pétreo sometido a grandes esfuerzos se fractura o desliza de improviso, reacomodándose inmediatamente los materiales y dejando escapar instantáneamente enormes cantidades de energía en forma de ondas que provocan la vibración del suelo y hacen temblar una parte del planeta.

El punto donde se origina el movimiento sísmico se llama “hipocentro”, y está generalmente ubicado en la Litósfera entre la corteza profunda y el manto superior, desde donde se generan y propagan las ondas sísmicas de forma concéntrica y tridimensional. Estas ondas cuando alcanzan el “epicentro”, punto en la superficie ubicado directamente sobre el hipocentro, se vuelven bidimensionales y continúan dispersándose en todas direcciones.

Las ondas viajan a través de un medio sólido y elástico desde donde se origina el sismo; las oscilaciones que se producen se transmiten a los puntos vecinos, los cuales también empiezan a oscilar. Con respecto a la “profundidad focal”, la distancia entre el epicentro y el hipocentro, se distinguen tres tipos de sismos: los superficiales, que se producen en la corteza terrestre a menos de 70 km; los intermedios, entre 70 y 300 km y los más profundos desde 300 hasta 700 km, estos últimos, en el manto superior. Su velocidad depende de la densidad y la elasticidad de los materiales que atraviesan. Viajan más rápido en aquellos materiales rígidos pero que elásticamente recobran su condición original al cesar el esfuerzo que causó su deformación; es decir, viajan más deprisa en un estrato rocoso que en una capa de lodo no consolidada. La velocidad generalmente aumenta con la profundidad, ya que la presión se incrementa y comprime la roca convirtiéndola en un material elástico, pero con mayor densidad (Alfaro, 2010).

La energía que transmiten está asociada con su “amplitud”, la distancia del pico más alto medido desde la línea central. Conforme la onda avanza, el material que atraviesa la amortigua y su amplitud disminuye. Así, cuanto mayor sea la profundidad del hipocentro, menor será la sensación del movimiento sísmico.

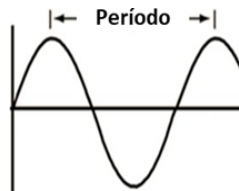
Figura No. 4 Amplitud de onda



Fuente: Elaboración propia

El otro factor que influye en la propagación de los sismos es el “período”, el tiempo que tarda la onda en viajar entre dos puntos de máxima amplitud. Por lo general, las ondas de período corto poseen mayores amplitudes, mientras que las de período largo, amplitudes menores; este comportamiento se observa porque conforme aumenta la distancia, la amplitud de las ondas disminuye.

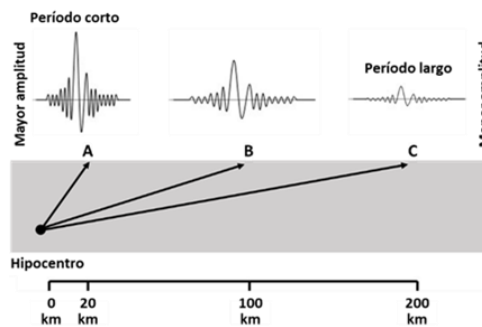
Figura No. 5 Período de la onda



Fuente: Elaboración propia

En consecuencia, la energía que libera un sismo sacude con mayor fuerza las zonas más próximas al hipocentro; conforme se propagan, las ondas empiezan a perder energía y a disminuir su amplitud. Es así, que en el punto A de la Figura No. 6 se percibirá un movimiento mucho más fuerte, pero de menor duración; en B su fuerza disminuirá, pero durará un poco más; y en C será más leve, pero dura mucho más tiempo. A distancias mucho mayores el sismo dejará de ser perceptible (Tarbuck, Lutgens y Tasa, 2005).

Figura No. 6 Amplitud y período de onda respecto hipocentro

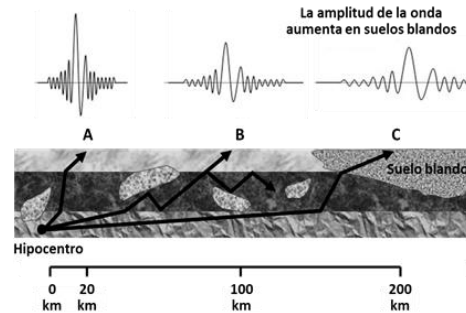


Fuente: Elaboración propia



Las ondas al atravesar materiales con distintas densidades, espesores y consistencias varían su velocidad y “refractan” el ángulo de su trayectoria, como se ilustra en la línea A de la Figura No. 7. En la línea B, las ondas se “reflejan” después de incidir sobre la superficie de un medio distinto. Al avanzar hacia el exterior se hallan estratos menos consolidados, como los suelos arcillosos o arenosos, en los cuales las ondas sísmicas tienden a aumentar su amplitud a pesar de la distancia desde el hipocentro, como se observa en la línea C.

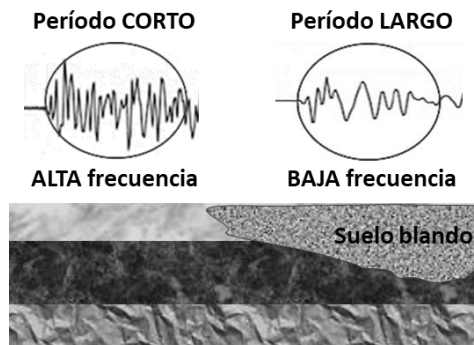
Figura No. 7 Trayectoria y amplitud de onda



Fuente: Elaboración propia

En la superficie terrestre, la vibración de un sismo depende de la geología y características del suelo local. Por lo general, el movimiento sobre roca o suelos muy firmes experimenta periodos muy cortos que se caracterizan por el mayor número de trazas por unidad de tiempo; en estratos más blandos o menos consolidados, como suelos arcillosos o arenosos, los períodos son más largos y se distinguen por tener menor cantidad de trazas por unidad de tiempo. La cantidad de oscilaciones o trazas por unidad de tiempo se conoce como “frecuencia” y es inversa al período (Dominguez, 2014).

Figura No. 8 Periodos y frecuencia en relación a tipo de suelo



Fuente: Elaboración propia

Un sismo produce básicamente dos tipos de ondas: las “ondas internas”, llamadas así porque viajan a grandes profundidades desde el interior del planeta y las “ondas superficiales”, que se propagan a lo largo de la superficie terrestre a través de estratos poco profundos. Las primeras siempre figuran en los sismogramas y transmiten los temblores iniciales de un sismo, mientras que las segundas solo se encuentran en registros de sismos cuyo hipocentro haya sido poco profundo. Las “ondas internas” poseen limitado poder destructivo. Se desplazan en todas direcciones de forma concéntrica y tridimensional, a través de los materiales y estratos rocosos de la Litósfera, entre el manto superior y la corteza profunda, por lo que durante su trayectoria se refractan y/o se reflejan. Cuando alcanzan la superficie producen las ondas superficiales. Se clasifican en ondas primarias, de comprensión (Push-pull) o “P” y ondas secundarias, de corte (Shear) o “S” (Alfaro, 2009).

Las más veloces son las P, entre 1.1 y 8.0 km/s según el material que atraviesan; los sismógrafos las registran primero, por eso les llaman “primarias”. Son longitudinales, es decir, las partículas del suelo se deslizan en la dirección de propagación de la onda, comprimiendo y dilatando la superficie cíclicamente. Apréciense en la Figura No. 9 (a) los cables de alta tensión rotos debido a la tensión y el pavimento aplastado y fracturado por la compresión.

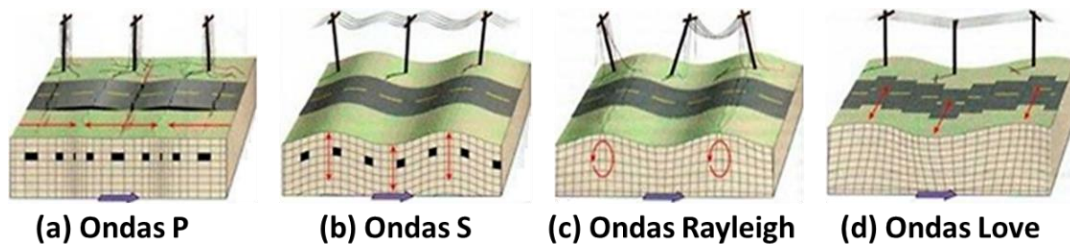
Las S son más lentas, su velocidad es más o menos un 58% de una onda P; los sismógrafos las registran después, por eso les dicen “secundarias”. Son transversales, o sea, que el suelo se desplaza perpendicular a la dirección de propagación, cortándolo arriba y abajo. Usualmente, la amplitud de la onda S es mayor que la P y su sensación es más fuerte. En la Figura No. 9 (b) puede distinguirse el vaivén ondulatorio del terreno conforme las ondas sísmicas avanzan.

Las “ondas superficiales”, generadas por la reflexión de las ondas internas, son más destructivas y las responsables de catástrofes sísmicas. Se propagan por la superficie terrestre de forma bidimensional, con una mínima penetración en el suelo. Viajan a casi 90% de la velocidad de las S con amplitudes mayores a las P, pero con períodos más prolongados. Oscilan perpendicularmente a la dirección de propagación y por su movimiento se dividen en: ondas “Rayleigh” (elíptico-retrógrado) y “Love” (lado a lado).

Las “Rayleigh” surgen al interactuar las ondas P con la componente vertical de las S. Son las más lentas, entre 1 y 4 km/s, casi 90% de las S. En el extremo superior, las partículas del suelo se desplazan en dirección opuesta y en la base, en la misma dirección. Nótese en la Figura No. 9 (c) los cables de alta tensión rotos por el vaivén ondulatorio del terreno y cómo el movimiento elíptico de las ondas hace emerger segmentos de la superficie terrestre y hunde otros.

Las ondas “Love” se originan por la superposición de dos o más ondas P con la componente horizontal de las S, creando patrones de ondas con mayores amplitudes que, tras alcanzar su punto más alto, vuelven a ser las mismas de antes. Son más veloces que las Rayleigh, entre 1 y 4.5 km/s. La Figura No. 9 (d) denota la distorsión en los cables de alta tensión provocada por los cortes transversales que producen estas ondas en la superficie terrestre (Tarbuck *et al.*, 2005).

Figura No. 9 Tipos de onda y su movimiento característico



Fuente: Tarbuck *et al.*, 2005

### 3. Magnitud e intensidad de los sismos

Innumerables terremotos han producido grandes catástrofes en distintos lugares de nuestro planeta, son escasos los registros históricos que describen la fuerza de su impacto y el nivel de devastación ocasionado. El primero que fuera ampliamente descrito data de mediados del siglo XVI en Europa, al que le siguieron otros muchos relatos, en su mayoría distorsionados o exagerados, pues hasta entonces, no había una real comprensión del fenómeno. Las incipientes observaciones que describían empíricamente las consecuencias de los terremotos, dieron paso a inicios del siglo XIX a los primeros registros objetivos y éstos, a las primeras escalas que medían vagamente lo catastrófico que resultaban. Actualmente, los sismos son evaluados mediante dos ponderaciones distintas: según su “magnitud” que está en función de la cantidad de energía liberada e “intensidad” que va ligada por las secuelas y la destrucción causada en el lugar afectado.

#### a. Intensidad

La “intensidad” es una valoración subjetiva de los efectos del sismo sobre el suelo, las personas y las estructuras; sus resultados pueden variar de un lugar a otro en una misma región. Se basa únicamente en la percepción humana y en la observación del daño ocasionado, sin usar instrumentos de medición. Es útil para recabar información donde no hay sismógrafos, examinar registros históricos o cotejar sismos antiguos. Existen más de 50 escalas que miden la intensidad, pero las más conocidas son:

“Mercalli”, desarrollada en 1902 por el sismólogo italiano Giuseppe Mercalli. Se expresa en números romanos y se divide en diez grados de severidad, desde muy débil hasta catastrófico, cuya intensidad se duplica proporcionalmente a cada grado. Reformada en 1931, la escala “Mercalli Modificada” se usa en nuestro continente. Consta de doce grados; los niveles bajos responden a la percepción humana del sismo, mientras que los más altos se relacionan con el daño estructural observado (Alfaro, 2009).

Cuadro No. 1 Escala de Mercalli Modificada

<b>Grado</b>	<b>Intensidad</b>	<b>Grado</b>	<b>Intensidad</b>
I	Detectado solo por instrumentos	VII	Daño moderado en estructuras
II	Sentido por personas en reposo	VIII	Daño considerable
III	Sentido dentro de un edificio	IX	Pánico general / Daño grave
IV	Sentido fuera de un edificio	X	Seria destrucción en edificios bien construidos
V	Casi todos lo sienten	XI	Casi nada queda en pie
VI	Sentido por todos	XII	Destrucción total

Fuente: Elaboración propia

La “EMS” o European Macroseismic Scale, publicada en 1998 por la Comisión Sismológica Europea, es usada en los países europeos. La “intensidad macrosísmica” clasifica la severidad del sismo basándose en los efectos provocados en las personas, objetos, la naturaleza y los daños en edificios. Descarta los efectos sismo-geológicos, refiriéndose a las fallas en el terreno, ya que resultan complejos y difíciles de evaluar para un observador, tales como estabilidad del terreno, nivel freático, etc.

A diferencia de escala de Mercalli que clasifica el daño en los edificios en base a sus materiales constructivos, la EMS considera la “vulnerabilidad” de los mismos, o sea, la forma en que éstos responden a las vibraciones ocasionadas por el sismo. Se puede decir entonces que los edificios menos dañados poseen una menor vulnerabilidad sísmica que los edificios más dañados, o que los edificios menos dañados son más sismos resistentes que los otros y viceversa.

La vulnerabilidad considera, además del tipo de material constructivo, el diseño de la edificación, su estado de conservación, la calidad constructiva, etc., factores que sismólogos e ingenieros han adoptado como datos macrosísmicos estándar en los estudios sobre sismicidad y amenazas sísmicas. La EMS viene acompañada de un manual bastante explicativo que incluye directrices, material de referencia, fotografías, ilustraciones y ejemplos de aplicación; contempla doce grados (ESC, 1998).

Cuadro No. 2 Escala EMS

<b>Grado</b>	<b>Intensidad</b>	<b>Grado</b>	<b>Intensidad</b>
I	No sensible	VII	Causa daños
II	Sentido levemente	VIII	Causa daños severos
III	Débil	IX	Destruyivo
IV	Observado ampliamente	X	Muy destruyivo
V	Fuerte	XI	Devastador
VI	Causa daños leves	XII	Completamente devastador

Fuente: Elaboración propia

La mayoría de estas escalas tienen doce grados de intensidad equivalentes entre sí, con cierta variación en los niveles de severidad formulados para cada uno de ellos. Ninguna basa sus resultados en las ecuaciones fundamentales de los sismogramas ni en herramientas matemáticas, en su lugar, se apoyan en encuestas telefónicas o a través de internet, cuestionarios, entrevistas, publicaciones locales, noticias de radio, prensa y televisión, la revisión de registros históricos, etc.

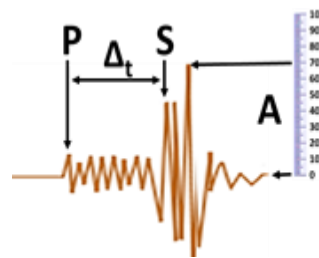
## b. Magnitud

Otra forma de medir un sismo es en función de la cantidad de energía liberada. Hasta 1935, los registros sismográficos solo servían de referencia para medir su intensidad. En ese año, el sismólogo estadounidense Charles Richter introdujo el concepto "magnitud", el cual innovó la forma de medir los sismos. A diferencia de la intensidad, que asigna un valor según la devastación ocasionada en un área limitada, la magnitud tiene un valor único en cualquier parte del mundo donde se calcule.

La magnitud de “Richter” es un dato objetivo calculado mediante una función logarítmica a partir de la amplitud de la onda registrada por el sismógrafo y de su duración sobre el sismograma. Se basa en la tendencia de las ondas P y S a disminuir su amplitud conforme aumenta la distancia. Debe corregirse dependiendo de la sensibilidad del sismógrafo, la profundidad del hipocentro, la distancia al epicentro y del tipo de suelo donde se encuentra ubicada la estación de registro.

La amplitud (A) de la onda S y el tiempo ( $\Delta t$ ) que esta tarda en llegar después de la P, permitieron a Richter calcular la magnitud de un sismo. Llamada escala de Magnitud Local “ $M_L$ ”, es efectiva para medir sismos que se originen a menos de 400 km de distancia de un sismógrafo, con magnitudes entre 2.0 y 6.9 y hasta 400 km de profundidad (Pérez, 2017).

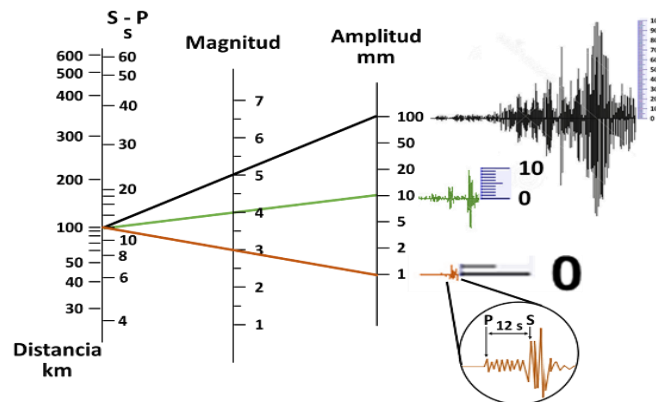
Figura No. 10 Amplitud y  $\Delta t$  en ondas P y S



Fuente: Elaboración propia

La Figura No. 11 indica cómo la magnitud de un sismo varía con la “amplitud” de la onda, trazada en este ejemplo por un sismógrafo a 100 km de distancia. Para la traza de 100 mm (negro) la magnitud es 5; 4 para la de 10 mm (verde) y 3 para la de 1 mm (café). Es decir, un sismo de magnitud 5 es diez veces mayor que uno de magnitud 4 y cien veces más grande que uno de magnitud 3 en amplitud. Además, indica que la constante para una distancia de 100 km son 12 s, es decir, la onda S tarda en llegar 12 s después la P.

Figura No. 11 Nomograma para cálculo de Magnitud Richter



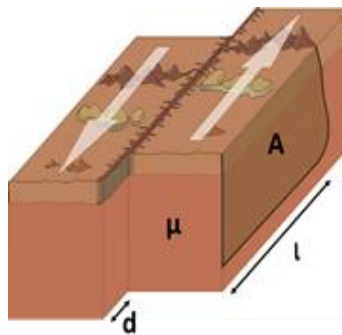
Fuente: Elaboración propia

La escala sismológica de “Richter” es la más conocida mundialmente, pero los instrumentos utilizados para su cálculo ya han quedado obsoletos, por lo que ha sido remplazada por otras escalas más precisas y exactas que miden la magnitud mediante una función logarítmica a partir del tipo de onda sísmica registrada por el sismógrafo, de su duración sobre el sismograma o de qué parte de la señal sísmica se usa para determinarla, siendo las más conocidas:

La Magnitud de Ondas Superficiales “ $M_s$ ”, obtiene su valor generalmente de las ondas de Rayleigh; sus correcciones consideran la distancia al epicentro y la profundidad del hipocentro. Mide sismos a largas distancias cuyo hipocentro se localiza a profundidades menores de 70 km con magnitudes entre 5 y 8, pero resulta inexacta cuando alcanzan valores entre 8.3 y 8.7. Fue desarrollada en 1942 y algunas variantes se usan actualmente en la República Popular China y partes de Rusia.

La Magnitud de Momento “ $M_w$ ”, es la escala más confiable hoy en día para medir sismos profundos, a más de 600 km de distancia y magnitudes superiores a 6.9 (para magnitudes entre 3 y 6.9 sus valores son semejantes a la escala Richter). Esta se calcula a partir del Momento Sísmico “ $M_0$ ”, que relaciona el “módulo de deformación” de la roca ( $\mu$ , distinto para cada material), el área de ruptura a lo largo de la “falla sísmica” ( $A$ , la superficie de contacto entre los dos bloques que se deslizan en direcciones opuestas) y el corrimiento entre ambos bloques ( $d$ ). Cuando los esfuerzos provocan que la roca falle, la fuerza que se genera, es decir, la magnitud del sismo, es proporcional a la longitud de la falla ( $l$ ) (Tarbuck et al., 2005).

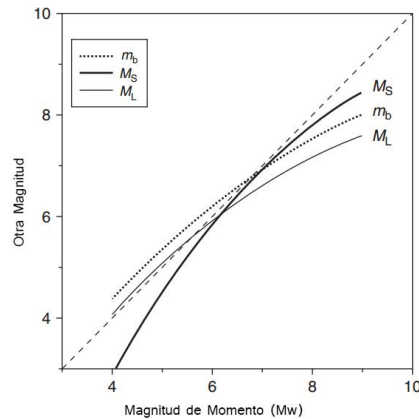
Figura No. 12 Momento sísmico



Fuente: Elaboración propia

En términos de  $M_0$ , la Magnitud de Momento “ $M_w$ ” es útil para calcular la dimensión de terremotos acontecidos en el pasado y que pudieran anticiparse en el futuro, con tan solo estimar los valores  $\mu$ ,  $A$  y  $d$ , para cualquier falla sísmica. Así, el mayor terremoto registrado en la historia sucedió en Chile (1960) con magnitud 8.3  $M_s$  (Magnitud de Ondas superficiales); estudios posteriores revelaron que la magnitud del mismo fue de 9.5  $M_w$  (Magnitud de Momento). Las escalas de magnitud son logarítmicas, no son graduadas y son escalas abiertas de medida absoluta, es decir, no tienen límite superior. Los sismólogos han creado factores para ampliar las escalas a muchos otros tipos de medición (CSN, 2016).

Figura No. 13 Relación entre Magnitud de momento y otras magnitudes



Fuente: CSN, 2016

## C. ESTRUCTURAS SISMO-RESISTENTES

### 1. Concepto

La sismo-resistencia es la capacidad de las edificaciones de resistir la acción de las fuerzas causadas por un sismo, aunque estas sufran daños. Su objetivo pretende disminuir la respuesta estructural hasta el punto de evitar el colapso con la intención de proteger la vida de las personas. A pesar de ello, nunca debe descartarse la posibilidad que ocurra un terremoto más fuerte de lo esperado y pueda provocar un daño estructural irreparable, o incluso, el derrumbe de la edificación.

El diseño sismo-resistente utiliza la capacidad de los materiales hasta que llegan a deformarse inelásticamente y así concentrar el daño de la estructura en regiones específicas llamadas “articulaciones plásticas”. Estas admiten considerables deformaciones inelásticas que absorben y disipan la energía durante el sismo. Las conocidas como “estructuras dúctiles” son capaces de soportar múltiples ciclos de carga sísmica acomodando grandes deformaciones en las zonas de articulación plástica. Esto le permite a la edificación mantener su integridad estructural y su capacidad de resistencia.



La capacidad estructural de un edificio sismo-resistente toma en cuenta durante su diseño la acción de las cargas sísmicas y estima la dimensión y configuración de sus elementos estructurales, suficientes para soportar un sismo de determinada magnitud. Sin embargo, las edificaciones muchas veces se encarecen porque dichos elementos se sobredimensionan y cuando un sismo demanda un alto nivel de deformación inelástica, el peso excesivo de la estructura contribuye al colapso del edificio.

## 2. Comportamiento sísmico de las estructuras

Durante un sismo, la vibración del suelo se transmite a las edificaciones a través de la cimentación y ésta a su vez la transfiere a la estructura. Del estado de reposo, proyectado básicamente para soportar cargas gravitacionales, el edificio bruscamente pasa a resistir un vertiginoso movimiento ondulatorio que genera cargas dinámicas actuando en todas direcciones. Por ello, la acción del sismo sobre la estructura y el efecto que produce al edificio en su conjunto, provoca en los distintos elementos estructurales esfuerzos cíclicos de tensión y compresión y cambios de dirección de los esfuerzos de corte y flexión.

En un sistema totalmente rígido la vibración de un edificio sería igual a la de su base, pero como las estructuras poseen cierta elasticidad, será distinta. Esto, porque el “período de vibración” de la base varía al de la estructura, como resultado de las aceleraciones que se producen entre la superficie del suelo y la cimentación.

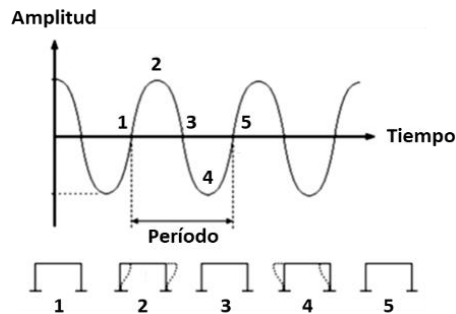
El período de vibración se refiere al tiempo que tarda la estructura en realizar una oscilación completa. Cuanto mayor la duración del período, mayor daño se induce a la estructura ya que se producen mayores desplazamientos. El “período fundamental”, aquel de máxima duración, es el parámetro que se utiliza en el diseño de la estructura para calcular su respuesta ante los movimientos sísmicos, de tal manera que resulte lo más segura y económica posible (Alfaro, 2009).

La aceleración es un indicador que precisa el cambio de la velocidad horizontal a la que se mueve el suelo; es una medida que se puede relacionar con el daño que el sismo provoca en las edificaciones. Por ello, las estructuras se diseñan para resistir una “aceleración máxima”, la cual permite estimar la fuerza de reacción en la base del edificio. Esta generalmente se expresa como un porcentaje de la aceleración de la gravedad.

El período de vibración del edificio permite estimar el desplazamiento límite de la estructura y de esta forma limitando la flexibilidad de una estructura se reduce el posible daño que un sismo provocaría a la edificación, considerando que las deformaciones ocasionadas por los desplazamientos durante un sismo tienen mayor influencia sobre el daño estructural que la resistencia.

Toda estructura durante un sismo oscila de lado a lado con un período de vibración característico. La Figura No. 14 representa el ciclo de una oscilación completa de un sistema de un grado de libertad. Los puntos 1, 3 y 5 muestran un desplazamiento nulo, el edificio no se mueve a la derecha ni a la izquierda. En la posición 2, la parte superior de la traza, ocurre el máximo desplazamiento hacia la derecha y en la 4, la parte inferior de la traza, alcanza el máximo desplazamiento a la izquierda (CENAPRED, 1999)

Figura No. 14 Período de vibración de un sistema de 1 grado de libertad



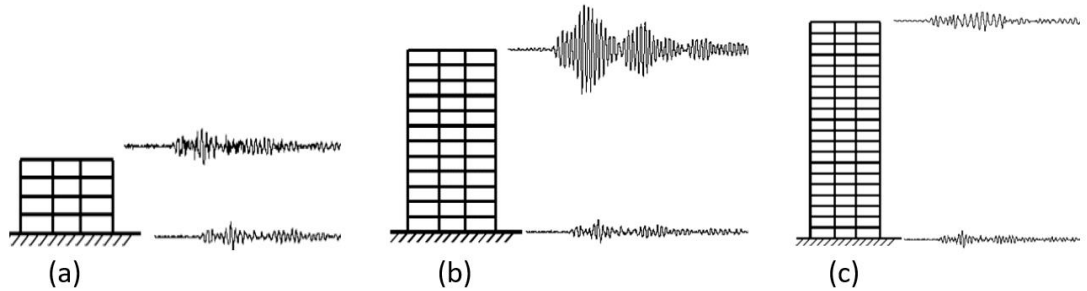
Fuente: CENAPRED, 1999

Cuando el suelo tiende a vibrar más lentamente que la estructura, la aceleración máxima del edificio y la del suelo se asemejan. Por ejemplo, si el período de vibración del edificio es de 0.5 segundos y el del suelo de 1.5, el edificio completaría tres ciclos de vibración en el mismo tiempo que el suelo solo logra completar uno. La Figura No. 15 (a) muestra la semejanza entre la aceleración del techo en un edificio de cuatro niveles y la del suelo. Nótese la amplitud de la traza del techo y la base del edificio.

Cuando el período de vibración del suelo y del edificio son iguales o cercanos, la estructura amplifica el movimiento del suelo, las fuerzas sísmicas se incrementan y la oscilación del edificio se vuelve peligrosa. En la Figura No. 15 (b) puede distinguirse el vaivén ondulatorio del terreno moviendo la base de un edificio de 12 niveles. En este caso, el período de vibración del edificio y del suelo alcanzan el mismo valor, 1.5 segundos.

A medida que el periodo de la estructura se vuelve mayor al del suelo, las aceleraciones en el edificio disminuyen. Obsérvese en la Figura No. 15 (c) la vibración del terreno agitando la base de un edificio de 20 niveles. En este caso, el período de vibración del edificio es 2.5 segundos, mientras que el del suelo es de 1.5 (CENAPRED, 1999).

Figura No. 15 Distintas respuestas de un edificio según su periodo de vibración

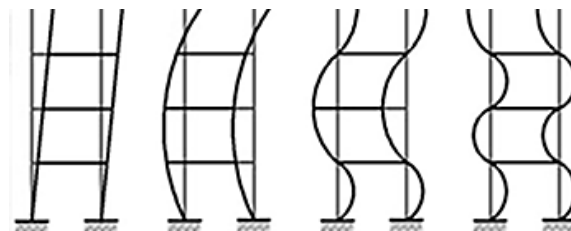


Fuente: Elaboración propia

De tal forma que, a mayor cantidad de niveles, mayor es el período de vibración y, por lo tanto, mayor el tiempo que tardará el edificio en completar una oscilación. La estructura tenderá a moverse más peligrosamente a medida que su período de vibración se asemeje cada vez más al del suelo.

Durante un sismo, los edificios oscilan de formas muy distintas según las cargas sísmicas impacten en la estructura. La rigidez y la altura son factores que afectan su patrón o modos de vibración y, por ser tridimensionales, se pueden desplazar y deformar en las tres direcciones del espacio físico y girar sobre sí mismos en diferentes ejes de rotación. El peso de la estructura y los cambios de la aceleración del suelo a cada instante también modifican la respuesta del edificio.

Figura No. 16 Modos de vibración de un edificio



Fuente: Elaboración propia

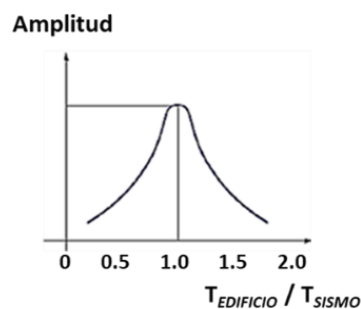
Otro factor que influye sobre las fuerzas a las que se ve sometido un edificio es la duración que tarda el movimiento del suelo. Si las aceleraciones son moderadas, pero el tiempo que demora el sismo es bastante prolongado, el período de oscilación se extenderá y el desgaste estructural podría provocar el colapso del inmueble debido a la fatiga de los materiales. De esta forma, a medida que van ocurriendo más sismos los edificios cada vez se vuelven más vulnerables.

Como se ha visto, el daño estructural en los edificios está íntimamente relacionado con la aceleración sísmica del suelo y no con la magnitud del sismo. Por tal razón, las edificaciones se examinan analizando sus modos de vibración, considerando que la oscilación de una estructura es siempre una combinación de todos los movimientos verticales, horizontales, rotacionales o combinaciones de éstos. Cada modo involucra movimientos diferentes, aunque no todos tengan el mismo grado de excitación.

### 3. Períodos de vibración de las edificaciones

La respuesta dinámica de una edificación durante un sismo obedece a la relación entre los períodos de vibración del suelo de apoyo y el propio de la estructura. Si ambos tienden o son iguales, el edificio entra en “resonancia”, es decir, la vibración del edificio aumenta de forma progresiva conforme la aceleración del suelo se va amplificando cada vez más en la edificación, según las ondas sísmicas viajan a través de la superficie. Como resultado, se producen mayores desplazamientos que inducen en la estructura mayores deformaciones, incrementándose cíclicamente los esfuerzos de tensión y compresión y los cambios de dirección de los esfuerzos de corte y flexión en cada uno de sus elementos estructurales (Domínguez, 2014).

Figura No. 17 Aceleración en función de los períodos de oscilación del edificio y del sismo

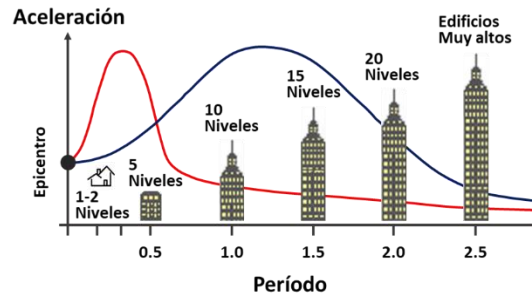


Fuente: Domínguez, 2014

Si la aceleración del edificio es menor que la del sismo, resulta en un incremento del período de la edificación, baja la frecuencia de sus oscilaciones y simplemente se mueve con el suelo deformándose muy poco, mejorando considerablemente las propiedades sismo-resistentes de la estructura. A medida que la frecuencia del movimiento del suelo aumenta, el período de la edificación disminuye y cada vez la deformación de la estructura será mayor.

Generalmente, los edificios altos experimentan oscilaciones de mayor período que las construcciones bajas, por lo que se mueven más lentamente. Cuando se presentan oscilaciones de alta frecuencia y períodos cortos (línea roja) el sismo es más nocivo para las estructuras bajas y rígidas. Con períodos más largos y de menor frecuencia (línea azul), las estructuras altas y flexibles corren mayor riesgo. En cuanto al suelo, los blandos tienden a reducir el período y amplificar las bajas frecuencias del sismo.

Figura No. 18 Relación entre aceleración, distancia al epicentro y periodo de la estructura

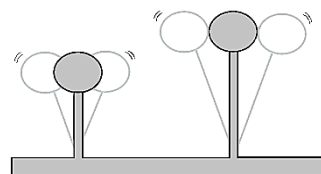


Fuente: Elaboración propia

La respuesta de un edificio está condicionada entonces, por la frecuencia del sismo y la propia de la estructura, el tipo de material del suelo de apoyo y la distancia al epicentro, la cual reduce el contenido frecuencial a medida que aumenta el margen de separación. Por otro lado, las componentes horizontales de un sismo son las más críticas, debido a que las edificaciones empotradas sobre sus cimientos actúan en esa misma dirección como voladizos.

El movimiento oscilatorio de un edificio podría aproximarse al de un péndulo invertido sometido a una vibración en su base. Al cesar la excitación, la oscilación del péndulo se irá amortiguando gradualmente hasta recuperar su posición de equilibrio. Sin embargo, los edificios tienen diferente altura, por lo que su respuesta será distinta ante una misma aceleración del suelo. La Figura No. 19 ilustra tal situación: dos péndulos invertidos con iguales características de masa y rigidez, pero con diferente longitud de barra, permiten notar que entre mayor es la longitud de la barra mayor será su período de vibración, es decir, los edificios de mayor altura experimentan oscilaciones más lentas que las construcciones bajas.

Figura No. 19 Péndulos invertidos de distinta altura

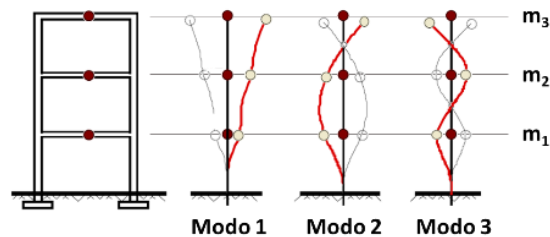


Fuente: Elaboración propia

De forma similar, los edificios de varios niveles se comportarán como péndulos invertidos múltiples que pueden vibrar de diversos modos.

Así, un edificio de tres niveles se comportará como un péndulo invertido de tres masas, es decir, presentará tres modos distintos de vibración. En la forma más básica, “modo fundamental” o modo 1, la estructura oscila de lado a lado: todas las masas se mueven a un mismo lado de la vertical. En este modo, el movimiento en la base es mucho menor que en la azotea, lo cual provoca que en los niveles superiores se perciba un movimiento mucho más fuerte que en las plantas inferiores. En los modos subsiguientes, 2 y 3, mientras algunas masas se desplazan a un lado de la vertical, otras lo hacen al lado contrario (Domínguez, 2014).

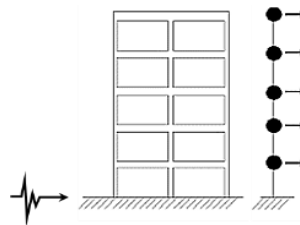
Figura No. 20 Edificio de tres niveles y sus modos de vibrar



Fuente: Domínguez, 2014

De hecho, un edificio puede experimentar tantos modos de vibrar como cantidad de niveles posea. Así, las estructuras de un nivel vibrarán de una sola forma desplazando su única masa a cada lado de la vertical. Este es el caso de una edificación con un solo “grado de libertad”, término que establece la cantidad mínima de parámetros que precisa el número de reacciones en una estructura. Muchos edificios se pueden simplificar de esta forma, concentrando la masa de cada losa en un solo nodo o punto de análisis, tal como se muestra en la Figura No. 21. En este caso, los desplazamientos se analizan en el sentido de la aceleración.

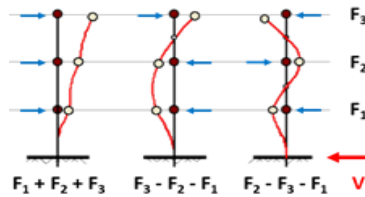
Figura No. 21 Edificio como péndulo con masas concentradas



Fuente: Elaboración propia

Esta aceleración, actuando en la base del edificio, induce una fuerza inercial sobre la propia estructura. La respuesta de la edificación dependerá de su rigidez y de la distribución de su masa a través de las alturas donde se concentra; la Figura No. 22 ilustra para cada modo de vibrar, el sentido direccional y la suma vectorial de estas cargas horizontales. Nótese que la mayor fuerza de corte en la base de la estructura o “cortante basal” corresponde al modo fundamental, donde todas las fuerzas inerciales actúan en el mismo sentido. En los otros dos modos el sentido de estas fuerzas se alterna, resultando en menores valores de cortante.

Figura No. 22 Modos de vibración y fuerzas inerciales



Fuente: Domínguez, 2014

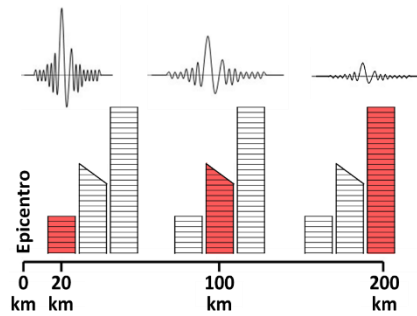
No todos los edificios responden del mismo modo ante una vibración en la base. De hecho, la aceleración del suelo variará a cada instante, variando así también la respuesta del edificio y, en consecuencia, su potencial daño. No siempre el modo más crítico será el fundamental, porque en éste se presentan las mayores deformaciones; en cualquiera de los otros modos pueden ocurrir aceleraciones y desplazamientos aún mucho mayores en lo alto del edificio, generándose esfuerzos que podrían ocasionar el colapso de los niveles superiores.

Aunque las edificaciones pueden simplificarse y aproximarse al equivalente de un péndulo invertido sometido a una aceleración en su base, el período de vibración y la frecuencia, básicamente determinados por su rigidez y altura, es un concepto que no describe de forma exacta el comportamiento dinámico de la estructura. En el análisis estático, la magnitud de las fuerzas laterales se vincula a estas aceleraciones, cuya relación con los desplazamientos que experimentan las masas de las losas del edificio dependen de ese período o frecuencia y del amortiguamiento de la estructura.

La respuesta dinámica de un edificio también se verá alterada por la influencia del terreno. El suelo de apoyo actúa como un disipador de energía amortiguando las ondas sísmicas que se refractan o reflejan en las discontinuidades de los estratos subyacentes, variando a su vez, el período fundamental de vibración de la estructura. Así, un edificio construido sobre roca o suelos muy firmes alcanzará su menor período de vibración porque actuará como un voladizo perfectamente empotrado en la base. En estratos más blandos o menos consolidados se registrará el mayor de los períodos porque el edificio se comportará como un voladizo parcialmente empotrado, debido a que la vibración del suelo vuelve más flexible los empotramientos.

Así, tal como el período fundamental de vibración del edificio varía con su altura, la resonancia entre la frecuencia del sismo y de la estructura varía con la distancia al epicentro. Cerca de éste, el suelo vibra a altas frecuencias y períodos cortos provocando que estructuras bajas y rígidas entren en resonancia, aunque es probable que un edificio alto también pueda hacerlo en un modo de vibración superior al fundamental. Según aumenta la distancia, el suelo disipa la energía liberada amortiguando la amplitud de las ondas sísmicas e induciendo menores frecuencias y períodos más largos, corriendo cada vez mayor riesgo las estructuras altas y flexibles (Domínguez, 2014).

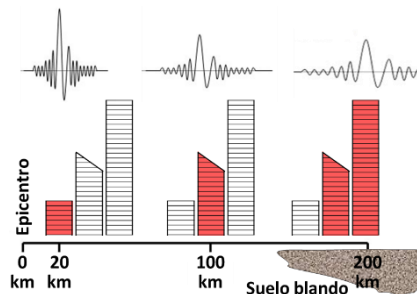
Figura No. 23 Variación de amplitud, periodo y distancia a epicentro



Fuente: Elaboración propia

Los suelos blandos o menos consolidados, como los estratos arcillosos o arenosos, tienden a amplificar las bajas frecuencias y aumentar la amplitud de las ondas sísmicas, lo cual extiende el período de vibración de las edificaciones y causa que edificios de mediana altura entren en resonancia, a pesar de encontrarse el epicentro alejado a grandes distancias (Domínguez, 2014).

Figura No. 24 Amplificación de amplitud para depósito de suelo blando



Fuente: Elaboración propia



#### 4. Efecto del amortiguamiento en la respuesta de las edificaciones

El tiempo de oscilación de las estructuras sometidas a las fuerzas variables impuestas por un sismo depende de sus propiedades de “amortiguamiento”, es decir, de su capacidad para reducir los desplazamientos en la edificación. La energía se disipa mediante la fricción inelástica de articulaciones plásticas que se ubican en secciones preestablecidas de la edificación, cuando los materiales que conforman los elementos estructurales son esforzados cíclicamente; la tipología estructural y el medio circunvecino absorben otra mínima parte.

El amortiguamiento procura mantener la edificación dentro del rango elástico; a medida que el período de vibración de la estructura aumenta, la pérdida de su rigidez cada vez más se intensifica hasta el punto de alcanzar el rango inelástico, en el cual, las deformaciones se vuelven más críticas conforme mayor es la carga sísmica y el tiempo que ésta dure. Cuando un sismo es muy severo, una inminente falla en el concreto reforzado podría provocar que un edificio experimente un daño estructural irreversible, e incluso, irreparable.

La fuerza de amortiguamiento es proporcional a la masa y rigidez de la estructura y su respuesta dependerá de la cantidad de energía que se disipe en cada ciclo de vibración. Un edificio con gran rigidez y poca masa tenderá a oscilar más rápidamente porque la frecuencia de su movimiento es alta, mientras que uno con gran masa y poca rigidez oscilará más lentamente porque registrará frecuencias bajas. En ambos casos, el amortiguamiento busca reducir la amplitud, la frecuencia y el tiempo de persistencia de la vibración hasta que la edificación retorna a su estado de reposo.

Las estructuras disminuyen progresivamente la amplitud de sus vibraciones en función de su capacidad para reducir los desplazamientos, absorbiendo o disipando la energía mediante distintas formas de amortiguamiento:

##### a. Fricción interna del material de la estructura

Ocurre cuando los materiales que conforman los elementos estructurales de un edificio son esforzados cíclicamente, causando una deformación elástica o plástica que se resiste al movimiento.

b. Histéresis

Igual al anterior, depende esencialmente de los materiales. Se origina cuando los elementos estructurales son sometidos a elevadas tensiones debidas a esfuerzos alternantes que causan deformaciones cíclicas, como resultado del rozamiento interno de un material fatigado actuando dentro del rango inelástico.

c. Rozamiento entre superficies de deslizamiento

La fuerza de fricción, contraria al movimiento, produce una deformación elástica que se opone al desplazamiento. Conocido como “amortiguamiento de Coulomb” o “fricción en seco”, se emplea en el diseño de dispositivos mecánicos de aislamiento sísmico sin lubricación.

d. Amortiguamiento viscoso

Es un concepto que permite simular la respuesta de un edificio sometido a deformaciones elásticas que se oponen al movimiento, aproximándola a la resistencia que genera un líquido viscoso al fluir a través del émbolo de un cilindro. También se usa en el diseño de mecanismos que absorben la energía sísmica mediante resortes helicoidales y pistones hidráulicos.

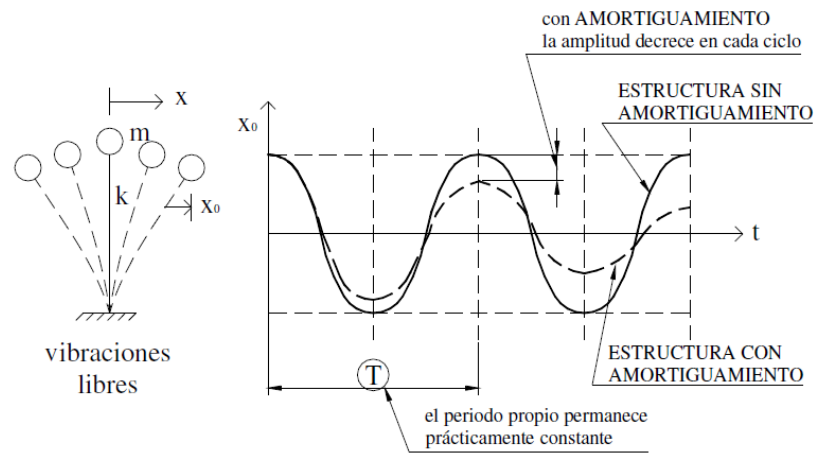
En el diseño sismo-resistente es común modelar las estructuras considerando el mecanismo de amortiguación viscoso, caracterizado por su simplicidad y facilidad para resolver las ecuaciones de movimiento. Ocasionalmente se utiliza el modelo de Coulomb en el caso de que haya dispositivos friccionales y, cuando se simulan deformaciones inelásticas debidas al comportamiento histerético de la estructura, se requiere recurrir a modelos matemáticos más complejos.

Básicamente, el amortiguamiento viscoso es una medida de la tasa de energía disipada por ciclo de deformación; toma como referencia el “amortiguamiento crítico”, valor que retorna la edificación a la posición de equilibrio en el menor tiempo posible (Chopra, 2014).

Muchas normas sísmicas planean distintas cantidades porcentuales de referencia respecto al amortiguamiento crítico, si bien, varían entre 4 y 6%. Su finalidad es obtener un amortiguamiento suave, es decir, llevar al edificio a la posición de equilibrio reduciendo gradualmente la amplitud de su movimiento en el tiempo. No obstante, cuanto mayor es el amortiguamiento menor es la respuesta de la estructura; por ello, incluir aisladores y disipadores sísmicos permite aumentar los períodos y proveer amortiguamiento y absorción de energía adicional, reduciendo así las deformaciones.

En sí, el comportamiento de una estructura está sujeto a la fuerza cortante en su base y conforme a la amortiguación del movimiento. La fuerza de amortiguación es proporcional al “coeficiente de amortiguación”, el factor que disipa igual cantidad de energía por cada oscilación; esta constante se define a partir del período fundamental de la estructura y las amplitudes del primer modo de vibración. Los períodos y formas de vibrar dependen de las características geométricas, las propiedades de los materiales (rigidez) y de la inercia que la estructura opone al movimiento (masa) (Cassano, 2009).

Figura No. 25 Amortiguamiento de la vibración de un péndulo invertido

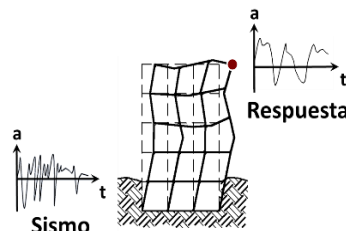


Fuente: Cassanora, 2009

## 5. Espectros de respuesta y de diseño

La respuesta de un edificio se refiere al modo en que la estructura responde a la aceleración inducida por un sismo, es decir, a los efectos que las vibraciones del suelo causan en torno a su posición de equilibrio modificando su configuración. Incluye el análisis de las fuerzas, aceleraciones, velocidades y desplazamientos que resultan de las deformaciones que surgen en la estructura, al reducir la misma a un sistema de equilibrio dinámico.

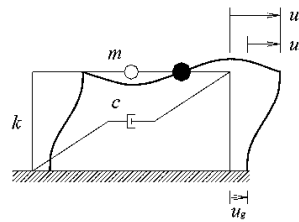
Figura No. 26 Respuesta de edificio ante la aceleración por sismo



Fuente: Casano, 2009

En la base de la estructura, la aceleración del sismo varía a cada instante como resultado de la superposición lineal de las ondas sísmicas que viajan por la superficie del suelo de modo continuo, ininterrumpido y compacto, variando como consecuencia, la respuesta del edificio. La perturbación transportada, de distinta duración, origina un corrimiento del suelo ( $u_g$ ) que provoca que el desplazamiento relativo entre la masa y el suelo ( $u$ ) (Chopra, 2014).

Figura No. 27 Respuesta de un sistema idealizado ante una excitación sísmica

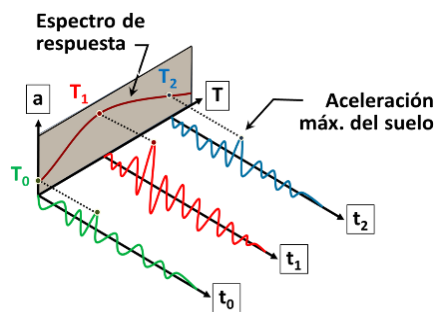


Fuente: Chopra, 2014

La relación entre la aceleración sísmica y los desplazamientos que experimentan las masas del edificio depende de sus características dinámicas, en principio, de sus frecuencias propias de vibración y su amortiguamiento. La aceleración de un edificio, es decir, la respuesta de la estructura a una perturbación en la base, depende de la magnitud y frecuencia de la aceleración del terreno y de su rigidez. Así, para una cierta aceleración del suelo se origina una aceleración de vibración en la estructura, definida por el período de vibración del edificio en función de su masa, altura y rigidez.

Al graficar sobre un sistema de coordenadas los máximos absolutos de las respuestas en el tiempo ( $t_x$ ), en función de las frecuencias o períodos de vibración ( $T_x$ ) de la estructura y la aceleración del suelo ( $a$ ), se modelan los “espectros sísmicos de respuesta”, gráficos que describen el movimiento de un sismo y facilitan información de las máximas respuestas que pueden producirse en edificios de diferente período fundamental y distintos valores del factor de amortiguamiento, en términos de aceleraciones, velocidades, desplazamientos u otro parámetro de interés (GISE, 2016).

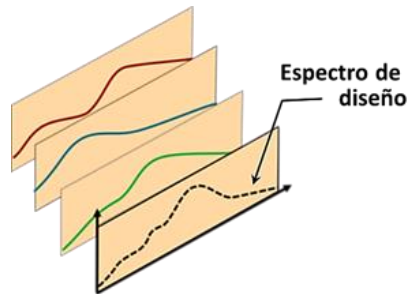
Figura No. 28 Espectro de respuesta



Fuente: Elaboración propia

El análisis sismo-resistente recurre a modelos que integran el efecto de varios sismos a fin de estimar, con mayor precisión, el valor máximo de la respuesta que se adapta a la sismicidad propia de la región de estudio, es decir, combinan dos o más espectros de respuesta para tasar una respuesta global. Llamados “espectros o sismos de diseño”, son curvas suavizadas sin cambios bruscos, producto del promedio de las envolventes de respuesta más la desviación estándar obtenida mediante procedimientos estadísticos y cálculos probabilísticos.

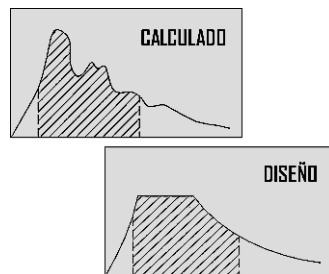
Figura No. 29 Espectro de diseño formado por tres espectros de respuesta



Fuente: Elaboración propia

Las condiciones locales del suelo, las propiedades mecánicas y el espesor de los estratos subyacentes y la profundidad a la que se encuentra la roca firme, modifican estos modelos. Usualmente son normalizados con tramos rectos en escala logarítmica y corregidos por la amplificación que sufren las ondas sísmicas en suelos compresibles; consideran una fracción del 5% respecto al amortiguamiento crítico y se deben calcular analizando la información disponible con herramientas estadísticas a fin reducir la probabilidad de excedencia. La zona plana procura prevenir las posibles incertidumbres en el cálculo de los períodos de vibración de las edificaciones.

Figura No. 30 Espectro de diseño normalizado

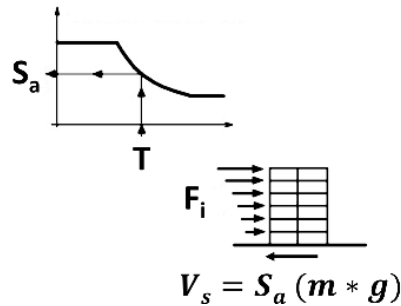


Fuente: Cassano, 2009

Los “espectros de aceleraciones de diseño”, asociados a las fuerzas inerciales ( $F_i$ ) impuestas a la estructura y expresados como una fracción de la gravedad ( $g$ ), son el punto de partida para el cálculo de las fuerzas laterales de diseño y la estimación de las deformaciones laterales.

El “cortante basal de diseño ( $V_s$ )”, la fuerza sísmica total en la base del edificio, se calcula a partir de la “aceleración espectral de diseño ( $S_a$ )” obtenida directamente del espectro determinado para el sitio y en función del período ( $T$ ), por el peso total de la edificación; para los desplazamientos, el cortante basal de diseño se distribuye en la estructura (Alfaro, 2009).

Figura No. 31 Espectro de diseño y fuerzas actuantes en edificación



Fuente: Elaboración propia

En sí, la aceleración sísmica es un indicador preciso del daño que los sismos causan a las estructuras y la medida más utilizada en las normativas sismo-resistentes para la estimación de la fuerza cortante total de diseño en la base de una estructura (Bazán, 2010).

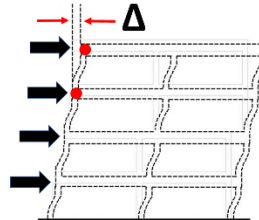
## 6. Desplazamientos y derivas horizontales

Los daños estructurales que los sismos causan a las edificaciones se deben principalmente a los desplazamientos laterales que sufre la estructura. La interacción de la superestructura con su cimentación muchas veces ocasiona daños en columnas, vigas, losas, muros y otros elementos no estructurales que ponen en riesgo la seguridad de la construcción e incluso, dependiendo de la severidad, podrían llevar a la edificación al colapso parcial o total. Controlar el nivel de daño en la estructura requiere considerar las demandas de desplazamiento como el parámetro básico de diseño bajo diferentes escenarios sísmicos.

La distribución del cortante basal entre cada uno de los niveles de una edificación tiene por objeto la estimación de las máximas “derivas laterales ( $\Delta$ )”, la diferencia de desplazamiento lateral entre el nodo superior e inferior de dos niveles consecutivos, para el control de las deformaciones horizontales. Existe una correlación entre el límite de las derivas unitarias de entrepiso a lo largo del edificio y el daño aceptable.

Para evaluar dicha relación, se deben calcular las derivas en función de la rigidez de los componentes estructurales de la edificación; así, cuanto mayor es la estimación de la rigidez, menor será el corrimiento lateral de las derivas y, por lo tanto, menor será el potencial de daño en la estructura.

Figura No. 32 Derivas de piso



Fuente: Elaboración propia

Los componentes no estructurales son altamente vulnerables durante sismos de gran intensidad. Por ello, los límites de desplazamiento horizontal juegan un papel importante entre los desplazamientos laterales que las estructuras pueden llegar a desarrollar y los desplazamientos que los componentes no estructurales pueden llegar a tolerar, mientras la estructura vibra en su rango elástico. Cuando estos elementos no son aislados de la estructura, la rigidez de la edificación aumenta y su período de vibración disminuye; en consecuencia, la estructura deberá soportar mayores cargas sísmicas que las estimadas en el diseño (Bazán, 2010). Un método eficaz para limitar los desplazamientos laterales de las edificaciones por la acción sísmica es el uso de aisladores y disipadores de energía sísmica, los cuales se han convertido en la herramienta más simple que, mejorando el desempeño sísmico de la edificación, limitan el daño.

## D. AISLADORES SÍSMICOS DE BASE

### 1. Concepto

El aislamiento sísmico es una técnica de diseño que logra aislar una estructura de los movimientos del suelo mediante el acoplamiento de elementos flexibles entre la superestructura y su cimentación. Su propósito es absorber una parte significativa de la energía sísmica para disminuir las demandas de disipación de energía por ductilidad en los elementos estructurales principales, a fin que la estructura continúe en el rango elástico durante terremotos de gran intensidad y así, evitar la atenuación de su resistencia, reducir la fatiga de los materiales y minimizar el potencial daño estructural.

Concentrando y mitigando en su base la acción de las fuerzas sísmicas, los sistemas de aislamiento sísmico reducen la vulnerabilidad de las estructuras aportando amortiguamiento adicional para el control de las deformaciones, acortando los desplazamientos relativos entre el suelo y la edificación. Reducen notablemente la rigidez del sistema estructural y proveen la suficiente flexibilidad horizontal, logrando que el período de vibración de la estructura aislada sea mucho mayor que el de la misma estructura con base fija, lo cual reduce la aceleración en la edificación aislada.

A diferencia de las técnicas convencionales para el reforzamiento de estructuras, el aislamiento sísmico de base busca reducir los esfuerzos a niveles que puedan ser resistidos por edificaciones ya existentes, convirtiéndose en una opción especialmente útil para el reacondicionamiento de estructuras construidas bajo normas de diseño por ductilidad, la rehabilitación de edificios antiguos que no fueron construidos con bases sísmicas o para reforzar y proteger monumentos y construcciones con un gran valor histórico, patrimonial o arquitectónico que requieran ser rescatados y/o preservados (Osorio, 2001).

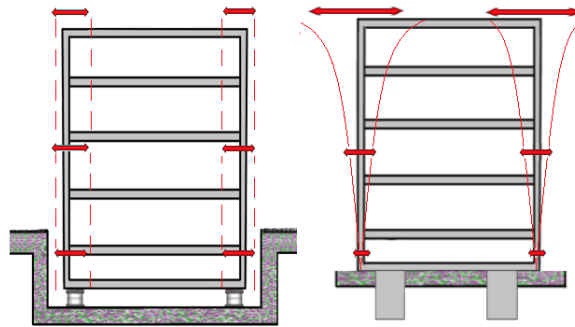
## 2. Eficiencia de la aislación sísmica de base

El diseño de un edificio puede combinar varios tipos de dispositivos de aislación sísmica e incluso, diferentes técnicas de disipación de energía sísmica para soportar un terremoto de gran magnitud. La capacidad total de amortiguamiento será la suma de todas las energías que puedan absorber o disipar cada uno de estos dispositivos. El nivel de daño en la estructura será consecuencia de las máximas derivas laterales que se produzcan en cada uno de los niveles de la edificación.

Los dispositivos de aislación sísmica dislocan la edificación del terreno evitando que la aceleración total del suelo alcance a la superestructura, es decir, que solo una parte de la energía sísmica lograría llegar a causar un potencial daño en comparación con los tradicionales sistemas constructivos de base fija. La estructura aislada en la Figura No. 33 se observa que se comporta como un bloque rígido moviéndose sobre los aisladores de base, la amplificación sísmica se reduce y pronto el edificio se estabiliza; de esta forma se restringen los desplazamientos entre cada nivel, que es la causa que daña la estructura. En cambio, en los edificios de base cimentada la aceleración sísmica se amplifica en las partes altas.



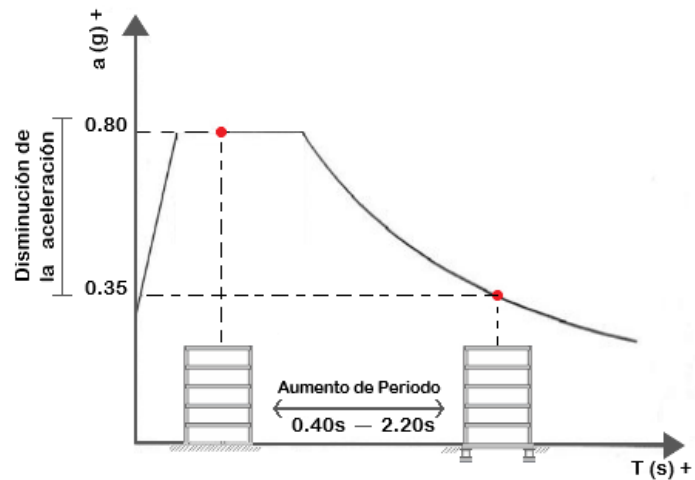
Figura No. 33 Comportamiento de edificio con base fija y aislada



Fuente: Elaboración propia

La notable flexibilidad horizontal que aportan estos aisladores permite acomodar la deformación del terreno durante un sismo en una deformación de corte, dificultando así, la transferencia del movimiento del suelo hacia la estructura. Esto hace que el período de vibración sea mucho mayor en la edificación aislada, aproximadamente tres veces más que el de la misma estructura sin aislación, es decir, con base fija. Esto cual permite lograr una disminución sustancial de la aceleración sobre la edificación aislada. Teóricamente, se espera que las deformaciones inelásticas sean absorbidas por este sistema de aislamiento sísmico, es decir, que se produzcan en los aisladores para que la estructura asentada sobre éstos pueda mantener un comportamiento lineal (Genatios y Lafuente, 2016).

Figura No. 34 Disminución de la aceleración con aislamiento sísmico



Fuente: Elaboración propia

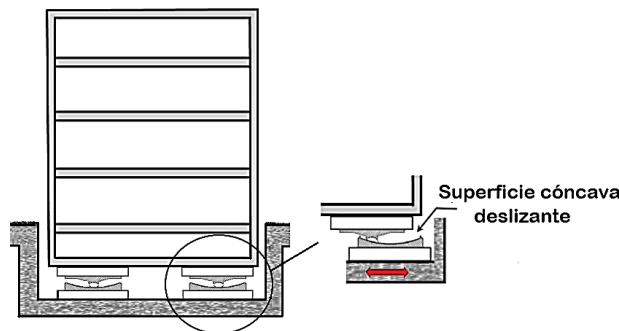
### 3. Tipos de aisladores sísmicos de base

La aislación sísmica de base es la forma más eficiente para la protección sísmica de estructuras relativamente bajas y/o rígidas. Básicamente existen dos tipos de dispositivos: los “aisladores deslizantes o friccionales”, que poseen una superficie de deslizamiento que disipa la energía por medio de las fuerzas de rozamiento y los “aisladores elastoméricos”, los más desarrollados y utilizados actualmente, que usan un elastómero de caucho natural o neopreno reforzado con finas láminas de acero.

#### a. Aisladores deslizantes o friccionales

Estos dispositivos para deslizarse cuentan con una superficie de deslizamiento conectada a la cimentación, sobre la cual se desliza una placa de acero que soporta a la estructura. El edificio aislado totalmente del terreno se desplaza horizontalmente de manera independiente del suelo, por lo que deberá considerar ciertas instalaciones especiales como tuberías de agua potable, drenajes, energía eléctrica y un diseño especial para el foso del ascensor. Generalmente requieren de mecanismos que retornen la estructura a su posición original después de un sismo y demandan mayor cuidado y mantenimiento, ya que cualquier variación en las superficies deslizantes modificaría el coeficiente de fricción y la capacidad de deslizamiento.

Figura No. 35 Esquema de un aislador deslizante



Fuente: Elaboración propia

Se distinguen dos clases: “apoyos planos”, los más simples, que carecen de fuerza de restauración y actúan por medio de una junta deslizante recubierta con una fina capa de material elastomérico la cual reduce el coeficiente de fricción y, “péndulos friccionales”, que cuentan con un deslizador articulado sobre una superficie cóncava, como en la figura, el cual resuelve el problema de la fuerza de restauración y además provee la suficiente rigidez para reducir considerablemente los niveles de la aceleración del sismo en un amplio rango de frecuencias (Saiful, Jameel y Zamin, 2011).

## b. Aisladores elastoméricos

Numerosos fabricantes y proveedores de aisladores elastoméricos de base en el mundo, entre los que destacan Bridgestone, SRS/ Skellerup Rubber Services y DIS/ Dynamic Isolation Systems, entre muchos otros, han desempeñado un papel importante en el desarrollo de la tecnología de aislamiento sísmico, incluida su comercialización desde la década de 1980. Sus investigaciones, la creciente demanda de aislamiento sísmico y la inclusión de nuevos materiales en los procesos constructivos, han contribuido gradualmente a transformar las normativas sismo-resistentes a nivel mundial y a desarrollar nuevos métodos de diseño y análisis en apoyo a la Ingeniería Sísmica.

Durante los últimos 20 años, los aisladores elastoméricos han ido incrementando considerablemente sus capacidades e integrando dispositivos de mayor tamaño. Hoy en día, se moldean aisladores prefabricados con dimensiones de hasta 155 cm (61 pulgadas) de diámetro y 76 cm (30 pulgadas) de altura, con capacidades de hasta 4,000 toneladas. Pesan cerca de 10 toneladas y permiten desplazamientos laterales de 91 cm (36 pulgadas), aunque el desplazamiento real de un aislador y la capacidad de carga dependen del módulo de elasticidad y el número de capas de caucho (DIS, 2007).

La vida útil normal de los aisladores elastoméricos es mayor de 50 años. Su diseño y manufactura procura como objetivo particular obtener baja degradación con el tiempo y la fiabilidad de las propiedades, no obstante, el envejecimiento y las condiciones ambientales, en especial la temperatura, pueden afectar las propiedades del caucho. Las propiedades mecánicas del elastómero se pueden variar ajustando su composición química y/o agregando rellenos en caucho natural para aumentar la relación de amortiguación; las características del núcleo de plomo también se pueden modificar con el mismo fin.

Son diseñados y fabricados a medida para cada proyecto en particular, de acuerdo a la rigidez horizontal y vertical, desplazamiento, capacidad de carga y amortiguamiento requerido. El tamaño del dispositivo se puede determinar a partir de la fuerza axial de la columna (carga nominal a largo plazo de la columna) y la selección de las dimensiones basado en el diseño de la interfaz de aislamiento sísmico. La mayoría de proveedores prestan apoyo técnico a los proyectos, ayudando a realizar los estudios de viabilidad, la elaboración del presupuesto, la ingeniería de valor del proyecto y a la determinación de los parámetros para el modelado estructural.

De sección cuadrada o circular, son dispositivos formados básicamente por un conjunto de láminas planas de acero intercaladas y vulcanizadas con capas de elastómeros. Ofrecen una alta rigidez vertical y logran la flexibilidad lateral necesaria para permitir un gran desplazamiento horizontal entre la estructura aislada y el suelo.

Se fabrican a medida para cada proyecto de acuerdo a la rigidez horizontal y vertical, desplazamiento, capacidad de carga y amortiguamiento requerido. Aumentan su eficiencia y capacidad de carga según aumentan su superficie, es decir, es preferible utilizar aisladores con mayor diámetro en vez de varios de menor diámetro, lo cual amplía el período de vibración de la estructura aislada, logrando así, un comportamiento más flexible (Genatios y Lafuentes, 2016).

Figura No. 36 Ensayo de un aislador elastomérico



Fuente: DIS, 2007

Los tres tipos de apoyos elastoméricos ampliamente usados son:

#### 1) Aisladores de caucho de bajo amortiguamiento

Denominados apoyos LDRB (Low-Damping Rubber Bearing), son los dispositivos más simples y fáciles de fabricar que combinan flexibilidad y disipación de energía en un solo elemento. Adicionan un amortiguamiento entre 2 y 5%, por lo que se usan regularmente en conjunto o como complemento de otros sistemas de protección sísmica para proveer amortiguamiento adicional al sistema.

Este tipo de aislador provee una buena flexibilidad lineal y una fuerza de restauración estable. El caucho de alta amortiguación convencional muestra una dependencia de la histéresis de carga, donde su velocidad de cambio de rigidez se ha reducido y la restauración empeora progresivamente después de una carga repetida bajo una deformación creciente (DIS, 2007).

Figura No. 37 Aislador de caucho de bajo amortiguamiento



Fuente: DIS, 2007

## 2) Aisladores de caucho de alto amortiguamiento

Llamados HDRB (High-Damping Rubber Bearing), son de similar configuración a los anteriores. Se fabrican agregando al caucho elementos como carbón, aceites y resinas, a fin de aumentar el amortiguamiento hasta niveles entre 10 y 15%. Presentan una mayor rigidez durante los primeros ciclos de carga y poseen una notable flexibilidad lateral que permite el desplazamiento horizontal de los extremos del aislador. Las láminas de acero le proporcionan una gran rigidez vertical.

Poseen características similares a la amortiguación de un resorte, pues son capaces de almacenar y devolver energía sin sufrir deformaciones permanentes al cesar las cargas del sismo a las que es sometido el edificio. Es una excelente opción en áreas con limitaciones de espacio, porque no requiere un amortiguador por separado (Sísmica, 2012).

Figura No. 38 Aislador de caucho de alto amortiguamiento



Fuente: Sísmica, 2012

## 3) Aisladores de caucho con núcleo de plomo

Los apoyos LRB (Lead-plug Rubber Bearing), son muy similares a los dos tipos de aisladores anteriores, pero se diferencian por poseer un núcleo cilíndrico de plomo en el centro que aumenta el nivel de amortiguamiento viscoso a niveles entre 25 y 30%. Puede ser modelado como lineal o no lineal, de acuerdo a las disposiciones de la normativa. Al deformarse lateralmente durante un sismo, el núcleo de plomo fluye disipando energía en forma de calor e incidiendo en deformaciones plásticas. Al finalizar, las propiedades del elastómero retornan la estructura a su posición de equilibrio y el núcleo de plomo vuelve a cristalizarse. De esta forma, el dispositivo queda nuevamente preparado.

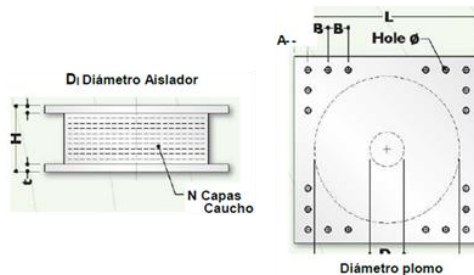
Su histéresis se asemeja a los materiales elastoplásticos; el caucho provee la capacidad de resorte y el núcleo de plomo la amortiguación; la atenuación se puede ajustar variando el diámetro del núcleo. Al final de su vida útil, se requiere un tratamiento especial para ser tratado como residuo industrial, dependiendo de la regulación ambiental del país (Sísmica, 2012).

Figura No. 39 Aislador de núcleo de plomo



Fuente: Sísmica, 2012

Figura No. 40 Propiedades técnicas de un aislador con núcleo de plomo



Cuadro No. 3 Propiedades de ingeniería para un aislador con núcleo de plomo

Diámetro Aislador, $D_i$ (mm)	PROPIEDADES DE DISEÑO			Desplazamiento Máximo, $D_{max}$ (mm)	Capacidad Carga Axial $P_{max}$ (kN)
	Rigidez Producida, $K_d$ (kN/mm)	Resistencia Características $Q_d$ (kN)	Rigidez a la compresión, $K_v$ (kN/mm)		
305	0.2-0.9	0-65	>50	150	450
355	0.2-1.2	0-65	>100	150	700
405	0.3-1.6	0-110	>100	200	900
455	0.3-2.0	0-110	>100	250	1,150
520	0.4-2.3	0-180	>200	300	1,350
570	0.5-2.8	0-180	>500	360	1,800
650	0.5-3.5	0-220	>700	410	2,700
700	0.5-4.2	0-220	>800	460	3,100
750	0.7-4.7	0-265	>900	460	3,600
800	0.7-5.3	0-265	>1,000	510	4,000
850	0.7-6.1	0-355	>1,200	560	4,900
900	0.7-6.1	0-355	>1,400	560	5,800
950	0.7-6.1	0-490	>1,800	610	6,700
1000	0.8-6.3	0-490	>1,900	660	7,600
1050	0.9-6.3	0-580	>2,100	710	8,500
1160	1.1-6.5	0-665	>2,800	760	13,800
1260	1.2-6.7	0-755	>3,700	810	20,500
1360	1.4-7.0	0-890	>5,100	860	27,600
1450	1.6-7.2	0-1,025	>5,300	910	33,400
1550	1.8-7.4	0-1,025	>6,500	910	40,000

Cuadro No. 4 Propiedades de ingeniería para un aislador con núcleo de plomo

TAMAÑO DEL DISPOSITIVO				DIMENSIONES DE LA PLACA DE SOPORTE					
Diámetro Aislador, D <sub>i</sub> (mm)	Altura Aislador, H (mm)	Número de capas de caucho, N	Diámetro del plomo, D <sub>L</sub> (mm)	L (mm)	t (mm)	Cantidad Orificios	Orificio Ø (mm)	A (mm)	B (mm)
305	125-280	4-14	0-100	355	25	4	27	50	-
355	150-305	5-16	0-100	405	25	4	27	50	-
405	175-330	6-20	0-125	455	25	4	27	50	-
455	175-355	6-20	0-125	510	25	4	27	50	-
520	205-380	8-24	0-180	570	25	8	27	50	50
570	205-380	8-24	0-180	620	25	8	27	50	50
650	205-380	8-24	0-205	700	32	8	27	50	50
700	205-430	8-30	0-205	750	32	8	33	65	75
750	230-455	8-30	0-230	800	32	8	33	65	75
800	230-510	8-33	0-230	850	32	8	33	65	75
850	230-535	8-35	0-255	900	38	12	33	65	95
900	255-560	9-37	0-255	955	38	12	33	65	95
950	255-585	10-40	0-280	1005	38	12	33	65	95
1000	280-635	11-40	0-280	1055	38	12	40	75	115
1050	305-660	12-45	0-305	1105	44	12	40	75	115
1160	330-760	14-45	0-330	1205	44	12	40	75	115
1260	355-760	16-45	0-355	1335	44	16	40	75	115
1360	405-760	18-45	0-380	1435	51	16	40	75	115
1450	430-760	20-45	0-405	1525	51	20	40	75	115
1550	455-760	22-45	0-405	1625	51	20	40	75	115

Fuente: DIS, 2007

#### 4. Consideraciones de diseño

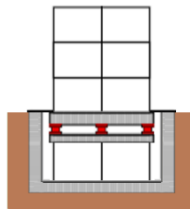
El diseño sismo-resistente de un edificio utilizando la técnica constructiva del aislamiento sísmico de base debe ser evaluado, tanto desde el punto de vista de la eficiencia dinámica, como del económico. Alcanzar este equilibrio requiere comparar ambas soluciones, es decir, realizar el análisis del comportamiento dinámico del edificio diseñado con base fija y luego con aislamiento sísmico de base.

La diferencia económica en ambos casos no siempre será el marco para la toma de decisiones. De hecho, el edificio aislado conseguirá una mejor eficiencia dinámica, pero su costo será más elevado; decidir la técnica constructiva debe considerar la importancia del edificio, aunque si se tratara de un hospital, posiblemente el costo del sistema de aislamiento sísmico de base no se escatimaría.

Por otra parte, el análisis de costos no solo se refiere a los gastos derivados de la adquisición e instalación del sistema de aislamiento sísmico de base; se deben tomar en cuenta y evaluar ciertos aspectos constructivos. Uno de ellos, es decidir dónde ubicar la interfaz de aislamiento, es decir, el límite para desacoplar la superestructura aislada, de la cimentación que se mueve rigidamente con el suelo (ver Figuras No. 41,42 y 43).

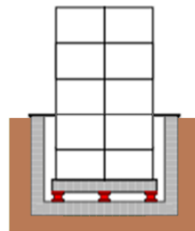
Si se elige el primer nivel del edificio, la instalación de los dispositivos de aislamiento sísmico requerirá de columnas y paredes totalmente separadas de la cimentación, lo cual obliga a colocar juntas horizontales para dar continuidad en escaleras, elevadores, fachadas y otros elementos no estructurales, lo que en obra muchas veces resulta inadecuado por ser más complicado de lo previsto.

Figura No. 41 Interfaz de aislamiento en primer nivel



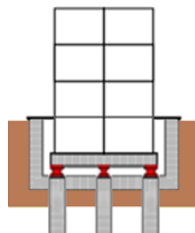
Si se escoge el nivel inferior de la cimentación, los muros de contención, que no pueden incluirse en el sistema de aislamiento, impedirían el desplazamiento de los aisladores sísmicos instalados en las columnas perimetrales, lo cual requiere agregar columnas u otros elementos para separar la estructura y aislarla de los muros de contención.

Figura No. 42 Interfaz de aislamiento en cimentación



Si la estructura se construye sobre pilotes, un diafragma u otros elementos estructurales proveerían la continuidad por encima de la interfaz de aislamiento. Las separaciones mínimas entre los muros de contención y la estructura aislada, deben ser mayores al desplazamiento máximo total para evitar el choque del diafragma.

Figura No. 43 Interfaz colocada sobre pilotes

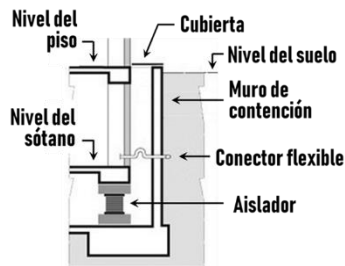


Fuente: Oviedo, 2015



En todos los casos, es necesario adaptar un diseño arquitectónico que facilite la conexión de componentes que se deban de acoplar encima, debajo o a través de la interfaz de aislamiento, como drenajes, tuberías de agua potable, energía eléctrica, escaleras, ascensores u otras instalaciones especiales. Además, requiere acceso y espacio suficiente para la inspección de los aisladores y su cambio.

Figura No. 44 Sección esquemática de un aislador



Fuente: Arnold, 2016

Los accesorios que se montan en las tuberías que cruzan la interfaz de aislamiento sísmico deben permitir desplazamientos relativos entre sus extremos; a menudo son fabricados para ser flexibles o están equipados con juntas universales.

Las escaleras y los puntos de acceso se deben acondicionar y fijar a la superestructura, para que permanezcan suspendidas o simplemente apoyadas en la estructura por debajo de la interfaz de aislamiento; pequeños deslizadores se pueden colocar para apoyar las escaleras y permitir movimientos laterales.

La estructura externa donde viaja el ascensor se debe acoplar a cada nivel de la superestructura y a partir de la interfaz de aislamiento o del nivel 0, aislarse de los sótanos; de esta forma, la torre del ascensor no se apoya en la subestructura, ya que queda suspendida de los niveles superiores. Otra alternativa es apoyar parcialmente esta torre sobre deslizadores para que pueda desplazarse lateralmente (Arnold, 2016).

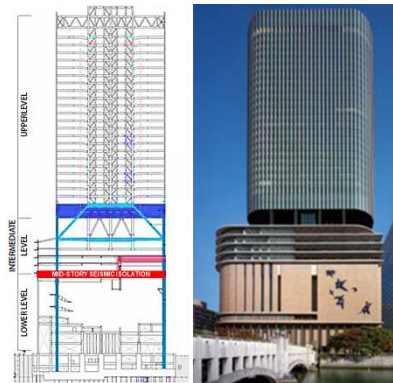
Un aspecto imprescindible de evaluar son las condiciones de suelo de apoyo y la geología local. No es recomendable aislar sísmicamente edificios que descansen sobre suelos no consolidados, no cohesivos o fácilmente disgregables y en aquellos que sean susceptibles de ser saturados por agua, ya que las vibraciones del sismo hacen que pierdan su estabilidad y consecuentemente disminuyan su resistencia, quedando la estructura vulnerable a sufrir asentamientos, agrietamientos, inclinaciones y eventualmente, daños irreparables que pueden conducir a la pérdida total.

De igual forma, no es aconsejable aislar sísmicamente estructuras sumamente rígidas con períodos de vibración muy bajos, ya que el aislador incrementará las aceleraciones del suelo en la estructura. Para este tipo de edificaciones, el rango ideal oscila entre períodos de 0.5 y un segundo.

También se debe tomar muy en cuenta que el aislamiento sísmico de base no es adecuado para edificios de gran altura y solo resulta bastante eficiente para edificaciones bajas y de mediana elevación; de hecho, el edificio más alto con aisladores sísmicos es “Los Angeles City Hall”, de 138 m de altura (32 niveles), rehabilitado en California, EE.UU., en 2001.

Sin embargo, el aislamiento sísmico de base puede presentarse como una opción para edificios de gran altura si se emplean técnicas sofisticadas de manera correcta. Como ejemplo se resalta el edificio “Nakanoshima Festival Tower”, un complejo rascacielos de 200 m de altura (39 niveles), rehabilitado en Osaka, Japón, en 2012. Este cuenta con 31 niveles aislados separados por la interface ubicada debajo del nivel 9, que divide la sección intermedia de la inferior. Es así, la segunda estructura sísmicamente aislada más alta del mundo (Okada, et al, 2014)

Figura No. 45 Nakanoshima Festival Tower



Fuente: Okada, et al, 2014

Es importante tener presente que una configuración estructural irregular produce desplazamientos máximos distintos en cada aislador, que dependen del nivel de excentricidad de la estructura y de las características del sismo. De manera general, el alejamiento de formas y esquemas estructurales simétricos es castigado severamente por los sismos. Por tal razón, es recomendable utilizar aisladores de sección transversal circular, cuyas propiedades, iguales en cualquier dirección, producen una mejor respuesta de la estructura dada la naturaleza errática de los sismos.

En cuanto a la protección de los aisladores contra incendios, las normas generalmente establecen que: en las áreas del edificio sin riesgo de incendios, no se requiere protección al fuego; en las áreas con riesgo de incendios o si la norma lo requiere, se debe proveer mediante extintores, pulverizadores de fibra mineral, mantas ignífugas (Figura No. 46) y cajas cortafuego (Figura No. 47), entre otros. Referente a los materiales con los que está hecho el aislador, el fabricante recomienda el tipo de protección al fuego que se deba emplear. Si se elige el primer nivel del edificio para la instalación de los dispositivos de aislamiento sísmico, es necesario colocar una cubierta resistente al fuego (DIS, 2007).

Figura No. 46 Aislador con manta ignífuga



Fuente: DIS, 2007

Figura No. 47 Aislador con caja protectora al fuego



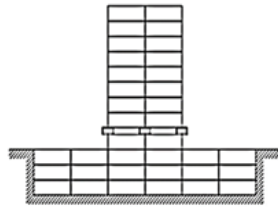
Fuente: DIS, 2007

El siguiente ejemplo permite formarse una idea de las consideraciones de diseño que deben tomarse en cuenta al momento de implementar un sistema de aislamiento sísmico, en el cual se presentan las ventajas y desventajas de algunas formas en que se podría ubicar la interfaz de aislamiento sísmico en un edificio de nueve niveles y tres sótanos (ver Figuras No. 48,49,50 y 51):

Torre del edificio aislada en el primer entrepiso

- Presenta problemas con la instalación de escaleras, elevadores, fachadas y otros elementos no estructurales.
- En estructuras esbeltas se pueden producir esfuerzos de tensión en los aisladores.
- La cimentación es más cara.

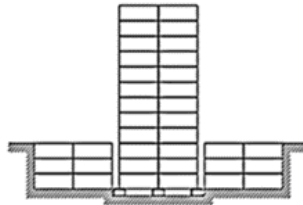
Figura No. 48 Torre del edificio aislada en el primer entrepiso



Torre del edificio totalmente aislada

- En torres esbeltas se pueden producir esfuerzos de tensión en los aisladores.
- La estructura puede resultar inestable.

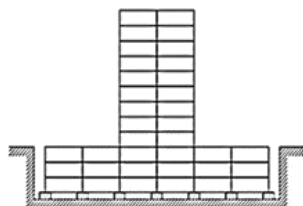
Figura No. 49 Torre del edificio totalmente aislada



Edificio totalmente aislado

- Es la mejor opción porque toda la estructura se protege sísmicamente.
- Si el edificio cuenta con más de un sótano, la contención del suelo resulta difícil y costosa.

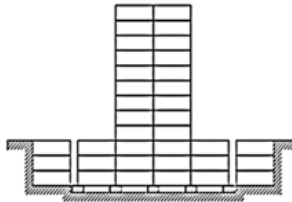
Figura No. 50 Edificio totalmente aislado



Torre del edificio parcialmente aislada

- Resuelve el problema de contención del suelo.
- Toda la estructura y sus contenidos están protegidos.
- Juntas típicamente en estacionamientos.

Figura No. 51 Torre del edificio parcialmente aislada



Fuente: León, 2017

## 5. Consideraciones económicas

Los costos que conlleva la protección sísmica de un edificio derivan esencialmente de las características de su uso y del nivel de seguridad estructural requerida por el proyecto. En concepto, se debe prever que su condición de servicio después de un sismo bastante severo permita que continúe siendo utilizado con normalidad. En sí, muchas veces el costo de una estructura protegida sísmicamente suele ser mayor que el de una construida con cimentación convencional.

En nuestro país, aún persiste la duda si estos sistemas realmente representan un ahorro o inclusive, si llegarán a transformar su demanda en el mercado inmobiliario. El costo de un aislador elastomérico oscila entre 9 y 15 mil dólares estadounidenses (Sirvesa, s.f.); si bien, la inversión en un sistema de asilamiento de base dependerá básicamente del tipo de dispositivos que se instalarán según el diseño adoptado, este gasto compensa las reparaciones de la estructura previstas por sismos durante su ciclo de vida (Genatios y Lafuente, 2016).

Muchas son las variables que influyen en el costo de cada proyecto en particular. En general, un edificio con aisladores de base no demandará columnas muy robustas ni elementos demasiado grandes para que la resistencia y estabilidad de la estructura soporten los esfuerzos de diseño, lo cual reduce los volúmenes de acero y concreto. Este ahorro en materiales se debe confrontar al menos con los siguientes costos:

#### Costos de inversión

- Dispositivos (fabricación, prototipos y ensayos en obra).
- Instalación (anclajes, montaje, nivelación, etc.).
- Protección contra el fuego de los dispositivos (en caso se requiera).
- Diafragma, columnas u otros elementos para soportar la interfaz y aislar la superestructura de la cimentación y ésta, de los muros de contención.
- Red de juntas de dilatación, conectores flexibles y otras tuberías para la acometida de energía eléctrica, agua potable, drenaje.
- Adaptación del foso del ascensor y otras instalaciones especiales.

#### Costos de mantenimiento

- Mantenimiento e inspecciones durante su vida útil.
- Reemplazo de unidades debido al envejecimiento, abrasión y/o uso.
- Mecanismo paralelo a ser instalado para realizar el remplazo de unidades.

Hoy en día existen diversos métodos para evaluar los costos de explotación de un edificio durante todo su ciclo de vida, considerando el valor de la inversión actual y los beneficios futuros. En la formulación de un proyecto es frecuente elegir la opción con el menor costo de inversión, aunque los costos de mantenimiento sean mayores o simplemente, no se toman en cuenta porque incumben a otra etapa, si bien, una menor inversión tiende a tener un mayor costo de mantenimiento y viceversa.

Por otra parte, la reducción de la probabilidad de daño e incluso, la pérdida total de la estructura a consecuencia de un sismo bastante severo, compensa la inversión inicial. De igual manera, se debe considerar que los costos de mantenimiento son permanentes y necesarios para conservar la estructura operativa, mismos que continuarán siendo realizados hasta que se incurran en nuevos costos de inversión destinados a extenderle la vida útil al edificio.

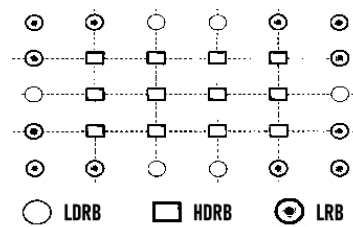
También es importante señalar que los costos asociados con la protección sísmica de un edificio, no solo se relacionan con la inversión en el tipo de tecnología empleada y la mano de obra especializada para su instalación, sino que además deben tomar en cuenta el valor económico de los contenidos y los componentes no estructurales, los cuales representan un monto muy superior al costo de la estructura. Por ello, más que la evaluación económica del proyecto, deben plantearse los beneficios comerciales que serán un factor crucial en la explotación económica y el futuro de la edificación. En sí, la inversión en aislamiento sísmico de base ha venido ganando la aceptación y la confiabilidad del mercado inmobiliario a nivel mundial (Genatios y Lafuente, 2016).

Muchas son las variables que se pueden llegar a considerar e influir en el costo de inversión de cada proyecto en particular, sin embargo, reducir los costos en aislamiento sísmico se consigue generalmente con alguna de estas soluciones:

a. Combinar varios tipos de aisladores elastoméricos

Estos dispositivos, totalmente compatibles, capaces de controlar los desplazamientos horizontales, proveer la suficiente rigidez torsional y retornar la estructura a su posición inicial, logran mejores resultados en conjunto al ubicar los aisladores con núcleo de plomo (LRB), en las áreas externas de la planta de cimentación, tal como se indica en la Figura No. 52 (Osorio, 2001).

Figura No. 52 Distribución óptima de sistema híbrido



Fuente: Osorio, 2001

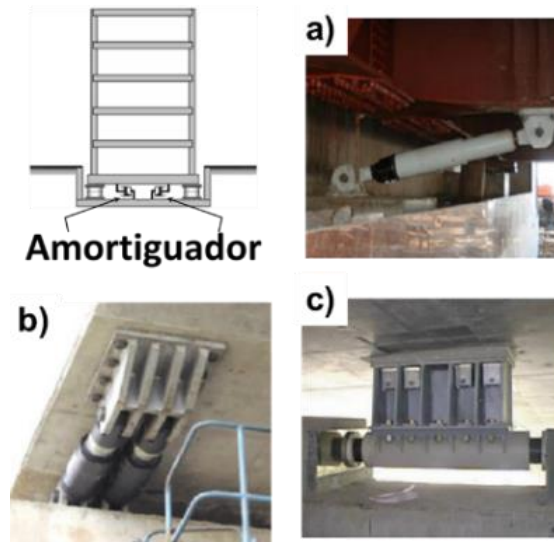
b. Utilizar aisladores circulares y con mayor sección transversal

Dada la naturaleza errática de los sismos, los aisladores elastoméricos de sección circular favorecen la respuesta de la estructura en cualquier dirección horizontal. Igualmente, su eficiencia y capacidad de carga aumentan conforme mayor sea su superficie, es decir, es preferible utilizar aisladores con mayor diámetro en vez de varios de menor diámetro. Una opción poco usual es utilizar aisladores longitudinales; su propósito es distribuir las cargas verticales que se concentran sobre los aisladores de sección transversal circular o cuadrada, sobre una superficie más extendida.

c. Incrementar la relación de amortiguamiento del sistema de aislamiento de base

Para mejorar la respuesta sísmica del edificio resulta conveniente agregar en paralelo disipadores de energía, entre ellos: de amortiguación hidráulica para controlar los desplazamientos (a); de conexión rígida que actúan bajo movimientos de alta velocidad (b); de amortiguación de fluido viscoso diseñados para poseer una función de resorte que retorna a su posición al terminar el sismo (c) (Tecnoav, s.f.).

Figura No. 53 Tipos de disipadores sísmicos

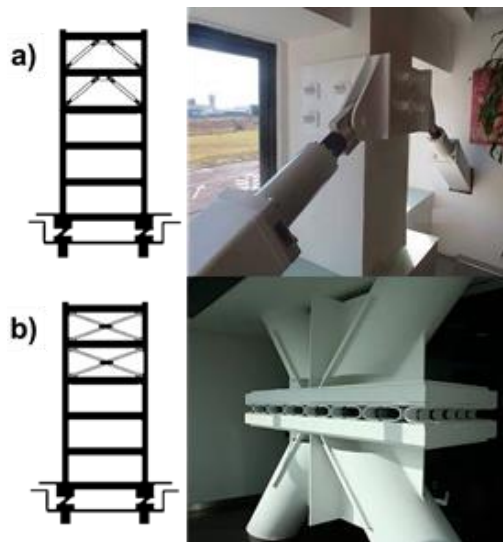


Fuente: Tecnoav, s.f.

d. Combinar dispositivos de protección sísmica

Una alternativa bastante eficiente es combinar con el aislamiento sísmico de base otros dispositivos diseñados para absorber o disipar la energía sísmica, ya sean amortiguadores (a) o disipadores de fricción (b), que se instalan en los últimos niveles del edificio para minimizar el cabeceo; tiene el inconveniente que se aumenta el peso de la estructura. En la medida que se sofistican e implementan otros sistemas de protección sísmica, el costo de inversión aumenta.

Figura No. 54 (a) Amortiguadores (b) Disipadores de fricción



Fuente: OAK58, s.f.



Los costos del aislamiento sísmico de base resultan ser muy representativos porcentualmente y poco redundantes en edificaciones pequeñas, pues significa, no solo invertir en el tipo de tecnología de aislamiento de base empleada y la mano de obra especializada para su instalación, sino también, evaluar los costos a partir del estudio de las condiciones de suelo de apoyo y la geología local, la amenaza sísmica, el tipo de uso de la estructura, la configuración y materiales de la estructura, pero principalmente, el daño estructural que se espera.

Determinar la factibilidad económica de proteger sísmicamente un edificio utilizando aisladores elastoméricos, significa, además de requerir un adecuado análisis de los costos de inversión y mantenimiento asociados a la implementación de tales dispositivos, anteriormente discutidos, evaluar integralmente los costos de reparación o reemplazo/rehabilitación y lucro cesante, el cual, es una forma de daño patrimonial que consiste en la pérdida de la utilidad económica de un edificio como consecuencia del daño ocasionado por un terremoto y que no se habría producido si el terremoto no hubiera ocurrido (Genatios y Lafuente, 2016).

Los costos de operación y de remodelación/reutilización de estructuras no se consideran en este enfoque económico. Los primeros se refieren a todos aquellos gastos periódicos contemplados para el funcionamiento del edificio desde el inicio hasta el final de su vida útil, tales como energía eléctrica, agua potable, sistemas de aire acondicionado/calefacción y otros. Incluyendo el mantenimiento preventivo de la estructura durante el período de uso, como limpieza de fachadas, pintura, albañilería, plomería, goteras, impermeabilización, curación de superficies expuestas, y otras medidas de protección. Los segundos tratan acerca de modificar, alterar o transformar las características de la estructura y/o adaptarla a un nuevo uso.

Los costos de reparación o reemplazo/rehabilitación se derivan a consecuencia de un evento sísmico o que corresponden al mantenimiento correctivo al final de la vida útil del edificio. Comprenden los trabajos de diagnóstico, reparación, refuerzo y protección de elementos estructurales que advierten la corrección de fallas evidentes.

En sí, un edificio aislado exhibe un notable nivel de seguridad estructural y reduce los costos de reparación ocasionados por terremotos; aun así, la decisión de invertir en este tipo de protección todavía debe evaluar integralmente los costos de reparación de los elementos no estructurales y los contenidos, en la alternativa sin aislación de la estructura. Lograr precisar la mejor opción involucra el balance entre el capital de inversión, la Arquitectura y la Ingeniería del proyecto.

## 6. Ejemplo de implementación de un sistema de aislación sísmica

El siguiente ejemplo es una aplicación práctica, en el ámbito inmobiliario para incrementar la seguridad estructural, que permite formarse una idea sobre el costo de la implementación de un sistema de aislación sísmica:

El edificio “Torre del Sol”, el más moderno proyecto inmobiliario de la ciudad de Copiapó, Chile, desarrollado por la Constructora ALCORP, S.A. Tiene cerca de 19,000 m<sup>2</sup> de construcción, 19 niveles en total y es el edificio residencial con aislación sísmica de base más alto de América Latina. Asentado sobre 45 aisladores sísmicos de caucho con núcleo de plomo (LRB), cuyo costo unitario fue alrededor de los 9,409.76 dólares estadounidenses (US\$), proveen amortiguamientos efectivos del orden de 25 y 23% para los sismos de diseño y máximo probable, respectivamente, conforme a los ensayos de laboratorio. Así, el sistema de aislación reduce las aceleraciones y deformaciones máximas de la estructura entre un 75 y 85% respectivamente.

Figura No. 55 Edificio Torre del Sol



Fuente: Metal Design, 2014

El costo total de incorporar el sistema de aislación fue cerca de US\$ 846,878.67, valor que corresponde al 7.9% del monto total del proyecto y que equivale a un costo de US\$ 44.58 por metro cuadrado (US\$/m<sup>2</sup>), aproximadamente. De este costo, el 50% o sea 22.29 US\$/m<sup>2</sup>, se refiere a costos directos del sistema de aislación (aisladores, ensayos, placas base, anclajes, etc.) y el otro 50%, 22.29 US\$/m<sup>2</sup>, a los costos de las obras anexas (elementos flexibles para instalaciones y para cubrir juntas de aislación, envigados, etc.). A estos costos, aún se debe descontar el ahorro en materiales por la reducción de las secciones de los elementos estructurales (AICE, 2012).

## VI. METODOLOGÍA

### A. CRITERIOS DE DISEÑO SÍSMICO

#### 1. Marco de referencia

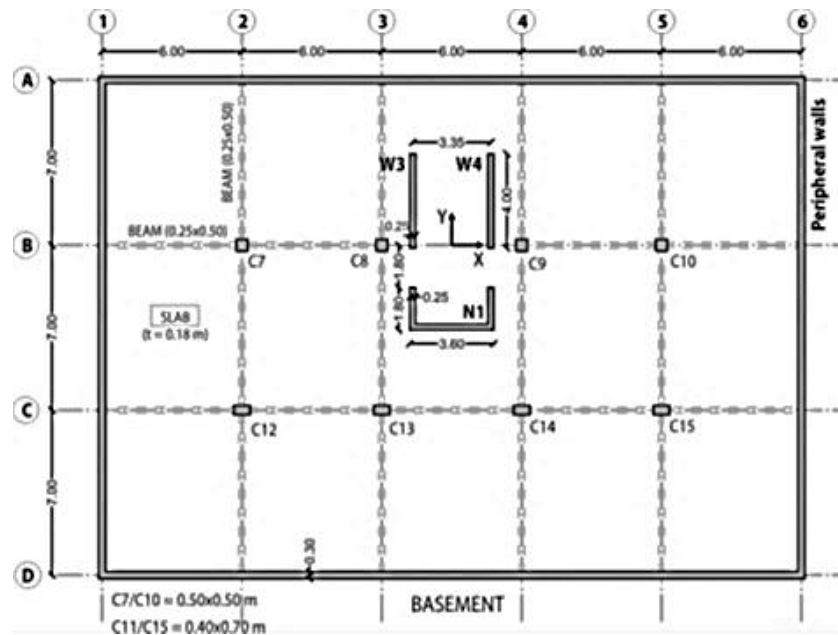
Con el fin de realizar el análisis comparativo sobre el comportamiento estructural entre un edificio diseñado con base fija y otro utilizando la técnica constructiva del aislamiento sísmico de base, se optó por contrastar las normas EN 1998 (2004), ASCE/SEI 7-10 y AGIES - NSE (2017). Para ello, se decidió desarrollar totalmente el diseño sísmico del edificio presentado en el "Taller EC 8: Diseño sísmico de edificios", realizado en la ciudad de Lisboa, Portugal, el 10 y 11 de febrero de 2011, como una estrategia de la Comisión Europea para la implementación, armonización y desarrollo de los Eurocódigos, cuyo documento final fue publicado en 2012 por el Joint Research Centre (JCR). En sí, la norma europea se utilizó como patrón de comparación.

Los resultados obtenidos en el ejemplo trabajado bajo las normas contenidas en el EC-8 para edificios diseñados con base fija, fueron comparados con los resultados conseguidos mediante la norma AGIES - NSE (2017) y los obtenidos para edificios diseñados con aislamiento sísmico de base, con los de la norma ASCE/SEI 7-10. De esta forma, se logra comparar objetivamente la respuesta sísmica de un mismo edificio bajo dos normas de seguridad estructural diferentes.

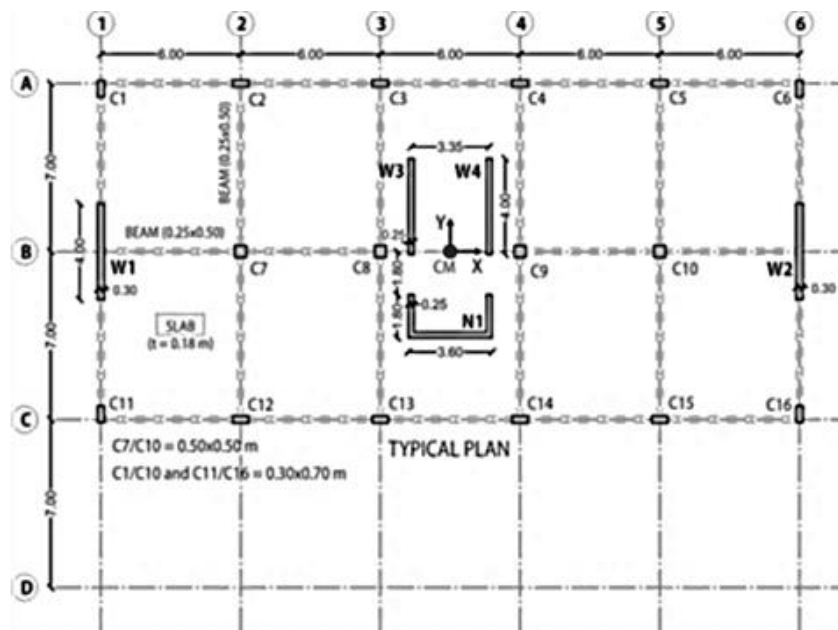
#### 2. Descripción del edificio

El modelo a diseñar es un edificio de concreto reforzado de seis plantas sobre el nivel del suelo de 30 x 14 m destinadas al uso de oficinas y dos sótanos de 30 x 21 m como parqueos. La altura total de la estructura es de 25 m; 19 m corresponden a la superestructura. La separación entre plantas y sótanos es de 3.0 m, a excepción de la planta baja (entre los niveles 0 y 1), que es de 4.0 m. El sótano queda confinado entre paredes perimetrales y la cimentación se apoya sobre suelo tipo B. La losa tiene 0.18 m de espesor y el sistema estructural consiste en muros y marcos.

Figura No. 56 Planta típica y planta de sótanos del edificio a utilizar



(a)



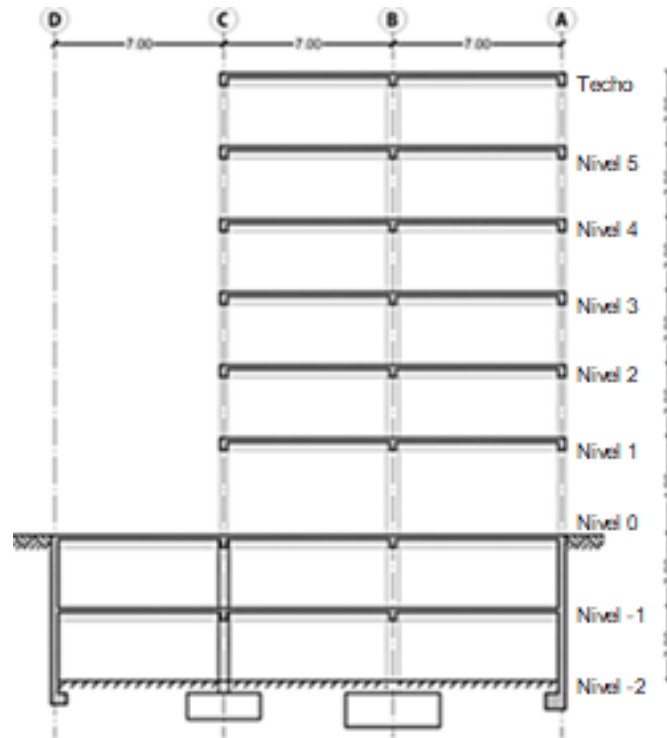
(b)

Plano del edificio:

(a) Niveles del sótano.

(b) Niveles superiores a 0. Los ejes X e Y, así como el origen del sistema de coordenadas globales y el centro de masa (CM) están marcados.

Figura No. 57 Sección transversal del edificio a utilizar



El concreto empleado tiene una resistencia de 25/30 N/mm<sup>2</sup> (255/305 kg/cm<sup>2</sup>), un módulo de elasticidad medio,  $E_{cm} = 31\text{GPa}$  (315,000 kg/cm<sup>2</sup>) y su coeficiente de Poisson,  $\nu$ , es 0 (concreto fisurado). La estructura se diseña con clase de ductilidad intermedia y acero de refuerzo S500 Clase C que cuenta con un límite a la fluencia de 500 MPA (5,100 kg/cm<sup>2</sup>).

Las masas el edificio por nivel se presentan en el Cuadro No. 55. La masa total en el Nivel 1 es igual a 2,351 toneladas. Los niveles que están destinados al uso de parqueo no se tomarán en cuenta, pues sus deformaciones son muy bajas por lo que sus resultados no tienen influencia en el análisis de este trabajo.

Cuadro No. 5 Masas correspondientes a cada nivel del edificio

Nivel	Masa ton
Techo	370.12
Nivel 5	391.30
Nivel 4	391.30
Nivel 3	391.30
Nivel 2	391.30
Nivel 1	415.12

### 3. Criterios de análisis

EN 1998 (EC 8) establece dos niveles de desempeño sísmico: no colapso y limitación del daño. En el primero, la edificación debe soportar la acción sísmica de diseño, conservar su integridad estructural y extender su capacidad de carga residual después del sismo. En el segundo, debe resistir un sismo con una mayor probabilidad de ocurrencia, pero que al mismo tiempo supere el sismo de diseño, sin padecer daños que limiten su uso y funcionalidad.

La prevención del colapso se ocupa de proteger la vida humana en el proceso de evacuación o durante las réplicas, aún si la estructura resultara económicamente irreparable. La limitación del daño se relaciona con la disminución de pérdidas económicas debidas a reparaciones ocasionadas por sismos frecuentes; la estructura no debe presentar deformaciones permanentes y sus elementos deben conservar su resistencia y rigidez originales.

#### a. Clasificación de las estructuras y factores de seguridad

Las normas estudiadas fijan una vida útil de referencia de 50 años a la mayor parte de edificaciones, período durante el cual, se estima que estarán sometidas a la acción de sismos de baja intensidad y ocurrencia frecuente; de mediana intensidad y ocurrencia probable; y de gran intensidad y ocurrencia poco probable. El nivel de riesgo considerado se establece clasificando las estructuras según su importancia y las consecuencias de la falla y, la probabilidad de exceder el sismo de diseño, modificando el período de retorno para elegir el sismo adecuado al diseño según la sismicidad de la región.

EC 8 clasifica los edificios en cuatro “clases de importancia” partiendo de las consecuencias del colapso para la vida humana, la sociedad y la economía, así como por su importancia para la seguridad pública y la protección civil. Determina la confiabilidad del edificio recomendando un “factor de importancia  $\gamma_i$ ” a cada clase de importancia. Este factor depende, tanto del período de retorno y de la probabilidad que se supere la intensidad de un sismo extremo en un ciclo de vida útil de 50 años, elegido para el requisito de no colapso, como para el cumplimiento del requisito de limitación del daño, cuyo tiempo de vida útil se reduce a 10 años, pero para un sismo de menor intensidad.

Para edificios aislados sísmicamente, el factor de importancia  $\gamma_I$  ajusta su valor a 1.2, independientemente de la clase de importancia.

Cuadro No. 6 Clases de importancia y factores de importancia  $\gamma_I$  recomendados – EC 8

Clase de importancia	Edificios	Factor de importancia $\gamma_I$
I	Edificios de menor importancia para la seguridad pública, por ejemplo, edificios agrícolas, etc.	0.8
II	Edificios ordinarios, que no pertenecen a las otras categorías	1.0
III	Edificios cuya resistencia sísmica es importante en vista de las consecuencias asociadas con un colapso, por ejemplo, escuelas, salones de actos, instituciones culturales, etc.	1.0
IV	Edificios cuya integridad durante los terremotos es de vital importancia para la protección civil, por ejemplo, hospitales, estaciones de bomberos, centrales eléctricas, etc.	1.4
–	Edificios aislados sísmicamente	1.2

ASCE 7-10 clasifica los edificios y otras estructuras en función del grado de peligro para la vida humana, la salud y el bienestar asociados con el daño a la propiedad o la pérdida de uso o funcionalidad. Hace una categorización del riesgo según su uso u ocupación y recomienda un “factor de importancia  $I_e$ ” por cada categoría. Este factor depende del período de retorno elegido para el requisito de no colapso, cuya probabilidad de excedencia contempla un período de 50 años.

Los edificios sísmicamente aislados toman el factor de importancia  $I_e$  igual a 1.0, independientemente de la asignación de su categoría de riesgo.

Cuadro No. 7 Categoría de riesgo y factores de importancia  $I_e$  recomendados – ASCE 7-10

Categoría del riesgo	Uso u ocupación de edificios y estructuras	Factor de importancia $I_e$
I	Edificios y otras estructuras que representan un bajo riesgo para la vida humana en caso de falla	1.0
II	Todos los edificios y otras estructuras, excepto las enumeradas en las categorías de riesgo I, III y IV	1.0
III	Edificios y otras estructuras no incluidas en la categoría IV o donde se manejan sustancias tóxicas o explosivas, cuyo colapso es un riesgo catastrófico para la vida humana	1.25
IV	Edificios y otras estructuras esenciales requeridas para mantener la funcionalidad de otras instalaciones o donde se manejan sustancias tóxicas o explosivas, cuyo colapso podría significar un peligro desastroso para la comunidad	1.5
–	Edificios aislados sísmicamente	1.0

NSE 1 clasifica las obras según sea la naturaleza de su uso u ocupación, del impacto socioeconómico que pueda implicar la falla o el cese de sus funciones, del grado de control del daño y de la cantidad de elementos en riesgo. Establece cuatro “categorías de ocupación” y recomienda el “factor  $K_d$ ” para la clasificación del riesgo sísmico en función de cuatro niveles de “sismo de diseño”. Éstos se basan en el porcentaje de probabilidad de ser excedidos en un período de 50 años: 10% "básico", obras ordinarias; 5% “severo”, obras importantes y esenciales; 2% "extremo", es la base del mapa de zonificación sísmica del país y “mínimo”, una reducción del sismo básico para obras utilitarias y readecuación de las existentes. La norma establece el “sismo extremo” como sismo de referencia y se diseña con sismos más reducidos para proveer una capacidad post-elástica remanente, que le permita resistir a la estructura sismos aún mucho mayores antes de colapsar.

En cuanto a las nuevas tecnologías de protección sísmica, la norma no considera ningún tipo de los sistemas de protección sísmica para edificios ni de otras estructuras.

Cuadro No. 8 Categorías de ocupación y factores  $K_d$  recomendados – AGIES NSE (2017)

Categoría de ocupación	Obras	Factor $K_d$
I	<u>Utilitarias</u> : albergan personas de manera incidental, sin tener construcciones habitables, de estar o de trabajo, como instalaciones agrícolas o industriales, bodegas, etc.	0.55
II	<u>Ordinarias</u> : no están incluidas en las categorías I, III o IV y tienen una carga de ocupación inferior a 300 personas	0.66
III	<u>Importantes</u> : prestan servicios importantes (no esenciales) después de un desastre a personas o entidades o albergan valores culturales, como escuelas, museos, prisiones, etc.	0.80
IV	<u>Esenciales</u> : estatales o privadas, que deben permanecer en operación continua durante y después de un siniestro, como puentes, hospitales, bomberos, policía, etc.	0.80
–	Sismo “extremo” de referencia	1.00

El edificio en estudio está destinado al uso de oficinas. Por lo tanto, se clasificó de acuerdo a cada una de las normas analizadas de la siguiente manera:

Cuadro No. 9 Comparación de la clasificación y de los factores recomendados

Norma	Clasificación	Descripción	Factor
EC 8	Clase de importancia II	Edificios ordinarios, que no pertenecen a las otras categorías	$\gamma_1 = 1.0$ ( $\gamma_1$ aislado = 1.2)
ASCE 7-10	Categoría del riesgo II	Todos los edificios y otras estructuras, excepto las enumeradas en las categorías de riesgo I, III y IV	$I_e = 1.0$ ( $I_e$ aislado = 1.0)
NSE 1	Categoría de ocupación II	Ordinarias: no están incluidas en las categorías I, III o IV y tienen una carga de ocupación inferior a 300 personas	$K_d = 0.66$



NSE 1, de manera similar a versiones antiguas de ASCE 7, clasifica las edificaciones por función y carga de ocupación. Para establecer si la “carga de ocupación” es inferior o mayor a 300 personas, se aplica la siguiente ecuación:

$$\text{Carga de ocupación} = \Sigma \text{Área bruta del piso} / \text{Factor de carga de ocupación}$$

Cuadro No. 10 Carga de ocupación – AGIES NSE (2017)

Clasificación de obra por función	Área (m <sup>2</sup> )	Niveles	Factor de carga de ocupación (m <sup>2</sup> / persona)	Carga de ocupación
Oficinas	30 x 14	6	11.0	229
Parqueos	30 x 21	2	18.5	68
La carga total de ocupación es inferior a 300 personas				<b>297</b>

#### b. Clasificación del sitio

La vibración del sismo en la superficie está sumamente influenciada por las condiciones del suelo subyacente y, en consecuencia, las características del sitio de construcción y la naturaleza del suelo de apoyo condicionan la respuesta sísmica de las estructuras. Las tres normas estudiadas clasifican el sitio de interés con base en las características del perfil de suelo en los primeros 30 m de profundidad, basándose en los tres parámetros siguientes:

- La velocidad media de la onda de corte,  $V_s$ .
- El número de golpes en la prueba de resistencia a la penetración estándar.
- La resistencia al corte del suelo no drenado.

De estos, la velocidad media de la onda de corte es el parámetro principal para la selección del tipo de suelo.

La clasificación del sitio es necesaria para configurar correctamente el espectro del sismo de diseño. Se realiza a partir de la velocidad media de propagación de las ondas de corte en los 30 primeros metros de profundidad; cuando la información sobre estas velocidades no está disponible, los otros parámetros se pueden usar para seleccionar el tipo de suelo apropiado.

EC 8 clasifica siete “tipos de suelo”: A, B, C, D, E,  $S_1$  y  $S_2$ . En cuanto a su composición estratigráfica, los perfiles de A a D están conformados por roca u otras formaciones rocosas, incluyendo suelos cohesivos blandos o sueltos sin cohesión. El tipo E se caracteriza por constituirse de capas superficiales suaves o sueltas con espesores entre 5 y 20 m, ubicados sobre una formación subyacente mucho más rígida. Los suelos  $S_1$  y  $S_2$  requieren estudios geológicos y geotécnicos del terreno especiales para definir el tipo y condiciones de la cimentación.

Dichos suelos suelen tener una baja amortiguación interna, valores muy bajos de  $V_s$  y un comportamiento lineal anormal entre esta capa y los materiales subyacentes, lo cual resulta en una amplificación sísmica distorsionada del sitio.

Cuadro No. 11 Tipo de suelo y sus propiedades a 30 metros – EC 8

Tipo de suelo	Descripción estratigráfica	Parámetros		
		$V_s$ (m/s)	$N_{SPT}$ Golpes/30 cm	$C_u$ (kPa)
<b>A</b>	Roca o terreno rocoso a partir de 5 m de profundidad	> 800	--	--
<b>B</b>	Arena o grava muy densa; arcilla muy dura de varias decenas de metros de profundidad	360 – 800	> 50	> 250
<b>C</b>	Arena o grava densa/semidensa; arcilla dura de varias decenas de metros de profundidad	180 – 360	15 – 50	70 – 250
<b>D</b>	Arena o grava de baja a media densidad; arcilla blanda/semidura	< 180	< 15	< 70
<b>E</b>	Estrato tipo C o D, de 5 a 20 m de profundidad, sobre estratos tipo A			
<b>S<sub>1</sub></b>	Estratos de arcilla blanda con más de 10 m de espesor que poseen una alta plasticidad ( $PI > 40$ ) y un alto contenido en agua	< 100	--	10 – 20
<b>S<sub>2</sub></b>	Suelos arcillosos sensibles a la licuefacción y otros tipos de suelo			

ASCE 7-10 hace una clasificación de seis “clases del sitio”: A, B, C, D, E y F. Las clases de A a D son suelos constituidos por roca o suelos bastante compactos. El sitio clase E corresponde a estratos de arcilla blanda con más de 3 m (10 pies) de espesor; aquellas capas de suelo sin cohesión deben al menos poseer un índice de plasticidad  $PI > 20$  y un contenido de humedad  $w \geq 40\%$ .

El sitio F consiste en suelos colapsables, débilmente cementados y sensibles a posibles fallas bajo cargas sísmicas; incluyen arcillas altamente orgánicas o turba y suelos arcillosos vulnerables a la licuefacción.

Cuadro No. 12 Clase de sitio y sus propiedades a 30 metros – ASCE 7-10

Clase de sitio	Descripción estratigráfica	Parámetros		
		$\bar{v}_s$ (ft/s)	<b>N o N<sub>ch</sub></b> Golpes/30 cm	<b>S<sub>u</sub></b> (psf)
<b>A</b>	Roca dura	> 5000	N/A	N/A
<b>B</b>	Roca	2500–5000	N/A	N/A
<b>C</b>	Suelo muy denso y roca blanda	1200–2500	> 50	> 2000
<b>D</b>	Suelo rígido	600–1200	15 – 50	1000–2000
<b>E</b>	Suelo de arcilla blanda	< 600	< 15	< 1000
<b>F</b>	Suelos que requieren análisis de respuesta del sitio			

NSE 2 tipifica los sitios en las siguientes categorías: AB, C, D, E y F. Los suelos A y B son depósitos densos y profundos de roca sólida, moderadamente fragmentada o intemperizada; C y D son perfiles de suelo firmes; E son estratos blandos de 3 m o más de espesor con un índice de plasticidad  $IP > 20$  y de humedad  $w \geq 40\%$ . La clase F son estratos susceptibles de falla o colapso bajo cargas sísmicas e incluyen suelos licuables o débilmente cementados; turbas y/o arcillas con alto contenido orgánico de más de 3 m; arcillas altamente plásticas o de baja rigidez con espesores de 8 y 12 m, respectivamente; arcillas semirígidas o suaves en estratos mayores que superan los 36 m.

Cuadro No. 13 Clase de suelo y sus propiedades a 30 metros – AGIES NSE (2017)

Clase de suelo	Descripción estratigráfica	Parámetros		
		<b>V<sub>ps</sub></b> (m/s)	<b>N<sub>p</sub> o N<sub>nc</sub></b> Golpes/30 cm	<b>S<sub>uc</sub></b> (kPa)
<b>A</b>	Roca dura	> 1524	N/A	N/A
<b>B</b>	Roca	762 - 1524	N/A	N/A
<b>C</b>	Suelo muy denso y roca suave	366 - 762	> 50	> 250
<b>D</b>	Suelo firme y rígido	183 - 366	15 - 50	250 - 50
<b>E</b>	Suelo suave	< 183	< 15	< 50
<b>F</b>	Suelos con problemas especiales			

Se recurrió al Sistema Internacional de Unidades (SI) como medio de referencia para clasificar la naturaleza geológica del perfil del suelo de apoyo clasificado como tipo B, tomando la velocidad media de la onda de corte ( $V_s$ ), como el parámetro principal de comparación con las otras normas:

Cuadro No. 14 Comparación de tipo de suelo / clase de sitio

Norma	Tipo de suelo / Clase de Sitio	Descripción estratigráfica	$V_{s,30}$ (m/s)	$N_{SPT}$ Golpes/30 cm	$C_u$ (kPa)
EC 8	B	Depósitos de arena muy densa, grava o arcilla muy rígida, de al menos varias decenas de metros de espesor, caracterizados por un aumento gradual de las propiedades mecánicas con la profundidad	360 - 800	> 50	> 250
ASCE 7-10	C	Suelo muy denso y roca blanda	366 - 762	> 50	> 96
NSE 1	C	Suelo muy denso y roca suave	366 - 762	> 50	> 250

### c. Clasificación de la sismicidad del lugar

La severidad esperada de un sismo en una localidad debe tomar en cuenta la configuración tectónica regional, la geología y la “sismicidad”, relacionada esta última con la frecuencia con que ocurren los sismos en ese lugar. Para fines de diseño, la sismicidad se basa en la evaluación del peligro sísmico, usualmente presentado en mapas de zonificación que se dividen en macro-zonas de amenaza sísmica, caracterizadas por su “índice de sismicidad” según el peligro local y asumiendo regularmente una condición de suelo rocoso; pueden subdividirse en micro-zonas para señalar condiciones sísmicas severas geográficamente localizadas. Estos valores se basan en registros históricos y datos geológicos y son también ajustados para proveer criterios de diseño consistentes con la región.

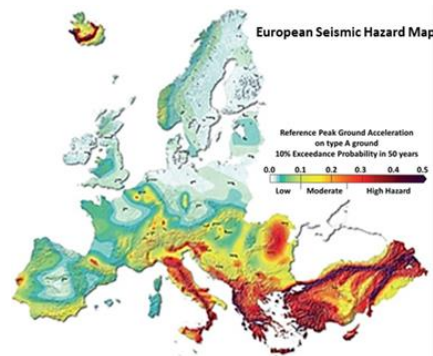
La sismicidad incide en la selección del espectro sísmico de diseño. Las tendencias más recientes describen el riesgo sísmico por los valores de las ordenadas espectrales que corresponden a ciertos períodos clave en el espectro de respuesta, aunque una gran mayoría de normas aún emplean el valor de la aceleración máxima del suelo (peak ground acceleration, PGA), como una medida relativa de la sismicidad en una localidad expresada en función de la gravedad “g”.

EC 8 caracteriza cada zona sísmica en base a la “aceleración máxima del suelo de referencia para suelos tipo A,  $a_{gR}$ ”, o PGA, información que figura con mayor detalle en los mapas de zonificación sísmica incluidos en el Anexo Nacional de cada país miembro. Para otros períodos de retorno, el factor de importancia  $\gamma_I$  se adopta para estimar la “aceleración sísmica de diseño,  $a_g$ ”, establecida por la relación:  $a_g = \gamma_I * a_{gR}$ .

El mapa de riesgo sísmico elaborado en 2013 por SHARE (Seismic Hazard Harmonization in Europe), indica los distintos niveles de peligro sísmico que se alcanzarán o superarán en los próximos 50 años a lo largo del continente europeo con una probabilidad de excedencia del 10%, basado en el registro histórico de los terremotos de los últimos 1,000 años, en el conocimiento de las fallas activas, en la manera y la velocidad de deformación de la corteza terrestre y en la data de las aceleraciones máximas del suelo ( $a_{gR}$ ) provocadas por sismos anteriores.

El mapa exhibe tres macro-zonas de peligro sísmico asociadas a los grados de intensidad de la “Escala Macro-sísmica Europea (EMS)”: zona de alto peligro, con valores de  $a_{gR}$  de 0.5 a 0.25 g, se indican en rojo oscuro por ser las áreas de mayor riesgo; zonas de peligro moderado, entre 0.25 y 0.1 g, se muestran en color naranja y amarillo; y zonas de bajo riesgo, en color azul y verde, de 0.1 hasta 0 g.

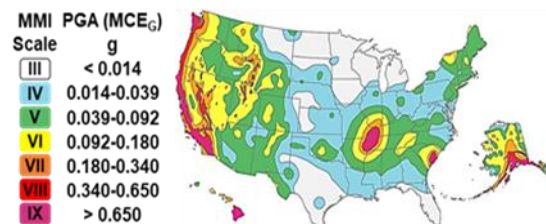
Figura No. 58 Mapa de peligro sísmico de Europa



Fuente: Share-EU, 2013

ASCE 7-10 determina el nivel de sismicidad de cada lugar o región basándose en la probable “aceleración máxima del suelo (PGA) de la media geométrica del máximo terremoto considerado ( $MCE_G$ )”, que se toma como la aceleración media del suelo sobre roca dura (sitio clase A) con una probabilidad de excedencia del 2% en un período de 50 años. Siete macro-zonas de peligro sísmico, asociadas a los grados de intensidad de la escala de “Mercalli Modificada (MMI)”, se fijan en mapas de zonificación sísmica. Los valores de estos mapas se multiplican por 2/3 y se corrigen multiplicándolos por el “factor de importancia  $I_e$ ” para obtener el sismo de diseño.

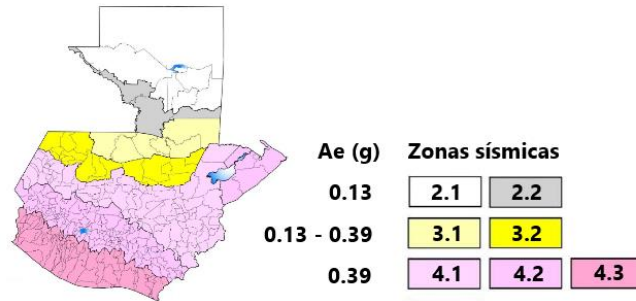
Figura No. 59 Mapa de peligro sísmico de Estados Unidos



Fuente: USGS, s.f.

NSE 2 establece tres niveles de intensidad sísmica en base a la “aceleración del sismo extremo (Ae)”, que corresponde a la aceleración media del suelo en el basamento rocoso (suelo tipo A) con 2% de probabilidad de ser excedido en 50 años. Siete zonas sismológicas dividen el territorio nacional que, a partir de la falla del Motagua-Polochic (4.1), aumentan de intensidad a medida que se acercan a la zona de subducción (4.3) en el Océano Pacífico; la intensidad más baja de sismicidad incumbe a la región norte del país (2.1 y 2.2) y el nivel de intensidad moderada a la región nororiental (3.1 y 3.2).

Figura No. 60 Mapa de zonificación sísmica de Guatemala



Fuente: AGIES, 2017

El mapa de zonificación sísmica distingue estas zonas por su “índice de sismicidad  $I_0$ ”, cuyo valor entre 2 y 4 aumenta el grado de la amenaza sísmica del sitio, el cual, esta norma lo especifica con mayor detalle en el “Anexo A - Listado de Amenaza Sísmica por Municipios”. Para fines de diseño, la sismicidad de la región se expresa en función de la aceleración máxima del suelo de referencia,  $a_{gR} = 0.25g$  y de la magnitud de las ondas de superficie  $M_s > 5.5$ , generalmente asociadas a sismos lejanos poco profundos (menores de 70 km) con magnitudes entre 5 y 8.

La estructura se diseña con ductilidad clase media (DCM)  $4 > q > 1.5$ ; la energía sísmica será disipada por toda la estructura, sin mayor pérdida de su resistencia.

Siendo  $a_g = \gamma_1 * a_{gR}$ , donde  $a_{gR} = 0.25g$  y habiendo obtenido el factor de importancia,  $\gamma_1 = 1.0$  de la clasificación de la estructura, la “aceleración sísmica de diseño”,  $a_g = 0.25g$ , se convierte en el parámetro de comparación para ser relacionado con las otras normas como sigue:

Cuadro No. 15 Comparación de sismicidad

Escala	Grado	Intensidad	g
European Macroseismic Scale	VIII	Causa daños severos	0.24 - 0.40
Mercalli Modificada	VII	Daño moderado en estructuras	0.18 - 0.34
Mercalli Modificada	VII	Daño moderado en estructuras	0.13 - 0.39

Asimismo, estos valores de  $g$  también se indican en los mapas de zonificación sísmica en distintos rangos; por ejemplo, en el European Seismic Hazard Map, el rango entre 0.25 y 0.5  $g$ , se presenta en rojo oscuro por ser las áreas de mayor riesgo y, para el territorio nacional, el rango de 0.13 a 0.39 define a la región nororiental con el nivel de intensidad moderada (3.1 y 3.2).

d. Configuración de espectro de diseño

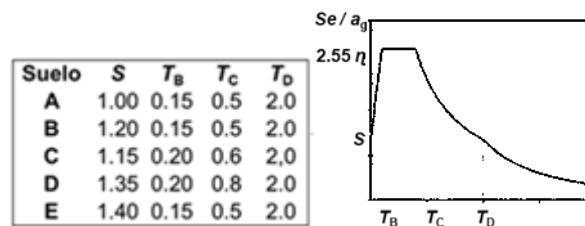
Los “espectros de diseño” marcan el final de los estudios de peligrosidad sísmica y el inicio del análisis de la respuesta de la estructura. Los “espectros de respuesta”, casi siempre normalizados por la aceleración máxima del suelo, son el punto de partida para el cálculo de las fuerzas de diseño y la estimación de las deformaciones laterales; ello requiere conocer las propiedades y la naturaleza geológica del suelo en el sitio de construcción, las características sísmicas del lugar y el período fundamental del edificio que se construirá. Se deben ajustar al perfil del suelo, corregir la amplificación que sufren las ondas sísmicas al atravesar suelos compresibles y considerar un 5% del amortiguamiento crítico.

Algunas normas sugieren el uso de espectros de comportamiento en el rango no lineal como mecanismo de disipación de energía, disminuyendo para el efecto, los valores de la aceleración espectral mediante factores de reducción que dependen del período de vibración y la ductilidad del sistema estructural.

EC 8 recomienda utilizar dos tipos de espectros de respuesta si la geología profunda no se considera: “Tipo 1”, para sismos de gran intensidad con epicentro lejano (la magnitud de las ondas de superficie “ $M_s$ ” es mayor a 5.5). “Tipo 2”, para sismos con epicentro cercano (cerca de 30 km), pero de igual o menor magnitud. Para el diseño del edificio se utiliza el espectro de diseño, es decir, el espectro de respuesta reducido por el “factor de comportamiento,  $q$ ”, asociado a la capacidad de disipación de energía según su clasificación de ductilidad.

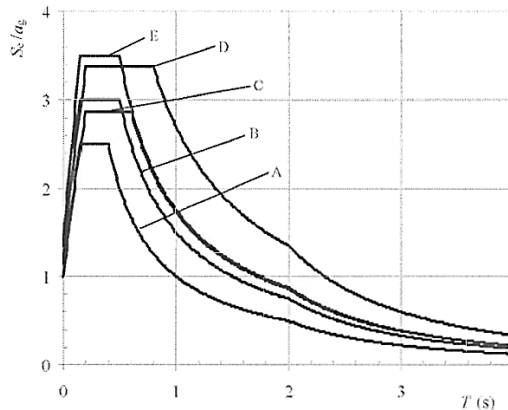
Para ajustar la forma del espectro de respuesta a las condiciones de sismicidad de cada lugar, se debe determinar el valor del “factor de suelo,  $S$ ” y de los “períodos  $T_B$ ,  $T_C$  y  $T_D$ ”, que definen los límites inferior y superior del tramo de aceleración espectral constante y el límite inferior de la zona de desplazamiento constante del espectro.

Figura No. 61 Componentes para configuración del espectro de diseño – EC 8



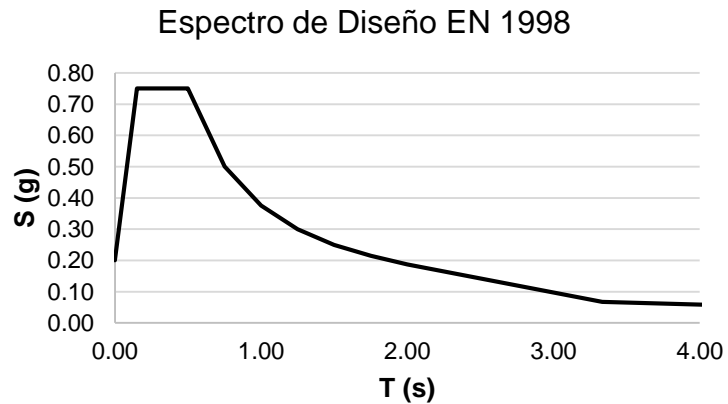
Estos parámetros son determinados de acuerdo al contexto sísmico de cada país miembro, no obstante, la norma recomienda valores para los espectros Tipo 1 y 2 en base al tipo de suelo. Por ejemplo, los parámetros recomendados para el espectro Tipo 1 se muestran en el siguiente espectro normalizado según cada tipo de suelo con 5% del amortiguamiento crítico para una “aceleración de diseño ( $a_g$ )”. Siendo  $a_g = \gamma_I \cdot a_{gR}$ , generalmente los valores de  $a_{gR}$  se toman del mapa de zonificación de riesgo sísmico y el “factor de importancia  $\gamma_I$ ”, de acuerdo a la “clase de importancia del edificio”.

Figura No. 62 Espectro de respuesta para distintos tipos de suelo



Para la combinación de espectro Tipo 1 ( $M_s > 5.5$ ) y suelo tipo B, la norma europea recomienda los parámetros siguientes:  $S = 1.2$ ;  $T_B = 0.15$  s,  $T_C = 0.5$  s; y  $T_D = 2.0$  s. Así, el espectro obtenido para el análisis correspondiente a este trabajo se representa a continuación:

Figura No. 63 Espectro de diseño obtenido según Eurocódigo 8





ASCE 7-10 maneja su espectro de diseño como un sismo ordinario que tiene 10% de probabilidad de excedencia en 50 años; para ello, multiplica por 2/3 el “terremoto considerado de máximo riesgo,  $MCE_R$ ”, valores que se obtienen de los mapas de zonificación. Estos mismos deben corregirse por el “factor de importancia  $I_e$ ” para obtener el sismo de diseño.  $MCE_R$  (Risk-Targeted Maximum Considered Earthquake), es un espectro de respuesta de aceleración con amortiguamiento del 5% y el 1% de probabilidad de retorno en un período de 50 años.

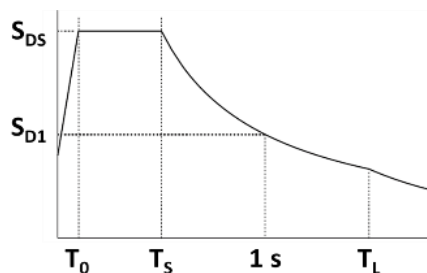
El espectro se estructura a partir de los parámetros  $S_s$  y  $S_1$ , que corresponden al valor de la aceleración de respuesta espectral con 5% de amortiguamiento para períodos cortos y de 1 segundo, respectivamente, obtenidos de los  $MCE_R$  en los mapas de zonificación sísmica. Ambos valores se deben ajustar al perfil del suelo según la clase de sitio y luego multiplicarlos por 2/3 para encontrar los parámetros de aceleración de respuesta espectral del terremoto de diseño, como sigue:  $S_{DS} = 2/3 (S_s * F_a)$  y  $S_{D1} = 2/3 (S_1 * F_v)$ . Donde:

$S_{DS}$  y  $S_{D1}$  son respectivamente, los parámetros de aceleración de respuesta espectral del terremoto de diseño con amortiguamiento de 5% para períodos cortos y de 1 segundo, ajustados por la clase de sitio.

$F_a$  y  $F_v$  son respectivamente, los coeficientes de sitio para períodos cortos (0.2 segundos) y períodos largos (1.0 segundo).

$$T_0 = 0.2 S_{D1} / S_{DS}; \quad T_s = S_{D1} / S_{DS} \quad \text{y} \quad T_L = \text{período largo de transición}$$

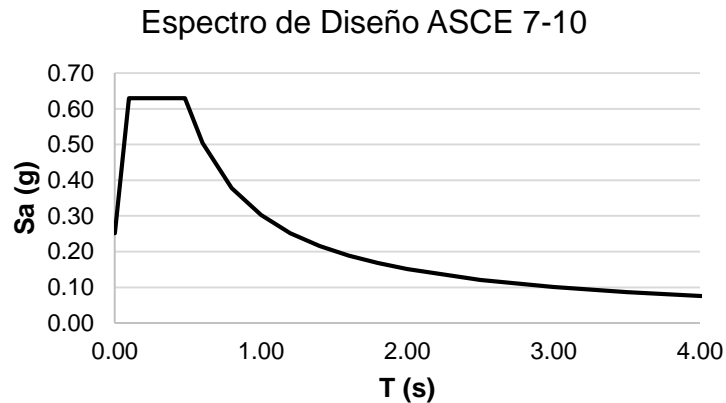
Figura No. 64 Componentes para configuración del espectro de diseño – ASCE 7-10



Para la configuración del espectro de diseño el “Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS)” facilita un software en línea que, al indicar el código de diseño de referencia (ASCE 7-10), seleccionar la clasificación del suelo del sitio (clase C) y señalar en el mapa o digitar la Latitud y Longitud del lugar, automáticamente genera los espectros de respuesta y de diseño y un reporte detallando la información.

En este caso, sobre el mapa se seleccionó un sitio con valor  $PGA = 0.25 \text{ g}$ , el mismo valor de la aceleración de referencia  $a_{gR}$  del ejemplo de trabajo del Taller EC 8. De esta forma, se generaron los valores para:  $S_s = 0.913 \text{ g}$  y  $S_1 = 0.303 \text{ g}$ , así como las ordenadas  $S_{DS} = 0.630 \text{ g}$  y  $S_{D1} = 0.303 \text{ g}$ , del sismo de diseño.

Figura No. 65 Espectro de diseño obtenido según ASCE 7-10



NSE 2 define los sismos de diseño mediante espectros de respuesta simplificados con 5% de amortiguamiento. El espectro se configura a partir de los parámetros  $S_{cr}$  y  $S_{1r}$ , cuyos valores están especificados en el “Anexo A - Listado de Amenaza Sísmica por Municipios” y con menos detalle, en el mapa de zonificación sísmica del país. Ambos parámetros son, respectivamente, las ordenadas de período corto (0.2 segundos) y período de 1 segundo del sismo extremo considerado en el basamento de roca en el sitio de interés, mismos que se deben ajustar al perfil del suelo en el sitio de construcción en base al índice de sismicidad y si es necesario, por el incremento de vibración debido a la proximidad de fallas geológicas activas. Para ello, debe cumplir con las siguientes relaciones:  $S_{cs} = (S_{cr} * F_a * N_a)$  y  $(S_{1s} = S_{1r} * F_v * N_v)$ . Donde:

$S_{cs}$  y  $S_{1s}$  son respectivamente, la ordenada espectral del sismo extremo en el sitio de interés para estructuras con períodos de vibración cortos y, períodos de 1 segundo.

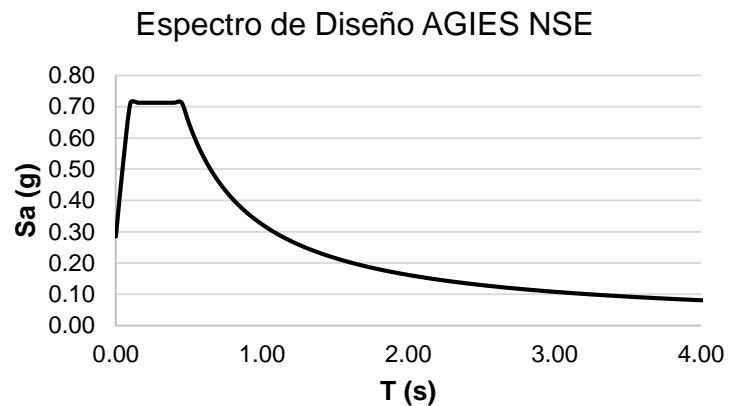
$F_a$  y  $F_v$  son respectivamente, el coeficiente de sitio para períodos cortos y períodos largos; dependen de las características del tipo de suelo de apoyo y del índice de sismicidad.

$N_a$  y  $N_v$  son respectivamente, los factores de falla cercana asociados a la proximidad horizontal de fuentes sísmicas o amenazas geológicas.

Finalmente, los parámetros del espectro se deben calibrar a la probabilidad de ocurrencia del sismo de diseño por medio del factor  $K_d$ , según el nivel de sismo (mínimo, básico, severo y extremo), como sigue:  $S_{cd} = (K_d * S_{cs})$  y  $S_{1d} = (K_d * S_{1s})$ .

Para la configuración del espectro de diseño según la norma nacional, se utilizó el mapa de zonificación sísmica de Guatemala a fin de hallar los valores  $S_{cr} = 0.90$  g,  $S_{1r} = 0.35$  g y del “índice de sismicidad”,  $I_0 = 3.1$ ; este último, junto a la clase de sitio C, sirvieron para encontrar el “coeficiente de sitio para períodos de vibración cortos”,  $F_a = 1.2$  y el “coeficiente de sitio para períodos largos”,  $F_v = 1.4$ . Con estos valores se obtuvieron las ordenadas espectrales del sismo extremo en el sitio de interés. Finalmente multiplicando por el valor probabilístico  $K_d = 0.66$  se obtuvieron las ordenadas espectrales de diseño para estructuras con período de vibración corto,  $S_{cd} = 0.713$  y de períodos de vibración de 1 segundo,  $S_{1s} = 0.323$ , ambos para un amortiguamiento nominal de 5% del crítico.

Figura No. 66 Espectro de diseño obtenido según AGIES NSE (2017)



## B. ANÁLISIS Y CÁLCULO ESTRUCTURAL DEL EDIFICIO

### 1. Análisis del edificio sin aisladores elastoméricos

El análisis estructural del edificio sin aislamiento sísmico se realizó desde dos perspectivas distintas: en la primera, se utilizaron los resultados obtenidos siguiendo el ejemplo presentado en el "Taller EC 8: Diseño sísmico de edificios", bajo las normas contenidas en el EC-8 para edificios diseñados con base fija; en la segunda, mediante la norma AGIES - NSE (2017). El objetivo es analizar los resultados de ambas normativas en el capítulo siguiente, a fin de comparar las fuerzas de corte en la base del edificio y los desplazamientos originados en los niveles de la superestructura.

#### a. Herramienta de diseño

El análisis sísmico realizado en esta investigación se desarrolla en base al programa de análisis tridimensional para edificaciones ETABS (Extended Three Dimensional Analysis of Building Systems), un software especializado de análisis estructural desarrollado específicamente para el diseño y dimensionamiento de edificios de acero y concreto reforzado. Es producido por Computers and Structures, Inc. (CSI), una compañía de software estructural y de Ingeniería Sísmica fundada en 1975 con sede en California.

ETABS integra todos los aspectos del proceso de diseño y ofrece herramientas de modelado y visualización en 3D. Permite el dimensionamiento de elementos estructurales y la creación de diseños y detalles, cuenta con capacidades de análisis lineal y no lineal, opciones de dimensionamiento y diseño integral para una amplia gama de materiales, pantallas gráficas, informes y dibujos esquemáticos que facilitan al usuario la comprensión inmediata de los resultados del análisis y diseño. Genera automáticamente y aplica acciones sísmicas con base a códigos internacionales, entre ellos, Eurocódigo 8-2004 y ASCE 7-10; puede definir automáticamente funciones de espectro de diseño para la norma AGIES NSE 2-10, aunque aún no cuenta con un espectro para AGIES NSE 2-17, por lo que este se ingresó de manera manual.

A diferencia de otros programas, ETABS identifica características que son inherentes al diseño de edificios y que otros softwares no reconocen, por lo que se eligió para este análisis. Sus comandos son intuitivos y permiten la generación de elevaciones y plantas estructurales; incluye el dimensionamiento de vigas, columnas, losas, muros y mampostería. Los modelos se pueden crear y automáticamente los resultados representarse directamente en la estructura. Facilita diseños esquemáticos del modelo, cuadros resumen, tablas informativas, detalles de los elementos estructurales y calcula fuerzas, esfuerzos y desplazamientos.

#### b. Método de análisis

Los métodos de análisis más comúnmente adoptados por la mayoría de normas sismo-resistentes para el diseño de estructuras son: el “Método de las fuerzas laterales equivalentes” y el “Método Modal Espectral (MME)”. La preferencia en su selección dependerá principalmente de la importancia del edificio, su configuración estructural y otras características particulares de su diseño. Por otra parte, para el diseño de edificaciones con aislamiento de base, los códigos establecen criterios adicionales que se deben cumplir para poder elegir el método de análisis más adecuado. Sin mencionar también que, mientras más complejos sean los requerimientos de diseño de la edificación, el análisis sísmico demandará métodos más rigurosos para obtener un diseño más preciso, a donde una mayor complejidad asocia un mayor costo en la etapa de diseño.

El análisis sísmico realizado en esta investigación corresponde al MME, un método de respuesta lineal para estimar fuerzas y desplazamientos máximos, inducidos por el sismo, en los elementos de un sistema estructural en términos de sus propiedades dinámicas. Esto quiere decir que el análisis se llevará a cabo en función de los parámetros modales que son: la frecuencia (o período), los modos de vibración y el amortiguamiento.

Se eligió este método de análisis debido a que estos parámetros, en su orden, permiten reducir las respuestas en resonancia de la estructura y descubrir los modos que más fácilmente se excitan con el sismo, lo que resulta realmente útil para considerar el efecto del aislamiento sísmico en la respuesta del edificio.

Este método pretende la construcción de un modelo objetivo que refleje el comportamiento dinámico de la estructura. Descompone la deformación compleja de un edificio en una serie de simples modos de deformación, tomando como referencia el espectro de diseño y la magnitud de respuesta máxima de los parámetros de interés de cada modo. Se utiliza el “Método de la Combinación Cuadrática Completa (CQC)” para la combinación de los distintos modos y el “Método de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SRSS)” para la combinación direccional de los resultados del análisis modal.

Las limitaciones del método se relacionan con el comportamiento inelástico que desarrollan las estructuras durante el sismo. Por esa razón, las normas usualmente establecen condiciones que debe cumplir el diseño de la estructura para que el MME posea la suficiente precisión y resulte ser aplicable al cálculo y la verificación del diseño.

En las normas consideradas en este trabajo se determina un número mínimo de modos de vibración que desplace al menos el 90% de la masa total de la estructura en cada dirección principal para describir la respuesta dinámica, donde finalmente los modos superiores contribuyen muy poco ya que generan fuerzas equivalentes que se cancelan parcialmente en altura, característico en estructuras con muchos grados de libertad. En el caso de edificios aislados sísmicamente, el MME considera en el sistema de aislamiento todos los modos de vibración, pero por facilidad, en la superestructura solamente se trabaja con el primer modo. En esta investigación se consideran tres grados de libertad por planta al analizar el edificio con y sin aisladores elastoméricos de base.

El MME considera un factor de reducción de la aceleración espectral que modifica la respuesta de todos los modos utilizados en cada dirección de análisis. Dicho factor denominado en EC 8 “factor de comportamiento,  $q$ ”, en ASCE 7 “coeficiente de modificación de respuesta,  $R$ ” y en AGIES “factor  $R$ ”, pretende ser una medida de la capacidad de la estructura para absorber energía y mantener un comportamiento cíclico de deformación sin colapsar. Incide en la determinación de la fuerza cortante en la base de la estructura y depende principalmente de la ductilidad de los materiales constructivos; por ello, su valor se incrementa conforme aumenta la ductilidad y la capacidad de disipación de energía de la estructura. Para un sistema estructural de marcos intermedios, estos factores son los siguientes:

- EN 1998 (EC 8):  $q = 3$
- ASCE 7-10:  $R = 5$
- AGIES NSE (2017)  $R = 5$

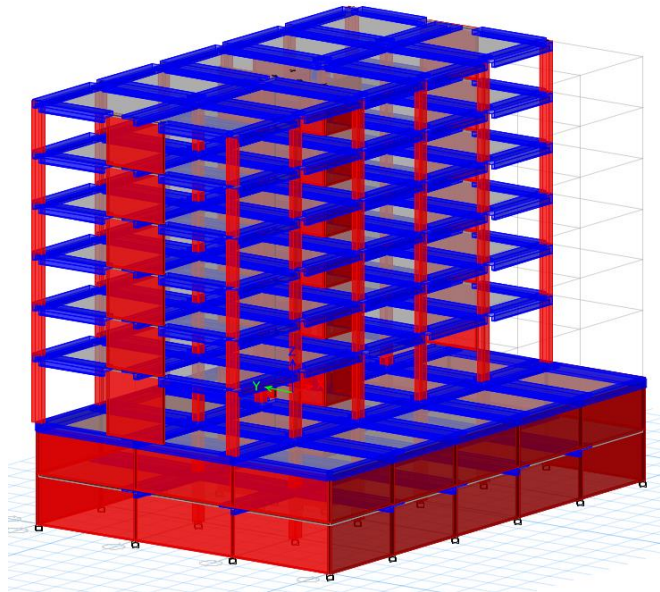
Así, la respuesta sísmica, caracterizada por el “espectro de diseño”, determina con bastante exactitud la “fuerza de corte en la base de la estructura,  $V_s$ ” en cada una de las dos direcciones horizontales ortogonales. Finalmente, esta fuerza de corte se compara con el cortante basal calculado mediante el “Método de las fuerzas laterales equivalentes” y como consecuencia, se obtienen las derivadas en cada nivel de la estructura.

### c. Modelo del Edificio

El modelo espacial del edificio en tres dimensiones se llevó a cabo utilizando la herramienta de diseño ETABS, tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- Todos los elementos, incluyendo muros, se modelaron como elementos de línea.
- Se utilizó el equivalente a dos anchos efectivos para modelar cada una de las vigas interiores y exteriores, respectivamente.
- Los elementos se asumieron completamente empotrados en la base.
- Columnas, vigas y muros están conectados mediante diafragma rígido.
- Los elementos se consideraron como agrietados, modificando su flexibilidad elástica y propiedad de rigidez ante corte en un 50%. La rigidez torsional se estableció como 10% de la rigidez torsional de la sección no agrietada.

Figura No. 67 Modelo 3D del edificio



Elaboración propia utilizando ETABS 2016

d. Determinación de períodos y modos de vibración

Para el análisis modal se utilizaron 3 grados de libertad por planta, lo que totaliza 18 modos de vibración. Los tres primeros modos de vibración del edificio son:

- Modo 1 actuando en la dirección X, con 51% de la masa trasladada.
- Modo 2 actuando en la dirección Y, con 50% de la masa trasladada.
- Modo 3 para el giro en el eje Z, con 39% de la masa trasladada.

Asimismo, el número de modos de vibración logró trasladar 90% de la masa total del edificio desde el modo 14 en la dirección X, modo 12 en dirección Y y modo 17 en la torsión con respecto al eje Z, cumpliendo así con lo recomendado por las tres normas. A continuación, se presentan los tres primeros modos de vibración del edificio; el cuadro de Proporciones de masas de participación modal para el edificio con base fija completo con los 18 modos de vibración se encuentra en el Anexo A. Nótese el valor del período fundamental actuando en el eje X = 0.76 s.

Cuadro No. 16 Proporciones de masas de participación modal para el edificio con base fija

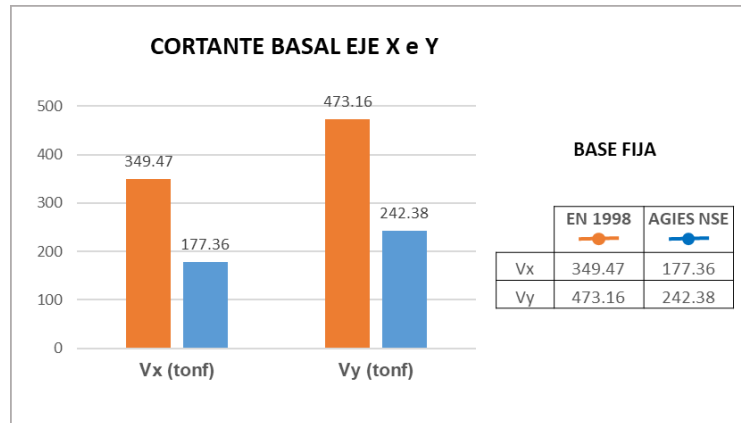
Modo	Período seg	UX	UY	Sum UX	Sum UY	RZ	Sum RZ
1	0.760	0.51	0.00	0.51	0.00	0.03	0.03
2	0.534	0.00	0.50	0.51	0.50	0.00	0.03
3	0.498	0.01	0.00	0.52	0.51	0.39	0.42

e. Determinación del cortante basal y de los desplazamientos

La magnitud de la fuerza de corte en la base del edificio es el parámetro utilizado para el cálculo y la evaluación de los desplazamientos y las derivas de diseño. El control sobre los límites de los desplazamientos y las derivas laterales es de gran importancia para mejorar el desempeño sísmico de la edificación y limitar el daño a los componentes no estructurales, los cuales son altamente vulnerables a las incursiones post-elásticas durante sismos prolongados y/o de gran intensidad.

El gráfico a continuación, presenta el cortante basal en las dos direcciones de análisis. Puede distinguirse que la respuesta de la estructura en cada eje es bastante distinta. También se aprecia que en ambos casos la norma EN 1998 exhibe valores bastante mayores que los obtenidos con la norma AGIES NSE: en la dirección X, el cortante basal es 172.11 tonf (49.25%) mayor y en la dirección Y, 230.78 tonf (48.77%).

Gráfico No. 1 Cortante basal dirección X e Y para edificio con base fija



Las tres normas citadas en esta investigación evalúan los desplazamientos y las derivas como un mecanismo para estimar el daño que un sismo podría causar a la estructura, en especial, a los componentes no estructurales. La analogía entre estas normas considera dos tipos de desplazamientos laterales: un desplazamiento elástico circunscrito al límite de cedencia de la estructura, seguido de un desplazamiento último después de sobrepasar el rango post-elástico.



En este sentido, los siguientes gráficos muestran los desplazamientos (cm) en los ejes X e Y, que se presenta en cada nivel del edificio dentro del rango elástico. Observe que en ambas direcciones de análisis la norma EN 1998 exhibe mayores valores que los obtenidos con la norma AGIES NSE: en la dirección X, el desplazamiento máximo del edificio es 1.43 cm (48.47%) mayor y en la dirección Y, 1.35 cm (48.91%).

Gráfico No. 2 Desplazamiento X en Eje C6 para edificio con base fija

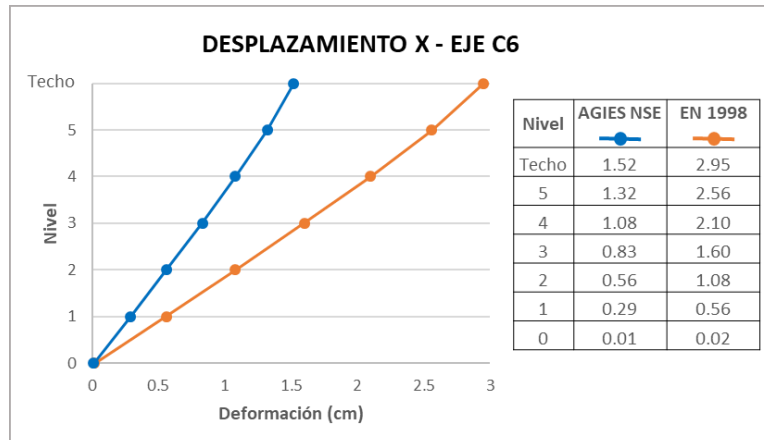
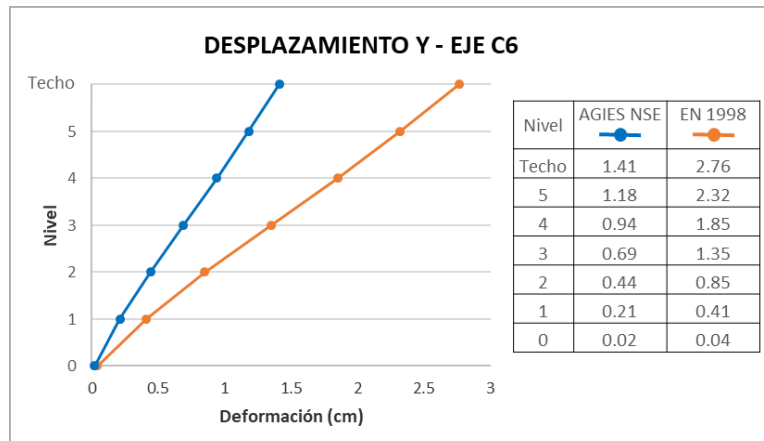


Gráfico No. 3 Desplazamiento Y en Eje C6 para edificio con base fija



La apreciación de las deformaciones horizontales se interesa más en las derivas que en los desplazamientos laterales absolutos. Las derivas se asocian directamente a la rigidez de los elementos estructurales; sobrevalorar la rigidez de la estructura podría llevar a menospreciar daños potenciales en el edificio. En sí, el sistema estructural deber ser capaz de proporcionar la resistencia y la disipación de energía necesarias para soportar las aceleraciones horizontales del sismo, dentro de los límites tolerables de deriva lateral especificados en cada norma, con el fin de prevenir daños considerables. Es importante destacar que el control de las deformaciones horizontales se vuelve más rígido a medida que las limitaciones de deriva se tornan más rigurosas.

Los gráficos a continuación muestran las derivas (cm) en los ejes X e Y, que se presenta en cada nivel del edificio dentro del rango elástico. Se puede apreciar que en ambas direcciones de análisis la norma EN 1998 exhibe mayores valores que los obtenidos con la norma AGIES NSE: en la dirección X, la deriva de techo es 0.19 cm (48.72%) mayor y en la dirección Y 0.21 cm (47.73%).

Gráfico No. 4 Deriva X en Eje C6 para edificio con base fija

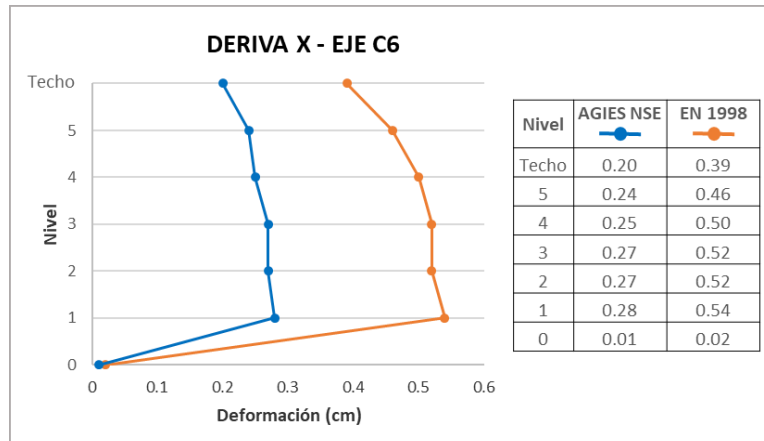
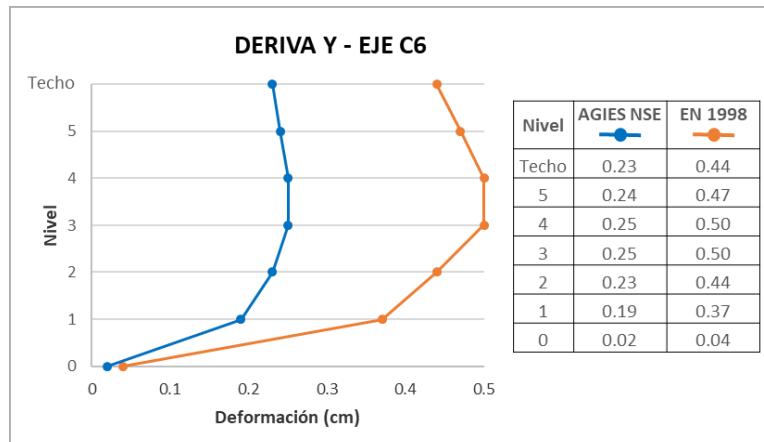


Gráfico No. 5 Deriva Y en Eje C6 para edificio con base fija



Por último, a fin que la edificación mantenga un comportamiento cíclico de deformación sin colapsar que se asemeje cada vez más a la respuesta real durante un sismo, ambas normas sugieren llevar el comportamiento de la estructura hasta el rango post-elástico como mecanismo de disipación de energía. En la medida en que sea explotada su respuesta no lineal, la capacidad de disipación de energía de la estructura para controlar el desarrollo de deformaciones inelásticas en los miembros estructurales se compensa entre la reserva de capacidad de resistencia y la ductilidad del sistema estructural, siempre que se conserve la integridad de la estructura.

La sobre resistencia se debe a factores inherentes a los materiales, como el aumento de la resistencia del concreto reforzado con el tiempo o el endurecimiento del acero después de la fluencia, pero generalmente, al hábito de diseñar con los valores mínimos de resistencia de los materiales a fin de obtener valores más altos que los requeridos por el diseño teórico. En cuanto a la ductilidad, ésta desvanece la energía transmitida por el sismo mediante ciclos histeréticos de carga y descarga. Por esta razón, el control de las derivas establece un método de verificación de que el sistema estructural tiene simultáneamente resistencia lateral y capacidad de disipación de energía.

Los siguientes gráficos muestran las derivas últimas (cm) en el rango post-elástico que cada nivel del edificio presenta en los ejes X e Y. Nótese la similitud de los valores de deformación obtenidos entre ambas normas, no obstante, la norma EN 1998 en las dos direcciones de análisis exhibe levemente mayores valores que los obtenidos con la norma AGIES NSE: en la dirección X, la deriva última de techo es 0.270 cm (23.08%) mayor y en la dirección Y 0.285 cm (21.59%).

Gráfico No. 6 Deriva última X en Eje C6 para edificio con base fija

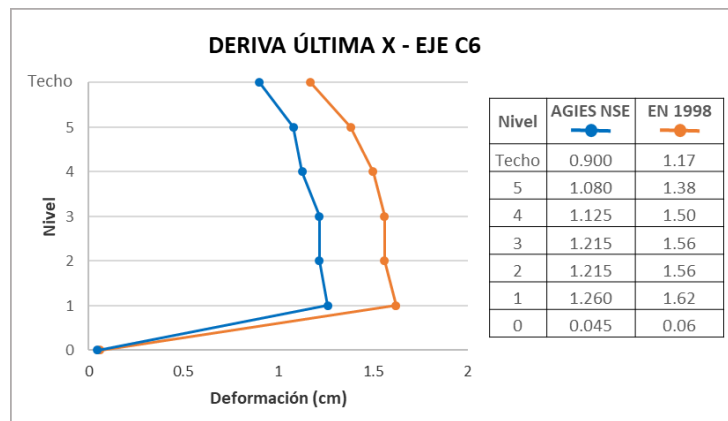
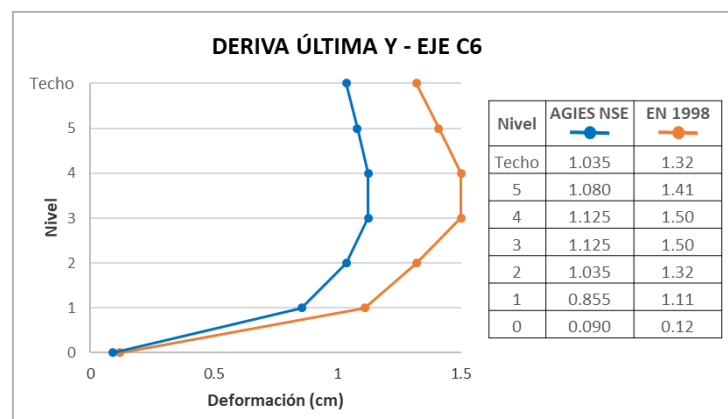


Gráfico No. 7 Deriva última Y en Eje C6 para edificio con base fija



Después de un sismo bastante severo la estructura puede presentar daños substanciales o quedar muy dañada, haber perdido significativamente su rigidez y resistencia lateral e incluir considerables derivas permanentes, hasta el punto que puede ser económicamente irrecuperable. Aun así, el edificio debe mantener una capacidad de carga mínima que evite el colapso total para asegurar la protección de la vida humana en el proceso de la evacuación o, durante las réplicas del sismo. En el mejor de los casos, el daño solo se espera en elementos no estructurales y su ocurrencia dependerá de la deformación que la estructura, en respuesta al terremoto, impone sobre dichos elementos. Por esta razón, el requisito de prevención y limitación de daños debe verificarse en términos de las derivas máximas tolerables de la edificación.

Ambas normas establecen valores máximos de deriva como parámetros para el control de las deformaciones horizontales y limitar el daño a los componentes no estructurales, los cuales son altamente vulnerables a las incursiones post-elásticas durante sismos prolongados y/o de considerable intensidad. Para ello, relacionan los límites del desplazamiento relativo de la deriva con la altura del nivel para el que se calcula la deriva, a fin de mejorar el comportamiento sísmico la de la edificación.

Concretamente, la norma EN 1998 requiere que la estructura soporte sismos intensos relativamente frecuentes sin que manifieste daños significativos o la pérdida de su operatividad. Por ello, asocia los parámetros que se describen a continuación en la Ecuación No. 1:

$$d_r * v \leq \alpha * h \Rightarrow \frac{d_r}{h} \leq \frac{\alpha}{v} \quad \text{Ecuación No. 1}$$

Donde:

$d_r$  = deriva del piso.

$h$  = altura del piso.

$v$  = factor de reducción que depende de la clase de importancia del edificio.

$\alpha$  = factor que depende del tipo y disposición de los elementos no estructurales como sigue:

- 0.50% de la altura del entrepiso ( $h$ ), para edificios que tienen elementos no estructurales constituidos por materiales frágiles unidos a la estructura.
- 0.75%  $h$ , para edificios con elementos no estructurales dúctiles.
- 1.00%  $h$ , para edificios sin elementos no estructurales o que los mismos están fijados de manera que no interfieren con deformaciones estructurales.

En el caso del edificio en cuestión, los valores correspondientes son:

$$dr = \frac{0.01}{0.5} * 300 \text{ cm} = 6 \text{ cm}$$

$$dr = \frac{0.01}{0.5} * 400 \text{ cm} = 8 \text{ cm}$$

De forma similar, AGIES NSE establece parámetros para limitar daños inaceptables en base al control sobre las deformaciones post-elásticas de la estructura. Las “derivadas últimas máximas”, en función de la clasificación y la tipología de la edificación, se convierten en los máximos valores admisibles para cada sistema estructural y, su comparación por especificación con las "derivadas laterales tolerables", determinan los límites que aunque puedan admitir el desarrollo de deformaciones inelásticas significativas en los miembros estructurales, procuran que se conserve la integridad de la estructura o que presenten un daño colateral aceptable.

Para esto, asocia los parámetros que se describen en el siguiente cuadro:

Cuadro No. 17 Derivas últimas máximas tolerables

Estructura	Clasificación de obra		
	Categoría II	Categoría III	Categoría IV
Edificaciones NSE 7.4	0.007h <sub>p</sub>	0.007h <sub>p</sub>	0.007h <sub>p</sub>
Edificaciones NSE 7.9	0.007h <sub>p</sub>	0.007h <sub>p</sub>	0.007h <sub>p</sub>
Edificaciones en general	0.020h <sub>p</sub>	0.020h <sub>p</sub>	0.015h <sub>p</sub>

h<sub>p</sub> es la altura del piso para el que se calcula la deriva.

En el caso del edificio en cuestión, los valores correspondientes son:

$$\Delta_u = 0.020 * 300 \text{ cm} = 6 \text{ cm}$$

$$\Delta_u = 0.020 * 400 \text{ cm} = 8 \text{ cm}$$

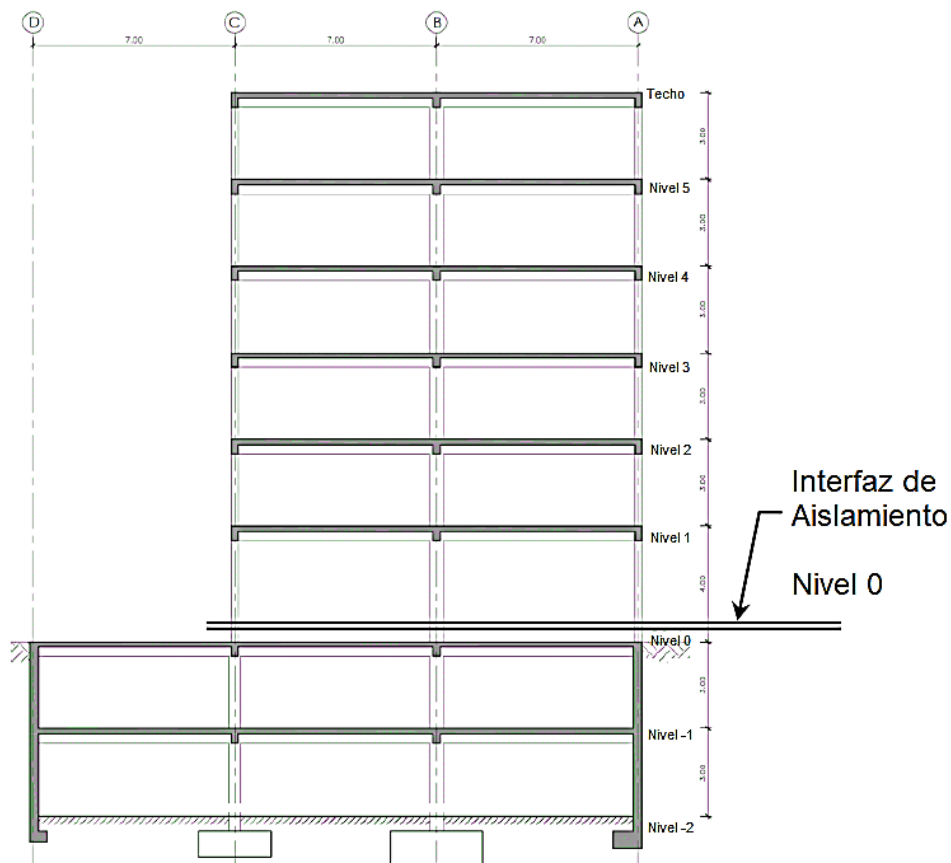
Con el software ETABS se obtuvieron los valores absolutos de las derivadas unitarias post-elásticas. En ambas normas, los valores de las derivadas últimas máximas no sobrepasaron las derivadas laterales tolerables. Estos resultados muestran un comportamiento elasto-plástico de la estructura, que además de permitir formarse una idea sobre la rigidez lateral y las rigideces unitarias de los niveles del edificio, procuran un rendimiento estructural sin colapso.

## 2. Análisis del edificio con aisladores elastoméricos

El análisis estructural del edificio con aislamiento sísmico se realizó desde dos perspectivas distintas: en la primera, se utilizaron los resultados obtenidos siguiendo el ejemplo presentado en el "Taller EC 8: Diseño sísmico de edificios", bajo las normas contenidas en el EC-8 para edificios diseñados con aisladores elastoméricos; en la segunda, mediante la norma ASCE 7 - 10.

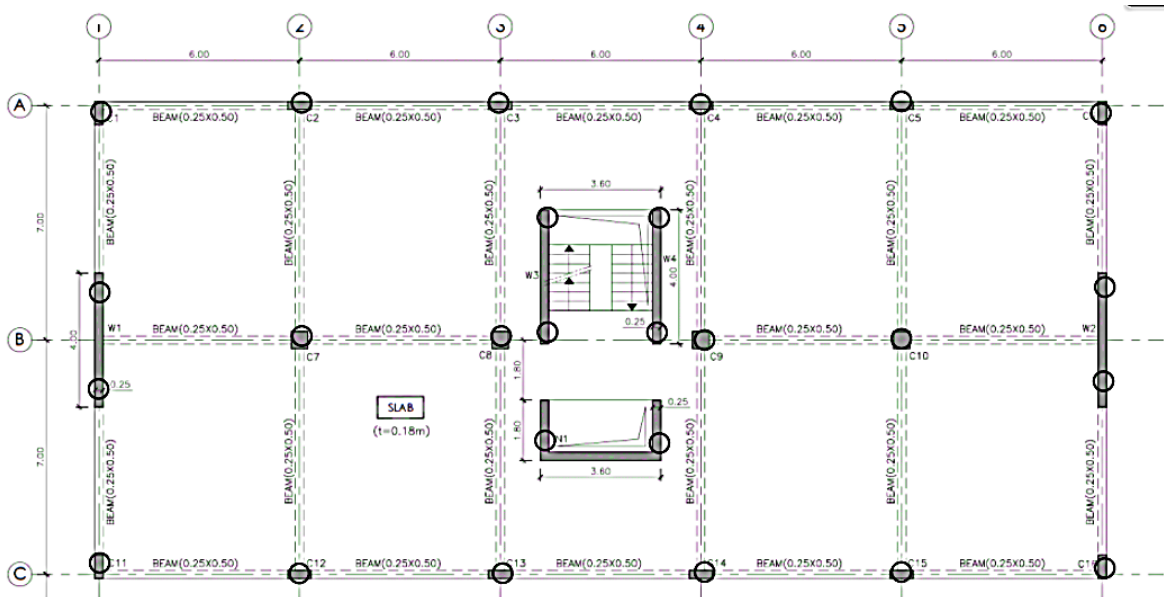
Para la elaboración del modelo espacial se utilizaron en general las mismas características que de la estructura convencional. Los cambios realizados fueron aplicados solamente a la integración del sistema de aislamiento sísmico. La interfaz de aislación se ubicó al nivel 0 de la estructura, separando el edificio en dos partes como se ve en la Figura No. 68. Por lo tanto, esto quiere decir que los muros y columnas deberán ser interrumpidos durante su construcción para la instalación de los aisladores. Al mismo tiempo se deberían colocar juntas horizontales en los elementos no estructurales, fachadas y cajas de escaleras y elevadores.

Figura No. 68 Posición de la interfaz de aislamiento



El sistema de aislamiento está conformado por 26 aisladores elásticos de base. Estos deben ser colocados por debajo de los elementos que transmiten la carga entre la superestructura y la subestructura, es decir, se coloca debajo de las columnas y muros de corte del edificio. Se modelaron vigas rectangulares de 0.25 x 0.50 m en el nivel de la interfaz que tienen la función de conectar la subestructura, el sistema de aislamiento y la superestructura.

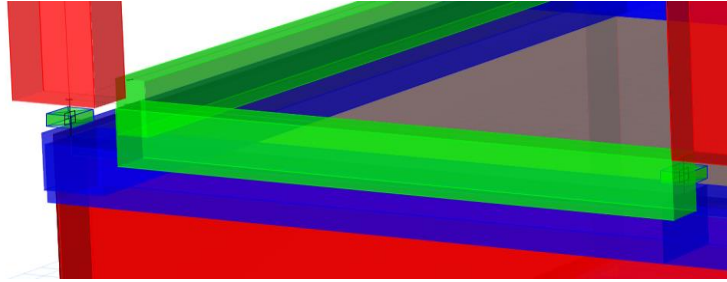
Figura No. 69 Ubicación de los aisladores



Para la aplicación de los aisladores se hizo uso de la propiedad “Link/Support”, que permite la simulación del comportamiento histerético bilineal de los dispositivos del aislamiento utilizando solamente las propiedades de rigidez efectiva y amortiguamiento efectivo, cuando el análisis es lineal. Si el análisis fuese no lineal, para simular la respuesta del dispositivo se necesitan, además, la rigidez post fluencia y la fuerza de fluencia. Los dispositivos cuentan con dos grados de libertad que permiten el desplazamiento en el plano horizontal del edificio y, empotrado en el plano vertical.

El área de parqueo, es decir, la subestructura, no se tomó en cuenta para el análisis debido a que sus deformaciones son demasiado pequeñas para apreciarse correctamente.

Figura No. 70 Representación del aislador con vigas de amarre – ETABS 2016



Por último, en el capítulo siguiente se procederá a discutir los resultados obtenidos en el modelo mediante ambas normativas (EC 8 y ASCE 7-10), a fin de comparar las fuerzas de corte en la base del edificio y los desplazamientos originados en los niveles de la superestructura.

#### a. Método de análisis

Tal como se realizó en el edificio con base fija, el método de análisis utilizado fue el Método Modal Espectral; aunque es importante resaltar los requisitos que los códigos establecen para utilizar este método en estructuras aisladas, así como las modificaciones en los factores de comportamiento del edificio, también es importante señalar las razones por las cuales no era factible utilizar otro tipo de análisis.

A diferencia de EC 8 que no considera el análisis por fuerzas equivalentes para edificios aislados, ASCE 7-10 lo hace, pero con muchas restricciones. Entre estas, la estructura debe estar localizada en un sitio con  $S_1 = 0.60 g$  o menos, con clase de sitio A, B, C o D, la cantidad de niveles por encima de la superestructura no puede ser mayor a 4 ni tener una altura que sobrepase los 19.8 m. Por otra parte, un análisis de tiempo historia es permitido para todas las estructuras en ambos códigos, pero no se realizó por la complejidad del mismo y por la dificultad que implicaba al autor conseguir datos de acelerogramas representativos para el edificio estudiado.

Por otra parte, entre las consideraciones para utilizar un análisis modal espectral en ASCE 7-10 se requiere que la estructura se localice en una clase de sitio A, B, C o D y que se cumplan con los requisitos de rigidez de los dispositivos en la Sección 17.4.1. EC 8 requiere que el período objetivo de la estructura aislada sea por lo menos 3 veces mayor al período de la estructura con base fija, pero menor a 3 segundos, la dimensión más larga del edificio sea menor a 50 m, que todos los dispositivos se encuentren debajo de elementos que soportan carga vertical y que la distancia a la falla más cercana con  $M_s > 6.5$  sea al menos 15 km. Esto quiere decir que es posible aplicar el Método Modal Espectral para el análisis y que además, resulta ser el más adecuado.



El Método Modal Espectral para estructuras aisladas en EC 8 utiliza un factor de comportamiento  $q = 1$  para todas las estructuras. Esto quiere decir que el edificio en análisis se comportará completamente elástico. Para ASCE 7-10 se toman dos criterios en cuanto a la elección del factor de comportamiento R: donde la estructura se encuentra por encima del sistema de aislamiento este valor será el menor entre  $3/8$  del Factor R correspondiente al sistema estructural y 2 y; para la estructura que se encuentra por debajo del sistema de aislamiento se usará un  $R = 1$  (no se toma en cuenta en este análisis).

## b. Diseño de aislador HDRB

### 1) Norma EN 1998 (EC 8)

El Eurocódigo 8 presenta la manera de diseñar la estructura cuando esta se encuentra aislada, tomando en cuenta el proceso y todas las consideraciones necesarias. Sin embargo, el diseño de los dispositivos y sus propiedades está cubierto en la Norma Europea EN 15129: Dispositivos Anti-Sísmicos. En esta se establecen los requisitos de funcionalidad, reglas generales, características de los materiales, requisitos de fabricación y ensayo, evaluación de conformidad, instalación y mantenimiento de los dispositivos de aislamiento sísmico.

En cuanto a los distintos sistemas de aislamiento sísmicos (aisladores elastoméricos, dispositivos elasto-plásticos, amortiguadores viscosos o de fricción, entre otros) se establece que deben cumplir con una o la combinación de dos o más de las siguientes funciones:

- Capacidad de carga vertical combinada con mayor flexibilidad lateral y alta rigidez vertical.
- Disipación de energía, ya sea histórica o viscosa.
- Capacidad de modernización; sin embargo, como solo los dispositivos lineales se tratan completamente en la sección 10, no se asocia ningún requisito a esta función que se cumple para este tipo de aisladores. Las indicaciones se dan en la parte 2 en una situación más general.
- Restricción lateral (rigidez elástica suficiente) bajo cargas laterales no sísmicas de servicio.

Ahora bien, debido a que se utilizará un sistema de aislamiento con aisladores elastoméricos de base, se toman consideraciones más específicas acerca de los dispositivos. Las propiedades que se emplean para el diseño de los dispositivos son las siguientes:

- Capacidad de carga  $\sigma_{AC}$ : 10 MPa (102 kg/cm<sup>2</sup>)
- Deformación última de corte: 500%
- Módulo de Corte G: 1 MPa (10.19 kg/cm<sup>2</sup>)
- Amortiguamiento efectivo: 12%
- Período objetivo  $T_D$ : 2.5 segundos
- Espesor de capas t: 8 mm
- Masa por encima del sistema de aislamiento sísmico: 2,351 ton

#### a) Eficiencia del sistema de aislamiento

Para determinar la eficiencia del sistema de aislamiento EC 8 utiliza el factor  $\beta$ , que es una relación entre el período de la superestructura considerada como rígida y sobre el sistema de aislamiento  $T_a$  y el período de la estructura sin aislamiento. Usualmente se utilizan los períodos correspondientes al primer modo de vibración de cada estructura.

Usualmente, un sistema de aislamiento que funciona de manera correcta tiene valores de  $\beta$  entre 5 y 10. Para el edificio en estudio,  $\beta = 3$ , lo que denota que el sistema puede no ser tan eficiente como en otros edificios.

#### b) Demanda de ductilidad

Para determinar un factor de comportamiento  $q$  en edificios con aislamiento sísmico se utiliza el factor de eficiencia  $\beta$  y el factor de comportamiento  $q$  del edificio con base fija. Así se obtiene la demanda de ductilidad  $\mu$  mediante la Ecuación No. 2:

$$\mu = (q - 1)[1 + \beta^2] \quad \text{Ecuación No. 2}$$

$$\mu = (3 - 1)[1 + 3^2]$$

$$\mu = 20$$

Debido a que este factor brinda valores demasiado altos en estructuras aisladas, EN 8 elige utilizar un factor de comportamiento  $q = 1$  para estructuras con sistema de aislación sísmica de manera que se mantengan en un rango elástico.

c) Propiedades del aislador

Para la implementación de los aisladores en el modelo ETABS y cumplir con los objetivos de la investigación, se hace un mayor énfasis en las propiedades de rigidez efectiva, rigidez vertical, área y altura de los dispositivos.

La rigidez efectiva total se obtiene mediante la Ecuación No. 3:

$$K_T = M * \left(\frac{2\pi}{T_D}\right)^2 \quad \text{Ecuación No. 3}$$

$$K_T = M * \left(\frac{2\pi}{T_D}\right)^2$$

$$K_T = 2,351 \text{ ton} * \left(\frac{2\pi}{2.5 \text{ s}}\right)^2$$

$$K_T = 14,850 \text{ kN/m}$$

La rigidez efectiva total es la suma de la rigidez de cada aislador en el sistema, por lo que mediante la Ecuación No. 4 obtenemos la rigidez propia de cada aislador:

$$K_h = \frac{K_T}{N} \quad \text{Ecuación No. 4}$$

$$K_h = \frac{14,850 \text{ kN/m}}{26}$$

$$K_h = 571.16 \text{ kN/m}$$

El área total requerida por el sistema de aislamiento se obtiene mediante la Ecuación No. 5:

$$A_T = \frac{P_{max}}{\sigma_{AC}} \quad \text{Ecuación No. 5}$$

$$A_T = \frac{2,351 \text{ ton} * 9.81 \text{ m/s}^2 * 1.4}{10 \text{ MPa}}$$

$$A_T = 3.23 \text{ m}^2$$

Por lo que el área de cada aislador está dada por la Ecuación No. 6:

$$A = \frac{A_T}{N} \quad \text{Ecuación No. 6}$$

$$A = \frac{3.23 \text{ m}^2}{26}$$

$$A = 0.124 \text{ m}^2$$

Para ello se requiere usar aisladores cuadrados de 35 x 35 cm o aisladores circulares con diámetro de 40 cm.

Para obtener el espesor de caucho del aislador se utiliza la Ecuación No. 7:

$$e = \frac{G * A}{K_T} \quad \text{Ecuación No. 7}$$
$$e = \frac{1MPa * 3.23m^2}{14,850 kN/m}$$
$$e = 0.22 m$$

Esto requiere 28 capas de 8mm cada una, a lo cual se le debe adicionar el espesor total de las láminas metálicas que conforman el aislador.

La rigidez vertical se obtiene mediante la Ecuación No. 8, donde el período en la dirección vertical no debe ser mayor a 0.1 segundos:

$$K_v = M * \left(\frac{2\pi}{T_v}\right)^2 \quad \text{Ecuación No. 8}$$
$$K_v = 2,351 ton * \left(\frac{2\pi}{0.1}\right)^2$$
$$K_v = 9,281,375 kN/m$$

La relación entre  $K_v$  y  $K_T$  debe ser mayor o igual a 50, lo que efectivamente se cumple.

El desplazamiento de la superestructura se calcula mediante la Ecuación No. 9:

$$D = \frac{S_e(T)}{\left(\frac{2\pi}{T_D}\right)^2} \quad \text{Ecuación No. 9}$$
$$D = \frac{1.30 m/s^2}{\left(\frac{2\pi}{2.5 s}\right)^2}$$
$$D = 20.6 cm$$

Este desplazamiento se multiplica por el factor de confiabilidad  $\gamma_x$ . Como el valor recomendado de  $\gamma_x$  en edificios es 1.2, entonces  $D = 24.72 cm$ .

## 2) Norma ASCE 7-10

Al igual que EC 8, ASCE 7-10 presenta las mismas consideraciones generales para el diseño de los dispositivos de aislamiento sísmico, entre ellas: condiciones ambientales, fuerza del viento, resistencia al fuego, inspección y reemplazo y control de calidad.

En cuanto a las propiedades de rigidez efectiva, rigidez vertical, área y espesor de la capa de goma del dispositivo, se calculan de manera similar a EC 8.

El desplazamiento de diseño de la superestructura se calcula mediante la Ecuación No. 10:

$$D_D = \frac{g * S_{D1} * T_D}{4 * \pi^2 * B_D} \quad \text{Ecuación No. 10}$$

El amortiguamiento efectivo ( $B_D$ ) se obtiene del Cuadro No. 18. Así, para un valor de amortiguamiento efectivo de 12%, es necesario realizar una interpolación lineal entre los valores. De esta manera,  $B_D$  o  $B_M = 1.26$

Cuadro No. 18 Factor  $B_D$  o  $B_M$

Effective Damping, $\beta_D$ or $\beta_M$ (percentage of critical) <sup>a,b</sup>	$B_D$ or $B_M$ Factor
≤2	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.7
40	1.9
≥50	2.0

Por lo tanto,

$$D_D = \frac{9.81 \text{ m/s}^2 * 0.303 * 2.5\text{s}}{4 * \pi^2 * 1.26}$$

$$D_D = 14.92 \text{ cm}$$

El desplazamiento máximo se obtiene mediante la Ecuación No. 11:

$$D_M = \frac{g * S_{M1} * T_M}{4 * \pi^2 * B_M} \quad \text{Ecuación No. 11}$$

$$D_M = \frac{9.81 \text{ m/s}^2 * 0.454 * 2.5\text{s}}{4 * \pi^2 * 1.26}$$

$$D_M = 22.38 \text{ cm}$$

Para obtener el desplazamiento de diseño total y el desplazamiento máximo total, ASCE 7-10 permite multiplicar los valores de  $D_D$  y  $D_M$  por 1.1 para facilitar el diseño.

Por lo tanto, se obtiene que:

$$D_{TD} = 1.1 * D_D \quad \text{Ecuación No. 12}$$

$$D_{TD} = 1.1 * 14.92\text{cm}$$

$$D_{TD} = 16.4 \text{ cm}$$

Y,

$$D_{TM} = 1.1 * D_M \quad \text{Ecuación No. 13}$$

$$D_{TM} = 1.1 * 22.38 \text{ cm}$$

$$D_{TM} = 24.62 \text{ cm}$$

### c. Determinación de períodos y masas equivalentes

#### 1) Masas del edificio por nivel

Las masas del edificio por nivel son las mismas que fueron determinadas para el análisis del edificio con base fija, debido a que no se realizaron cambios en los elementos ni en el detalle. Esto permite comparar de mejor manera los desplazamientos y el cortante basal en la estructura entre ambos modelos.

#### 2) Períodos y modos de vibración

Tal como se realizó en el edificio de base fija, en el análisis modal se utilizaron tres grados de libertad por planta, lo que totaliza 18 modos de vibración; los tres primeros son:

- Modo 1 actuando en la dirección X, con 64% de la masa trasladada.
- Modo 2 actuando en la dirección Y, con 64% de la masa trasladada.
- Modo 3 para el giro en el eje Z, con 55% de la masa trasladada.

Asimismo, el número de modos de vibración logró trasladar 90% de la masa total del edificio desde el modo 16 en la dirección X, modo 12 en dirección Y y modo 18 en la torsión con respecto al eje Z, cumpliendo así con lo recomendado por las tres normas. A continuación, se presentan los tres primeros modos de vibración del edificio; el cuadro de Proporciones de masas de participación modal para el edificio con base aislada completo con los 18 modos de vibración, se encuentra en el Anexo B. Nótese el valor del período fundamental actuando en el eje X = 2.62 s, el cual se asemeja al período objetivo, 2.50 s.

Cuadro No. 19 Proporciones de masas de participación modal para edificio con base aislada

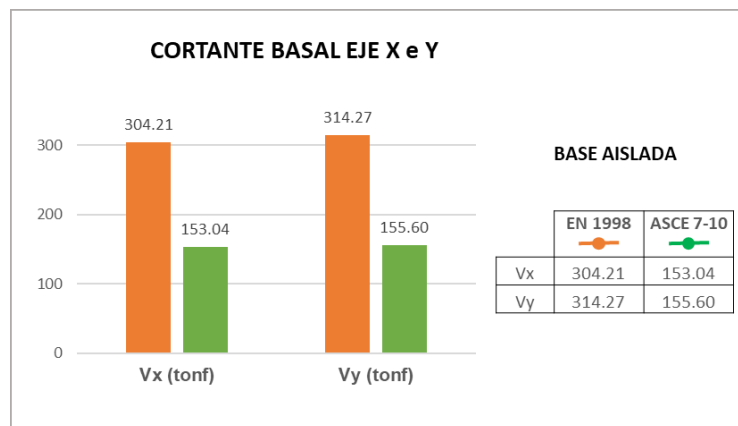
Modo	Período seg	UX	UY	Sum UX	Sum UY	RZ	Sum RZ
1	2.62	0.64	0.00	0.64	0.00	0.01	0.01
2	2.57	0.00	0.64	0.64	0.64	0.00	0.01
3	2.38	0.00	0.00	0.64	0.64	0.55	0.56

d. Determinación del cortante basal y de los desplazamientos

La ampliación del período fundamental pretende la flexibilización de la estructura, extendiendo los desplazamientos laterales para disminuir significativamente su respuesta dinámica, en términos de fuerzas y aceleraciones. La interfaz de aislación, cuya rigidez lateral es mucho menor que la de la superestructura, tenderá a deformarse transmitiendo menores esfuerzos cortantes y amortiguar una considerable parte de la energía sísmica. El edificio entonces experimenta la traslación de un bloque rígido, evitando deformaciones en la estructura y conteniendo daños en los componentes no estructurales.

El gráfico a continuación presenta el cortante basal en las dos direcciones de análisis. Puede distinguirse que la respuesta de la estructura en cada eje es casi igual. También se aprecia que, en ambos casos, la norma EN 1998 exhibe valores mucho mayores que los obtenidos con la norma ASCE 7-10: en la dirección X, el cortante basal es 151.17 tonf (49.69%) mayor y en la dirección Y, 158.67 tonf (50.49%).

Gráfico No. 8 Cortante basal en dirección X e Y para edificio con base aislada



Mientras que en la norma EN 1998 la superestructura se diseña para que se comporte en un rango completamente elástico, la norma ASCE 7-10 permite un ligero comportamiento post-elástico. En ambos casos, la demanda de desplazamientos laterales se concentra en el sistema de aislación, por lo que las derivas son mucho menores a las de un edificio con base fija.

En este sentido, los Gráficos No. 9 y 10 muestran los desplazamientos (cm) en los ejes X e Y, que se presenta en cada nivel del edificio dentro del rango elástico. Observe que en ambas direcciones de análisis la norma EN 1998 exhibe mayores valores que los obtenidos con la norma ASCE 7-10: en la dirección X, el desplazamiento máximo del edificio es 11.88 cm (49.73%) mayor y en la dirección Y, 12.83 cm (50.49%).

Gráfico No. 9 Desplazamiento X para edificio con base aislada

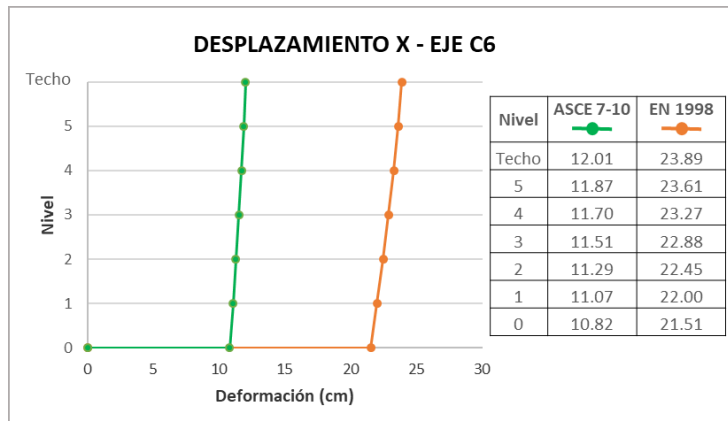
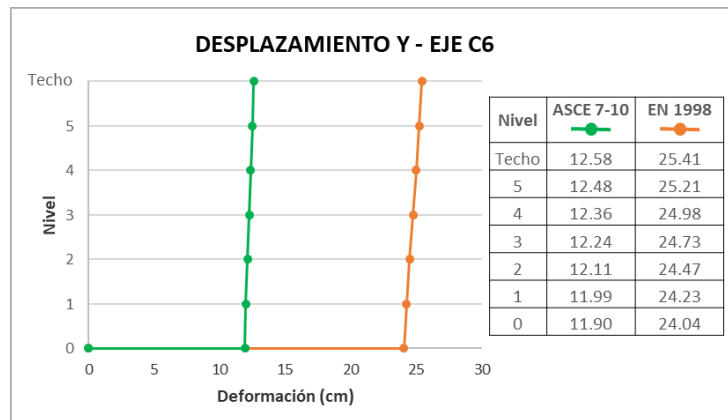


Gráfico No. 10 Desplazamiento Y para edificio con base aislada





Tanto la norma EN 1998 como la norma ASCE 7-10 concentran la limitación del daño en el sistema de aislación, de hecho, las rigideces de los aisladores permiten estimar las derivas de diseño de la superestructura. En sí, los límites tolerables deben verificarse en términos de las deformaciones entre plantas con el fin de evitar daños significativos en los elementos estructurales e impedir daños masivos en los elementos no estructurales.

Los gráficos a continuación muestran las derivas (cm) en los ejes X e Y, que se presenta en cada nivel del edificio dentro del rango elástico. Se puede apreciar que en ambas direcciones de análisis la norma EN 1998 exhibe mayores valores que los obtenidos con la norma ASCE 7-10: en la dirección X, la deriva de techo es 0.14 cm (50.00%) mayor y en la dirección Y 0.10 cm (50.00%).

Gráfico No. 11 Deriva X en eje C6 para edificio con base aislada

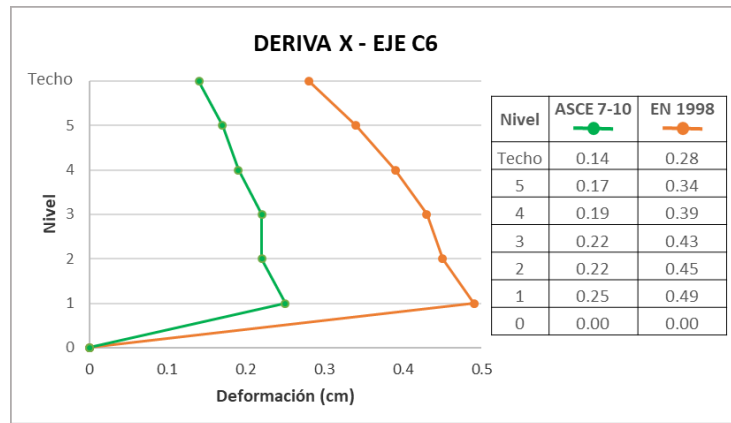
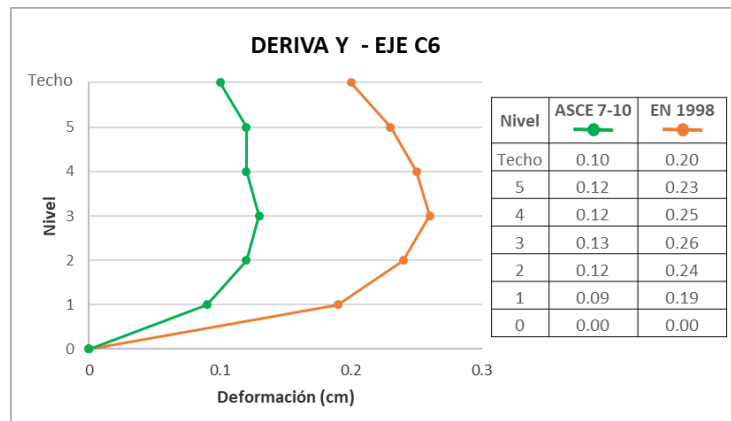


Gráfico No. 12 Deriva Y en eje C6 para edificio con base aislada



Ambas normas establecen valores máximos de deriva como parámetros para el control de las deformaciones horizontales y limitar el daño a los componentes no estructurales durante sismos prolongados y/o de considerable intensidad. Para ello, relacionan los límites del desplazamiento post-elástico de la deriva como un método de verificación de que el sistema de aislación posee simultáneamente resistencia lateral y capacidad de disipación de energía.

Los siguientes gráficos muestran las derivas (cm) en el rango post-elástico que cada nivel del edificio presenta en los ejes X e Y. Nótese en este caso la similitud de los valores de deformación obtenidos entre ambas normas, no obstante, la norma EN 1998 en las dos direcciones de análisis exhibe levemente mayores valores que los obtenidos con la norma ASCE 7-10: en la dirección X, la deriva última de techo es 0.025 cm (12.50%) mayor y en la dirección Y 0.035 cm (12.50%).

Gráfico No. 13 Deriva última Y en eje C6 para edificio con base aislada

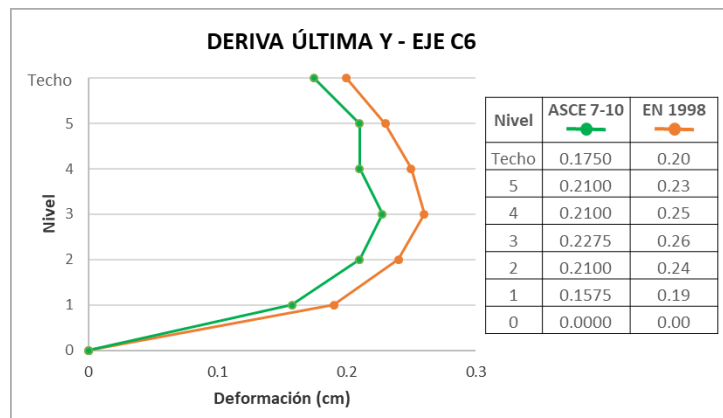
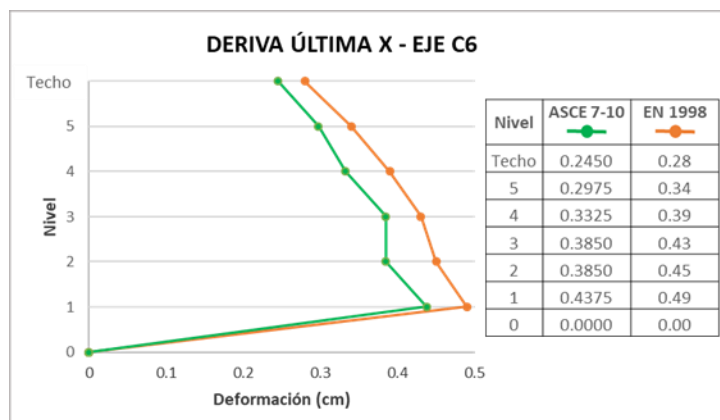


Gráfico No. 14 Deriva última X en eje C6 para edificio con base aislada



### 3. Análisis del edificio en Ciudad de Guatemala

El análisis estructural del edificio con y sin aislamiento sísmico de base, anteriormente realizado, se desarrolló en iguales condiciones de sismicidad tomando como referencia la “aceleración máxima del suelo de referencia para suelos tipo A,  $a_{gR}$ ”, dada en el ejemplo trabajado en el "Taller EC 8: Diseño sísmico de edificios", cuyo valor de 0.25g, se convirtió en el parámetro de comparación para ser relacionado en todas las normas.

En Guatemala, este valor se relaciona con la sismicidad de la región nororiental 3.1, una de las siete zonas sismológicas en que se divide el territorio nacional, cuyo “índice de sismicidad  $I_0$ ” corresponde a un nivel de intensidad moderada. Por otro lado, la Ciudad de Guatemala se encuentra en la región 4.2, una zona sísmica ubicada entre la falla del Motagua-Polochic (región 4.1) y la zona de subducción en el Océano Pacífico (región 4.3), caracterizadas por sus valores de la aceleración máxima del suelo muy superiores a 0.39g, lo cual requiere un nuevo análisis y cálculo estructural del edificio.

Para ello, el análisis del edificio diseñado con base fija se realizó bajo la norma AGIES - NSE (2017) y mediante la norma ASCE 7-10, utilizando aislamiento sísmico de base. El objetivo es analizar los resultados de ambos sistemas constructivos con el fin de comprobar la ventaja que los aisladores elastoméricos, tienen para incrementar la capacidad de las edificaciones de resistir el impacto de los terremotos, mejorando así, la seguridad estructural del edificio más allá de la “prevención del colapso”, con el objeto de resguardar su total funcionalidad después del sismo.

#### a. Períodos y modos de vibración

La tabla muestra el notable aumento del período fundamental del edificio diseñado con aislamiento sísmico de base de 0.76 a 2.62 s, es decir, se tuvo un incremento de 1.86 s (70.99%) en relación al edificio calculado con base fija, lo cual hizo disminuir la aceleración espectral del modo 1, de 1.62 a 0.46 m/s<sup>2</sup>.

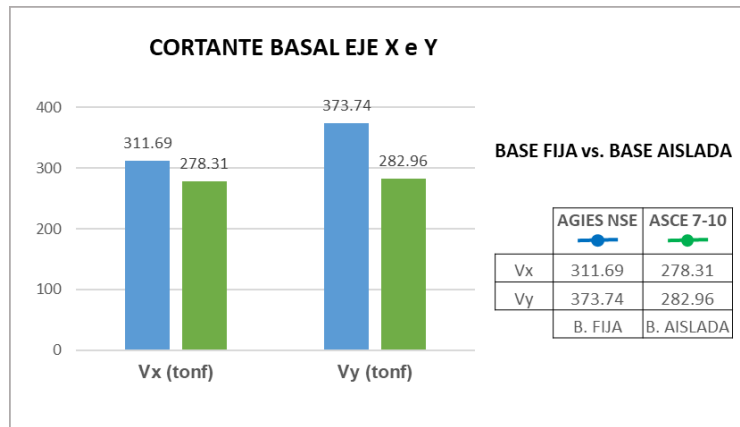
Cuadro No. 20 Comparación entre periodos de la estructura base fija y aislada

INCREMENTO DEL PERÍODO FUNDAMENTAL				
Modo	Período (s)		Aumento (s)	Relación porcentual
	Base fija	Base aislada		
1	0.76	2.62	1.86	70.99
2	0.53	2.57	2.04	79.22
3	0.50	2.38	1.88	79.08

b. Determinación del cortante basal y de los desplazamientos

El gráfico a continuación presenta la magnitud de la fuerza de corte en la base del edificio en las dos direcciones de análisis. En ambos casos, se observa que la respuesta de la estructura aislada es muy similar en cada eje, distinta de la producida por el sistema constructivo de base fija. También se aprecia que los resultados obtenidos con la norma AGIES NSE para el diseño del edificio de base fija, son relativamente mayores a los obtenidos con la norma ASCE 7-10 para el sistema de aislamiento sísmico de base: en la dirección X, el cortante basal es 33.38 tonf (10.71%) mayor y en la dirección Y, 90.78 tonf (24.29%).

Gráfico No. 15 Cortante basal para edificio en Ciudad de Guatemala



A continuación, se presenta la acumulación de los desplazamientos que se producen en el edificio de base fija y el comportamiento de la superestructura por encima de la interfaz del sistema de aislamiento sísmico que, como si se tratara de un bloque rígido en traslación sobre el suelo, limita las deformaciones del edificio. Se puede apreciar que los desplazamientos totales en ambas direcciones de análisis resultan ser mucho mayores en la estructura aislada, de hecho, el mayor desplazamiento se produce en la interfaz de aislamiento.

En este sentido, los gráficos muestran los desplazamientos (cm) en los ejes X e Y, que se presenta en cada nivel del edificio dentro del rango elástico. Obsérvese el marcado aumento de estos desplazamientos en el edificio diseñado con aislamiento sísmico de base en las dos direcciones de análisis, obtenidos con la norma ASCE 7-10: en la dirección X, la diferencia del desplazamiento es 19.23 cm (87.97%) y en la dirección Y, 20.58 cm (89.95%), valores muy por encima de los obtenidos con la norma AGIES NSE debido al desplazamiento de los aisladores.

También se puede apreciar que es muy distinto el comportamiento de la edificación de base fija, cuyo desplazamiento pasan de 0 a 2.63 y 2.30 cm, en los ejes X e Y respectivamente, lo cual genera mayores esfuerzos internos a causa de la deformación de los elementos estructurales. Por el contrario, en el edificio aislado, los mayores desplazamientos se dan en nivel de la interfaz de aislación en ambas direcciones, pasando de 0 a 19.68 y 21.64 cm, pero a partir de la interfaz el desplazamiento total es de 2.18 cm en el eje X y 1.24 cm en el eje Y, demostrando tener un nivel menor de desplazamientos totales.

Gráfico No. 16 Desplazamiento X para edificio en Ciudad de Guatemala

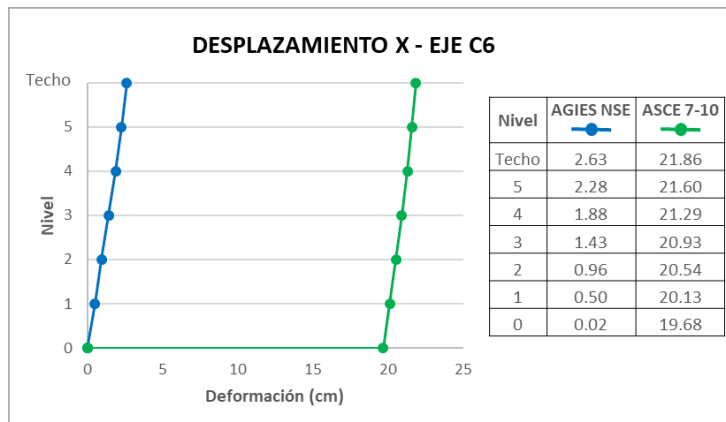


Gráfico No. 17 Desplazamiento Y para edificio en Ciudad de Guatemala



La disminución de la aceleración sísmica en la estructura se produce cuando ocurren mayores desplazamientos, por ello, la demanda de desplazamientos laterales se concentra en el sistema de aislación; por esta razón, las derivas son mucho menores que las de un edificio con base fija.

Los gráficos a continuación muestran las derivas (cm) en los ejes X e Y, que se presenta en cada nivel del edificio dentro del rango elástico. Se puede apreciar que en ambas direcciones de análisis la norma AGIES NSE exhibe mayores valores que los obtenidos con la norma ASCE 7-10: en la dirección X, la deriva de techo es 0.09 cm (25.71%) mayor y en la dirección Y 0.18 cm (48.65%).

Gráfico No. 18 Deriva X en eje C6 para edificio en Ciudad de Guatemala

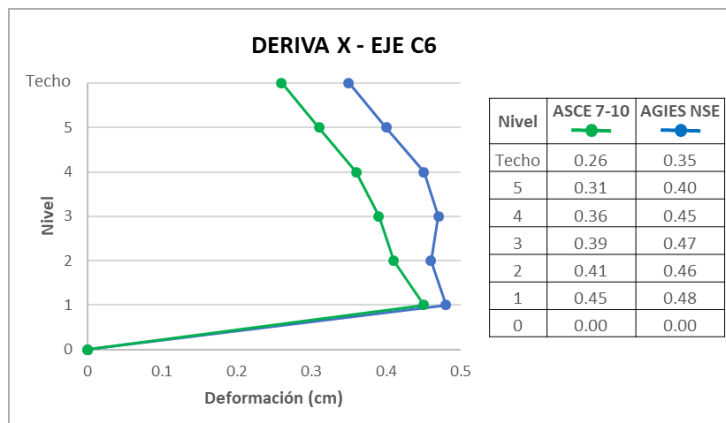
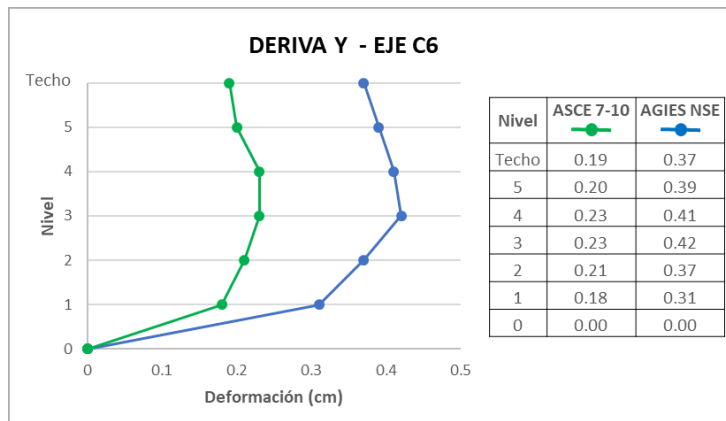


Gráfico No. 19 Deriva Y en eje C6 para edificio en Ciudad de Guatemala



Aunque ambas normas establecen valores máximos de deriva como parámetros para el control de las deformaciones horizontales y limitar el daño a los componentes no estructurales, queda claro que las derivas en la superestructura del sistema aislado siempre serán menores en comparación con las del sistema de base fija.

Los siguientes gráficos muestran las derivas (cm) en el rango post-elástico que cada nivel del edificio presenta en los ejes X e Y. Nótese la gran diferencia entre los valores de deformación obtenidos entre ambas normas para los distintos métodos constructivos. Así, la norma AGIES NSE en las dos direcciones de análisis exhibe mayores valores que los obtenidos con la norma ASCE 7-10: en la dirección X, la deriva última varía de 1.37 cm en la interfaz hasta 1.12 cm en el techo (un promedio de 67.75%) mayor y, en la dirección Y, de 1.08 cm en la interfaz hasta 1.33 cm en el techo (un promedio de 78.72%).

Gráfico No. 20 Deriva última X en eje C6 para edificio en Ciudad de Guatemala

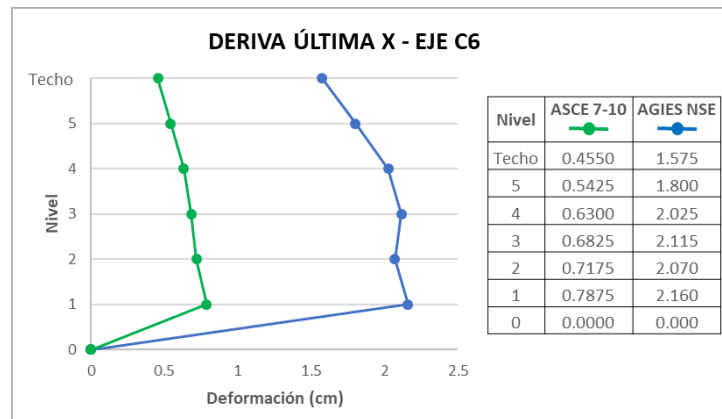
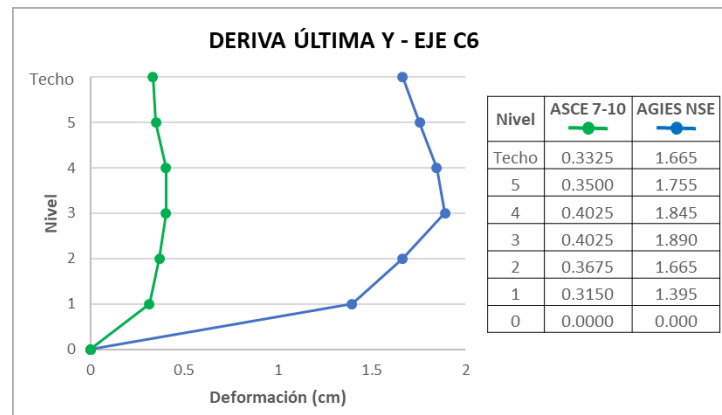


Gráfico No. 21 Deriva última Y en eje C6 para edificio en Ciudad de Guatemala



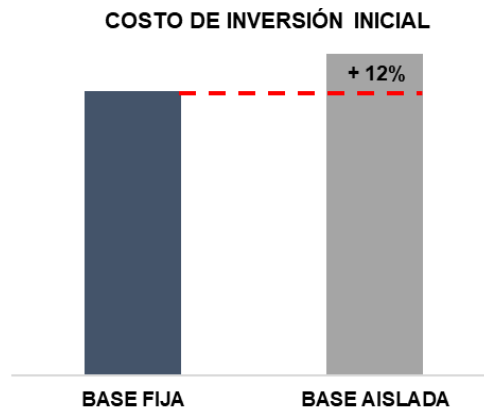
### c. Comparación económica

Como ya se discutió anteriormente, muchas son las variables que influyen en la cuantificación económica de un proyecto, a pesar que los costos de inversión y mantenimiento durante el ciclo de vida de un edificio se convierten en uno de los principales indicadores a evaluar. Por esta razón, en esta investigación se realizó una comparación bastante práctica para establecer, si el gasto en aislamiento sísmico de base resulta ser la opción más adecuada de protección sísmica en edificaciones bajas o de mediana altura en la Ciudad de Guatemala.

Este análisis consistió en establecer un costo total estimado del edificio de acuerdo a los precios por m<sup>2</sup> de construcción terminada y los publicados por la Cámara Guatemalteca de la Construcción. Para ello, se consideraron los volúmenes de concreto y acero para la construcción de los elementos estructurales integrados en los marcos intermedios, tratando de precisar las propiedades geométricas y dinámicas que resultasen en un diseño seguro y económico en ambos sistemas constructivos, dando como resultado, secciones más reducidas en el sistema aislado.

Al edificio aislado se le incrementó el costo estimado de los 26 aisladores elastoméricos, incluyendo los costos directos de su instalación, ensayos, placas base, anclajes, etc., así como los derivados de los costos de las obras anexas. La diferencia entre los dos diseños, da la idea de economía en el proyecto de base fija, pues a pesar que los costos de concreto y acero de la edificación aislada en un principio son menores debido a la reducción de sus secciones y cuantías de acero, la inclusión de los aisladores elastoméricos representa un aumento de 10% del costo total.

Gráfico No. 22 Costo de inversión inicial para edificio en Ciudad de Guatemala





La siguiente parte de este análisis consistió en hacer una comparación de los costos de reparación ocasionados por un terremoto en ambos sistemas constructivos. Existen muchos estudios y métodos desarrollados por diferentes autores para la evaluación del daño post-sismo en edificaciones. Algunos de ellos, como Roufaiel, M. & Meyer, C. (1987) o Mosalem, Ayala, White y Roth (1997), transforman la deformación máxima en una deformación de entrepiso que la consideran como índice del daño de la estructura; establecen cuatro estados de daño:

Cuadro No. 21 Estado de daño - Deformación de entrepiso

Estado de daño	Estado / límite	Descripción del daño	Deformación de entrepiso %
Ninguno	Elástico	Sin daño estructural y no estructural visible	< 0.2
Leve	Agrietamiento	Posible reparación de elementos no estructurales	0.2 - 0.5
Moderado	Fluencia	Requiere reparaciones sin demoler o reemplazar elementos estructurales	0.5 - 1.0
Fuerte	Ruptura, pandeo y/o aplastamiento	Daño estructural que requiere la demolición de grandes áreas o el reemplazo del edificio	> 1.0

Fuente: Mosalem *et al.*, 1997

En términos de costos de reparación post-sismo, el “Instituto de Investigación de Ingeniería de Terremotos, EERI”, propone una guía con seis niveles de daño que puede sufrir un edificio después de un terremoto, vinculados directamente con el costo de reparación en relación al valor de mercado del edificio:

Cuadro No. 22 Estado de daño - Costo de reparación

Nivel	Estado de daño %	Descripción del daño	Costo de reparación en relación al valor de mercado del edificio %
Ninguno	0	Sin daño	---
Ligero	0 - 5	Daño no estructural aislado	< 5 %
Moderado	5 - 25	Daño estructural ligero y no estructural considerable	< 25 %
Severo	25 - 50	Daño estructural considerable y no estructural excesivo	< 50 %
Total	50 - 100	Daño total	Más económico demoler que reparar
Colapso	> 100	Destrucción del edificio	Demolición y reemplazo del edificio

Fuente: EERI, 1996

La siguiente tabla resume la comparación entre el índice del daño de la estructura y el costo de reparación post-sismo. Nótese cómo el porcentaje de la deformación de entrepiso se relaciona directamente con el estado de daño de la estructura y su costo de reparación en relación al valor de mercado del edificio:

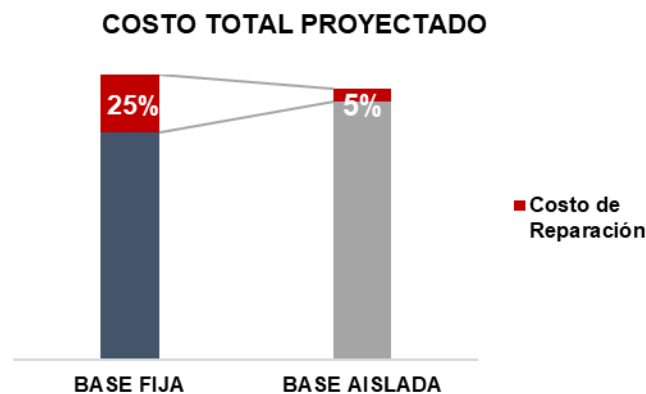
Cuadro No. 23 Relación del Índice de daño - Costo de reparación

Deformación de entrepiso %	Nivel	Índice de daño %	Descripción del daño	Costo de reparación en relación al valor de mercado del edificio %
< 0.2	Ligero	0 - 5	Sin daño estructural y no estructural aislado	< 5 %
0.2 - 0.5	Moderado	5 - 25	Daño estructural ligero y no estructural considerable	< 25 %
- 1.0	Severo	25 - 50	Daño estructural considerable y no estructural excesivo	< 50 %
> 1.0	Total	> 50	Daño estructural que requiere la demolición de grandes áreas o el reemplazo del edificio	Más económico demoler que reparar

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los valores máximos obtenidos para las derivas en el rango inelástico, el edificio con base aislada no presenta ningún nivel de daño por mantenerse en el rango elástico, pero aun así, se le asignó un nivel de daño leve, mientras el de base fija si presenta un daño moderado con fluencia asociada. Los costos de reparación, en base al Cuadro No. 23, tendrán como máximo 5% y 25%, respectivamente, en relación al valor de mercado del edificio. Los costos proyectados de ambos sistemas constructivos para un escenario post-sismo se presentan a continuación:

Gráfico No. 23 Costo total proyectado para edificio en Ciudad de Guatemala



Por lo tanto, queda a criterio del lector establecer la conveniencia de invertir en este tipo de protección sísmica para este edificio de oficinas en particular, pues todavía se debe evaluar integralmente los costos de protección y recuperación de los contenidos, que, por cierto, si en dichas oficinas se manejara información vital, posiblemente el costo del sistema de aislamiento sísmico de base no se escatimaría tratando de salvaguardarla. Lograr precisar la mejor opción involucra el balance entre el capital de inversión y el nivel de seguridad estructural que requiera el proyecto según la condición de servicio demandada después de un terremoto, para que continúe siendo utilizado con normalidad.

## VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las normas estudiadas en este análisis tienen como propósito lograr estructuras con apropiados niveles de desempeño y resistencia que eviten fallas que conlleven la pérdida de vidas humanas y materiales durante un sismo de gran intensidad. Estas plantean un escenario de comportamiento inelástico de las edificaciones y admiten un daño que se busca controlar, con los cuales se pueda estimar de mejor forma el comportamiento sísmico de las estructuras para cualquier demanda sísmica.

EN 1998 determina dos niveles de desempeño sísmico: no colapso y limitación del daño. En el primero, la edificación debe soportar la acción sísmica de diseño, conservar su integridad estructural y extender su capacidad de carga residual después del sismo. En el segundo, debe resistir un sismo con una mayor probabilidad de ocurrencia, pero que al mismo tiempo supere el sismo de diseño, sin padecer daños que limiten su uso y funcionalidad.

ASCE 7-10 y AGIES NSE también establecen dos niveles de desempeño sísmico. En el primero, la edificación debe resistir la demanda sísmica prevista en el rango elástico de los materiales estructurales, sin que sufra deterioro. En el segundo, los elementos estructurales deben soportar el exceso de esfuerzos, desplazamientos y deformaciones en un rango inelástico de tipo cedente dúctil, antes de alcanzar el sismo de diseño.

Las tres normas manejan los espectros de diseño como un sismo con 10% (EN 1998) y 2% (ASCE 7-10 y AGIES NSE) de probabilidad de excedencia en 50 años, período durante el cual se estima que las edificaciones estarán sometidas a la acción de sismos de baja intensidad y ocurrencia frecuente; de mediana intensidad y ocurrencia probable; y de gran intensidad y ocurrencia poco probable. Por razones económicas, ASCE 7-10 aplica un factor de reducción a los valores resultantes de las fuerzas de diseño sísmico de  $2/3$ . De forma similar, AGIES NSE considera el parámetro  $K_d$ , cuyo concepto básico es el mismo. La probabilidad de exceder el sismo de diseño se establece modificando el período de retorno para elegir el sismo adecuado al diseño según la sismicidad de la región.

Las tres normas también clasifican las estructuras en cuatro tipos según el riesgo estimado y/o las consecuencias de una falla. Esta diferencia en la confiabilidad del edificio se define mediante la aplicación de un factor que cada norma recomienda conforme se clasificó la obra, el que modifica la aceleración espectral o los parámetros sísmicos considerados. También clasifican las condiciones de las capas más superficiales del terreno en los primeros 30 m; EN 1998 clasifica siete tipos de suelos, mientras ASCE 7-10 y AGIES NSE cinco.

Asimismo, los espectros de diseño consideran las demandas de disipación de energía por ductilidad, definiendo factores de reducción de la aceleración espectral en función de la tipología estructural y de los materiales constructivos: factor q en la norma EN 1998 y factor R en la norma ASCE 7-10 y AGIES NSE. Para estimar los desplazamientos en el rango inelástico EN 1998 utiliza el mismo factor q para amplificar el desplazamiento elástico obtenido con el análisis lineal, mientras que ASCE 7-10 y AGIES NSE utilizan el factor Cd que al igual que el factor R depende de la tipología estructural y de los materiales constructivos.

A continuación, se presenta la comparación de estos parámetros, empleados en el presente análisis estructural:

Parámetros	Norma		
	EN 1998	ASCE 7-10	AGIES NSE
Clasificación de las estructuras	Clase de importancia II	Categoría del riesgo II	Categoría de ocupación II
Factores de seguridad	Factor de importancia $\gamma_f = 1.0$	Factor de importancia $I_e = 1.0$	Factor $K_d = 0.66$
Tipo de suelo	B	C	C
Ductilidad	Factor q = 3	Factor R = 5	Factor R = 5
Desplazamiento inelástico	Factor q = 3	Factor Cd = 4.5	Factor Cd = 4.5

Estas diferencias en las formas de los espectros de diseño reflejaron distintos valores para  $S_a$ . Este como coeficiente adimensional expresa el valor de la aceleración en la base del edificio como una fracción de la gravedad. Es así como en el primer análisis donde se evaluó el comportamiento sísmico del edificio con sistema convencional se obtuvo una aceleración de  $1.61 \text{ m/s}^2$  para el modo fundamental mediante EN 1998 y  $0.83 \text{ m/s}^2$  para el modo fundamental mediante AGIES NSE 2017. Esta diferencia en la aceleración se debe primordialmente a la diferencia en la ductilidad considerada para el mismo sistema constructivo en ambas normas (factor q y R). Por esta razón es que se obtienen las grandes diferencias en el cortante basal de ambas normas.

Los valores máximos de los desplazamientos y de las derivas en el rango elástico de cada nivel del edificio en ambas direcciones de análisis también fueron mayores según la norma EN 1998 que los obtenidos con la norma AGIES NSE debido a la diferencia en ductilidad, pero es hasta la deriva última donde los valores se asemejan aún más, sin dejar de presentarse valores mayores ante la norma EN 1998. Esto quiere decir que EN 1998 exige diseños más conservadores con estructuras más rígidas para soportar las fuerzas sísmicas de diseño que AGIES NSE 2017.

En cuanto al comportamiento de la estructura con aisladores ante la norma EN 1998 y ASCE 7-10 también se observan ciertas diferencias debido al proceso de diseño sísmico estipulado en ambas normas. Entre la diferencia más significativa destaca el nivel de ductilidad permitido para edificaciones con aislamiento sísmico. EN 1998 exige un comportamiento totalmente elástico de la estructura ante el sismo de diseño mientras que ASCE 7-10 sí permite cierto grado de comportamiento inelástico, lo que quiere decir que permite estructuras aisladas con mayor flexibilidad del sistema estructural (presentando mayores deformaciones y posibles daños). Las diferencias en los cortantes basales obtenidos mediante ambas normas reflejan este criterio entre las normas.

Las dos normas concentran la limitación del daño en el sistema de aislación y determinan el nivel de desempeño de una estructura ante la acción sísmica por un desplazamiento lateral máximo o una deriva de entrepiso máxima. Estos parámetros, actuando en el rango elástico y en ambas direcciones de análisis en cada nivel del edificio, fueron 50% mayores según la norma EN 1998 que los obtenidos con la norma ASCE 7-10.

También relacionan el límite inelástico de la deriva como un método de verificación de que el sistema de aislación posee simultáneamente resistencia lateral y capacidad de disipación de energía. La gran similitud de los valores de las deformaciones últimas en este rango obtenidas con la norma EN 1998 fue levemente mayor, 12.5%, lo cual sugiere nuevamente que esta norma recomienda el diseño de estructuras bastante rígidas.

Por último, luego de contrastar las distintas normativas y con la finalidad de alcanzar los objetivos propuestos en esta investigación, se realizó el análisis comparativo sobre el comportamiento estructural entre el edificio diseñado con base fija utilizando la norma AGIES - NSE (2017), para luego contrastar estos resultados con el diseño del mismo edificio utilizando la técnica constructiva del aislamiento sísmico de base mediante la norma ASCE 7-10. La intención es mostrar la ventaja que los aisladores elastoméricos ofrecen para incrementar la capacidad de las edificaciones de resistir el impacto de futuros terremotos en la Ciudad de Guatemala, e impulsar esta tecnología en el diseño estructural de nuevas edificaciones, el reacondicionamiento de edificios ya existentes, la rehabilitación de estructuras antiguas que no fueron construidas con bases sísmicas o para reforzar y proteger monumentos y construcciones con un gran valor histórico, patrimonial o arquitectónico que requieran ser rescatados y/o preservados.

Al obtener los periodos de vibración del edificio con aislamiento sísmico; éstos fueron mayores a 2 segundos en los tres primeros modos de vibración (2.62, 2.57 y 2.38 s, respectivamente), mismos que se asemejaron bastante al período objetivo, 2.50 s; de esta forma, la respuesta de la estructura mejoró respectivamente en cada modo 70.99, 79.22 y 79.08 %, lo cual evidencia la efectividad del sistema de aislación sísmica de base. No existió inversión de desplazamientos en todos los modos de vibración, ya que las discontinuidades de la estructura en planta y en elevación no son significativas. La superestructura experimentó la traslación de un bloque rígido, debido a la flexibilidad de los aisladores elastoméricos y a la rigidez que mantuvo la misma.

La ampliación del período fundamental hizo disminuir la respuesta dinámica en términos de fuerzas y aceleraciones, de hecho, la aceleración espectral del primer modo de vibración se redujo de 1.62 a 0.46 m/s<sup>2</sup>, es decir, 1.16 m/s<sup>2</sup> (11.82%) en comparación con la intensidad del campo gravitatorio. Sin embargo, la magnitud de la fuerza de corte en la base del edificio en las dos direcciones de análisis fue muy similar, siendo los resultados obtenidos con la norma AGIES NSE para el diseño del edificio de base fija relativamente mayores, pues en la dirección X el cortante basal fue 33.38 tonf (10.71%) mayor y en la dirección Y, 90.78 tonf (24.29%). A primera instancia pareciera una mejora poco significativa, pero es necesario resaltar que el espectro de diseño sin aislamiento se reduce mediante un factor  $R = 5$ , a diferencia del espectro de diseño para el edificio con aislamiento que es de  $R = 1.75$ . Es decir, aunque se presentan valores de cortante basal semejantes el espectro utilizado para el aislamiento sísmico es significativamente mayor.

Con respecto a los mayores desplazamientos en el edificio aislado, estos se produjeron a nivel de la interfaz de aislación en ambas direcciones ortogonales, pasando de 0 a 19.68 y 21.64 cm, pero que aumentaron sobre la interfaz hasta alcanzar el techo, 2.18 cm sobre el eje X y 1.24 cm en el Y. Para el edificio con base fija se obtuvieron desplazamientos totales de 2.36 cm sobre el eje X y 2.30 cm en el Y.

Es realmente en las derivas últimas donde más se aprecia la aportación del sistema de aislación ante la respuesta sísmica en el edificio. Esto debido a que la estructura convencional ya pasa a comportarse en un rango inelástico mientras que la estructura aislada lo hace muy ligeramente. Para la estructura con sistema de aislación la deriva última máxima es de 0.78 cm en el eje X y 0.40 cm en el eje Y al mismo tiempo que para la estructura convencional es de 2.16 cm y 1.89 cm. Esto quiere decir que las reducciones de derivas últimas están entre un 65 y 80%, comportándose la estructura aislada como un bloque rígido con muy pocas deformaciones.

Como se ha mencionado, la deriva es una de las formas que se utilizan actualmente para estimar el daño en una edificación. Mediante los resultados se obtuvo que el edificio con aislamiento sísmico no presentó daños por mantenerse dentro de un rango elástico al mismo tiempo que el edificio convencional si presenta daños moderados que requieren reparación. De esta forma se contempla la filosofía actual de diseño basada en el principio que ante un sismo frecuente no se debe presentar daño, ante un sismo intermedio un daño reparable y para un sismo severo puede presentarse un alto nivel de daño, pero sin llegar al colapso estructural para así resguardar la vida humana. Esto pues, primordialmente las estructuras se diseñan para comportarse de una manera dúctil, creándose eslabones de falla (rótulas plásticas) que permiten disipar la energía de las vibraciones sísmicas sin que se vea comprometida la estabilidad global del edificio.

Este concepto puede funcionar correctamente si la estructura es sometida a un sismo similar al de diseño, sin embargo, es poco probable que así sea. Si el sismo que impacta sobre las edificaciones resulta ser mucho mayor al esperado, se requerirá una alta demanda de ductilidad por parte de los componentes estructurales, tal como sucedió en el terremoto de Christchurch, Nueva Zelanda en febrero de 2011. Aun siendo este un país con un elevado desarrollo y un alto desempeño en la ingeniería estructural los edificios convencionales presentaron altos niveles de daño, en donde muchos de ellos debieron ser demolidos por el excesivo costo de reparación que representaban. Mediante un consenso entre la población, los políticos y los ingenieros del lugar se determinó que los daños presentados eran completamente inaceptables.

Por esta razón muchos países intentan mejorar los sistemas de diseño actual para minimizar los daños que se siguen presentando alrededor del mundo. La ingeniería sísmica, relativamente reciente, realiza cálculos basados en parámetros empíricos para mejorar los métodos constructivos actuales o desarrollar nuevos métodos que logren un mejor comportamiento ante los terremotos. Por tal motivo esta investigación pretende apoyar el uso de estas nuevas tecnologías mediante los resultados obtenidos del análisis, demostrando la mejora de la respuesta sísmica del edificio estudiado al incorporarle un sistema de aislamiento sísmico de base.

Mundialmente, las tecnologías de vanguardia en el campo de la aislación sísmica de base han ido posicionándose en el mercado de la construcción, ofreciendo un sistema de protección sísmica confiable y económico frente a otras posibilidades tecnológicas de mayor desarrollo. La continuidad en el funcionamiento de las instalaciones vitales después de un terremoto y la inmediata recuperación de las actividades civiles, comerciales y productivas, requieren que ciertas edificaciones puedan continuar funcionando inmediatamente después de un terremoto.





## VIII. CONCLUSIONES

Luego de haber profundizado en el estudio del aislamiento sísmico de base, como una de las modernas tecnologías orientadas a mejorar la seguridad estructural de las edificaciones para resistir el impacto de los terremotos más allá de la “prevención del colapso” y resguardar su total funcionalidad después del sismo y, de haber desarrollado el proceso analítico e interpretativo detallado en el capítulo anterior, se concluyen lo siguiente:

1. Los resultados obtenidos bajo las normas EN 1998 (EC 8) y ASCE 7-10, confirman la capacidad de los aisladores elastoméricos para aumentar el periodo natural de la edificación no aislada y disminuir las aceleraciones del suelo sobre la edificación aislada. La interfase de aislación, con una rigidez lateral bastante menor que la de la superestructura, redujo y amortiguó considerablemente parte de la energía sísmica transmitiendo menores esfuerzos cortantes. Los mayores desplazamientos se produjeron a nivel de la interfaz de aislación en ambas direcciones de análisis; las derivas de entrepiso aumentaron levemente sobre la interfaz hasta alcanzar el techo, comportándose todo el edificio como un bloque rígido sobre el sistema de aislamiento.

2. Los criterios de diseño y análisis estructural utilizados en las normas EN 1998 (EC 8) y ASCE 7-10 restringen el factor de modificación de la estructura por ductilidad, de tal manera que la edificación se comporte en un rango mayormente elástico. Esto hace que las deformaciones obtenidas sean bastante pequeñas y los daños ocasionados considerablemente bajos. El uso de este sistema dependerá de las consideraciones económicas y del daño que se espera, debiendo tener siempre presente que, aunque el valor del sistema de aislación continúa siendo generalmente el factor que incrementa el costo inicial, una menor inversión tiende a un mayor costo de reparación y viceversa.

3. A fin de mitigar la vulnerabilidad ante la probable ocurrencia de un evento sísmico de considerable intensidad en nuestro país, es indispensable incluir el uso de tecnologías de aislación sísmica en la normativa de diseño sísmo resistente de Guatemala, para que además de emplearse en el diseño estructural, se aplique en edificios ya existentes, estructuras antiguas que no fueron construidas con bases sísmicas o para rescatar y preservar monumentos históricos.



## IX. RECOMENDACIONES

Las expectativas de la presente investigación fueron alcanzadas, por lo cual, es prudente sugerir las siguientes recomendaciones:

1. Que se profundicen las investigaciones en el campo de la aislación sísmica de base y en la aplicación de otras tecnologías de vanguardia, orientadas a mejorar la protección sísmica de las edificaciones, cuyo propósito, además de proteger la vida humana, persiga proveer un mínimo de calidad estructural que permita resistir la fuerza de un terremoto de gran intensidad, sin que la estructura llegue a padecer daños que limiten su uso y funcionalidad.

2. Que, a través de las Universidades del país, como extensiones de la investigación formal y de la diseminación del conocimiento, se divulgue y promueva el uso de esta tecnología en Guatemala, para que además de emplearse en el diseño estructural de nuevos edificios, se adapte en edificios ya existentes, estructuras antiguas que no fueron construidas con bases sísmicas o para rescatar y preservar monumentos históricos.

3. Que se incluya en las Normas de Seguridad Estructural de Guatemala, el uso de tecnologías de aislación sísmica como una alternativa de protección sísmica confiable y económica frente a otras posibilidades tecnológicas de mayor desarrollo, para que ingenieros, inversionistas y empresarios del sector de la construcción, adopten una cultura de prevención sísmica como una medida de mitigación ante la permanente amenaza sísmica que en cualquier momento podría impactar al territorio nacional.



## X. BIBLIOGRAFÍA

AGIES (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica). 2017. *Historia*. 3 págs.

\_\_\_\_\_. 2017a. Norma de Seguridad Estructural 2: Demandas estructurales, condiciones de sitio y niveles de protección. Edición 2017. 107 págs.

\_\_\_\_\_. 2017b. Norma de Seguridad Estructural 3: Diseño Estructural de Edificaciones. Edición 2017. 66 págs.

AICE. 2012. «*Aplicación de sistemas de aislación sísmica en edificaciones de mediana altura, Caso Edificio Torre del Sol*». Revista EMB Construcción, Edición septiembre 2012. [Chile]. (133): 30-31.

Alfaro, Andrés. 2009. *Introducción a la ingeniería sísmológica*. Universidad de la Salle, Bogotá. 152 págs.

ASCE (American Society of Civil Engineers). 2016. *About ASCE*. Extraído de: [https://www.asce.org/about\\_asce/](https://www.asce.org/about_asce/) [17/05/2018]

ASCE. 2010. *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. ASCE/SEI Standard 7-10.

Arnold, Chris. 2016. *Seismic Safety of the Building Envelope*. Extraído de: <http://www.wbdg.org/resources/seismic-safety-building-envelope> [24/07/2018]

Bazán, Enrique. 2010. *Diseño sísmico de edificios*. México. 320 págs.

CEN (Comisión Europea para la Estandarización). 2004. *EN 1998 -1: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. 229 págs.

CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres). 1999. *Curso sobre diseño y construcción sísmorresistente de estructuras*. México. 417 págs.

Chopra, Anil K. 2014. *Dinámica de estructuras*. Editorial Pearson Educación. México. 752 págs.

CSN (Centro Sismológico Nacional). 2016. *Fórmulas para estimar la magnitud de un sismo*.  
Extraído de: <http://www.csn.uchile.cl/formulas-para-estimar-la-magnitud/> [14/04/2018]

Domínguez, Mauricio. 2014. *Periodos de vibración de las edificaciones*. Extraído de:  
<http://www.redalyc.org/html/1939/193932724001/> [05/05/2018]

EERI (Earthquake Engineering Research Institute). 1996. *Post-earthquake investigation field guide, Learning from earthquakes*. Earthquake Engineering Research Institute (96-1): 1-144.

ESC (European Seismological Commission). 1998. *European Macroseismic Scale 1998*. Editor G. Grünthal, Luxemburgo. 101 págs.

Espíndola, J.M. 1994. *Terremotos y ondas sísmicas*. UNAM. 51 págs.

Genatios, Carlos y Lafuente, Marianela. 2016. *INTRODUCCIÓN AL USO DE AISLADORES Y DISIPADORES EN ESTRUCTURAS*. Banco de Desarrollo de América Latina. 190 págs.

GISE (Grupo Ingeniería Sísmica-Estructuras). 2016. *Diferencia entre espectro de respuesta (ER) y espectro de diseño (ED)*. Extraído de: [www.gise-ec.com](http://www.gise-ec.com) [29/06/2018]

Joint Research Centre. 2011. *About the EN Eurocodes*. Extraído de:  
<https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/> [18/05/2018]

León, Ivan. 2017. *Sistemas modernos de protección sísmica: aisladores sísmicos*. Extraído de:  
[https://issuu.com/engcaos/docs/ponencia\\_cip-ancash\\_2017](https://issuu.com/engcaos/docs/ponencia_cip-ancash_2017) [09/06/2018]

Mosalem, K.M., Ayala G., White R.N. and Roth, C. (1997). *Seismic Fragility of LRC Frames with and without masonry infill walls*. Journal of Earthquake Engineering, Vol.1, No.4, 693-719.

OAK58. *Seguridad contra sismos*. Extraído de: <https://www.oak58.com/seguridad> [17/07/2018]

Okadan, Ken. 2014. *Structural Design of Nakanoshima Festival Tower*. International Journal of High-Rise Buildings. [Japón] 3 (3): 173-183.

Osorio, Leonardo. 2001. *Aislamiento de cimentaciones para mejorar la respuesta sísmica de estructuras*. Revista de la Universidad de La Salle. [Colombia] (32): 51-61

Oviedo, Juan. 2015. *Protección sísmica y reforzamiento de edificaciones a través de sistemas no convencionales*. 3er Simposio de ingeniería de materiales y estructuras. Colombia.

Pérez, Victoria. 2017. *¿Qué significa en realidad la magnitud de un terremoto?* Extraído de: <https://es.gizmodo.com/ni-escala-richter-ni-grados-que-significa-la-magnitud-1802632528> [14/04/2018]

Roufaiel, M. and Meyer, C. (1987). Analytical Modeling of Hysteretic Behavior of R/C Frames. Journal of Structural Engineering 113:3,429-444.

Saiful, A. B., Jameel, M., y Zamin, M. 2011. *Seismic Isolation in Buildings to be a Practical Reality: Behavior of Structure and Installation Technique*, Journal of Engineering and Technology Research. Universidad de Malaya, Malasia. 19 págs.

Sauter, F. 1990. *Introducción a la sismología*. Universidad de Costa Rica, San José. Primera Edición. 272 págs.

Share-EU. 2013. *European Seismic Hazard Map*. Extraído de: <http://www.share-eu.org/> [02/08/2018]

Sirve S.A. *Seismic Proteccion Technologies*. Extraído de: <http://www.sirve.cl> [15/06/2018]

Tarbuck, E. J.; Lutgens, F.K. y Tasa, D. 2005. *Ciencias de la Tierra*. Pearson Educación S.A. Madrid. 736 págs.

USGS (United States Geological Survey). Extraído de: <http://earthquake.usgs.gov/designmaps>  
[13/08/2018]



## XI. ANEXOS

**Anexo A.** Proporciones de masas de participación modal para edificio con base fija

<b>ANÁLISIS MODAL BASE FIJA</b>							
<b>Modo</b>	<b>Período seg</b>	<b>UX</b>	<b>UY</b>	<b>Sum UX</b>	<b>Sum UY</b>	<b>RZ</b>	<b>Sum RZ</b>
1	0.76	0.51	0.00	0.51	0.00	0.03	0.03
2	0.534	0.00	0.50	0.51	0.50	0.00	0.03
3	0.498	0.01	0.00	0.52	0.51	0.39	0.42
4	0.201	0.09	0.00	0.61	0.51	0.01	0.43
5	0.133	0.00	0.13	0.61	0.64	0.00	0.43
6	0.121	0.01	0.00	0.61	0.64	0.09	0.52
7	0.095	0.03	0.00	0.64	0.64	0.00	0.52
8	0.061	0.02	0.00	0.66	0.64	0.00	0.52
9	0.06	0.00	0.13	0.66	0.77	0.00	0.52
10	0.052	0.00	0.00	0.66	0.77	0.05	0.57
11	0.045	0.02	0.00	0.68	0.77	0.00	0.57
12	0.041	0.00	0.18	0.68	0.95	0.00	0.57
13	0.038	0.07	0.00	0.75	0.95	0.00	0.58
14	0.037	0.22	0.00	0.98	0.95	0.01	0.59
15	0.031	0.00	0.00	0.98	0.95	0.11	0.69
16	0.03	0.00	0.02	0.98	0.97	0.00	0.69
17	0.026	0.00	0.00	0.98	0.97	0.27	0.96
18	0.022	0.00	0.00	0.98	0.98	0.00	0.96

**Anexo B.** Proporciones de masas de participación modal para edificio con base aislada

<b>ANÁLISIS MODAL BASE AISLADA</b>							
<b>Modo</b>	<b>Período seg</b>	<b>UX</b>	<b>UY</b>	<b>Sum UX</b>	<b>Sum UY</b>	<b>RZ</b>	<b>Sum RZ</b>
1	2.62	0.64	0.00	0.64	0.00	0.01	0.01
2	2.57	0.00	0.64	0.64	0.64	0.00	0.01
3	2.38	0.00	0.00	0.64	0.64	0.55	0.56
4	0.36	0.00	0.00	0.64	0.64	0.00	0.56
5	0.27	0.00	0.00	0.64	0.64	0.00	0.56
6	0.26	0.00	0.00	0.64	0.64	0.00	0.56
7	0.13	0.00	0.00	0.64	0.64	0.00	0.56
8	0.08	0.00	0.00	0.64	0.64	0.00	0.56
9	0.08	0.00	0.00	0.64	0.64	0.00	0.56
10	0.07	0.00	0.00	0.64	0.64	0.00	0.56
11	0.05	0.00	0.00	0.64	0.64	0.00	0.56
12	0.04	0.00	0.32	0.64	0.96	0.00	0.56
13	0.04	0.00	0.00	0.65	0.96	0.00	0.56
14	0.04	0.00	0.01	0.65	0.97	0.00	0.56
15	0.04	0.01	0.00	0.65	0.97	0.00	0.56
16	0.04	0.32	0.00	0.97	0.97	0.01	0.57
17	0.04	0.00	0.00	0.98	0.97	0.00	0.57
18	0.03	0.00	0.00	0.98	0.97	0.40	0.98

### Anexo C. Metrado de concreto para edificio con base fija

Nivel	Material		Muros	Columnas	Vigas	Total
Nivel -1 (-3.00 m)	Concreto	Volume (m3)	84	8	13	212
		Area (m2)	682.37	44.9	121.8	1427.13
		Ratio (m2/m3)	8.12	5.61	9.37	28.5
		Number of elements	9	8	22	40
		Unit price of formwork (USD/m2)	26.64	33.13	49.04	
		Total price of formwork (USD)	18178.39	1487.67	5973.24	37391.35
		Unit price of material (USD/m3)	200	200	200	
		Total price of material (USD)	16800	1600	2600	42400
Nivel 0 (±0.00 m)	Concreto	Volume (m3)	84	8	12	211
		Area (m2)	682.37	44.9	123.12	1428.73
		Ratio (m2/m3)	8.12	5.61	10.26	29.4
		Number of elements	9	8	22	40
		Unit price of formwork (USD/m2)	26.64	33.13	49.04	129.14
		Total price of formwork (USD)	18178.39	1487.67	6037.98	37461.62
		Unit price of material (USD/m3)	200	200	200	800
		Total price of material (USD)	16800	1600	2400	42200
Nivel 1 (+4.00 m)	Concreto	Volume (m3)	23	16	22	132
		Area (m2)	186.4	120.99	127.04	825.25
		Ratio (m2/m3)	8.1	7.56	5.77	26.93
		Number of elements	7	16	22	46
		Unit price of formwork (USD/m2)	26.64	33.13	49.04	
		Total price of formwork (USD)	4965.75	4008.53	6229.82	23149.42
		Unit price of material (USD/m3)	200	200	200	
		Total price of material (USD)	4600	3200	4400	26400
Nivel 2 (+7.00 m)	Concreto	Volume (m3)	16	16	22	125
		Area (m2)	138	88.99	125.38	743.31
		Ratio (m2/m3)	8.63	5.56	5.7	25.4
		Number of elements	7	16	22	46

		Unit price of formwork (USD/m2)	26.64	33.13	49.04	
		Total price of formwork (USD)	3676.37	2948.37	6148.41	20721.01
		Unit price of material (USD/m3)	200	200	200	
		Total price of material (USD)	3200	3200	4400	25000
Nivel 3 (+10.00 m)	Concreto	Volume (m3)	16	16	22	125
		Area (m2)	138	88.99	125.38	743.31
		Ratio (m2/m3)	8.63	5.56	5.7	25.4
		Number of elements	7	16	22	46
		Unit price of formwork (USD/m2)	26.64	33.13	49.04	
		Total price of formwork (USD)	3676.37	2948.37	6148.41	20721.01
		Unit price of material (USD/m3)	200	200	200	
		Total price of material (USD)	3200	3200	4400	25000
Nivel 4 (+13.00 m)	Concreto	Volume (m3)	16	16	22	125
		Area (m2)	138	88.99	125.38	743.31
		Ratio (m2/m3)	8.63	5.56	5.7	25.4
		Number of elements	7	16	22	46
		Unit price of formwork (USD/m2)	26.64	33.13	49.04	
		Total price of formwork (USD)	3676.37	2948.37	6148.41	20721.01
		Unit price of material (USD/m3)	200	200	200	
		Total price of material (USD)	3200	3200	4400	25000
Nivel 5 (+16.00 m)	Concreto	Volume (m3)	16	16	22	125
		Area (m2)	138	88.99	125.38	743.31
		Ratio (m2/m3)	8.63	5.56	5.7	25.4
		Number of elements	7	16	22	46
		Unit price of formwork (USD/m2)	26.64	33.13	49.04	
		Total price of formwork (USD)	3676.37	2948.37	6148.41	20721.01
		Unit price of material (USD/m3)	200	200	200	
		Total price of material (USD)	3200	3200	4400	25000
Techo (+19.00 m)	Concreto	Volume (m3)	16	16	22	117
		Area (m2)	138.79	89.23	128.92	747.88
		Ratio (m2/m3)	8.67	5.58	5.86	26.32
		Number of elements	7	16	22	46

		Unit price of formwork (USD/m <sup>2</sup> )	26.64	33.13	49.04	
		Total price of formwork (USD)	3697.37	2956.19	6322.21	20923.63
		Unit price of material (USD/m <sup>3</sup> )	200	200	200	
		Total price of material (USD)	3200	3200	4400	23400
						<b>Σ-M<sup>3</sup>: 1172</b>

**Anexo D. Metrado de acero para edificio con base fija**

Proyecto : <b>ANÁLISIS Y DISEÑO DE UN EDIFICIO CON AISLAMIENTO SÍSMICO EN GUATEMALA</b>				
Propietario : <b>JOSE ANTONIO LETONA SAMAYOA</b>				
Fecha : <b>SEPTIEMBRE - 2018</b>				
Especialidad : <b>TESIS</b>				
Modulo : _____				
				Hecho por : <b>J. LETONA</b>
				Revisado por : _____
ITEM	DESCRIPCION	Und.	Parcial	Total

**Metrado de Vigas** **1,082.65**

**Vigas N+4.00m / Ejes Número**

Varillas Longitudinales 2 Ø5/8"   _____	kg	565.44
Bastones 1 Ø1/2"   _____	kg	65.34
Bastones 1 Ø3/4"   _____	kg	19.49
Bastones 1 Ø7/8"   _____	kg	44.08
Bastones 1 Ø1"   _____	kg	70.45
Estribo : 43 Und de Ø3/8" en 24 Elem. Simil.	kg	317.86

**Vigas N+4.00m / Ejes Letra**

Varillas Longitudinales 2 Ø5/8"   _____	kg	572.88
Bastones 2 Ø1/2"   _____	kg	26.68
Bastones 2 Ø5/8"   _____	kg	15.81
Bastones 2 Ø3/4"   _____	kg	40.77
Bastones 2 Ø7/8"   _____	kg	55.33
Bastones 2 Ø1"   _____	kg	42.19
Bastones 2 Ø1 9/8"   _____	kg	28.34
Estribo : 37 Und de Ø3/8" en 112 Elem. Simil.	kg	638.18

**1,420.17**

**Vigas N+7.00m-16.00m / Ejes Número**

Varillas Longitudinales 2 Ø5/8"   _____	kg	1696.32
Varillas Longitudinales 2 Ø3/4"   _____	kg	827.90
Bastones 1 Ø1/2"   _____	kg	142.56
Bastones 1 Ø5/8"   _____	kg	79.36
Bastones 1 Ø3/4"   _____	kg	88.70
Bastones 1 Ø7/8"   _____	kg	80.26
Bastones 1 Ø1"   _____	kg	378.90
Bastones 1 Ø9/8"   _____	kg	137.63
Estribo : 43 Und de Ø3/8" en 24 Elem. Simil.	kg	1271.42

**4,703.06**

**Vigas N+7.00m-16.00m / Ejes Letra**

Varillas Longitudinales 2 Ø5/8"   _____	kg	2209.68
Varillas Longitudinales 2 Ø3/4"   _____	kg	120.06
Bastones 1 Ø1/2"   _____	kg	87.32
Bastones 1 Ø5/8"   _____	kg	79.05
Bastones 1 Ø3/4"   _____	kg	186.37
Bastones 1 Ø7/8"   _____	kg	322.24
Bastones 1 Ø1"   _____	kg	84.38
Bastones 1 Ø9/8"   _____	kg	53.64
Bastones 1 Ø10/8"   _____	kg	203.52

**4,622.60**

Estribo : 37 Und de Ø3/8" en 112 Elem. Simil.	kg	1276.35
---	----	---------

**Vigas Techo N+19.00m / Ejes Número**

1,082.65

Varillas Longitudinales 2 Ø5/8"  _____	kg	565.44
Bastones 1 Ø1/2"  _____	kg	65.34
Bastones 1 Ø3/4"  _____	kg	19.49
Bastones 1 Ø7/8"  _____	kg	44.08
Bastones 1 Ø1"  _____	kg	70.45
Estribo : 43 Und de Ø3/8" en 24 Elem. Simil.	kg	317.86
Varillas Longitudinales 2 Ø5/8"  _____	kg	572.88
Bastones 2 Ø1/2"  _____	kg	26.68
Bastones 2 Ø5/8"  _____	kg	15.81
Bastones 2 Ø3/4"  _____	kg	40.77
Bastones 2 Ø7/8"  _____	kg	55.33
Bastones 2 Ø1"  _____	kg	42.19
Bastones 2 Ø1 9/8"  _____	kg	28.34
Estribo : 37 Und de Ø3/8" en 112 Elem. Simil.	kg	638.18

**Metrado de columnas**

**C 50x50**

9,636.77

Varilla Longitudinal 4 Ø1/2" _____	kg	365.90
Varilla Longitudinal 4 Ø1" _____	kg	1471.01
Varilla Longitudinal 4 Ø1/2" _____	kg	68.11
Varilla Longitudinal 4 Ø1" _____	kg	273.82
Estribo : 20 Und de Ø3/8" en 28 Elem. Simil.	kg	627.20
Estribo : 27 Und de Ø3/8" en 4 Elem. Simil.	kg	120.96

**C 30x70**

Varilla Longitudinal 8 Ø3/4" _____	kg	4257.79
Estribo : 20 Und de Ø3/8" en 72 Elem. Simil.	kg	1612.80

**C 40x70**

Varilla Longitudinal 8 Ø7/8" _____	kg	642.05
Estribo : 20 Und de Ø3/8" en 8 Elem. Simil.	kg	197.12

---

**ΣTotal 23,968.06 kg**

**23.97 Ton**

---

**Anexo E. Metrado de concreto para edificio con base aislada**

<b>Nivel</b>	<b>Material</b>		<b>Muros</b>	<b>Columnas</b>	<b>Vigas</b>	<b>Total</b>
Nivel -1 (-3.00 m)	Concreto	Volume (m3)	84.78	5.05	11.72	208.65
		Area (m2)	682.37	42.64	122.17	1425.23
		Ratio (m2/m3)	8.05	8.44	10.43	32.32
		Number of elements	9	8	22	40
		Unit price of formwork (USD/m2)	26.64	33.13	49.04	
		Total price of formwork (USD)	18178.39	1412.66	5991.09	37333.95
		Unit price of material (USD/m3)	200	200	200	
		Total price of material (USD)	16955.18	1010.36	2343	41728.54
Nivel 0 (±0.00 m)	Concreto	Volume (m3)	84.78	5.05	11.88	208.81
		Area (m2)	682.37	42.64	123.49	1426.9
		Ratio (m2/m3)	8.05	8.44	10.39	32.28
		Number of elements	9	8	22	40
		Unit price of formwork (USD/m2)	26.64	33.13	49.04	
		Total price of formwork (USD)	18178.39	1412.66	6055.83	37405.68
		Unit price of material (USD/m3)	200	200	200	
		Total price of material (USD)	16955.18	1010.36	2376	41761.54
Nivel 1 (+4.00 m)	Concreto	Volume (m3)	22.14	10.08	12.95	116.57
		Area (m2)	186.4	102.2	129.63	809.11
		Ratio (m2/m3)	8.42	10.14	10.01	34.04
		Number of elements	7	16	22	46
		Unit price of formwork (USD/m2)	26.64	33.13	49.04	
		Total price of formwork (USD)	4965.75	3385.95	6356.93	22655.17
		Unit price of material (USD/m3)	200	200	200	
		Total price of material (USD)	4428.93	2015.52	2590.38	23314.83
Nivel 2 (+7.00 m)	Concreto	Volume (m3)	16.41	7.28	12.85	107.94
		Area (m2)	138	75	127.97	731.97
		Ratio (m2/m3)	8.41	10.31	9.96	34.16
		Number of elements	7	16	22	46



		Unit price of formwork (USD/m2)	26.64	33.13	49.04	
		Total price of formwork (USD)	3676.37	2484.81	6275.53	20385.79
		Unit price of material (USD/m3)	200	200	200	
		Total price of material (USD)	3281.43	1455.52	2569.63	21586.58
Nivel 3 (+10.00 m)	Concreto	Volume (m3)	16.41	7.28	12.85	107.94
		Area (m2)	138	75	127.97	731.97
		Ratio (m2/m3)	8.41	10.31	9.96	34.16
		Number of elements	7	16	22	46
		Unit price of formwork (USD/m2)	26.64	33.13	49.04	
		Total price of formwork (USD)	3676.37	2484.81	6275.53	20385.79
		Unit price of material (USD/m3)	200	200	200	
		Total price of material (USD)	3281.43	1455.52	2569.63	21586.58
Nivel 4 (+13.00 m)	Concreto	Volume (m3)	16.41	7.28	12.85	107.94
		Area (m2)	138	75	127.97	731.97
		Ratio (m2/m3)	8.41	10.31	9.96	34.16
		Number of elements	7	16	22	46
		Unit price of formwork (USD/m2)	26.64	33.13	49.04	
		Total price of formwork (USD)	3676.37	2484.81	6275.53	20385.79
		Unit price of material (USD/m3)	200	200	200	
		Total price of material (USD)	3281.43	1455.52	2569.63	21586.58
Nivel 5 (+16.00 m)	Concreto	Volume (m3)	16.41	7.28	12.85	107.94
		Area (m2)	138	75	127.97	731.97
		Ratio (m2/m3)	8.41	10.31	9.96	34.16
		Number of elements	7	16	22	46
		Unit price of formwork (USD/m2)	26.64	33.13	49.04	
		Total price of formwork (USD)	3676.37	2484.81	6275.53	20385.79
		Unit price of material (USD/m3)	200	200	200	
		Total price of material (USD)	3281.43	1455.52	2569.63	21586.58
Techo (+19.00 m)	Concreto	Volume (m3)	16.5	7.29	13.32	100.11
		Area (m2)	138.79	75.19	131.56	736.54
		Ratio (m2/m3)	8.41	10.32	9.88	34.82
		Number of elements	7	16	22	46

		Unit price of formwork (USD/m2)	26.64	33.13	49.04	
		Total price of formwork (USD)	3697.37	2491.04	6451.68	20589.17
		Unit price of material (USD/m3)	200	200	200	
		Total price of material (USD)	3300.37	1457.81	2664.38	20022.56
						<b><math>\Sigma</math>-M<sup>3</sup> : 1065.9</b>

**Anexo F. Metrado de acero para edificio con base aislada**

Proyecto : ANÁLISIS Y DISEÑO DE UN EDIFICIO CON AISLAMIENTO SÍSMICO EN GUATEMALA				
Propietario : JOSE ANTONIO LETONA SAMAYOA Fecha : SEPTIEMBRE - 2018 Especialidad : TESIS Modulo :				
				Hecho por : J. LETONA Revisado por :
ITEM	DESCRIPCION	Und.	Parcial	Total

**Metrado de Vigas**

**Vigas N+4.00m / Ejes Número**

**1,021.62**

Varillas Longitudinales 2 Ø5/8"  ____	kg	565.44	
Bastones 1 Ø1/2"  ____	kg	59.90	
Bastones 2 Ø5/8"  ____	kg	7.91	
Bastones 1 Ø7/8"  ____	kg	70.53	
Estribo : 43 Und de Ø3/8" en 24 Elem. Simil.	kg	317.86	

**Vigas N+4.00m / Ejes Letra**

**1,356.84**

Varillas Longitudinales 2 Ø5/8"  ____	kg	572.88	
Bastones 2 Ø1/2"  ____	kg	41.23	
Bastones 2 Ø5/8"  ____	kg	27.67	
Bastones 2 Ø3/4"  ____	kg	11.65	
Bastones 2 Ø7/8"  ____	kg	15.81	
Bastones 2 Ø1"  ____	kg	21.09	
Bastones 2 Ø1 9/8"  ____	kg	28.34	
Estribo : 37 Und de Ø3/8" en 112 Elem. Simil.	kg	638.18	

**Vigas N+7.00m-16.00m / Ejes Número**

**4,096.62**

Varillas Longitudinales 2 Ø5/8"  ____	kg	2261.76	
Bastones 1 Ø1/2"  ____	kg	142.56	
Bastones 1 Ø5/8"  ____	kg	19.84	
Bastones 1 Ø3/4"  ____	kg	118.27	
Bastones 1 Ø7/8"  ____	kg	120.38	
Bastones 1 Ø1"  ____	kg	162.38	
Estribo : 43 Und de Ø3/8" en 24 Elem. Simil.	kg	1271.42	

**Vigas N+7.00m-16.00m / Ejes Letra**

**4,355.14**

Varillas Longitudinales 1 Ø5/8"  ____	kg	2291.52	
Bastones 1 Ø1/2"  ____	kg	48.51	
Bastones 1 Ø5/8"  ____	kg	300.39	
Bastones 1 Ø3/4"  ____	kg	46.59	
Bastones 1 Ø7/8"  ____	kg	64.45	
Bastones 1 Ø1"  ____	kg	84.38	
Bastones 1 Ø9/8"  ____	kg	107.27	
Bastones 1 Ø10/8"  ____	kg	135.68	
Estribo : 37 Und de Ø3/8" en 112 Elem. Simil.	kg	1276.35	

**Vigas N+4.00m / Ejes Número**

Varillas Longitudinales 2 Ø5/8"  ____	kg	565.44	<b>1,021.62</b>
Bastones 1 Ø1/2"  ____	kg	59.90	
Bastones 2 Ø5/8"  ____	kg	7.91	
Bastones 1 Ø7/8"  ____	kg	70.53	
Estribo : 43 Und de Ø3/8" en 24 Elem. Simil.	kg	317.86	

**Vigas N+4.00m / Ejes Letra**

Varillas Longitudinales 2 Ø5/8"  ____	kg	572.88	<b>1,356.84</b>
Bastones 2 Ø1/2"  ____	kg	41.23	
Bastones 2 Ø5/8"  ____	kg	27.67	

---

Bastones 2 Ø3/4"  ____	kg	11.65
Bastones 2 Ø7/8"  ____	kg	15.81
Bastones 2 Ø1"  ____	kg	21.09
Bastones 2 Ø1 9/8"  ____	kg	28.34
Estribo : 37 Und de Ø3/8" en 112 Elem. Simil.	kg	638.18

**Metrado de columnas****C 50x50**

Varilla Longitudinal 4 Ø1/2" _____	kg	365.90
Varilla Longitudinal 4 Ø1" _____	kg	1471.01
Varilla Longitudinal 4 Ø1/2" _____	kg	68.11
Varilla Longitudinal 4 Ø1" _____	kg	273.82
Estribo : 20 Und de Ø3/8" en 28 Elem. Simil.	kg	627.20
Estribo : 27 Und de Ø3/8" en 4 Elem. Simil.	kg	120.96

**C 30x50**

Varilla Longitudinal 4 Ø5/8" _____	kg	1473.12
Varilla Longitudinal 4 Ø3/4" _____	kg	2128.90
Estribo : 20 Und de Ø3/8" en 72 Elem. Simil.	kg	1290.24

**C 40x70**

Varilla Longitudinal 4 Ø1/2" _____	kg	104.54
Varilla Longitudinal 4 Ø1" _____	kg	420.29
Estribo : 20 Und de Ø3/8" en 8 Elem. Simil.	kg	179.20

---

**ΣTotal      21,731.99 kg**

**21.73    Ton**

---

## XII. GLOSARIO

1. Capa intemperizada: Capa de suelo superficial de baja velocidad sísmica que se deposita sobre roca sólida, constituida por material rocoso suelto, muchas veces no consolidado o que habitualmente exhibe porosidad.
2. Elastómero: Materias artificiales o naturales que presentan alta elongación o elasticidad y amplia elasticidad frente a cargas antes de fracturarse o romperse. Suele tratarse de polímeros cuya composición que incluye no metales.
3. Estudios de viabilidad: Son estudios técnico-económicos que se desarrollan para evaluar la pertinencia de ejecutar un proyecto determinado.
4. Ingeniería de Valor: Método sistemático de evaluación dirigido al análisis de materiales, sistemas y procesos, así como al equipamiento del edificio con el propósito de alcanzar las funciones requeridas en el programa al menor costo total.
5. Interfaz de aislamiento: Límite imaginario entre la superestructura que está aislada y la cimentación que se mueve rígidamente con el suelo.
6. Licuefacción de suelo: Fenómeno que, como consecuencia de la saturación de agua en sedimentos como arena o grava, provoca que estos suelos pierdan su consistencia y fluyan a causa de los esfuerzos provocados por un sismo.
7. Lucro cesante: Consiste en la pérdida de la utilidad económica de un edificio como consecuencia del daño ocasionado por un terremoto y que no se habría producido si el movimiento telúrico no hubiera ocurrido.
8. Nuevos materiales: Son productos diseñados, desarrollados y construidos a medida de requerimientos específicos con nuevas tecnologías, para responder a nuevas necesidades o a alguna aplicación tecnológica.
9. Protección civil: Entidades, instalaciones y acciones orientadas a proteger la integridad física de la población y su patrimonio, ante los efectos de los fenómenos naturales o tecnológicos que generan desastres.
10. Riesgo sísmico: Se llama riesgo sísmico a una medida que combina el “peligro sísmico”, con la “vulnerabilidad” y la posibilidad de que se produzcan en ella daños por movimientos sísmicos en un período determinado.