Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Estructuras

MEJORA DEL DESEMPEÑO ESTRUCTURAL DE UN EDIFICIO FRÁGIL DE MARCOS DE CONCRETO REFORZADO CON MUROS DESACOPLADOS UTILIZANDO DISIPADORES DE ENERGÍA SLB (*SHEAR LINK BOZZO)*

Ing. Fredy Javier Sánchez Herrera
Asesorado por el Msc. Ing. Alberto José Echeverría Solís

Guatemala, mayo de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA

MEJORA DEL DESEMPEÑO ESTRUCTURAL DE UN EDIFICIO FRÁGIL DE MARCOS DE CONCRETO REFORZADO CON MUROS DESACOPLADOS UTILIZANDO DISIPADORES DE ENERGÍA SLB (*SHEAR LINK BOZZO)*

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. FREDY JAVIER SÁNCHEZ HERRERA
ASESORADO POR EL MSC. ING. ALBERTO JOSÉ ECHEVERRÍA SOLÍS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ESTRUCTURAS

GUATEMALA, MAYO DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA

NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Armando Fuentes Roca
EXAMINADOR	Mtro. Ing. José Humberto Rosal Paz
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Juan Adolfo Orozco Coloma
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

MEJORA DEL DESEMPEÑO ESTRUCTURAL DE UN EDIFICIO FRÁGIL DE MARCOS DE CONCRETO REFORZADO CON MUROS DESACOPLADOS UTILIZANDO DISIPADORES DE ENERGÍA SLB (*SHEAR LINK BOZZO)*

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, con fecha 16 de junio de 2021.

Ing. Fredy Javier Sánchez Herrera

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.496.2023

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **MEJORA DEL DESEMPEÑO ESTRUCTURAL DE UN EDIFICIO FRÁGIL DE MARCOS DE CONCRETO REFORZADO CON MUROS DESACOPLADOS UTILIZANDO DISIPADORES DE ENERGÍA SLB (*SHEAR LINK BOZZO*),** presentado por: **Ing. Fredy Javier Sánchez Herrera,** que pertenece al programa de Maestría en ciencias en Estructuras después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
DECANA
FACULTAD DE INGENIERÍA

Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana

Guatemala, mayo de 2023

AACE/gaoc

Guatemala, mayo de 2023

LNG.EEP.OI.496.2023

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

"MEJORA DEL DESEMPEÑO ESTRUCTURAL DE UN EDIFICIO FRÁGIL DE MARCOS DE CONCRETO REFORZADO CON MUROS DESACOPLADOS UTILIZANDO DISIPADORES DE ENERGÍA SLB (SHEAR LINK BOZZO)"

presentado por **Ing. Fredy Javier Sánchez Herrera** correspondiente al programa de **Maestría en ciencias en Estructuras** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
ESCUELA DE POSTGRADO

Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería

Guatemala, 7 de junio de 2022

MSc. Ing Edgar Álvarez Cotí
Director, Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Por este medio informo a usted, que se ha revisado y APROBADO la siguiente TESIS DE GRADUACIÓN del alumno:

Carné:	201114083
Alumno:	Fredy Javier Sánchez Herrera
Maestría:	Estructuras
Título de la Investigación:	MEJORA DEL DESEMPEÑO ESTRUCTURAL DE UN EDIFICIO FRÁGIL DE MARCOS DE CONCRETO REFORZADO CON MUROS DESACOPLADOS UTILIZANDO DISIPADORES DE ENERGÍA SLB (SHEAR LINK BOZZO)

En este sentido, extiendo el Visto Bueno correspondiente, para el cumplimiento de requisitos de la Escuela de Estudios de Postgrado, de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Sin otro particular

Vo. Bo. Msc. Ing. Armando Fuentes Roca
Coordinador Área Estructuras
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería

Escuela de Estudios de Postgrado, Edificio S-
Teléfono: 2418-9142 / 24188000 ext. 1382
WhatsApp: 5746-9323
Email: informacion_eep@ing.usac.edu.gt

Guatemala, 7 de junio de 2022

MSc. Ing Edgar Álvarez Cotí
Director, Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Por este medio informo a usted, que, como ASESOR, he revisado y aprobado el **INFORME FINAL DE TESIS** del alumno:

Carné:	2011-14083
Alumno:	Fredy Javier Sánchez Herrera
Maestría:	Estructuras
Título de la Investigación:	Mejora del desempeño estructural de un edificio frágil de marcos de concreto reforzado con muros desacoplados utilizando disipadores de energía SLB (*Shear Link Bozzo)*

En este sentido, extiendo el Visto Bueno correspondiente, para el cumplimiento de requisitos de la Escuela de Estudios de Postgrado, de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Sin otro particular,

Msc. Ing. Alberto José Echeverria Solís
Asesor

ALBERTO JOSÉ ECHEVERRIA SOLÍS
INGENIERO CIVIL
COLEGIADO 1553

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Porque sin él, nada de esto fuera posible.
Mi esposa	María Lucrecia Gómez Hernández, por su apoyo incondicional en todo momento y por creer en mí. Tú me inspiras a ser mejor cada día.
Mis padres	Alfredo Sánchez y Delia Herrera, por su guía y apoyo durante toda mi vida. Le agradezco a Dios por tener padres como ustedes.
Mis hermanos	Alfredo y Erick Sánchez, por su compañía y apoyo desde que éramos niños.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	En especial a la Escuela de Estudios de Postgrado de ingeniería, por permitir realizarme como profesional.
Mi familia	Mis abuelos, tíos, suegros, cuñadas y primos. Gracias a todos por su apoyo y cariño.
Ing. Alberto Echeverría	Por compartir su conocimiento y brindarme su apoyo en el desarrollo de este trabajo.
INCCO	Al Ingeniero Óscar Valdés, por su asesoría y apoyo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES VII
LISTA DE SÍMBOLOS XI
GLOSARIO XV
RESUMEN XIX
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA XXI
OBJETIVOS XXIII
HIPÓTESIS XXV
RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO XXVII
INTRODUCCIÓN XXIX

1. GENERALIDADES 1
1.1. Ingeniería estructural 1
1.1.1. Diseño estructural 1
1.1.2. Reforzamiento estructural 2
1.1.3. Desempeño estructural 3
1.1.4. Edificios dúctiles versus edificios frágiles 4
1.1.5. Evolución de ingeniería sismorresistente en Guatemala 5
1.2. Sistemas de protección sísmica 11
1.2.1. Disipadores de energía 13
1.2.1.1. Disipadores viscoelásticos 14
1.2.1.2. Disipadores histeréticos 15
1.2.2. Aisladores versus disipadores de energía 17

1.3. Disipadores de energía slb (Shear Link Bozzo) 21
1.3.1. Origen de los disipadores de energía tipo SLB 22
1.3.2. Características físicas y geométricas 27
1.3.3. Campos de aplicación 28
1.3.4. Ventajas de los disipadores SLB 30

2. EJEMPLO DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE EDIFICIO EXISTENTE DE CONCRETO REFORZADO 31
2.1. Características y geometría del edificio 31
2.1.1. Cargas y parámetros de diseño 34
2.1.1.1. Cargas muertas 34
2.1.1.2. Cargas vivas 35
2.1.1.3. Carga de sismo 37
2.1.2. Especificaciones de materiales 37
2.1.3. Modelado de la estructura 39
2.1.3.1. Definir secciones de concreto 40
2.1.3.2. Asignación de cargas 43
2.1.3.3. Revisión de irregularidades estructurales 46
2.2. Análisis sísmico y determinación de espectro de diseño 46
2.2.1. Aspectos sísmicos 47
2.2.1.1. Índice de sismicidad y nivel de protección 47
2.2.1.2. Tipo de fuente sísmica y clase de sitio 50
2.2.1.3. Espectros genéricos para diseño 51
2.2.1.3.1. Parámetros básicos 51

2.2.1.4. Ajuste por clase de sitio 52
2.2.1.5. Ajuste por intensidades sísmicas especiales 54
2.2.1.6. Probabilidad de ocurrencia del sismo de diseño 56
2.2.1.7. Espectro calibrado a nivel de diseño ... 56
2.2.1.8. Periodo de vibración de transición 57
2.2.1.9. Periodo fundamental de vibración 57
2.2.1.10. Espectros genéricos probables 59
2.2.1.11. Coeficiente sísmico al límite de cedencia Cs 60
2.2.1.12. Valores mínimos de coeficiente sísmico 62
2.2.2. Análisis modal espectral 64
2.2.2.1. Espectro de respuesta sísmica 65
2.2.2.2. Espectro de respuesta sísmica calibrado a nivel de diseño 66
2.2.2.3. Cortante basal 70
2.2.2.4. Calibración de análisis modal 72
2.2.2.5. Periodo fundamental analítico de la estructura 75
2.2.2.6. Derivas laterales tolerables 76

3. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE EDIFICIO EXISTENTE DE CONCRETO REFORZADO UTILIZANDO DISIPADORES SÍSMICOS SLB (SHEAR LINK BOZZO) 81
3.1. Criterio para la incorporación de disipadores SLB 81

3.2. Modelado e incorporación de disipadores SLB en edificio existente 84
3.2.1. Modelado de muros desacoplados 85
3.2.2. Modelado de disipadores sísmicos SLB 89

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y BENEFICIOS DEL USO DE DISIPADORES DE ENERGÍA SLB 105
4.1. Revisión de periodo fundamental de la estructura 105
4.2. Revisión de derivas de estructura 106
4.3. Consideraciones adicionales 108
4.3.1. Consideraciones adicionales para los disipadores SLB 108
4.3.1.1. Placa base y anclajes entre muro y disipador 109
4.3.1.1.1. Estimación de las fuerzas a tracción en los anclajes del disipador 109
4.3.1.1.2. Cálculo de espesor de placa base 111
4.3.1.2. Reforzamientos en muro desacoplado 112
4.3.1.2.1. Revisiones en solera de apoyo 112
4.3.1.2.2. Revisión de flexocompresión en muro desacoplado 118

4.3.1.2.3. Revisión de corte en muro desacoplado 119
4.3.2. Reforzamiento de sistema estructural existente ... 122
4.4. Análisis económico del uso de disipadores tipo SLB 123

5. ENSAYOS EXPERIMENTALES Y PROYECTOS CON DISIPADORES SLB 125
5.1. Proyectos con disipadores SLB 125
5.1.1. Edificio Industrial Nettalco-Perú 125
5.1.2. Edificio Urbania-México 126
5.1.3. Escuelas peruanas 128
5.1.4. Hotel Ceibo Dorado-Ecuador 129
5.2. Ensayos experimentales con disipadores tipo SLB 130
5.2.1. Ensayos en Universidad Federico II en Nápoles, 2016. *Set up* por Lolanda Nuzzo 130
5.2.2. Ensayo pórticos +SLB- UNAM -2017 132

CONCLUSIONES 133
RECOMENDACIONES 135
REFERENCIAS 137

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Disipador viscoelástico 15
2. Diferentes tipos de disipadores de energía histeréticos 17
3. Estructura con y sin disipadores 18
4. Estructura con y sin aislador sísmico 19
5. Sistema de aislación basal 19
6. Tipos de aisladores sísmicos 20
7. Disipadores SLB 22
8. Disipador sísmico SLB 24
9. Geometría disipadores SLB 28
10. Posición de los disipadores SLB 29
11. Disipadores SLB en muros desacoplados 30
12. Planta arquitectónica de edificio 32
13. Elevación arquitectónica de edificio 32
14. Ubicación de columnas y vigas en niveles 1,2, 3 y 4 33
15. Propiedades del concreto 4,000 psi 38
16. Secciones de elementos estructurales en ETABS 40
17. Propiedades de secciones de concreto en ETABS 41
18. Propiedades de losa de concreto en ETABS 42
19. Modelo estructural del edificio en ETABS 43
20. Patrones de carga en ETABS 44
21. Asignación de cargas muertas adicionales 44

22. Asignación de cargas vivas 45
23. Asignación de cargas distribuidas..... 45
24. Ingreso de coeficiente sísmico en ETABS 63
25. Ingreso de casos de carga sísmica estática en ETABS..... 64
26. Gráfica de espectro de respuesta sísmica sin calibrar..... 66
27. Gráfica de espectro de respuesta sísmica calibrado a nivel de diseño 67
28. Ingreso de espectros de respuesta en ETABS 68
29. Ingreso de caso de carga sísmica de diseño en ETABS 69
30. Corte basal en ETABS..... 71
31. Obtención de cortantes estáticos en ETABS 72
32. Casos de carga de diseño en ETABS..... 74
33. Periodos fundamentales analíticos en ETABS 76
34. Derivas del edificio existente-sismo en X..... 78
35. Derivas del edificio existente-sismo en y 78
36. Propuesta de ubicación de disipadores SLB 82
37. Muro desacoplado previo a la incorporación de disipadores 83
38. Disipador SLB en muro desacoplado..... 84
39. Material muro desacoplado en ETABS 85
40. Creación de muro desacoplado en ETABS 86
41. Modelado de muros desacoplados en ETABS 87
42. Información del muro modelado en ETABS..... 89
43. Propiedad inicial de disipador 91
44. Modelado de disipador SLB en ETABS 92
45. Configuración de conexiones de disipador en ETABS..... 93
46. Configuración de sección de brazo rígido en ETABS 94
47. Modelado de disipadores SLB en todo el edificio con ETABS..... 95

48. Visualización de fuerza cortante en disipadores 96
49. Diagrama de fuerza cortante de disipadores SLB 97
50. Asignación de propiedades no lineales a link (disipador SL) 99
51. Asignación de rigidez lateral del disipador 100
52. Asignación los parámetros de diseño del disipador. 101
53. Asignación de los disipadores de acuerdo con el prediseño en cada dirección respectivamente 102
54. Periodos fundamentales analíticos de edificio con disipadores SLB.. 105
55. Revisión de deriva de entrepiso máxima (eje x) =0.01289-cumple.... 107
56. Revisión de deriva de entrepiso máxima (eje y) = 0.01268-cumple... 107
57. Placa base y anclajes entre muro y disipador 110
58. Sección crítica a flexión en placa base de disipador 112
59. Detalle de anclaje de disipador y placa base 117
60. Detalles tipos de refuerzo de muros desacoplados de mampostería en Guatemala 121
61. Refuerzo de muro desacoplado existente 122
62. Edificio Industrial Nettalco-Perú 126
63. Edificio Urbania -México 128
64. Escuelas peruanas 129
65. Hotel Ceibo Dorado 130
66. Ensayos en Universidad Federico II en Nápoles 131
67. Ensayo pórticos +SLB -UNAM- 2017 132

TABLAS

I. Proyectos con disipadores SLB 25
II. Cargas vivas para edificaciones 36

III. Índice de sismicidad de edificio existente 48
IV. Nivel de protección sísmica y probabilidad de sismo de diseño 49
V. Tipo de fuente sísmica 50
VI. Coeficientes de sitio Fv 53
VII. Coeficientes de sitio Fa 53
VIII. Factor Na para periodos cortos de vibración 54
IX. Factor Nv para periodos cortos de vibración 55
X. Factores Kd de acuerdo con el nivel de sismo 56
XI. Coeficientes y factores para diseño de sistemas sismorresistentes 61
XII. Espectro de respuesta sísmica sin calibrar 65
XIII. Espectro de respuesta sísmica calibrado a nivel de diseño 66
XIV. Derivas máximas tolerables 77
XV. Parámetros para diseño de disipadores SLB 90
XVI. Selección de disipadores de energía SLB para edificio 98
XVII. Fuerzas a tracción en los anclajes de los disipadores 109
XVIII. Cálculo de espesor de placa base 111
XIX. Resistencia requerida para los anclajes 113
XX. Análisis de resistencia en tracción y al arrancamiento de los anclajes . 113
XXI. Diseño a flexocompresión de muro desacoplado 118
XXII. Diseño por cortante de muro desacoplado 119
XXIII. Precio estimado para el reforzamiento de la estructura utilizando disipadores tipo SLB 124

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Hp	Altura total del edificio
As	Área de acero
As_{max}	Área de acero máximo
As_{min}	Área de acero mínimo
A_{st}	Área de acero por temperatura
A_v	Área de varilla de acero
A_g	Área gruesa de una sección
CMS	Carga muerta adicional al peso de la estructura
CM	Carga muerta (peso propio de estructura)
CV	Carga viva
cm	Centímetro
Fv	Coeficiente de sitio para periodos de vibración cortos
Fa	Coeficiente de sitio para periodos de vibración largos
Na	Coeficiente por proximidad de las amenazas especiales para períodos de vibración corto
Nv	Coeficiente por proximidad de las amenazas especiales para períodos de vibración largos
C_s	Coeficiente sísmico
V_B	Corte basal
f'c	Esfuerzo a compresión del concreto
fy	Esfuerzo de cedencia del acero
e	Excentricidad

Kd	Factor de determinación de los niveles de diseño
R	Factor de reducción
Io	Índice de sismicidad
I	Inercia
Kg	Kilogramo
lb	Libra
psi	Libra sobre pulgada cuadrada
m	Metro
$\mathbf{m^2}$	Metro cuadrado
ml	Metro lineal
mm	Milímetro
E	Módulo de elasticidad el concreto
Scs	Ordenada espectral ajustada del sismo extremo en el sitio de interés para estructuras con periodo corto de vibración
S1s	Ordenada espectral ajustada del sismo extremo en el sitio de interés para estructuras con periodo de vibración de 1 segundo
S1r	Ordenada espectral de periodo 1 segundo del sismo extremo
Scr	Ordenada espectral de periodo corto del sismo extremo considerado en el basamento de roco en el sitio de interés
Tf	Periodo de vibración analítico calculado con el programa de análisis
Ts	Periodo expresado en segundos que separa los períodos cortos de los largos

Ta	Periodo fundamental de vibración
T_0	Periodo que define el inicio de la meseta de periodos cortos del espectro
γ_c	Peso específico del concreto
γ_s	Peso específico del suelo analizado
W_s	Peso total del edificio
Plg	Pulgada
K	Rigidez

GLOSARIO

Acero estructural	Se obtiene al combinar el hierro, carbono y pequeñas proporciones de otros elementos que le contribuyen un conjunto de propiedades determinadas.
ACI	Instituto Americano del Concreto (American Concrete Institute).
AGIES	Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica.
ASCE	Asociación Norteamericana de Ingenieros Civiles (American Society of Civil Engineers).
Asimétrico	Que no tiene posición, forma y tamaño, respecto de un plano.
ASTM	Asociación Americana para Ensayos y Materiales (American Society for Testing and Materials).
AutoCAD	Programa para dibujo arquitectónico y estructural.
Coguanor	Comisión Guatemalteca de Normas.

Concreto reforzado	Material compuesto de la unión del concreto simple y el acero de refuerzo.
Cuantía de acero	Cantidad de acero que se encuentra en una pieza de concreto.
Diafragma	Elementos horizontales que actúan distribuyendo las fuerzas laterales entre elementos verticales.
Ductilidad	Capacidad para deformarse sosteniblemente sin romperse.
Esfuerzo	Fuerza que se aplica en una determinada superficie.
FEMA	Agencia Federal para el Manejo de Emergencias de Estados Unidos (Federal Emergency Management Agency).
Inercia	Capacidad que tienen los cuerpos de modificar por sí mismos el estado de reposo o movimiento en que se encuentran.
Inflexión	Curvatura o desviación de un elemento bajo cierto estado de cargas.

Losa maciza	Elementos estructurales de concreto reforzado, de sección transversal rectangular llena y de poco espesor.
Mampostería	Sistema de construcción que consiste en levantar muros a base de bloques.
Momento	Propiedad de la fuerza aplicada para hacer girar un cuerpo.
Momento flector	Un momento de fuerza resultante de una distribución de tensiones sobre una sección transversal.
Monolítico	Que está hecho de una sola pieza, con un mismo material.
NGO	Norma Guatemalteca Obligatoria.
Redundancia	Es redundante cuando este tiene la mayor cantidad de pórticos adecuadamente dispuestas y que los elementos tengan la capacidad de disipar la energía más allá del rango de deformaciones elásticas
Rigidez	Capacidad de resistencia de un cuerpo a torcerse o doblarse por la acción de fuerzas exteriores.
Simétrico	Que tiene posición, forma y tamaño respecto un plano.

Sismorresistente	Que soporta la acción de fuerzas causadas por sismos frecuentes.
Zona sísmica	Una región en la que la tasa de actividad sísmica se mantiene bastante consistente. Puede significar que la actividad sísmica es increíblemente rara o que es muy común.

RESUMEN

El diseño sísmico de los edificios actuales de marcos de concreto está basado en la ductilidad y la redundancia estructural. Edificios antiguos con más de 25 años de vida útil tienen mucha probabilidad de tener deficiencias con estas características en su desempeño estructural. Estas se derivan por carecer de normas y nuevas tecnologías de diseño, debido a la época que fueron diseñadas y construidas.

Actualmente, existen nuevos métodos y mecanismos para mejorar el comportamiento estructural de las edificaciones, como los disipadores de energía SLB, que pueden brindar una solución práctica y económicamente accesible para estructuras existentes que necesiten una mejora estructural. Edificaciones con estos mecanismos pueden incrementar su vida útil, considerablemente, y podrán satisfacer los requisitos estructurales actuales.

El presente trabajo desarrolla un ejemplo práctico de la implementación de los disipadores de energía en un edificio de marcos de concreto, cuyo desempeño estructural requiere mejora en su ductilidad. El desarrollo práctico está desarrollado en un capítulo teórico que describe el funcionamiento, comportamiento y características de los mecanismos SLB, que ayudará a ingenieros y diseñadores estructurales empleen esta tecnología en las edificaciones existentes en Guatemala.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los edificios frágiles de marcos de concreto reforzado construidos cinco décadas atrás en la ciudad de Guatemala, no tienen la ductilidad solicitada en las normas vigentes de seguridad estructural, lo cual puede provocar su eventual colapso ante un sismo.

El diseño sísmico de los edificios de marcos de concreto actuales está basado en la ductilidad y la redundancia estructural. Edificios antiguos con más de 25 años de vida útil tienen mayor probabilidad de tener deficiencias con estas características de desempeño estructural; derivadas por la carencia de normas y nuevas tecnologías de diseño por la época en que fueron diseñadas las mismas.

El riesgo que corren las edificaciones con estas deficiencias es la presencia de una falla frágil al momento de presentarse un evento sísmico de gran magnitud, lo que podría producir daños graves en la estructura o la pérdida total de un inmueble. Otra problemática con estas edificaciones es la falta de interés social por la evaluación y reforzamiento de las estructuras existentes. El motivo principal, generalmente, se debe al costo elevado de estos trabajos.

Los disipadores SLB fueron creados en Perú y han sido una solución estructural económicamente rentable para corregir este déficit en el desempeño estructural de edificaciones existentes, así como la reducción de costos en edificaciones nuevas.

Principales causas del problema

- Inexistencia de análisis estructural con *software* que realizan cálculos más aproximados.
- Edificios diseñados antes de la evolución de las normas sismorresistentes.
- Inexistencia de normas estructurales enfocadas, específicamente a las características sísmicas de la república de Guatemala.
- Actualizaciones en las consideraciones sísmicas.
- Probabilidad de excedencia de sismo de diseño.
- Costos muy elevados de trabajos de reforzamiento de estructuras.

La interrogante central que surge debido a esta problemática se plantea a continuación:

- ¿En qué medida mejora el desempeño estructural los disipadores SLB a una estructura existente?

Adicional a esta surgen preguntas secundarias:

- La implementación de estos disipadores ¿garantizará la seguridad estructural de una edificación?
- ¿Qué trabajos y métodos adicionales habría que implementar para garantizar la seguridad estructural de una edificación?
- ¿Pueden los disipadores SLB ser una solución factible para la mejora del desempeño estructural de una estructura existente?

OBJETIVOS

General

Proponer una mejora en el desempeño estructural de un edificio de concreto reforzado con muros desacoplados, utilizando disipadores de energía SLB como método de reforzamiento.

Específicos

1. Describir las generalidades más importantes y la metodología de diseño de los disipadores SLB (Shear Link Bozzo).

2. Evaluar el desempeño estructural de una edificación frágil utilizando la normativa actual.

3. Evaluar el desempeño estructural de una edificación frágil utilizando los disipadores SLB.

4. Demostrar las ventajas del uso de los disipadores SLB.

5. Introducir una nueva tecnología de reforzamiento para edificios existentes de marcos rígidos de concreto reforzado.

HIPÓTESIS

La incorporación de disipadores sísmicos SLB reducirán las derivas de una estructura de marcos de concreto reforzado tipo E1 en un 50 % y adicionando técnicas adicionales de reforzamiento como fibras de carbono, estructuras metálicas adicionales, entre otros, podrá ser viable para edificaciones existentes.

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

El desarrollo del presente trabajo fue de tipo cuantitativo, ya que se miden las diferencias de los esfuerzos en la estructura del edificio existente, al evaluarlo sin dispositivos y agregarle posteriormente los disipadores de energía.

Variable independiente-cuantitativa: capacidad de aislamiento sísmico. Variable dependiente-cualitativa: reducción del daño sísmico.

El procedimiento para la determinación de los distintos datos utilizados, para concluir, es el siguiente:

Se planteó una revisión bibliográfica en donde hubo recopilación de toda la información disponible sobre los disipadores sísmicos SLB y se realizó un análisis de la teoría y la práctica del uso de estos dispositivos para emplearla en el trabajo de investigación; luego se desarrolló el análisis estructural de un edificio frágil en donde se hizo un análisis sísmico y estructural de una edificación con características frágiles basado en normativas antiguas. Se determinaron las deficiencias en cuanto a su ductilidad, tomando como base los requerimientos de las normativas actuales. En esta etapa se demuestra la existencia del problema.

En la siguiente etapa, se realizó el análisis estructural del edificio implementando los disipadores de energía SLB.

En esta se demostró la viabilidad del uso de estos dispositivos y luego realizar una comparación de resultados en donde se hizo un análisis profundo de los datos obtenidos tanto en el análisis sin disipadores como en el análisis utilizando estos dispositivos. Para ello se demuestra con base en normativas, que los resultados obtenidos en la implementación de los disipadores cumplen con los requerimientos actuales y que mejorarán el desempeño del edificio ante un evento sísmico.

Por último, se documentan ejemplos de la implementación de estos dispositivos en otros países para ejemplificar varios ensayos experimentales y casos de edificios reforzados con los disipadores SLB; con el objetivo de demostrar con base en datos y experimentación, la viabilidad de estos dispositivos.

INTRODUCCIÓN

El diseño de edificaciones sismorresistentes ha evolucionado a lo largo de los años, nuevos sistemas han sido desarrollados gracias al avance de la tecnología, y otros se han desarrollado con base en el estudio de fallas estructurales, causadas por eventos sísmicos recientes. Los disipadores de energía son considerados una de las tendencias modernas para el diseño sismorresistente, ofreciendo una solución económica y eficiente para la mejora del desempeño estructural de una edificación existente o nueva.

Esta investigación desarrolló el contenido necesario para que los diseñadores estructurales y profesionales de la ingeniería actualicen conocimientos y empleen los mecanismos de disipación de energía para mejorar el desempeño estructural de una edificación.

Los disipadores de energía SLB (Shear Link Bozzo) son mecanismos que consisten en una placa de acero de alta ductilidad, que instalados en puntos estratégicos proporcionan una reducción significativa en las fuerzas inducidas por un sismo.

En el capítulo uno se desarrollan los conceptos teóricos para el conocimiento detallado de los disipadores SLB, junto con los principios de diseño utilizados para la implementación de estos mecanismos.

En el segundo capítulo se desarrolla el análisis del desempeño estructural de un edificio frágil de marcos de concreto, sin la presencia de los disipadores de energía, en donde se pretende determinar la falta de ductilidad con base en las especificaciones de las normas sísmicas vigentes en la república de Guatemala.

El capítulo tercero muestra las ventajas y beneficios del uso de los disipadores SLB, empleando estos mecanismos para mejorar el desempeño estructural del edificio en mención.

Seguido de este análisis, se describe un cuarto capítulo con el análisis de los resultados obtenidos en el caso práctico desarrollado en donde se presentan conclusiones y recomendaciones para el uso de los disipadores SLB.

Por último, se presentan ejemplos de ensayos experimentales y proyectos desarrollados utilizando este tipo de disipadores de energía; demostrando su factibilidad como solución sismorresistente para estructuras existentes y nuevas.

1. GENERALIDADES

1.1. Ingeniería estructural

“Permite el planteamiento y el diseño de las partes que conforma el esqueleto resistente de las edificaciones, basados en un análisis y criterio especializado en la especialidad de ingeniería civil, cuya finalidad es conseguir estructuras seguras, resistentes y funcionales” (Sánchez F., 2016, pág. 1).

“El esqueleto estructural lo forma un sistema integrado de elementos que son destinados a soportar su propio peso y ciertos factores externos sin perder su funcionalidad estructural dentro de la edificación” (Sánchez F., 2016, pág. 1).

“En cada estructura existen elementos básicos que se adaptan a las necesidades para las que la edificación fue diseñada y varían dependiendo de la función y el sistema utilizado” (Sánchez F., 2016, pág. 1).

1.1.1. Diseño estructural

Bozzo, L. (2021) describe:

El diseño sísmico convencional de edificios está basado en la ductilidad y la redundancia estructural. Esta respuesta no lineal hace que la superposición modal del análisis dinámico no sea aplicable, pero aun así proporciona soluciones aproximadas a muchas situaciones prácticas. Sin

> embargo, este enfoque tiene varios inconvenientes como el que la demanda de ductilidad global puede requerir una ductilidad local grande y por consiguientes pueden ocurrir fallos locales. (pág. 4)

El desarrollo del diseño estructural es progresivo, Bozzo, L. y Hurtado, F. (2021) comentan:

> En las últimas décadas gran parte de la investigación realizada sobre el comportamiento estructural de edificaciones en zonas sísmicas, se ha enfocado al desarrollo de sistemas de control sísmico, tanto para el diseño de nuevas construcciones como para la rehabilitación de edificaciones dañadas por estos fenómenos. Todo ello, como una alternativa al diseño sísmico convencional, basado en los conceptos de ductilidad y redundancia estructural, que permite una reducción significativa de las fuerzas inducidas por un terremoto severo. Sin embargo, con la reducción de estas fuerzas, se está aceptando que la estructura puede sufrir daños de cierta magnitud cuando se presenta un sismo intenso, ya que la estructura puede trabajar en un rango no lineal. (pág. 1)

1.1.2. Reforzamiento estructural

El objetivo primordial de la ingeniería estructural y de una revisión a la estructura es minimizar el riesgo de una edificación ante una amenaza sísmica y proteger a las personas que habitan en ella.

> Enfoques recientes como el de la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias de Estados Unidos (FEMA) y la Asociación Norteamericana

de Ingenieros Civiles (ASCE) proponen la definición de objetivos múltiples considerando diferentes niveles de desempeño para diferentes escenarios sísmicos. Estos objetivos determinarán en gran medida el costo y la viabilidad del proyecto de rehabilitación, así como los beneficios que se obtendrían al reducir los daños de la propiedad y el nivel de interrupción de la edificación ante futuros terremotos. (Morales L. y Contreras J., 2012, pág. 3)

Una de las propuestas más difundidas corresponde al FEMA, el cual considera un objetivo de rehabilitación que puede ser básico, mejorado o limitado. Para definirlo, establece niveles que de desempeño de menor a mayor daño pueden ser: operativo, ocupación inmediata, resguardo de vida o prevención del colapso, para sismos de diseño con eventos asociados a periodos de retorno de 72, 225, 474 y 2475 años. (Morales L. y Contreras J., 2012, pág. 3)

1.1.3. Desempeño estructural

El propósito del desempeño es “encontrar una condición límite de daño que se considera satisfactorio para una edificación sujeta a determinado diseño sísmico” (AGIES, 2021, pág. 84).

“Las condiciones límite se determinan por el daño físico en la edificación, la seguridad de vida de los ocupantes y la serviciabilidad de la edificación posterior a un sismo” (Bozzo L, Gaxiola G. y Gonzales H., 2021).

1.1.4. Edificios dúctiles versus edificios frágiles

Como lo menciona el doctor Monzón: “Un objeto dúctil no se quiebra, sino que da de sí, aunque se dañe. De hecho, precisamente en el proceso de dañarse y distorsionarse su estructura interna absorbe la energía del impacto permitiéndole conservar su integridad” (Monzón, H, 2021, pág. 1).

“Las cosas frágiles no tienen esa cualidad. Al recibir cargas y sobrecargas lo frágil se mantiene íntegro e indemne hasta un cierto punto de rotura. Justo antes no habrá pasado nada. Justo después, habrá súbita desintegración” (Monzón, H, 2021, pág. 1). Esto también pasará con edificios sin ductilidad cuando el sismo sobrepase los parámetros considerados.

“El concepto de ductilidad y fragilidad aplica a edificaciones en general. Aplica particularmente a edificios de varios pisos” (Monzón, H, 2021, pág. 1).

“La sismoresistencia de los últimos 40 años se ha apoyado cada día más en la ductilidad para lograr edificios que resistan y sobrevivan eficazmente sismos de gran intensidad. La manera de hacerlo ha sido introduciendo detallado especial en las edificaciones” (Monzón, H, 2021, pág. 1).

“Lograr edificios con ductilidad es la meta de la ingeniería sismorresistente hoy en día” (Monzón, H, 2021, pág. 1).

“Cuando se generalice la sismorresistencia del siglo XXI habrá edificaciones construidas sobre aisladores sísmicos o bien edificaciones con

amortiguadores y la ductilidad será un recurso de respaldo y no el recurso principal de protección” (Monzón, H, 2021, pág. 1).

En Guatemala existen muchos edificios considerados como frágiles. El doctor Héctor Monzón describe en su artículo:

> Edificios de varios pisos que son frágiles por la técnica de refuerzo que se utilizó y que podrían ser peligrosos en caso de sismos muy intensos. De sobrepasar su punto de rotura durante uno de esos sismos, podrían colapsar total o parcialmente de manera súbita, atrapando a sus ocupantes. En general, estos edificios fueron diseñados y construidos hace cinco o seis décadas con tecnología que ahora es obsoleta y cuyo grado de amenaza sísmica debe ser evaluado, ya que no todos encierran el mismo riesgo. (Monzón, H, 2021, pág. 1)

1.1.5. Evolución de ingeniería sismorresistente en Guatemala

Guatemala es un país en constante evolución, en cuanto a análisis sísmico se refiere, y cada día se diseñan y construyen más edificios con estructuras sismorresistentes adecuadas para la zona. Sin embargo, muchos aún son vulnerables ante un evento de gran magnitud y hay que tomar en cuenta lo siguiente:

> La tecnología del refuerzo del concreto tuvo un salto para bien en los años 1970. Edificios posteriores de varias plantas bien diseñados son edificios dúctiles y tienen una probabilidad de colapso casi nula. Pero la mayoría

de los anteriores a 1970 son edificios frágiles y tienen una probabilidad de colapso significativa en sismos intensos.

> En Guatemala la ocurrencia de colapsos de este tipo de edificios durante el terremoto de 1976 fue baja (el Liceo Javier y el Hotel Terminal, los casos más notorios). Aunque algunos edificios tuvieron que ser demolidos parcialmente (Edificio Cruz Azul) y otros fueron casi milagrosamente rescatados, son muchos los que tuvieron extensas reparaciones que hoy se han olvidado. (Monzón, H, 2021, pág. 4)

“La generación de edificios de los años 1950 y 1960 sigue en uso, sin refuerzos ni readecuaciones que mejoren su próximo desempeño sísmico. De hecho, han adquirido un aura de virtual invulnerabilidad sísmica” (Monzón, H, 2021, pág. 4).

Se sabe que lo descrito anteriormente no es totalmente cierto, “sismos intensos originados en fallas geológicas superficiales muy próximas hicieron colapsar numerosos edificios de esa misma generación constructiva en San Salvador (1986) y ya había ocurrido en Managua (1972)” (Monzón, H, 2021, pág. 4).

Como lo describe el doctor Héctor Monzón: “el valle de Guatemala contiene varias fallas geológicas locales de este tipo y tampoco olvidemos que cada gran sismo deteriora en alguna medida las estructuras. Así que en un próximo sismo podemos no ser tan afortunados como en 1976” (Monzón, H, 2021, pág. 4).

“La sismoresistencia de los últimos 40 años se ha apoyado más y más en la ductilidad para lograr edificios que resistan y sobrevivan eficazmente sismos de gran intensidad. La manera de hacerlo ha sido introduciendo detallado especial en las edificaciones” (Monzón, H, 2021, pág. 1).

Por otro lado, viendo hacia el futuro, el doctor Monzón comenta: “Cuando se generalice la sismoresistencia del siglo XXI habrá edificaciones construidas sobre aisladores sísmicos o bien edificaciones con amortiguadores y la ductilidad será un recurso de respaldo y no el recurso principal de protección” (Monzón, H, 2021, pág. 1).

Los nuevos edificios corren menos riesgo, gracias al avance de la ingeniería sísmica en la nación y a la incorporación de las Normas de Seguridad Estructural (AGIES), que hoy son de carácter obligatorio.

Las normas AGIES se han convertido en documentos sumamente importantes para la regulación del diseño estructural en Guatemala. “Desde 1986 hasta 2018, AGIES ha desarrollado y mejorado versiones anteriores, con el fin de generar códigos representativos y aplicables a la realidad guatemalteca” (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica, 2021, pág. 1).

“Estos avances y progresos han sido el resultado de una necesidad creciente de parte de la industria de la Ingeniería Civil de entregar proyectos seguros y económicos” (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica, 2021, pág. 1).

“Esta demanda se presentó por primera vez, después del terremoto de 1976, cuando la fragilidad y deficiencia de las edificaciones se demostraron tras su desempeño inadecuado. Esto dio origen al primer proyecto de normas, las cuales se planificaron en 1986” (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica, 2021, pág. 1).

A partir de este suceso, las normas se fueron desarrollando de manera progresiva. Las actualizaciones más importantes son las siguientes:

“La segunda edición se trabajó en el 2001, fueron publicadas entre 2001 y 2002. El siguiente avance se realizó en el 2010, cuando se publicaron las Normas de Seguridad Estructural, dejando atrás el nombre de Normas Recomendadas” (Asociacion Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica, 2021, párr. 2).

“Fueron adoptadas, asimismo, por la Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres (CONRED), mediante el Acuerdo número 05-2001, permitiéndoles formar parte de la Norma para la Reducción de Desastres, NRD-1” (Asociacion Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica, 2021, párr. 3).

“Formalizando así la existencia de los códigos, haciendo uso de ellos de forma obligatoria” (Asociacion Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica, 2021, párr. 3).

Buscando aún la mejora de las publicaciones, se procedió a trabajar en la actualización para obtener las Normas de Seguridad Estructural 2018, llevando a cabo la revisión y modificación a través de Comités de Actualización de Norma, habiéndose constituido un comité por cada norma

a actualizar. (Asociacion Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica, 2021, párr. 4)

“Cada comité fue integrado por profesionales miembros de AGIES con experiencia en la materia, evaluaron y decidieron los cambios por medio de consenso o respaldados por evidencia científica y académica de origen nacional e internacional” (Asociacion Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica, 2021, párr. 4).

“El resultado fueron 14 normas, algunas fueran actualizadas y otras creadas” (Asociacion Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica, 2021, párr. 4).

Gracias a este avance, la conciencia acerca del riesgo ante un evento sísmica ha mejorado, muchas áreas de la ingeniería en el país tienen un mejor rubro, especialmente en las edificaciones muy altas y pequeñas construidas en serie.

Dicho lo anterior, se hace una recopilación de los puntos mencionados y que aún existe la necesidad de corregir y mejorar.

“En 2010 después de los terremotos de Haití y Chile, la Coordinadora para la Reducción de Desastres CONRED emitió su Acuerdo 03-2010 reiterado por medio de su Acuerdo 05-2011” (Monzón, H, 2021, págs. 5-6).

“Ambos acuerdos contienen los elementos esenciales para romper esos círculos viciosos en los que no ha habido previsiones concretas para reducir

desastres porque nadie exige normativas y nadie las exige porque no hay conciencia exacta que debería haber normativas específicas” (Monzón, H, 2021, págs. 5-6).

> Los acuerdos mencionados avalan normativas de construcción que han estado disponibles en una u otra forma en el medio. Por ejemplo, la Norma CONRED NRD-1 avala las normas recomendadas de diseño y construcción de AGIES, que desde su edición 2010 se han denominado Normas de Seguridad Estructural AGIES-NSE-2010. Estas a su vez recogen normativas internacionales que se han utilizado espontáneamente en el medio profesional por largo tiempo. (Monzón, H, 2021, págs. 5-6)

“Ya está disponible la Norma NRD-2 sobre salidas de emergencia y rutas de evacuación. Recientemente se creó la Norma CONRED NRD-3 que avala las Normas Técnicas Guatemaltecas COGUANOR promovidas por el Instituto del Cemento y el Concreto de Guatemala” (Monzón, H, 2021, págs. 5-6).

> En 2012, la Municipalidad de Guatemala tomó la determinación de requerir la aplicación de las normas de CONRED para otorgar licencias de construcción; esto fue un paso importante para allanar el camino hacia la adopción obligatoria de normas uniformes en la construcción privada. Claro, los profesionales responsables siempre han recurrido a alguna normativa, generalmente estadounidense, para basar la planificación de obras; la diferencia importante es que haya una referencia uniforme que el usuario pueda exigir y a la que el profesional pueda acogerse. (Monzón, H, 2021, págs. 5-6)

Según la Norma NRD-1 de CONRED incluye un aspecto muy importante: una calendarización para revisar estructuralmente la edificación pública existente. Sin embargo, la calendarización está por vencer y nadie ha tomado acción alguna" (Monzón, H, 2021, págs. 5-6).

"Problema aparte es que en realidad no hay recursos económicos, ni hay tampoco suficientes profesionales verdaderamente capacitados para llevarlas a cabo en el corto plazo" (Monzón, H, 2021, págs. 5-6).

"De más está repetir que en el sector privado es relativamente poco lo que se ha hecho para investigar los riesgos de la edificación más antigua. Igualmente, el recurso profesional capacitado es sumamente limitado en el país" (Monzón, H, 2021, págs. 5-6).

Como lo menciona (Monzón, H, 2021, pág. 6): "Falta ahora que más municipalidades del país se decidan a acordar normativas, sean éstas las de CONRED (que sería lo más práctico) u otras".

Generado de esta necesidad, universidades y profesionales de la ingeniería estructural han desarrollado métodos de reforzamiento como los disipadores de energía SLB, cuyo aporte en un edificio es bastante amplio en comparación con su complejidad y costo.

1.2. Sistemas de protección sísmica

"En términos generales los dispositivos de protección sísmica se clasifican según su funcionamiento como: de control activo y de control pasivo;

pudiendo existir sistemas que combinan ambos casos (sistemas híbridos y semi activos)” (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 2021, párr. 3).

“Los mecanismos de control activo son los que se ajustan a la excitación provocada durante un sismo y que se retroalimentan con la respuesta que presenta la estructura” (Condori, Pilar, 2021, pág. 5).

“Estos mecanismos de control activo recurren a un equipo analógico o digital de control, por lo que sus costos de instalación y mantenimiento resultan ser elevados; ya que debe garantizarse el funcionamiento correcto de los sistemas” (Condori, Pilar, 2021, pág. 5).

“Entre los dispositivos de control activo destacan los de masa activa y los tendones activos” (Condori, Pilar, 2021, pág. 5).

“Los dispositivos de control pasivo responden al movimiento de la estructura de forma prevista por el diseñador” (Condori, Pilar, 2021, pág. 5).

“Su funcionamiento depende exclusivamente de las propiedades mecánicas del elemento, ya sea por las propiedades del material utilizado o el funcionamiento conjunto de las partes que conforman el dispositivo” (Condori, Pilar, 2021, pág. 5).

“Los sistemas de control pasivo son los más conocidos e incluyen los sistemas de aislamiento sísmico, osciladores resonantes y los dispositivos mecánicos de disipación de energía” (Condori, Pilar, 2021, pág. 5).

“Los disipadores de energía son dispositivos diseñados para absorber la mayoría de la energía sísmica, evitando así que esta sea disipada mediante deformaciones inelásticas (daño) en los elementos estructurales” (Condori, Pilar, 2021, pág. 5).

“Pueden ser clasificados de acuerdo a sus comportamientos como histeréticos o viscos elásticos. Ambos tipos de disipadores de energía suelen colocarse en arreglos de diagonales a lo alto de los entrepisos de los edificios” (Condori, Pilar, 2021, pág. 5).

1.2.1. Disipadores de energía

El uso de estos dispositivos es una de las maneras que se utilizan actualmente para reforzar estructuras.

Estos mejoran el desempeño de la estructura mediante la adición de amortiguamiento y en algunos casos por la rigidez al sistema, que provoca una reducción en las demandas de desplazamiento y en las fuerzas internas de respuesta del edificio” (Condori, Pilar, 2021, pág. 4).

“Estos dispositivos son una opción competitiva cuando se trata de mejorar el desempeño de la estructura en niveles de protección de vida e incluso de ocupación inmediata, pero su aplicación puede ser limitada para el caso de la prevención del colapso” (Condori, Pilar, 2021, pág. 4).

“Cuando un sismo de considerable magnitud excita una estructura, el grado de daño que adquiere dependerá de la manera que ésta absorba los

niveles de energía cinética a los cuales estuvo sometida” (Condori, Pilar, 2021, pág. 4).

“Como los códigos de diseño actuales lo reconocen, sería demasiado costoso absorber esta energía dentro de la capacidad elástica de los materiales. La mayoría de los reglamentos recomiendan aprovechar la ductilidad que son capaces de desarrollar las estructuras” (Condori, Pilar, 2021, pág. 4).

“Los edificios diseñados de esta manera dependen para su supervivencia durante un sismo severo, de la ductilidad que puedan desarrollar los elementos estructurales que lo conforman” (Condori, Pilar, 2021, pág. 4).

“La razón fundamental que lo motiva es que, al entrar la estructura al intervalo de comportamiento inelástico, la respuesta se reduce, ya que existe disipación de energía” (Condori, Pilar, 2021, pág. 4).

1.2.1.1. Disipadores viscoelásticos

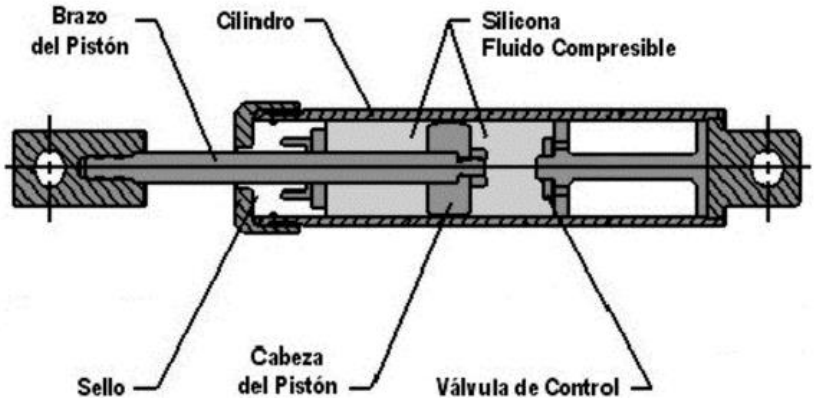
“Los disipadores viscoelásticos incluyen los sistemas de sólidos viscoelásticos, fluidos viscoelásticos y los disipadores fluido-viscosos” (Condori, Pilar, 2021, pág. 6).

> Los viscoelásticos dependen de la velocidad del movimiento en el sistema estructural. Los disipadores sólidos están constituidos por una capa de material viscoelástico ubicada entre dos placas de acero, usualmente acopladas a los arriostres que conectan los extremos de los entrepisos. Los dispositivos viscoelásticos líquidos disipan la energía por medio de las

deformaciones inducidas por un pistón en una sustancia altamente viscosa.

Los disipadores fluido-viscosos son dispositivos que disipan energía forzando el flujo de un fluido a través de un orificio. Estos dispositivos son similares a los amortiguadores de un automóvil; sin embargo, operan con un mayor nivel de fuerzas y son fabricados con materiales más durables para lograr un mayor tiempo de vida útil. (Condori, Pilar, 2021, pág. 6)

Figura 1. **Disipador viscoelástico**



Fuente: Condori, P. 2021. *Sistemas de proteccion sísmica*. Consultado el 28 de junio de 2021. Recuperado de https://es.scribd.com/document/266938168/proteccion-sismica.

1.2.1.2. Disipadores histeréticos

"Es un sistema que disipa la energía producida por algún movimiento sísmico en pequeñas deformaciones, además no requiere mantención salvo en

ambientes agresivos, también tiene una durabilidad alta y el montaje es sencillo con soldadura y apernado” (Ovalle J. y Reyes M., 2021, pág. 7).

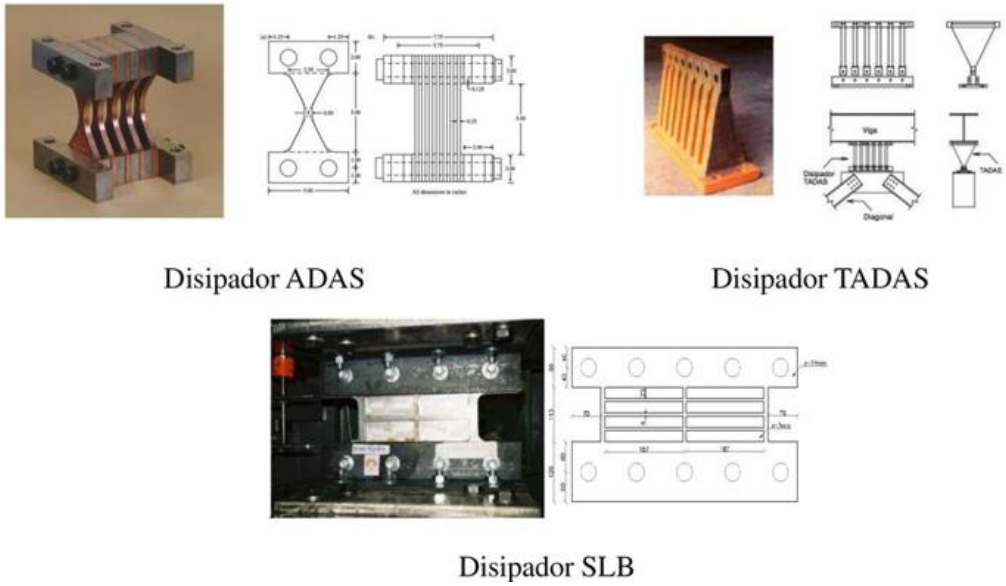
“Los disipadores histéricos dependen esencialmente de los desplazamientos de la estructura. Los disipadores metálicos están basados en la fluencia de los metales debido a flexión, corte, torsión o extrusión” (Condori, Pilar, 2021, pág. 6).

“Uno de los dispositivos histéricos más reconocidos es el ADAS (Added Damping And Stiffness), compuesto por placas de acero con sección transversal en forma de X instaladas en paralelo sobre los arriostres” (Condori, Pilar, 2021, pág. 6).

“El diseño de los elementos ADAS requiere que sus placas queden comprimidas entre sí con fuerzas lo suficientemente elevadas como para lograr empotrarlas en sus extremos sin que ocurran desplazamientos relativos entre ellos” (Condori, Pilar, 2021, pág. 6).

“Por su parte, los dispositivos TADAS (Triangular Added Damping And Stiffness), cada placa se conecta a un perno que permite que esta gire libremente, disipan energía por fluencia del material y se deforman en curvatura simple” (Condori, Pilar, 2021, pág. 6).

Figura 2. **Diferentes tipos de disipadores de energía histeréticos**



Fuente: Condori, P. (2021). *Sistemas de proteccion sísmica*. Consultado el 28 de junio de 2021. Recuperado de https://es.scribd.com/document/266938168/proteccion-sismica.

1.2.2. Aisladores versus disipadores de energía

"Los disipadores de energía son dispositivos de protección sísmica desarrollados para mejorar el comportamiento de los edificios ante un movimiento telúrico y reduce las deformaciones y fuerzas que el sismo traslade a la estructura mediante el aumento de la capacidad de amortiguamiento de la misma" (Ovalle J. y Reyes M., 2021, pág. 6).

"Los mecanismos de disipación de energía para absorber la mayoría de la energía sísmica, evitando así que esta sea disipada mediante deformaciones inelásticas en los elementos estructurales" (Condori, Pilar, 2021).

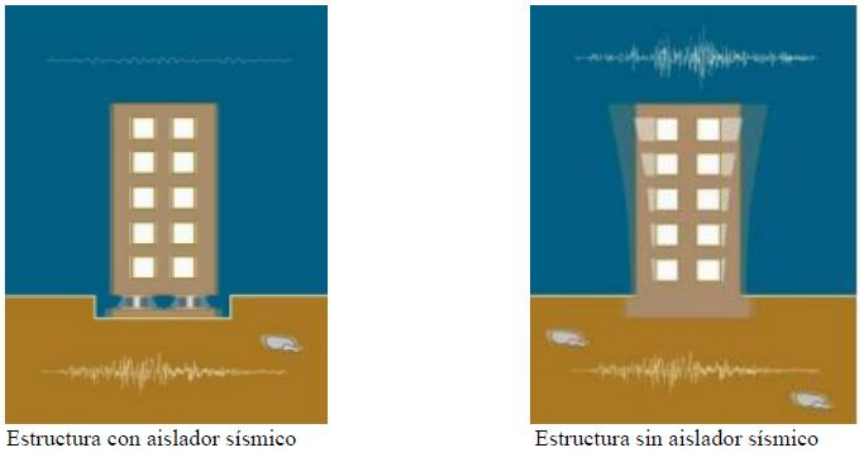
Figura 3. **Estructura con y sin disipadores**

Fuente: Ovalle, J. y Reyes M. (2021). *Sistemas de protección sísmica*. Consultado el 29 de junio de 2021. Recuperado de https://es.scribd.com/document/279886951/Sistemas-de-proteccion-sismica-en-Chile.

Por otro lado, los aisladores sísmicos pueden definirse como dispositivos de protección sísmica que “se instalan en las fundaciones y absorbe la deformación frente a un sismo, protegiendo a la estructura del esfuerzo sísmico” (Ovalle J. y Reyes M., 2021, pág. 3).

“El funcionamiento de los aisladores se basa en la premisa de que es posible separar una estructura de los movimientos del suelo mediante la introducción de elementos flexibles entre la estructura y su fundación” (Condori, Pilar, 2021, pág. 10).

Figura 4. **Estructura con y sin aislador sísmico**

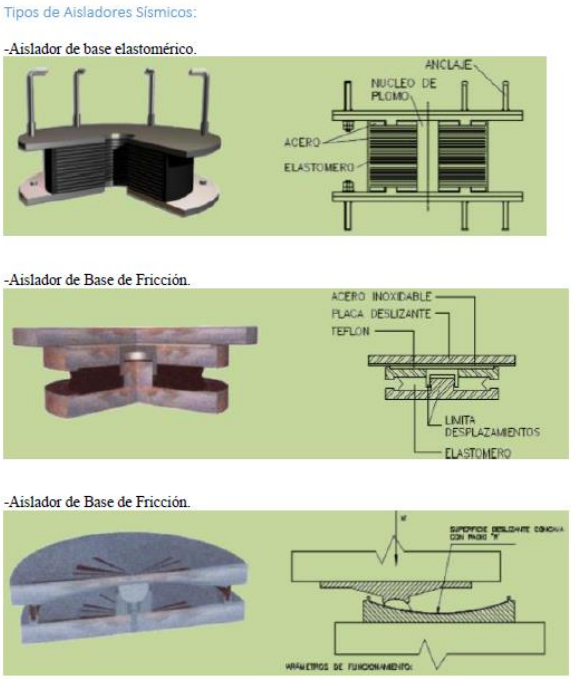


Fuente: Ovalle, J. y Reyes, M. (2021). *Sistemas de protección sísmica*. Consultado el 29 de junio de 2021. Recuperado de https://es.scribd.com/document/279886951/Sistemas-de-proteccion-sismica-en-Chile.

Figura 5. **Sistema de aislación basal**

Fuente: Marco, H. (2018). *Desempeño sísmico en edificaciones con aisladores elastomericos y amortiguadores de flujo viscoso*. Consultado el 29 de junio de 2021. Recuperado de https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/3246.

Figura 6. **Tipos de aisladores sísmicos**



Fuente: Ovalle, J. y Reyes M. (2021). *Sistemas de protección sísmica*. Consultado el 29 de junio de 2021. Recuperado de https://es.scribd.com/document/279886951/Sistemas-de-proteccion-sismica-en-Chile.

"Los amortiguadores no cambian el periodo fundamental de las estructuras y su efecto es proporcional a la velocidad, por lo que su efectividad práctica es limitada" (Bozzo L, 2021, pág. 9).

"Los disipadores pueden cambiar drásticamente el periodo estructural y los disipadores SLB empiezan a proteger las estructuras desde desplazamientos tan bajos como solo 1mm" (Bozzo L, 2021, pág. 9).

1.3. Disipadores de energía slb (Shear Link Bozzo)

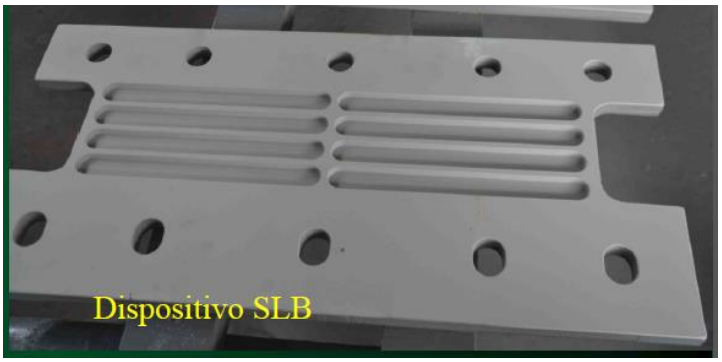
“El disipador SLB para diseño sísmico, se basa en el aumento localizado de la ductilidad del edificio, permitiendo una reducción significativa en las fuerzas inducidas por un sismo de alta intensidad” (Bozzo L, 2021, pág. 4).

“Es el único sistema de disipación con un doble modo de disipación de energía que permite mayor seguridad y capacidad” (Bozzo L, 2021, pág. 4).

El doctor Luis Bozzo, creador de estas conexiones, también las explica de esta manera:

> La ductilidad de las conexiones SLB, las cuales funcionan como rótulas plásticas, permiten el ideal sismo resistente, es decir, un sistema con el nivel de fuerzas del sistema flexible, pero con el nivel de desplazamientos del sistema rígido, concentrando las demandas de ductilidad en conexiones fabricadas industrialmente y con propiedades mecánicas definidas. (Bozzo L, Gaxiola G., 2021, pág. 1).

Figura 7. **Disipadores SLB**



Fuente: Bozzo, L. (2021). *Dossier-disipadores SLB para diseño sismo resistente*. Consultado el 29 de junio de 2021. Recuperado de https://es.scribd.com/document/373670566/1-Proyectos-Con-Disipadores-Casos-de-Estudio-Ing-Luis-Bozzo.

1.3.1. Origen de los disipadores de energía tipo SLB

"Los disipadores de energía son dispositivos diseñados para absorber la mayor cantidad posible de energía sísmica, evitando así que esta sea disipada mediante deformaciones inelásticas en los elementos estructurales" (Enciso Navarro, F., 2019, pág. 33).

Bozzo, L., Gaxiola, G. (2021) describen el "inicio de las conexiones SLB en el año de 1989, en una conversación personal con el distinguido profesor Popov en la U.C. Berkeley, quien manifestó, en referencia al popular sistema estructural de los pórticos excéntricos metálicos" (pág. 1).

> El acero era un excelente disipador de energía por fuerza cortante. Dado que normalmente se asocia en concreto armado el fallo a cortante como un fallo frágil, la observación o comentario referente al acero llamó la atención del Dr. Luis Bozzo. Por otra parte, esta observación se refiere a

> la capacidad disipativa por corte de los brazos excéntricos metálicos por lo que es y era natural pensar en unificar los campos de control pasivo de estructural con el diseño clásico mediante zonas disipativas controladas (una clara deficiencia del sistema de los pórticos excéntricos es su difícil reparación en el caso de un sismo severo que los active). (Bozzo L, Gaxiola G., 2021, pág. 1)

"El sistema de disipación de energía SLB ha sido probado en los laboratorios del Instituto Sperimentale Modelli e Strutture (ISMES) en Italia, en el laboratorio LNEC de Portugal y en la Universidad Católica del Perú, presentando resultados muy favorables" (Bozzo L, 2021, pág. 10) y la primera implementación fue realizada en un edificio de 7 pisos en Lima.

Figura 8. **Disipador sísmico SLB**

Fuente: Bozzo, L. (2021). *Dossier-disipadores SLB para diseño sismo resistente*. Consultado el 30 de junio de 2021. Recuperado de https://es.scribd.com/document/373670566/1-Proyectos-Con-Disipadores-Casos-de-Estudio-Ing-Luis-Bozzo.

Conforme pasan los años, esta tecnología se ha convertido en una solución muy rentable y se ha implementado en más edificios con desempeño frágil.

Se tiene el estudio comparativo realizado por el Dr. Luis Bozzo en el 2017, en donde comparó las respuestas sísmicas entre tres alternativas para un edificio de uso comercial y viviendas de 23 pisos más tres sótanos del

proyecto Urbania en la ciudad de Guadalajara en México. (Enciso Navarro, F., 2019)

En el Perú “se tiene conocimiento de la existencia de dos edificaciones ubicadas en Lima y Trujillo, en las cuales se combinan muros continuos y muros desacoplados con disipadores SLB” (Enciso Navarro, F., 2019).

Actualmente, este sistema de reforzamiento para estructuras frágiles de marcos de concreto reforzado cuenta con múltiples aplicaciones en varios países, y se han utilizado un total de 2182 unidades.

Tabla I. **Proyectos con disipadores SLB**

Item	Nombre del proyecto	Ubicación	Cantidad SLB	Núm. de pisos (Aprox)	Año de construcción (Aprox)
	PERÚ		**987**		
1	Casino Mubarack	San Borja	20	4	2002
2	Departamento de Odontología USMP	Ate	28	4	2013
3	Planta embotelladora-Lindley	Chilca	256	1	2014
4	Edificio de oficinas Monterosa	Surco	18	12	2015
5	Edificio multifamiliar Altos del Olivar	San Isidro	42	9	2015
6	Fábrica textil Vulcano	Ate	42	6	2015
7	Edificio residencial Cedrus	San Isidro	32	8	2016
8	Edificio Las Flores	Trujillo	28	9	2016-2017
9	Edificio residencial Pezet	San Isidro	30	15	2018
10	Edificio Ecopalmar	Trujillo	218	7	2018
11	Facultad de Arquitectura U. de Trujillo	Trujillo	14	2	2018

Continuación de la tabla I.

12	Universidad Santa María de Arequipa	Arequipia	88	10	2018
13	Edificio residencial Brasil-Canamond	Jesús María	19	19	2018
14	Sede Pacífico Seguros-Edif Tamayo	San Isidro	24	20	2018
15	Facultad Sistemas Univ. de Cajamarca	Cajamarca	54	4	2019
16	CENTRO CULTURAL PEDRO DE OSMA	Barranco	6	3	2019
17	Nuevo Ministerio de Vivienda Reforzamiento	San Isidro	60	15	2019
18	Proyecto Basadre		8		
	MÉXICO		**1060**		
1	Edificio Acapulco	Acapulco	20	23	2015
2	Edificio Acapulco	Acapulco	20	23	2015
3	Edificio Ixtapa	Ixtapa	94	18	2017
4	Edificio Urbania	Guadalajara	132	26	2017
5	Edificio Marina	Vallarta	68	10	2018-2019
6	Reparación Cima 500	Guadalajara	180	19	2019
7	Edificio Oak58	Puebla	400	64	2019
8	Proyecto Chapultepec	Guadalajara	26	21	2019
9	Proyecto Cima	Guadalajara	52	14	2019
10	Proyecto Tizate	Vallarta	68	8	2019
	ECUADOR		**135**		
1	Clínica Riobamba	Riobamba	17	6	2016
2	Hotel Ceibo Dorada	Manta	43	7	2016
3	Laboratorio Universidad FF AA	Quito	31	4	2017
4	Silos	Guayaquil	44	4	2017
	TOTAL		2182		

Fuente: elaboración propia, con información tomada de Bozzo, L. (2021). pág. 6.

En Guatemala, a la fecha no han sido implementados estos disipadores, pero es una opción factible que puede ser planteada para resolver las necesidades estructurales de las edificaciones, para prevenir daños graves ante la vulnerabilidad sísmica en el país.

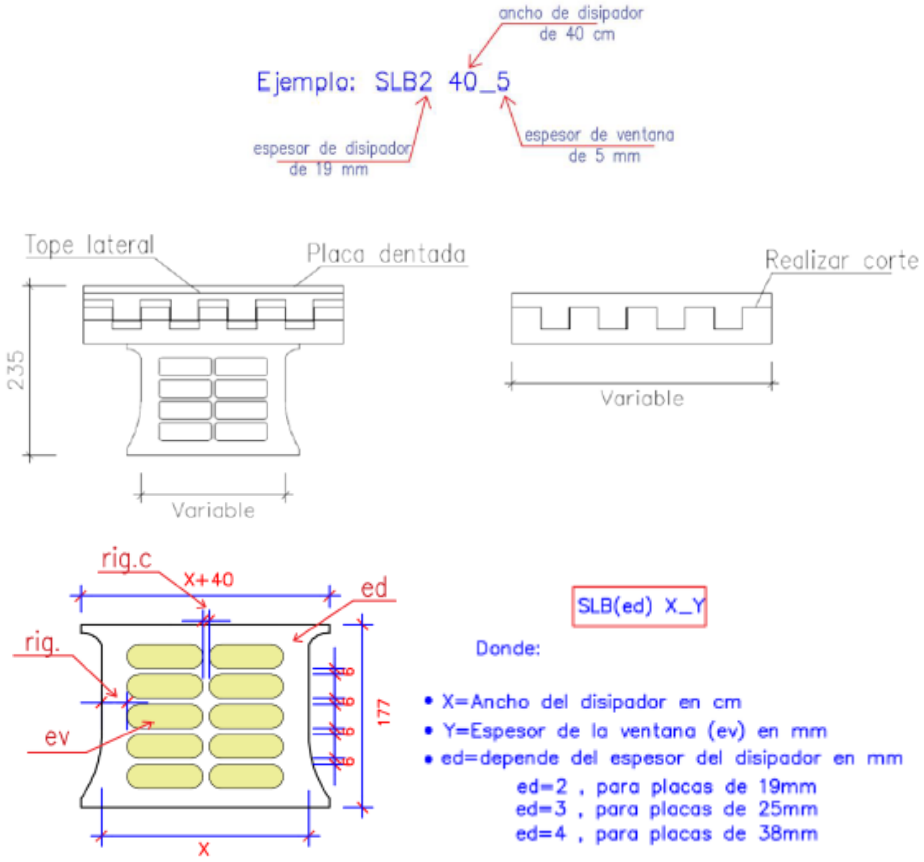
1.3.2. Características físicas y geométricas

El doctor Luis Bozzo detalla lo siguiente:

> La geometría y características generales de los dispositivos estándares actualmente fabricados se muestran en la figura 9. Donde la altura de 235 mm corresponde a 80 mm de la placa dentada o conexión almenada y 155 mm de altura del propio dispositivo (común a todos los dispositivos estándares, pero que se puede variar y adaptar a la obra o proyecto específico). La altura total es, por tanto, de 235 mm, aunque para fines de cálculo se utilice la altura del disipador, es decir 155 mm.
>
> Por otra parte, la longitud es según la fuerza de inicio de plastificación que se requiera, variando en la actualidad entre solo 60 mm para una fuerza de inicio de plastificación de 35,6 kN hasta 500 mm con una fuerza de inicio de plastificación de 897,7 kN. En caso de requerirse más fuerza, se puede diseñar un dispositivo específico o, simplemente, disponer de N dispositivos en paralelo. (Bozzo L., 2021, pág. 2)

“Los dispositivos estándares, actualmente fabricados con acero ASTM A36 (Fy 2530kg/cm2)” (Morales L. y Contreras J., 2012, pág. 3).

Figura 9. **Geometría disipadores SLB**

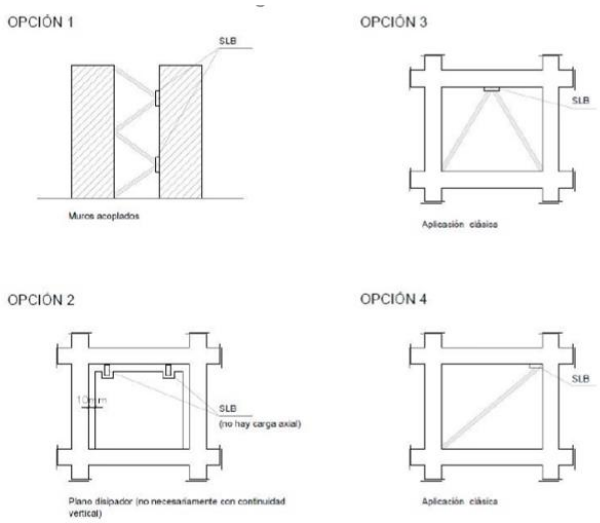


Fuente: Bozzo, L. (2021). *Análisis y diseño uilizando disipadores sísmicos tipo SLB*. Consultado el 29 de junio de 2021. Recuperado de https://www.prostructural.es/wp-content/uploads/2019/12/Manual-SLB-Devices.pdf.

1.3.3. Campos de aplicación

Estos disipadores pueden utilizarse en edificaciones tipo E3 de concreto y acero, empleando diagonales de acero o muros desacoplados.

Figura 10. **Posición de los disipadores SLB**

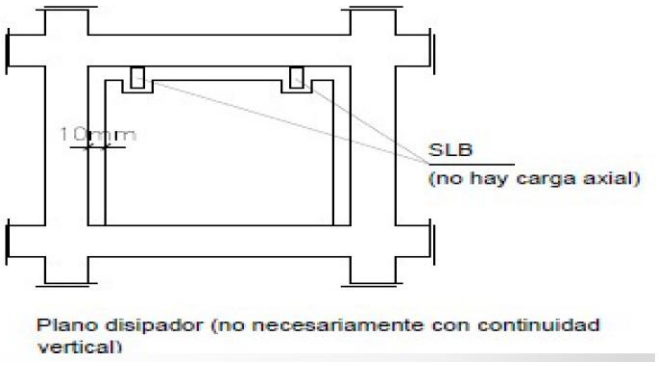


Fuente: Bozzo ,L., Gaxiola, G. (2021). *El concepto rígido-flexible-dúctil y las conexiones SLB*. Consultado el 29 de junio de 2021. Recuperado de https://www.academia.edu/30347209/el_concepto_rigido-flexible-ductil_y_las_conexiones_slb.

> Su empleo, desacoplando muros y pórticos, simplifica que el muro sea discontinuo toda vez que un sistema tradicional de muros discontinuo es muy vulnerable a un sismo severo debido a la sobre resistencia del muro y posible fallo por pandeo de las columnas que lo soportan. (Bozzo L, 2021, pág. 6)

“Con este sistema se puede hacer el muro discontinuo con seguridad dado que los dispositivos limitan la fuerza y proporcionan ductilidad. El conexón permite transferir los cortantes sísmicos sin carga axial” (Bozzo L, 2021, pág. 6).

Figura 11. **Disipadores SLB en muros desacoplados**



Fuente: Bozzo, L., Gaxiola, G. (2021). *El concepto rigido-flexible-dúctil y las conexiones slb*. Consultado el 29 de junio de 2021. Recuperado de https://www.academia.edu/30347209/el_concepto_rigido-flexible-ductil_y_las_conexiones_slb.

1.3.4. Ventajas de los disipadores SLB

Óptimos para rehabilitar estructuras muy flexibles o frágiles de concreto armado o metálicas.

Ahorro de costos en comparación de un sistema tradicional.

Control de fabricación y garantía de parámetros de diseño.

Operación continua después de uno o varios eventos sísmicos.

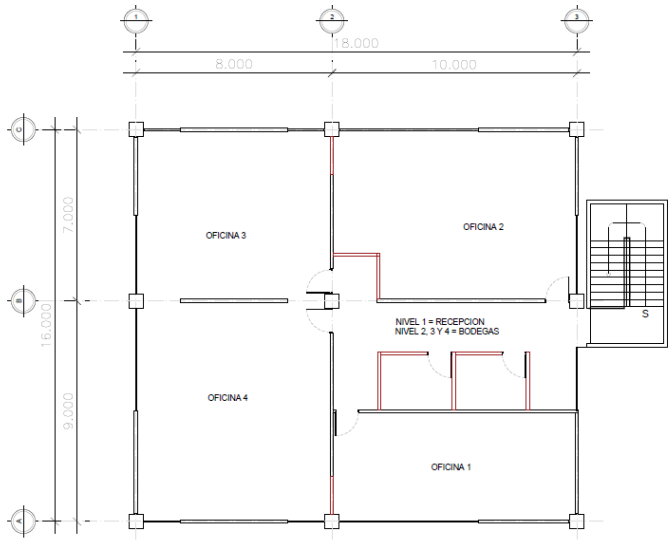
Mayor capacidad de deformación a rotura. (Bozzo L, 2021, pág. 2)

2. EJEMPLO DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE EDIFICIO EXISTENTE DE CONCRETO REFORZADO

2.1. Características y geometría del edificio

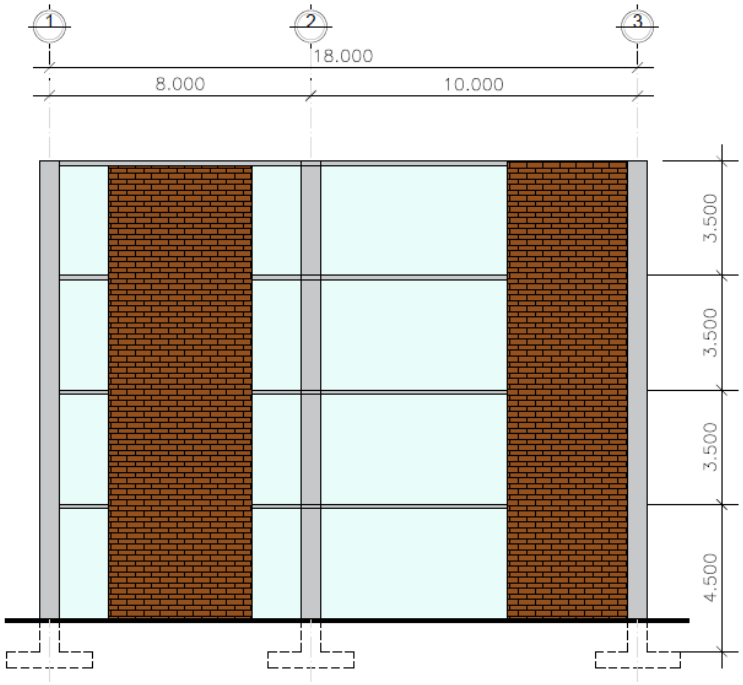
Se realiza el análisis de un edificio existente de oficinas con estructura de marcos de concreto reforzado de 15 m de altura y 4 niveles, cada planta tiene una superficie de 308.76 m^2 y cada nivel tiene una altura entre entrepisos de 3,5 m exceptuando el nivel 1 que tiene una altura de 4.5 m. Las losas de la edificación son de hormigón reforzado de 0.12 m de espesor y los muros de cerramiento son estructuras secundarias de mampostería confinada que se encuentras aisladas del sistema principal.

Figura 12. **Planta arquitectónica de edificio**



Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD 2020.

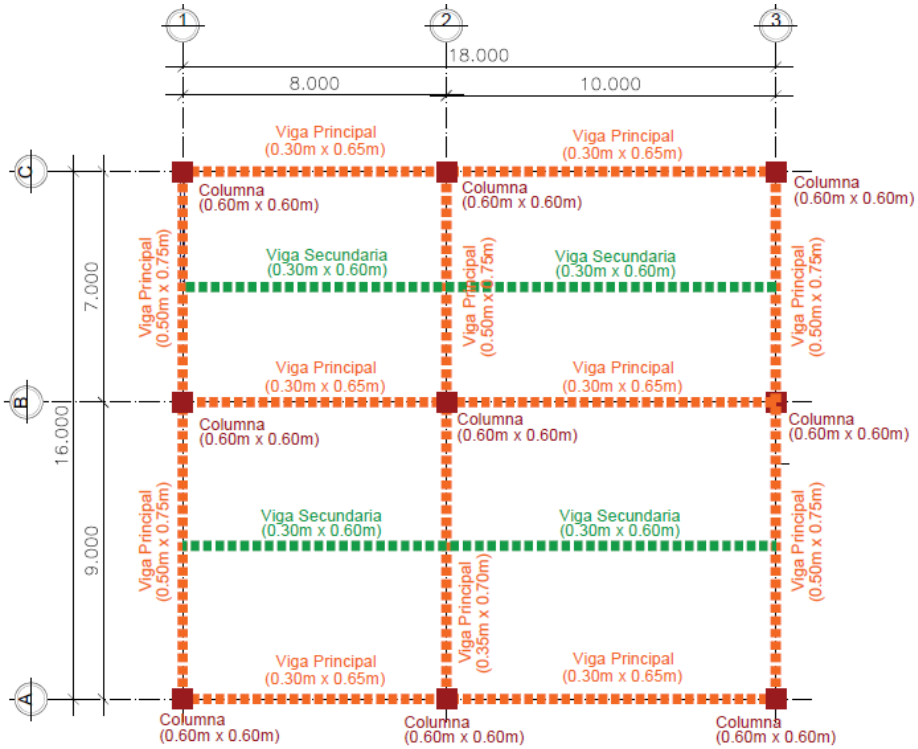
Figura 13. **Elevación arquitectónica de edificio**



Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD 2020.

Las columnas existentes son de hormigón reforzado de sección cuadrada de 0.60 m de ancho, 0.60 m de largo y el concreto utilizado es de 4,000 psi. El edificio cuenta con 3 tipos de vigas principales, la primera con sección rectangular de 0.50 m de ancho por 0.75 m de alto, la segunda con sección rectangular de 0.35 m de ancho por 0,70 m de alto y la tercera con sección rectangular de 0,30 m de ancho por 0.65 m de alto, todas de concreto de 4,000 psi. Las vigas secundarias del edificio son de sección rectangular de 0.30 m de ancho por 0.60 m de alto y el concreto utilizado es de 4 000 psi. Todas las losas del edificio son de concreto reforzado de 0.12 m de espesor. A continuación, en la figura 14, se presenta la ubicación de elementos estructurales.

Figura 14. **Ubicación de columnas y vigas en niveles 1,2, 3 y 4**



Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD 2020.

Cuando no se cuente con información geométrica y estructural del edificio, es necesario ejecutar un levantamiento completo de la edificación para obtener la geometría de los elementos estructurales. Las especificaciones de los materiales pueden obtenerse mediante ensayos destructivos y no destructivos en los elementos existentes.

2.1.1. Cargas y parámetros de diseño

Para el análisis se toman en cuenta las siguientes cargas.

2.1.1.1. Cargas muertas

“Comprenden todas las cargas de elementos permanentes de la construcción. Incluyen, pero no necesariamente están limitadas al peso propio de la estructura, pisos, rellenos, cielos, vidrieras, tabiques fijos y equipo permanente rígidamente anclado a la estructura” (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica, 2020b, pág. 2.1).

“Se toma en cuenta el peso de los tabiques y particiones interiores que no estén incorporados al sistema estructural. Se consideran como cargas uniformemente distribuidas sobre el entrepiso” (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica, 2020b, pág. 2.2).

“Generalmente, al valor de la carga muerta se le agrega un valor de sobre carga de 100 Kg/m^2 que corresponde a peso de rellenos y piso, y de 75 Kg/m^2 que corresponde a peso de tabiques” (Sánchez F., 2016, pág. 50).

Para el modelado del edificio existente se utilizan las siguientes cargas:

CM= peso propio de la estructura
CMS= 175 Kg/cm^2 para entrepisos
CMS= 100 Kg/cm^2 para cubierta

Donde:

CM =carga muerta
CMS = carga muerta adicional al peso de la estructura

2.1.1.2. Cargas vivas

“Son aquellas producidas por el uso y la ocupación de la edificación. Son generalmente empíricas, basadas en criterios de ingeniería de larga trayectoria; algunas veces pueden tener una base estadística, pero con dispersiones muy amplias” (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica, 2020b, pág. 3.1).

Las cargas vivas para edificaciones, de acuerdo con su tipo de ocupación o uso, se indican en la tabla II.

Tabla II. **Cargas vivas para edificaciones**

Pv (kg)	Wv (kg/m2)	Pv (kg)
Vivienda		
Balcones	300 [R]	
Habitaciones y pasillos	200 [R]	
Escaleras	300	
Oficina		
Pasillos y escaleras	300	
Oficinas	250 [R]	800
Áreas de cafetería	500	
Hospitales		
Pasillos y rampas	500	450
Clínicas y encamamiento	250 [R]	
Servicios médicos y laboratorio	350 [R]	800
Farmacia	500	
Escaleras	500	
Cafetería y cocina	500	

Fuente: elaboración propia, con información tomada de Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica, (2020b). pág. 3.6.

Para el modelado del edificio existente se utilizan las siguientes cargas:

CV= 250 Kg/cm^2 para entrepiso de oficinas

CV=100 Kg/cm^2 para cubierta

Donde:

CV =carga viva con base en lo especificado en NSE 2 de AGIES. Ver tabla II.

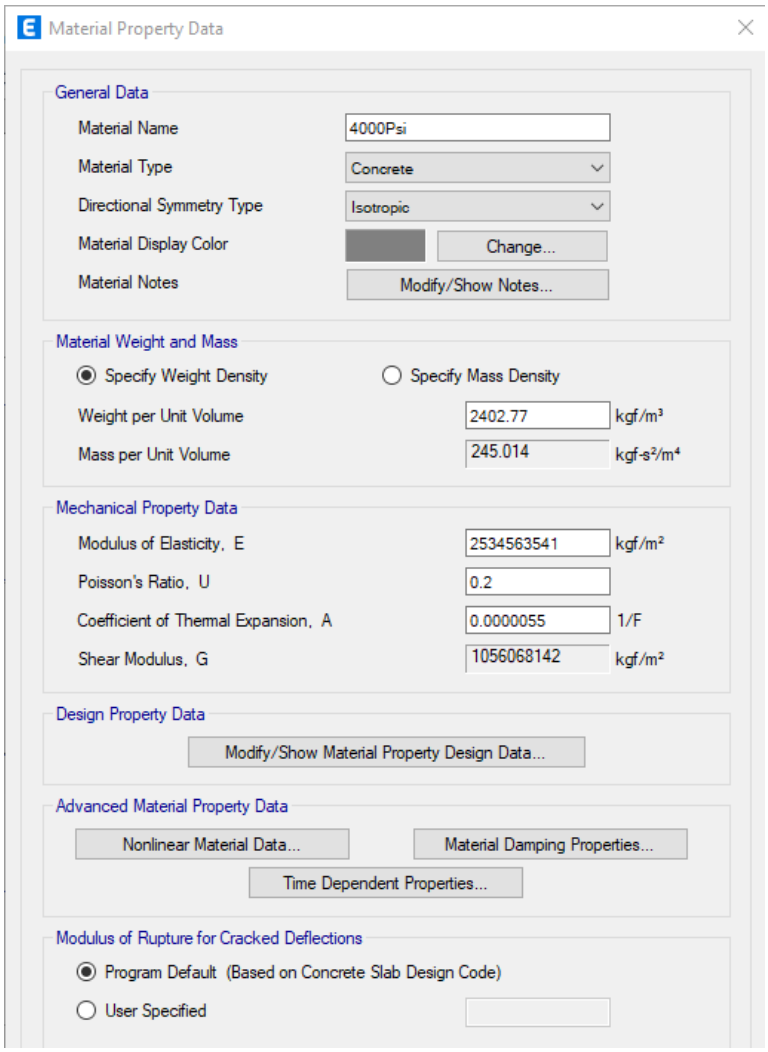
2.1.1.3. Carga de sismo

“Se determina por medio de la aplicación del método de análisis modal, se utilizó a una herramienta de análisis integral que tenga una capacidad total de modelar geometrías, cargas, rigideces y resultados en 3 dimensiones” (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica, 2020c, pág. 3.1).

2.1.2. Especificaciones de materiales

Para el modelado del edificio se utilizará concreto 4,000 psi, cuyas características físicas y mecánicas son las que se describen en la figura 15.

Figura 15. **Propiedades del concreto 4,000 psi**



Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS 19.1.0.

Para el análisis de un edificio existente siempre es recomendable realizar análisis de laboratorio para determinar las propiedades físicas y mecánicas de las secciones de concreto. Estas pueden ser destructivos y no destructivos.

Los ensayos no destructivos son métodos que no causan daño en la estructura a evaluar. Su función principal es para determinar las condiciones y estimar la resistencia del concreto endurecido de una forma confiable. En este documento trataremos los 4 métodos de ensayo que cuentan con procedimientos normalizados y son los siguientes:

Martillo de rebote o esclerométrico NTG 41017 h11 (ASTM C805)
Ensayo de penetración NTG 41017 h18 (ASTM C803)
Ensayo de madurez NTG 41042 (ASTM C1074)
Ensayo de extracción por deslizamiento NTG 41017 h26 (ASTM C900). (Instituto del Concreto y del Cemento de Guatemala, 2018, pág. 2)

También se pueden realizar ensayos destructivos como el método de obtención y ensayo de núcleos perforados y vigas aserradas de concreto COGUANOR NTG 41049.

En general, la extracción de núcleos se lleva a cabo cuando existe una duda razonable de la resistencia debido a que se tienen bajos resultados de los ensayos durante la construcción, por los síntomas de deterioro en la estructura o en estructuras antiguas, en donde se necesita obtener más información sobre las condiciones y resistencia del concreto. (Instituto del Cemento y del Concreto de Guatemala, 2019, pág. 2)

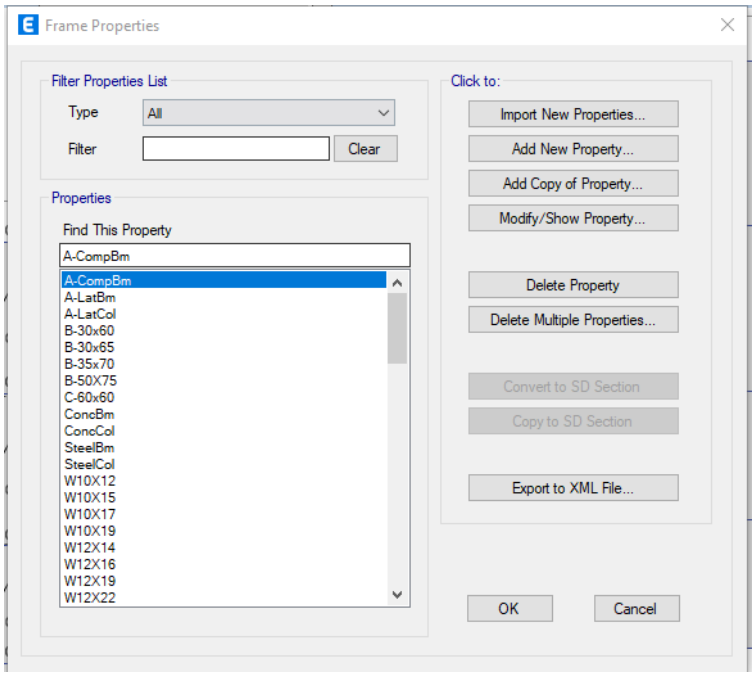
2.1.3. Modelado de la estructura

Para ejecutar el análisis estructural de la edificación se realiza el modelo analítico en el programa ETABS 19.1.0.

2.1.3.1. Definir secciones de concreto

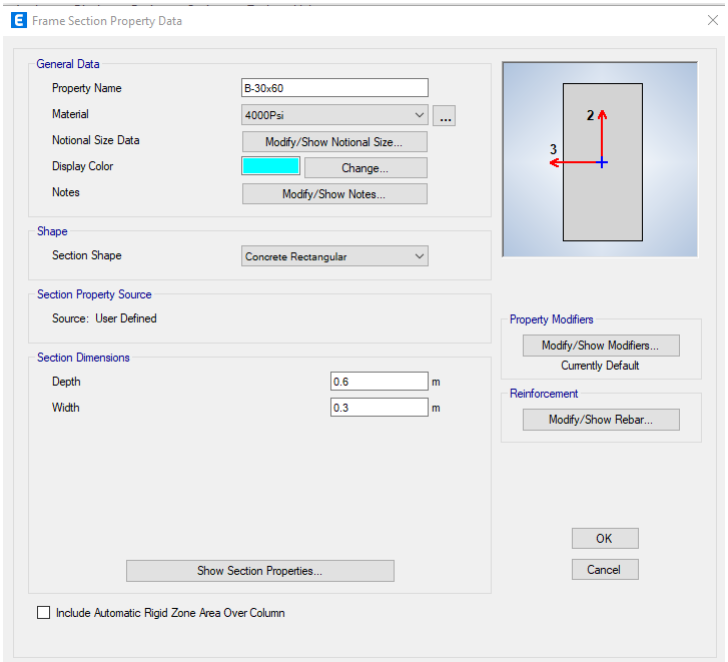
Se comienza definiendo la geométrica y materiales de las secciones de hormigón en el programa, seleccionando la pestaña define, *section properties, frame sections* y, por último seleccionar Add New property.

Figura 16. **Secciones de elementos estructurales en ETABS**



Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS 19.1.0.

Figura 17. **Propiedades de secciones de concreto en ETABS**

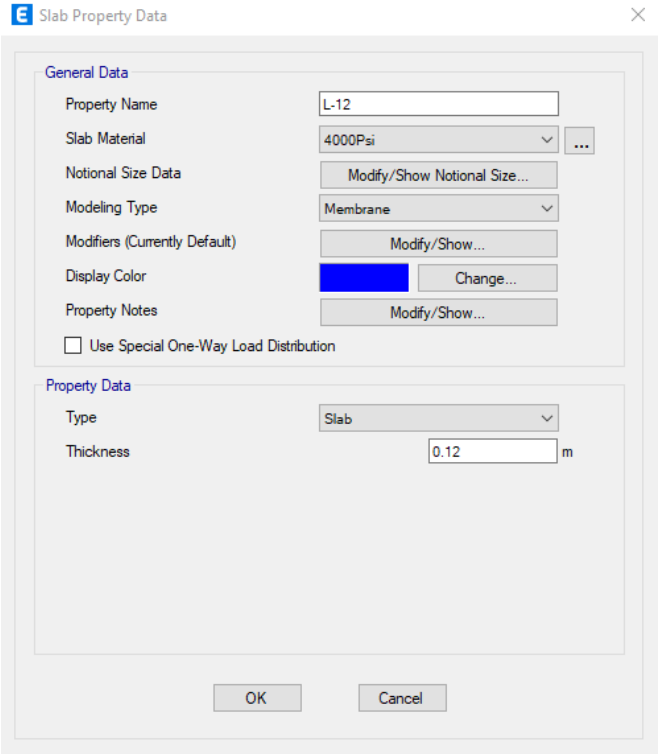


Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS 19.1.0.

En Frame Section Property Data se establece la dimensión de la sección de hormigón y el material a utilizar, que en este caso será concreto de 4,000 psi. El procedimiento se debe realizar con cada uno de los elementos de hormigón de las vigas y columnas definidas en la sección 2.1 de este documento.

El mismo procedimiento debe de realizarse para definir la sección de la losa, únicamente es de elegir la opción de *slab section* en lugar de *frame section*. Allí se define espesor de losa de 0.12 m y el material que es concreto de 4,000 psi.

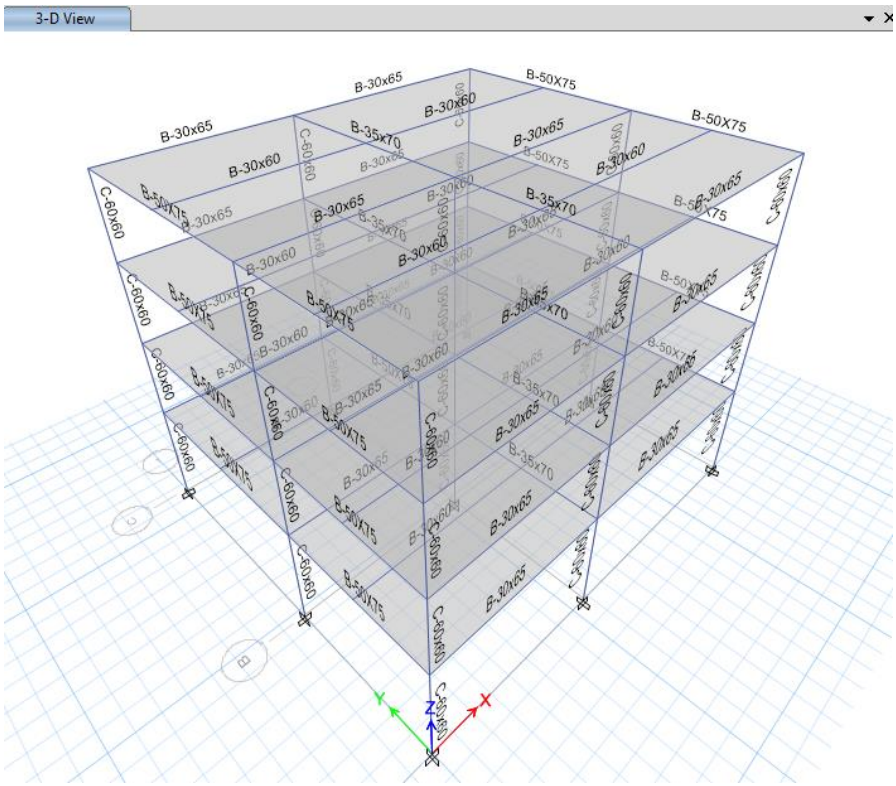
Figura 18. **Propiedades de losa de concreto en ETABS**



Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS 19.1.0.

Definidos los materiales y secciones de concreto a utilizar, se procede a modelar la estructura del edificio en el programa.

Figura 19. **Modelo estructural del edificio en ETABS**



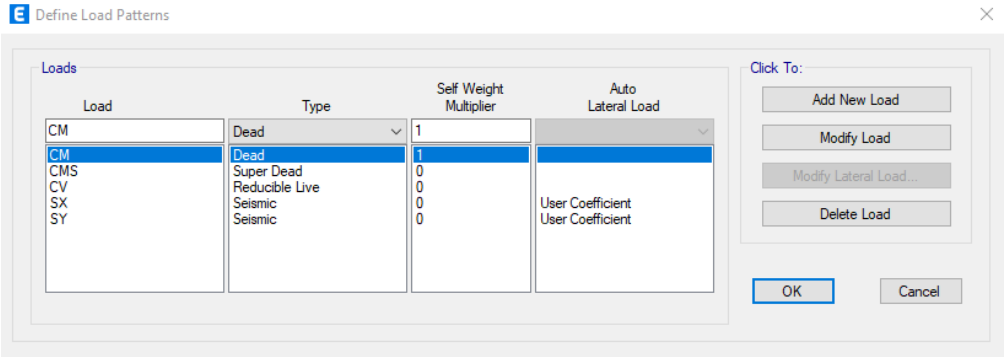
Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS 19.1.0.

2.1.3.2. Asignación de cargas

Luego del modelado de la estructura, se procede a realizar la asignación de cargas gravitacionales en losas y vigas.

Previo al inicio de asignación de cargas se deben de asignar los patrones de carga ingresando a define y luego Load Patterns. Allí se crean los casos de carga muerta adicional, carga viva y cargas de sismo.

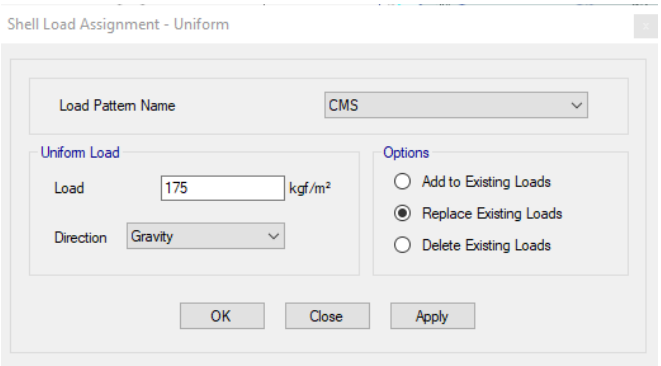
Figura 20. **Patrones de carga en ETABS**



Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS 19.1.0.

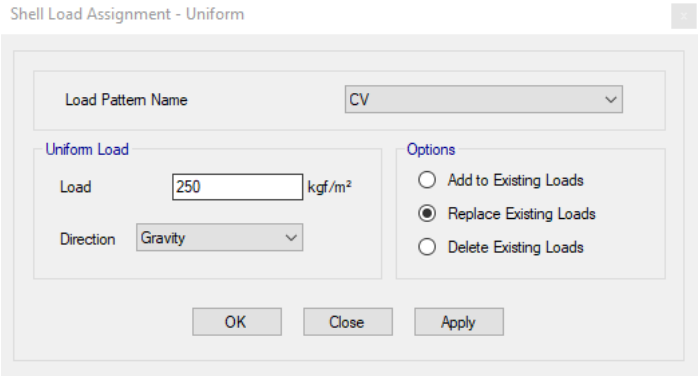
Para la asignación de cargas en losas se deben seleccionar las mismas, luego se ingresa a la pestaña Assign, Shell Loads, Uniform. Allí se define la carga muerta adicional y la carga viva a utilizar.

Figura 21. **Asignación de cargas muertas adicionales**



Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS 19.1.0.

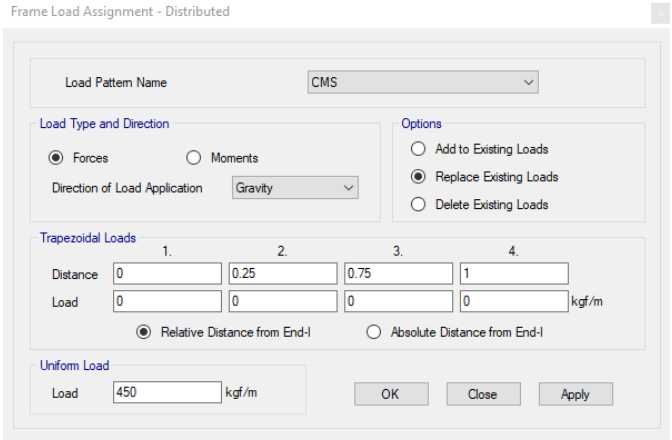
Figura 22. **Asignación de cargas vivas**



Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS 19.1.0.

También se realiza la asignación de cargas distribuidas que generan los muros de mampostería sobre las vigas principales y secundarias del edificio. Para ello se seleccionan las vigas, luego se ingresa a Assign, Frame Loads, Distributed y allí se asigna una carga distribuida sobre las vigas de 450 Kg/m.

Figura 23. **Asignación de cargas distribuidas**



Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS 19.1.0.

2.1.3.3. Revisión de irregularidades estructurales

Luego del modelado de la estructura se procede a determinar si la estructura en análisis tiene irregularidades en planta o en elevación que puedan afectar su comportamiento ante un evento sísmico. Las estructuras serán irregulares en planta si tienen una o más de las características enumeradas en la tabla 1.8-1 de la Norma NSE 2 de Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica (2020b). Las estructuras serán irregulares en elevación si tienen una o más de las características enumeradas en la tabla 1.9-1 de la Norma NSE 2 de Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica (2020b). En cuyo caso deberán cumplir con las disposiciones especiales señaladas para cada tipo de irregularidad definida en las tablas.

El edificio analizado tiene una configuración estructural simétrica, sin cambios bruscos de rigidez o alteración en la continuidad de sus elementos verticales y horizontales, por lo que no tiene la presencia de alguna irregularidad estructural especificada en las tablas antes mencionadas.

2.2. Análisis sísmico y determinación de espectro de diseño

“Para la determinación del espectro de respuesta sísmica y la elaboración del análisis estructural se deben de establecer los siguientes parámetros sísmicos establecidos en la norma” (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica, 2020b).

2.2.1. Aspectos sísmicos

La norma (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica (AGIES), 2020a) establece “NPS (nivel de protección sísmica) que se requiere según las condiciones sísmicas de cada localidad y según la clasificación de cada obra. También establece los parámetros y espectros sísmicos que posteriormente sirven para el análisis y diseño de las estructuras” (pág. 15).

2.2.1.1. Índice de sismicidad y nivel de protección

“Incide sobre el nivel de protección sísmica que se hace necesario para diseñar la obra o edificación e incide en la selección del espectro sísmico de diseño” (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica, 2020b, pág. 4.1).

“Para efecto de esta norma, el territorio de Guatemala se divide en macrozonas de amenaza sísmica caracterizadas por su índice de sismicidad que varía desde $I_o = 2$ a $I_o = 4$” (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica, 2020b, pág. 4.1).

El índice de sismicidad del edificio a analizar se obtiene del listado de amenaza sísmica y velocidad básica del viento por municipio para la república de Guatemala ubicado en la tabla A-1 de los anexos de NSE 3 (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica, 2020b).

El tipo de suelo se obtiene de un estudio de suelos realizado por un profesional en geotécnica y para este caso de estudio será suelo tipo C. Definido en Norma NSE 2.1 DE AGIES.

Tabla III. **Índice de sismicidad de edificio existente**

Núm.	Municipio	Departamento	Io	Suelo tipo C	
				Scr	S1r
78	Guatemala	Guatemala	4.1	1.53	0.68

Fuente: elaboración propia, con información tomada de Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica (AGIES), 2020b, pág. 91.

El nivel de protección sísmica (NPS) es una medida del grado de protección suministrado al público y a los usuarios de las obras nuevas o existentes contra los riesgos derivados de las solicitaciones de carga y de amenazas sísmicas. El nivel de protección requerido se especifica en la tabla 4.2.2-1 de la NSE 2, y depende del grado de amenaza sísmica en el sitio y de la clasificación de la obra. En estas normas se establecen cinco niveles de protección: A, B, C, D y E. El nivel E es el que da la protección sísmica más alta. Cualquier requisito, método de análisis o sistema constructivo adecuado para un nivel superior de protección puede utilizarse en un nivel más bajo. Los requisitos de cada nivel de protección sísmica están dados en la NSE 3. (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica (AGIES), 2020a, pág. 2.1)

Tabla IV. **Nivel de protección sísmica y probabilidad de sismo de diseño**

Índice de sismicidad [b]	**Clase de obra [a]**			
	Esencial	**Importante**	**Ordinaria**	**Utilitaria**
Io = 4	E	D	D	C
Io = 3	D	C	C	B
Io = 2	C	B	B	A
Probabilidad de exceder el sismo de diseño [c]	5 % en 50 años [d]	5% en 50 años [d]	10 % en 50 años	Sismo mínimo[e]

a] Ver clasificación de obra en NSE 1 capítulo 3.
[b] Ver índice de sismicidad en Sección 4.2.1.
[c] Ver sección 4.4 para selección de espectro sísmico de diseño según probabilidad de excederlo.
[d] A las obras esenciales e importantes les corresponde un sismo con la misma probabilidad de excedencia –se diferencian en detalles del nivel de protección y en las deformaciones laterales permitidas.
[e] Ver sección 4.4.2 (d).

Fuente: elaboración propia, con información tomada de Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica (2020b) pág. 4.2.

El edificio en análisis corresponde a una obra ordinaria debido a que “no está en las categorías I, III o IV y que tienen una carga de ocupación inferior a 300 personas” (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica (AGIES), 2020a, pág. 3.1).

Definido el índice de sismicidad y la categoría de la obra se puede definir que el edificio es clase D y tiene una probabilidad de 10 % de exceder el sismo de diseño en 50 años.

2.2.1.2. Tipo de fuente sísmica y clase de sitio

El sitio de proyecto se clasificará con base en las características del perfil de suelo bajo los cimientos. Los sitios se clasificarán en alguna de las siguientes categorías: AB, C, D, E o F. La clasificación del sitio será necesaria para configurar correctamente el espectro del sismo de diseño. La clasificación deberá ser establecida conforme a lo estipulado en la Norma NSE 2.1. La información a ser recabada y procesada dependerá de la categoría de obra (según se indique en la Norma NSE 2.1) y los resultados quedarán consignados en un informe detallado o un reporte de inspección de sitio según el caso. (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica, 2020b, pág. 4.2)

Tabla V. **Tipo de fuente sísmica**

Tipo de fuente	Descripción	Máxima magnitud-momento	Tasa de corrimiento (mm por año)
A	Fallas geológicas capaces de generar eventos de gran magnitud y con alta tasa de sismicidad [1]	Mo ≥ 7.0	TC ≥ 5
B	Fallas geológicas que no son A o C	Mo ≥ 7.0 Mo < 7.0 Mo ≥ 6.5	TC < 5 TC > 2 TC < 2

Continuación de la tabla V.

C	Fallas geológicas incapaces de generar eventos de gran magnitud y que tienen baja tasa de sismicidad	Mo < 6.5	TC ≤ 2
[1] La zona de subducción del territorio de Guatemala no debe considerarse en esta clasificación debido a la distancia a la fuente.			

Fuente: elaboración propia, con información tomada de Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica (2020b). pág. 4.11.

En el ejemplo de análisis se definirá una clase de sitio tipo C y una fuente sísmica tipo C en donde las fallas geológicas son incapaces de provocar eventos de gran magnitud. Dicha información debe de ser proporcionada en un estudio de suelo realizado por un profesional en geotecnia.

2.2.1.3. Espectros genéricos para diseño

La Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica (AGIES), 2020b establece los siguientes espectros genéricos.

2.2.1.3.1. Parámetros básicos

“Son los parámetros S_{cr} y S_{1r}, cuyos valores para el territorio de Guatemala están especificados en el listado de amenaza sísmica por municipios en anexo A” (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica, 2020b, pág. 4.4).

“Los parámetros Scr y S1r son respectivamente la ordenada espectral de período corto (0.2 segundos) y la ordenada espectral con período de 1 segundo del sismo extremo considerado en el basamento de roca en el sitio de interés” (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica, 2020b, pág. 4.4).

Los valores del edificio en análisis están definidos en la tabla II de este documento.

2.2.1.4. Ajuste por clase de sitio

“El valor de Scr y S1r estipulado deberá ser ajustado conforme a la clase de sitio y lo indicado en la sección 4.5.2” (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica, 2020b, pág. 4.5).

$$Scs = Scr * Fa \quad (1)$$

$$S_{1s} = Scr * Fv \quad (2)$$

Donde:

Scs **=** ordenada espectral del sismo extremo en el sitio de interés para estructuras con periodo de vibración corto.

S_{1s} **=** ordenada espectral correspondiente a periodos de vibración de 1 segundo; ambos para un amortiguamiento nominal de 5 % del crítico.

Fa = coeficiente de sitio para periodos de vibración cortos.

Fv **=** coeficiente de sitio para periodos largos.

Tabla VI. **Coeficientes de sitio Fv**

Clase de sitio	Índice de sismicidad			
	2	**3**	**4.1**	**4.2**
AB	1	1	1	1
C	1	1	1	1
D [1]	1	1	1	1
E	1	1	1	1
F	Se requiere evaluación específica - ver Sección 4.4			

[1] En los casos en que la investigación de suelos abreviada no especifique si un suelo firme clasifica como C o como D, el factor Fv se tomará del suelo D.

Fuente: elaboración propia, con información tomada de Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica (2020b). pág. 4.7.

Tabla VII. **Coeficientes de sitio Fa**

Clase de sitio	Índice de sismicidad			
	2	**3**	**4.1**	**4.2**
AB	1	1	1	1
C [1]	1	1	1	1
D	1	1	1	1
E	1	1	1	1
F	Se requiere evaluación específica - ver Sección 4.4			

[1] En los casos en que la investigación de suelos abreviada no especifique si un suelo firme clasifica como C o como D, el factor Fa se tomará del suelo C.

Fuente: elaboración propia, con información tomada de Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica (2020b). pág. 4.7.

Realizando el ajuste de las ordenadas espectrales del edificio en análisis por clase de sitio, están los siguientes resultados:

Fa = 1 para clase de sitio C e índice de sismicidad 4.1 (ver tabla VII)

Fv = 1 para clase de sitio C e índice de sismicidad 4.1 (ver tabla VI)

Scs = 1.53 * 1 = 1.53

S_{1s} = 0.68 * 1 = 0.68

2.2.1.5. Ajuste por intensidades sísmicas especiales

"El valor de Scr y S1r deberá ser adicionalmente ajustado por la posibilidad de intensidades incrementadas de vibración en el sitio" (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica, 2020b, pág. 4.5).

$$Scs = Scr * Fa * Na \qquad (3)$$

$$S_{1s} = Scr * Fv * Nv \qquad (4)$$

Donde:

Na = factor que aplica por la proximidad de las amenazas especiales

Nv = factor que aplica por la proximidad de las amenazas especiales

Tabla VIII. **Factor Na para periodos cortos de vibración**

Tipo de fuente	Distancia horizontal más cercana a fuente sísmica		
	≤ 2 km	5 km	≥ 10 km
A	1	1	1
B	1	1	1
C	1	1	1

[1] Tomar distancia horizontal a la proyección horizontal de la fuente sísmica sobre la superficie; no considerar las porciones del plano de falla cuya profundidad exceda 10 km.
[2] Utilizar el mayor factor Na obtenido al cotejar todas las fuentes relevantes.

Fuente: elaboración propia, con información tomada de Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica (AGIES), 2020b, pág. 4.12.

Tabla IX. **Factor Nv para periodos cortos de vibración**

Tipo de fuente	Distancia horizontal más cercana a fuente sísmica [1] [2]			
	≤ 2 km	≤ 5 km	≤ 10 km	≥ 15 km
A	1	1	1	1
B	1	1	1	1
C	1	1	1	1

[1] Tomar distancia horizontal a la proyección horizontal de la fuente sísmica sobre la superficie; no considerar las porciones del plano de falla cuya profundidad exceda 10 km.
[2] Utilizar el mayor factor Nv obtenido al cotejar todas las fuentes relevantes.

Fuente: elaboración propia, con información tomada de Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica (AGIES), 2020b, pág. 4.12.

Realizando el ajuste por intensidades sísmicas especiales del edificio, se tienen los siguientes resultados:

Na = 1 para tipo de fuente C y una distancia horizontal de 2-10 km a una fuente sísmica (ver tabla XIII).
Nv = 1 para tipo de fuente C y una distancia horizontal de 2-10 Km a una fuente sísmica (ver tabla IX).

Scs = 1,53 * 1 * 1 = 1,53
S_{1s} = 0,68 * 1 * 1 = 0,68

2.2.1.6. Probabilidad de ocurrencia del sismo de diseño

"Se determina la probabilidad de ocurrencia del sismo de diseño, según el nivel de protección sísmica que se requiera" (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica, 2020b, pág. 4.8).

Tabla X. **Factores Kd de acuerdo con el nivel de sismo**

Nivel de sismo	Factor Kd
Sismo ordinario — 10 % probabilidad de ser excedido en 50 años	0.66
Sismo severo — 5 % probabilidad de ser excedido en 50 años	0.8
Sismo extremo — 2 % probabilidad de ser excedido en 50 años	1
Sismo mínimo-condición de excepción	0.55

Fuente: elaboración propia, con información tomada de (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica, 2020b, pág. 4.8)

La edificación en análisis está clasificada como una obra ordinaria, por lo que se utiliza un factor Kd de 0.66.

2.2.1.7. Espectro calibrado a nivel de diseño

"Los parámetros del espectro se calibrarán a la probabilidad estipulada mediante las expresiones" (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica, 2020b, pág. 4.8).

$Scd = Scs * Kd = 1.53 * 0.66 = 1.0098$

$S_{1d} = S1s * Kd = 0.68 * 0.66 = 0.4488$

2.2.1.8. Periodo de vibración de transición

“Para construir los espectros de diseño genéricos se necesita definir los siguientes periodos de vibración (expresados en segundos)” (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica, 2020b, pág. 4.7).

“Periodo T_S que separa los periodos cortos de los largos” (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica, 2020b, pág. 4.7).

$$Ts = S1s / Scs = 0.68/1.53 = 0.4444 \text{ seg.} \qquad (5)$$

“Periodo T_0 que define el inicio de la meseta de periodos cortos del Espectro” (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica, 2020b, pág. 4.8)

$$T_0 = 0.2 * Ts = 0{,}20 * 0.4444 = 0.0889 \text{ seg.} \qquad (6)$$

2.2.1.9. Periodo fundamental de vibración

“El periodo fundamental de vibración de una edificación se estimará en forma empírica y genérica con la siguiente ecuación” (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica, 2020c, pág. 2.4).

$$Ta = KT\ (hn)^x \qquad (7)$$

$$Ta = 0.047\ (15\ \mathrm{m})^{0.90} = 0.5377 \text{ seg}$$

Donde:

hn = altura total del edificio, en metros, desde la base.

K_T = 0.047, para sistemas estructurales E1 que sean abiertos o con fachadas de vidrio o paneles livianos y pocas particiones rígidas.

x = 0.90, para sistemas estructurales E1 que sean abiertos o con fachadas de vidrio o paneles livianos y pocas particiones rígidas" (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica, 2020c, pág. 2.4).

> El sistema estructural del edificio en análisis es E1, debido a que es un sistema integrado con marcos de columnas y vigas que soportan toda la carga vertical y además todas las solicitaciones horizontales. Todos los marcos están unidos entre sí por diafragmas de piso. (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica, 2020c, pág. 1.12)

"Los modelos analíticos, generalmente, subestiman la respuesta sísmica y se hace necesario utilizar un calibrador empírico para obtener resultados eficaces. Los periodos analíticos **T_F** calculados con el programa están limitados conforme a la ecuación siguiente" (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica, 2020c, pág. 2.6).

$$T = Tf \leq 1.4*Ta \quad (8)$$

$$T = Tf \leq 1.4*0.5377$$

$$T = Tf \leq 0.7528 \text{ seg}$$

2.2.1.10. Espectros genéricos probables

"Cuando se puedan utilizar los espectros de diseño genéricos, las ordenadas espectrales $S_a(T)$ para cualquier periodo de vibración T, se definen con las siguientes expresiones" Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica (2020b), pág. 4.9.

Cuando $T < T_0$

$$S_a(T) = S_{cd}\,[0.4 + 0.6(T/\,T_0)] \qquad (9)$$

Cuando $T_0 \leq T \leq T_s$

$$S_a(T) = S_{cd} \qquad (10)$$

Cuando $T_s \leq T \leq T_L$

$$S_a(T) = S_{1d}/T < S_{cd} \qquad (10)$$

Cuando $T \geq T_L$

$$S_a(T) = S_{1d} / (T^2) * T_L \qquad (11)$$

En el caso del edificio en análisis, se tiene que:

$T_s < T < T_L$

$0.444 < 0.5377$

Por lo tanto, la ordenada espectral a utilizar será la siguiente:

$Sa(T) = S_{1d} / T$

$Sa(T) = 0.4488 / 0.5377$

$Sa(T) = 0.8346 < 1.0098$

Utilizando el método estático equivalente de la NS3 de AGIES, se procede a calcular el coeficiente sísmico que se ingresará en el modelo estructural para determinar el corte basal del edificio.

2.2.1.11. Coeficiente sísmico al límite de cedencia Cs

El coeficiente sísmico (Cs) en cada dirección de análisis se establecerá de la manera siguiente:

$$Cs = Sa(T) / R \qquad (12)$$

$$Cs = 0.8346 / 8$$

$$Cs = 0.1043$$

Donde:

Sa(T) = demanda sísmica de diseño (pseudo-aceleración inducida en función del periodo) para una estructura con periodo T obtenida del espectro de diseño sísmico establecido para el sitio, según la probabilidad de ocurrencia requerida, en la sección 4.5.6 de la NSE 2 de AGIES.

R = 8, factor de reducción para sistema de marcos dúctiles DA resistentes a momento E1 de concreto reforzado. Ver tabla XI. (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica, 2020, pág. 2.2)

Tabla XI. **Coeficientes y factores para diseño de sistemas sismorresistentes**

	SISTEMA ESTRUCTURAL Sección 1.6 [a]	Norma	R	ΩR	Cd	Límite de altura en metros SL - sin límite NP - no permitido notas nivel de protección				
						B	C	D	E	Notas
E1	**SISTEMA DE MARCOS RESISTENTES A MOMENTO**	1.6.2								
	Marcos dúctiles DA									
	De concreto reforzado	NSE 7.1	8	3	5.5	SL	SL	SL	SL	[b]
	De acero estructural	NSE 7.5	8	3	5.5	SL	SL	SL	SL	--
	Compuestos acero-concreto	NSE 7.1 /7.5	8	3	5.5	SL	SL	SL	SL	[g]
	Ductilidad intermedia DI									
	De concreto reforzado	NSE 7.1	5	3	4.5	33	20	12	NP	[b]
	De acero estructural	NSE 7.5	4.5	3	4	55	33	20	NP	--
	Compuestos acero-concreto	NSE 7.1 /7.5	4.5	3	4.5	33	20	12	NP	[g]
	Sistemas aislados	NSE 7.7	5	3	4.5	75	75	75	75	[n]
	Ductilidad baja DB									
	De concreto reforzado	NSE 7.1	3	3	2.5	20	NP	NP	NP	[b]
	De acero estructural	NSE 7.5	3.5	3	3	33	12	NP	NP	--
	Compuestos acero-concreto	NSE 7.1 /7.5	3	3	2.5	33	NP	NP	NP	[g]

DA — alta ductilidad.
DI — ductilidad intermedia; igual a DA con algunos requisitos menos exigentes de acuerdo a lo prescrito en la norma correspondiente.
DB — baja ductilidad; el sistema constructivo se considera frágil poco apto para zona de alta sismicidad.
DL — ductilidad limitada; el sistema estructural es inherente carente de ductilidad, aunque podrá desempeñarse en zona de alta sismicidad siguiendo las prescripciones de norma.

Fuente: elaboración propia, con información tomada de Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica (2020c) pág. 1.17.

2.2.1.12. Valores mínimos de coeficiente sísmico

"Se verifica que el Cs obtenido con la ecuación 2.2.1.7 cumpla con lo siguiente" (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica, 2020c, pág. 2.2).

$$Cs \geq \frac{(0.044)(Scd)(Fd)}{\beta d} \geq \mathbf{0.01} \qquad (13)$$

Donde:

$$Fd = (0.59\left(\frac{(4.77)(S1d)}{(Scd)(Tf)(R)}\right)) * (\frac{1}{kd}) = 1.2290 \ (14)$$

$$Bd = \frac{4}{1-\ln(0.05)} = 1.0011 (15)$$

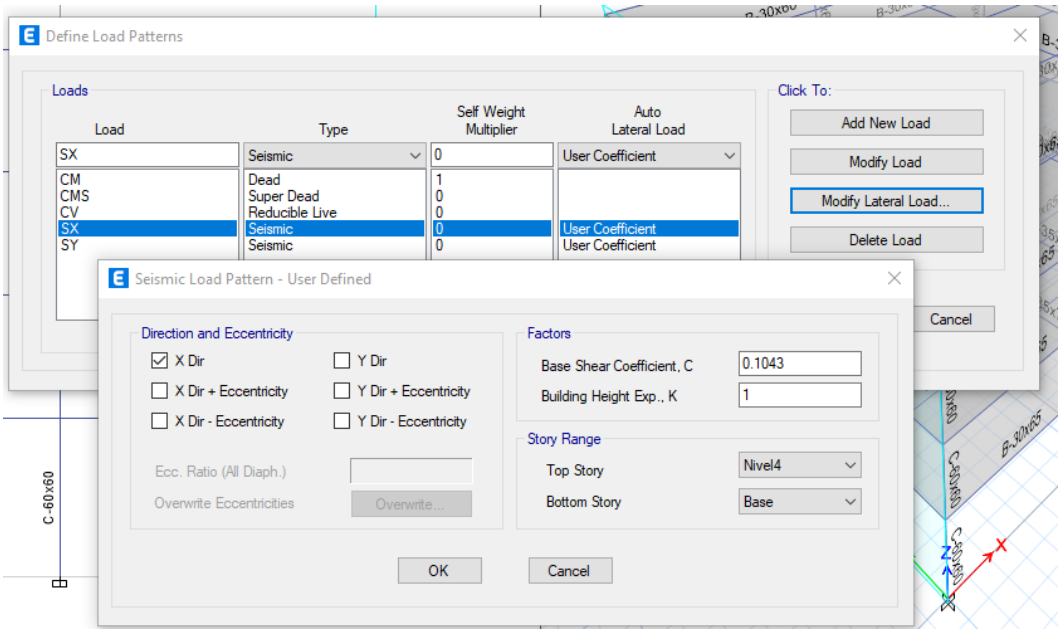
Haciendo la comprobación se determina que el coeficiente sísmico sí está dentro del rango permitido por la Norma NSE 3 de AGIES.

$$\boldsymbol{Cs} \geq \frac{(0.044)(1.0098)(1.2290)}{1.0011} \geq \mathbf{0.01}$$

$$\boldsymbol{Cs} \geq 0.0546 \geq \mathbf{0.01}$$

Calculado el coeficiente de diseño sísmico, se procede a ingresar dicho coeficiente a los parámetros de carga sísmica en el programa. Ingresando a *define*, Load Patterns y seleccionando la carga sísmica SX se ingresa el coeficiente sísmico y se define la dirección de análisis. El procedimiento se repite en la dirección SY.

Figura 24. **Ingreso de coeficiente sísmico en ETABS**

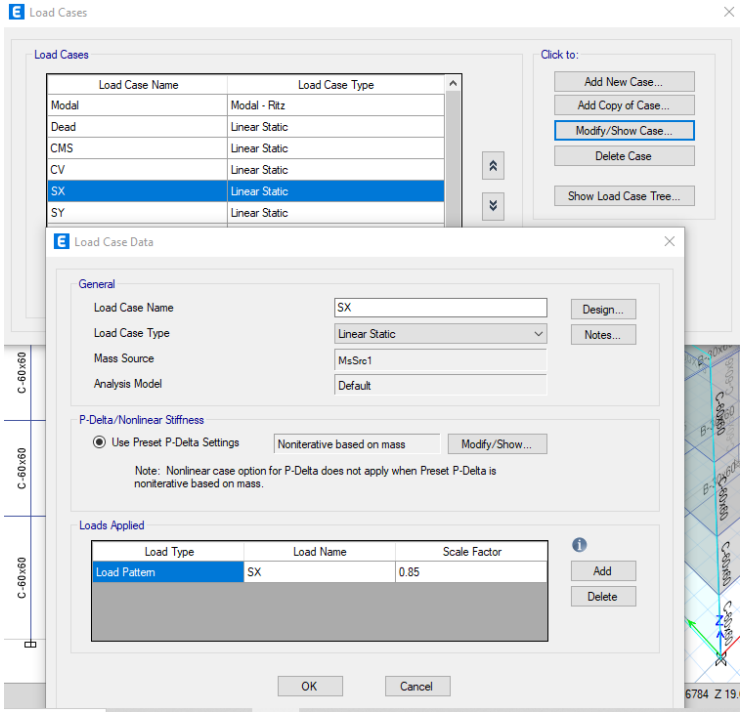


Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS 19.1.0.

El siguiente paso será crear los casos de carga sísmica. Para ello se ingresa a *define*, Loas Cases, Add New Case.

“Cuando la estructura no tenga irregularidades en planta ni irregularidades en elevación, entonces se podrá calibrar cada caso de carga sísmica con un factor de 0.85” (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica, 2020c, pág. 3.5).

Figura 25. **Ingreso de casos de carga sísmica estática en ETABS**



Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS 19.1.0.

2.2.2. Análisis modal espectral

El objetivo de este análisis es determinar los modos naturales de vibración de la estructura modelada en 3 dimensiones y los respectivos periodos de vibración. Para la aplicación del método de análisis modal, se recurrirá a una herramienta de análisis integral que tenga una capacidad total de modelar geometrías, cargas, rigideces y resultados en 3 dimensiones. (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica, 2020c, pág. 3.1)

2.2.2.1. Espectro de respuesta sísmica

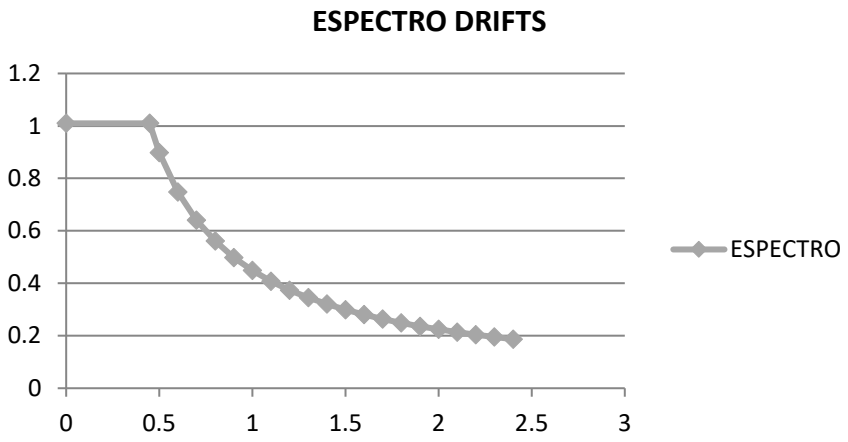
Utilizando la ordenada espectral de periodo corto del sismo extremo Scr y el periodo de transición Ts se construye el espectro de respuesta sísmica. Este espectro no está calibrado y se ingresará en el programa para fines de chequeo de derivas.

Tabla XII. **Espectro de respuesta sísmica sin calibrar**

Espectro de respuesta - DRIFTS	
Periodo	**Aceleración**
0	1.0098
0.4488	**1.0098**
0.5	0.8976
0.6	0.7480
0.7	0.6411
0.8	0.5610
0.9	0.4987
1	0.4488
1.1	0.4080
1.2	0.3740
1.3	0.3452
1.4	0.3206
1.5	0.2992
1.6	0.2805
1.7	0.2640
1.8	0.2493
1.9	0.2362
2	0.2244
2.1	0.2137
2.2	0.2040
2.3	0.1951
2.4	0.1870

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 26. **Gráfica de espectro de respuesta sísmica sin calibrar**



Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

2.2.2.2. Espectro de respuesta sísmica calibrado a nivel de diseño

El espectro de respuesta calibrado es el que se utilizará para el diseño estructural de la edificación y se obtiene dividiendo la aceleración dentro del factor de reducción R.

Tabla XIII. **Espectro de respuesta sísmica calibrado a nivel de diseño**

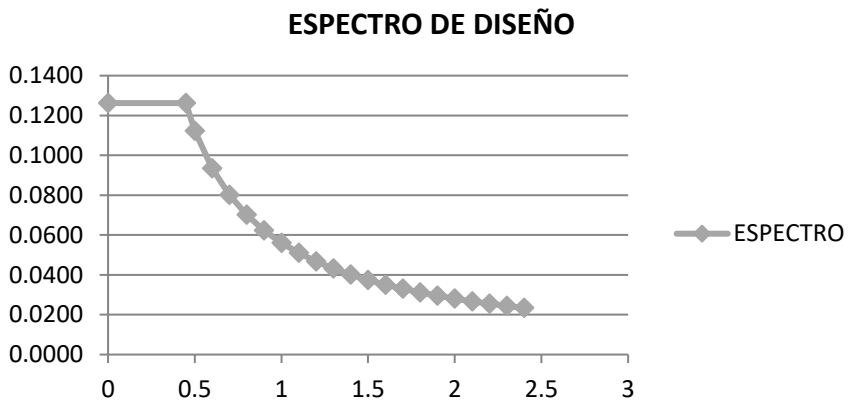
Espectro de diseño calibrado	
Periodo	**Aceleración**
0	0.1262
0.45	**0.1262**
0.5	0.1122
0.6	0.0935
0.7	0.0801

Continuación de la tabla XIII.

0.8	0.0701
0.9	0.0623
1	0.0561
1.1	0.0510
1.2	0.0468
1.3	0.0432
1.4	0.0401
1.5	0.0374
1.6	0.0351
1.7	0.0330
1.8	0.0312
1.9	0.0295
2	0.0281
2.1	0.0267
2.2	0.0255
2.3	0.0244
2.4	0.0234

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

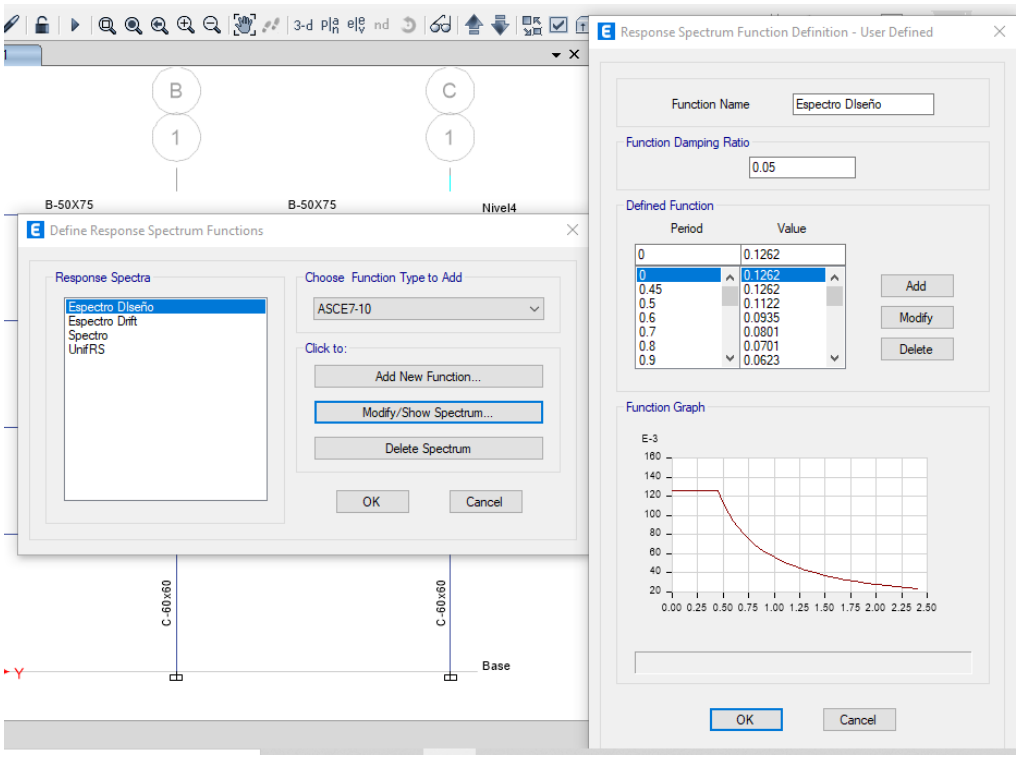
Figura 27. **Gráfica de espectro de respuesta sísmica calibrado a nivel de diseño**



Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Calculados los espectros de respuesta sísmica, se procederá a ingresar los datos en el programa ingresando en *define, functions, response spectrum, add new function* con la opción *from file.*

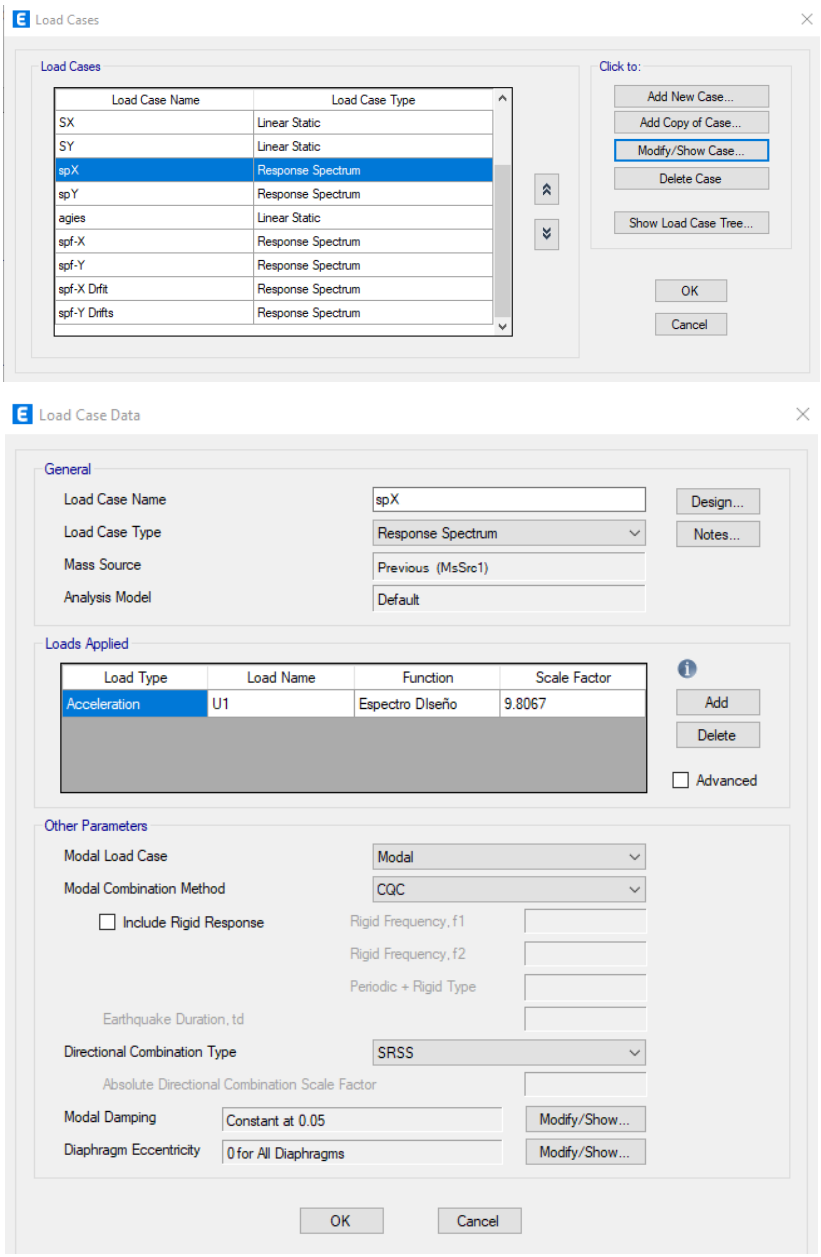
Figura 28. **Ingreso de espectros de respuesta en ETABS**



Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS 19.1.0.

El siguiente paso será crear los casos de carga sísmica utilizando el espectro de respuesta de diseño. Para ello se ingresa a *define, loas cases, add new case*. En la opción de *loas case type* se selecciona la opción *response spectrum* y en la opción *fuction,* se elige el espectro de diseño ingresado.

Figura 29. **Ingreso de caso de carga sísmica de diseño en ETABS**



Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS 19.1.0.

2.2.2.3. Cortante basal

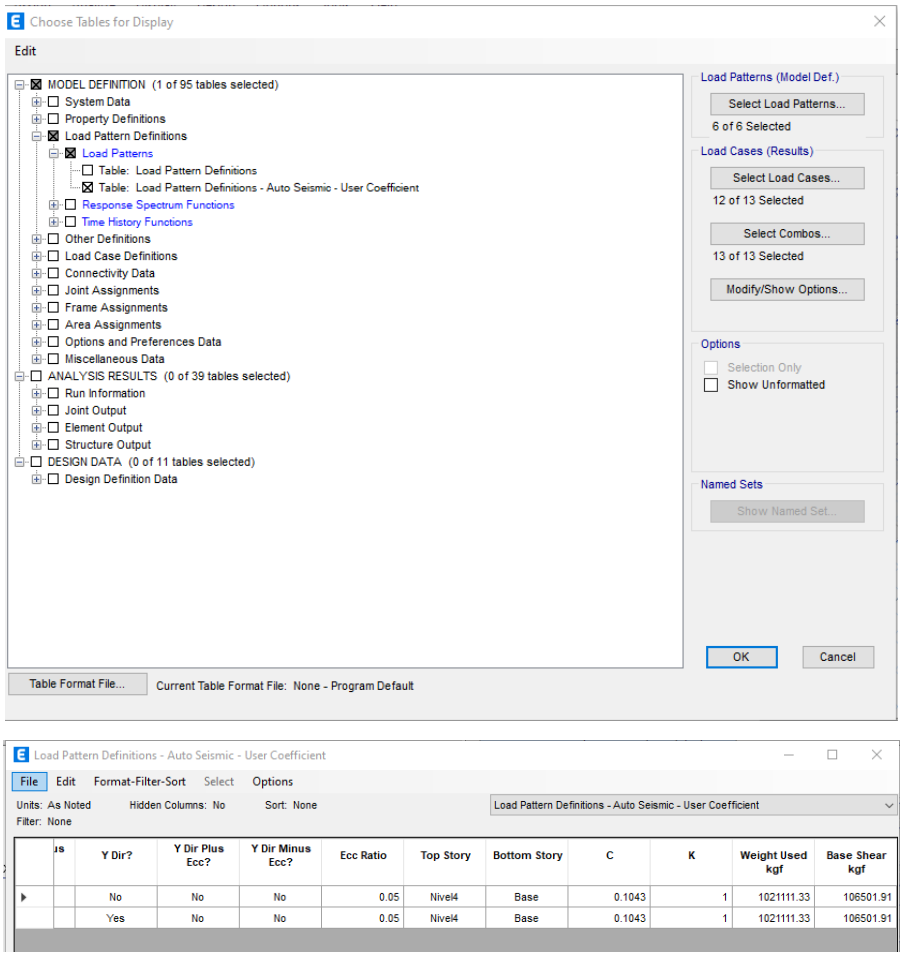
"El total de las fuerzas sísmicas equivalentes que actúan sobre la edificación, en cada dirección de análisis; se obtendrá con la expresión" (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica, 2020c, pág. 2.1).

$$VB = Cs*Ws \qquad (16)$$

Donde:
Cs = coeficiente sísmico calculado en la sección 2.2.1.7.
Ws = peso total del edificio

Para obtener el peso total del edificio se debe correr el análisis en el programa y se utiliza la opción *display, show tables* para obtener el dato descrito en la figura 30.

Figura 30. **Corte basal en ETABS**



	Y Dir?	Y Dir Plus Ecc?	Y Dir Minus Ecc?	Ecc Ratio	Top Story	Bottom Story	C	K	Weight Used kgf	Base Shear kgf
	No	No	No	0.05	Nivel4	Base	0.1043	1	1021111.33	106501.91
	Yes	No	No	0.05	Nivel4	Base	0.1043	1	1021111.33	106501.91

Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS 19.1.0.

Como se puede observar, al ingresar el coeficiente sísmico en los casos de carga el programa ya proporciona el corte basal calculado, siendo este:

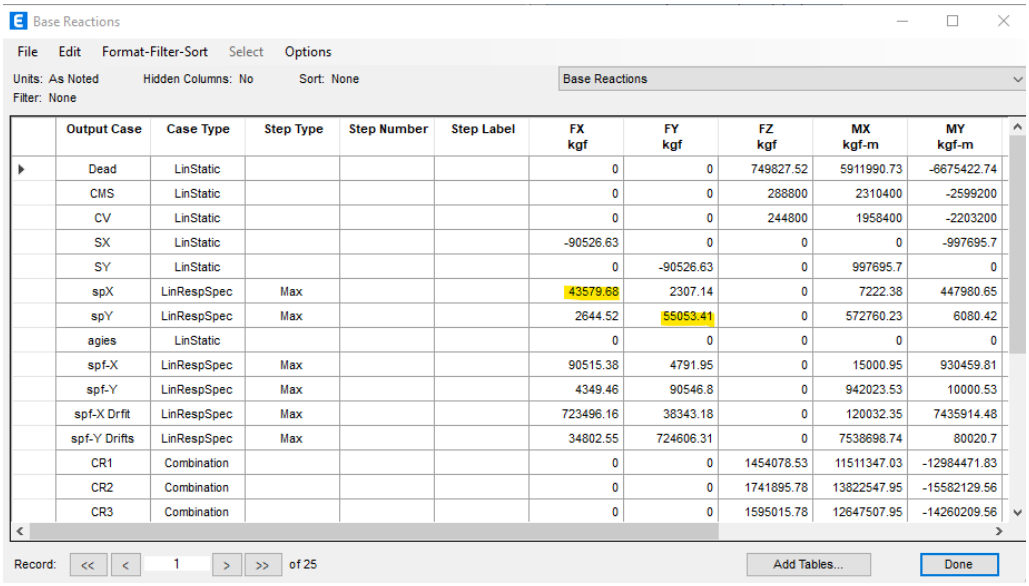
VB= 106,501.91 Kg

2.2.2.4. Calibración de análisis modal

“Los cortantes basales estáticos de la iteración inicial en cada dirección ortogonal horizontal V1X y V1Y no deberán utilizarse para diseño sin antes someterlos a un proceso de calibración” (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica, 2020c, pág. 3.4).

Los datos de calibración serán los cortantes dinámicos VEX y VEY obtenidos en el programa ingresando a la opción *display, show tables, base reactions.*

Figura 31. **Obtención de cortantes estáticos en ETABS**



Base Reactions

File Edit Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted Hidden Columns: No Sort: None Base Reactions

Filter: None

Output Case	Case Type	Step Type	Step Number	Step Label	FX kgf	FY kgf	FZ kgf	MX kgf-m	MY kgf-m
Dead	LinStatic				0	0	749827.52	5911990.73	-6675422.74
CMS	LinStatic				0	0	288800	2310400	-2599200
CV	LinStatic				0	0	244800	1958400	-2203200
SX	LinStatic				-90526.63	0	0	0	-997695.7
SY	LinStatic				0	-90526.63	0	997695.7	0
spX	LinRespSpec	Max			43579.68	2307.14	0	7222.38	447980.65
spY	LinRespSpec	Max			2644.52	55053.41	0	572760.23	6080.42
agies	LinStatic				0	0	0	0	0
spf-X	LinRespSpec	Max			90515.38	4791.95	0	15000.95	930459.81
spf-Y	LinRespSpec	Max			4349.46	90546.8	0	942023.53	10000.53
spf-X Drfit	LinRespSpec	Max			723496.16	38343.18	0	120032.35	7435914.48
spf-Y Drifts	LinRespSpec	Max			34802.55	724606.31	0	7538698.74	80020.7
CR1	Combination				0	0	1454078.53	11511347.03	-12984471.83
CR2	Combination				0	0	1741895.78	13822547.95	-15582129.56
CR3	Combination				0	0	1595015.78	12647507.95	-14260209.56

Record: << < 1 > >> of 25 Add Tables... Done

Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS 19.1.0.

Por tanto, los cortantes basales dinámicos de diseño serán los siguientes:

$$VDX = \max(1.00VEX, V1X) \qquad (17)$$

$$VDX = 90\,526{,}63 \text{ Kg}$$

$$VDY = \max(1.00VEY, V1Y) \qquad (18)$$

$$VDY = 90\,526{,}63 \text{ Kg}$$

Esto debido a que los cortantes estáticos son mayores.

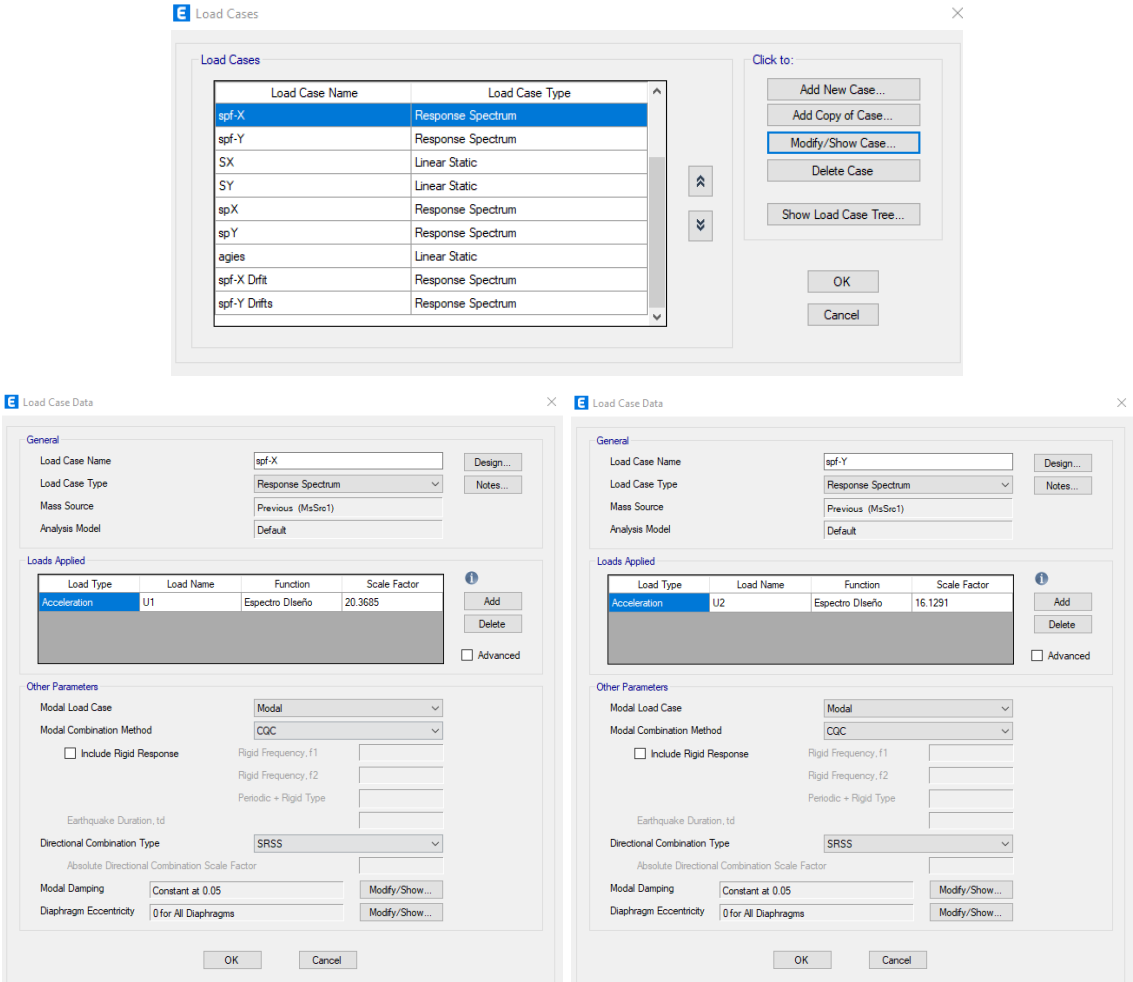
“Las fuerzas resultantes del análisis modal se multiplicarán por los factores VDX/V1X y VDY/V1Y y se utilizarán para integrar las solicitaciones sísmicas de diseño” (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica, 2020c, pág. 3.5).

$$VDX/V1X = 90\,526{,}63 / 43\,579{,}68 = 2{,}0777 \qquad (19)$$

$$VDY/V1Y = 90\,526{,}63 / 55\,053{,}41 = 1{,}6447 \qquad (20)$$

Calculados los factores se procede a ingresar estos datos al programa. Para ello se crean nuevos casos de carga en la opción *define, load cases, add new case.*

Figura 32. **Casos de carga de diseño en ETABS**



Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS 19.1.0.

Los factores de corrección se multiplicaron por la fuerza de gravedad de 9,8067 m/s^2 y se ingresan en la opción de *scale factor.*

Considerando que el análisis modal definirá modos de vibración, estos deberán ser combinados en una respuesta única que corresponderá con la respuesta sísmica de la estructura. La combinación de los diferentes

modos de vibración es lo que se conoce como combinación modal. El método CQC (Complete Quadratic Combination) considera la interacción de los diferentes modos, aunque a diferencia del método ABS reduce el efecto combinado por un coeficiente de correlación modal (ε). (Linked in, 2022, pág. 1)

Realizado este proceso se procede a volver a correr el análisis, para para comenzar con el proceso de revisión de los elementos estructurales existentes. El edificio en análisis no tiene elementos estructurales que necesiten un reforzamiento mayor, sin embargo, se debe de rectificar las derivas laterales y el periodo fundamental de la estructura debido a que no cumplen con lo especificado en Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica (AGIES), 2020b, lo que podría ocasionar un desempeño inadecuado de la estructura.

2.2.2.5. Periodo fundamental analítico de la estructura

Se deben de chequear los periodos analíticos obtenidos por el programa para determinar que se cumplan los límites indicados en la sección 2.2.1.5 de este documento. Para ellos se selecciona la opción *display* en el programa, luego *show tables, analysis results, structure output, modal information, modal periods.*

Figura 33. **Periodos fundamentales analíticos en ETABS**

Modal Periods And Frequencies

File Edit Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted Hidden Columns: No Sort: None Modal Periods And Frequencies

Filter: None

Case	Mode	Period sec	Frequency cyc/sec	CircFreq rad/sec	Eigenvalue rad²/sec²
Modal	1	1.198	0.835	5.2451	27.5115
Modal	2	0.948	1.055	6.6309	43.969
Modal	3	0.868	1.152	7.2376	52.3831
Modal	4	0.333	3.007	18.8925	356.9256
Modal	5	0.274	3.646	22.9057	524.6723
Modal	6	0.151	6.606	41.5073	1722.8573

Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS 19.1.0.

Como se observa en la figura 33, el periodo analítico de la estructura es 1.198 segundos, el cual es mayor al periodo fundamental máximo permitido por la Norma NSE 3 de AGIES.

$Tf \leq 0.7528$ seg

$1.198 \geq 0.7528$ seg

2.2.2.6. Derivas laterales tolerables

En las normas de seguridad estructural de AGIES se consideran dos etapas progresivas de desplazamientos sísmicos laterales. La primera etapa es el desplazamiento horizontal elástico, al límite de cedencia de la estructura, causado por el sismo de diseño dividido por el factor R. Se le denomina desplazamiento horizontal al límite de cedencia. La segunda etapa es el desplazamiento último, que representa el desplazamiento horizontal de la estructura después de haber sobrepasado al rango

postelástico. (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica, 2020c, págs. 4.4-4.5)

Para control de deformaciones horizontales no interesan directamente los desplazamientos absolutos sino las derivas. Las derivas últimas máximas serán los referentes para establecer las derivas laterales tolerables conforme a la tabla XIV.

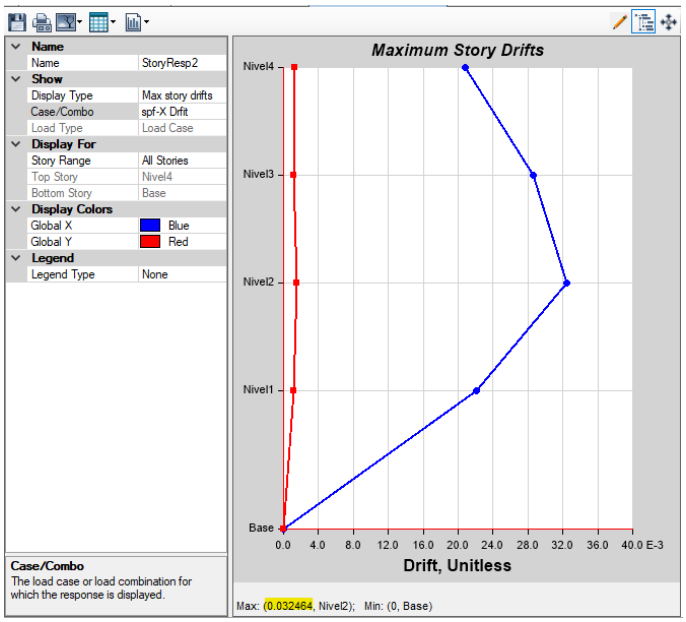
Tabla XIV. **Derivas máximas tolerables**

Estructura	**Clasificación de obra**		
	Categoría II	**Categoría III**	**Categoría IV**
Edificaciones NSE 7.4	0.007hp	0.007hp	0.007hp
Edificaciones NS3 7.9	0.010hp	0.010hp	0.010hp
Edificaciones en general	0.020hp	0.020hp	0.015hp
hp es la altura del piso para el que se calcula la deriva. [1]			

Fuente: elaboración propia, con información tomada de Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica (AGIES), 2020c, pág. 4.5

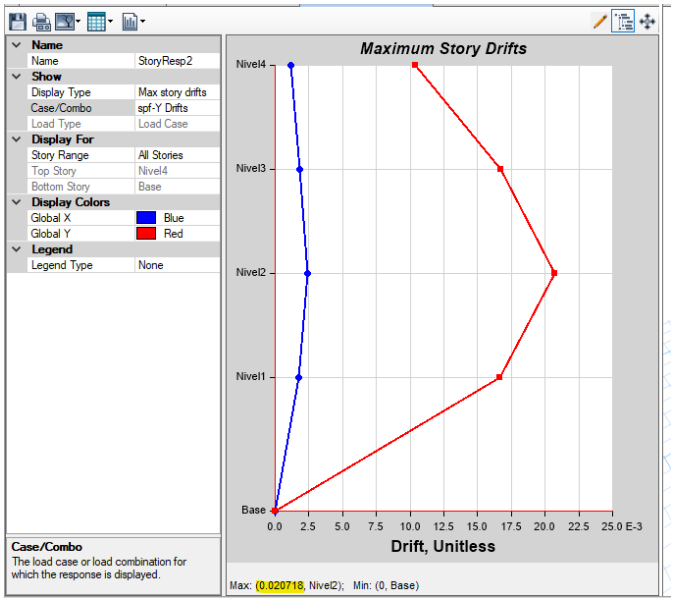
Para chequear las derivas del edificio en análisis, se elige la opción *display* en el programa, luego se selecciona *story response plost* y aparece una ventana en donde hay varias opciones. En dicha ventana se seleccionará la opción de *max story drifts* y seleccionar un caso de carga sísmico nuevo para cada dirección, utilizando el espectro de respuesta sin calibrar.

Figura 34. **Derivas del edificio existente-sismo en X**



Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS 19.1.0.

Figura 35. **Derivas del edificio existente-sismo en y**



Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS 19.1.0.

La deriva máxima tolerable para edificaciones en general y categoría II es de 0.020, con base en lo especificado en la tabla XIV. Como se puede observar en las figuras 34 y 35, las derivas del edificio en cada dirección son mayores a las derivas máximas tolerables del reglamento.

Deriva en X = 0.032464 > 0.020
Deriva en Y = 0.020718 > 0.020

Para reducir los desplazamientos y el periodo fundamental de la estructura es necesario mejorar la rigidez del edificio, incrementando la sección de las columnas estructurales, sin embargo, en este caso esta opción resulta poco factible, debido a que para realizar esto sería necesario hacer un reforzamiento de las columnas existentes utilizando un encamisado o incremento de espesores alrededor de la columna.

Estos sistemas de reforzamiento no solo son costosos, sino que representan un trabajo prolongado y destructivo para un edificio existente que probablemente está en uso. Por otro lado, la incorporación de los disipadores sísmicos SLB en el edificio en análisis puede resultar una opción más factible para mejorar la ductilidad de la estructura. En el capítulo siguiente se detalla el procedimiento utilizado para incorporar los disipadores en el análisis.

3. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE EDIFICIO EXISTENTE DE CONCRETO REFORZADO UTILIZANDO DISIPADORES SÍSMICOS SLB (SHEAR LINK BOZZO)

3.1. Criterio para la incorporación de disipadores SLB

El edificio en análisis con sistema estructural E1 de marcos rígidos de hormigón reforzado tiene muros de mampostería confinada que sirven para división de los espacios internos de la edificación. Los muros forman parte de la estructura secundaria al estar desacoplados en sus lados y por la parte superior del sistema estructural principal.

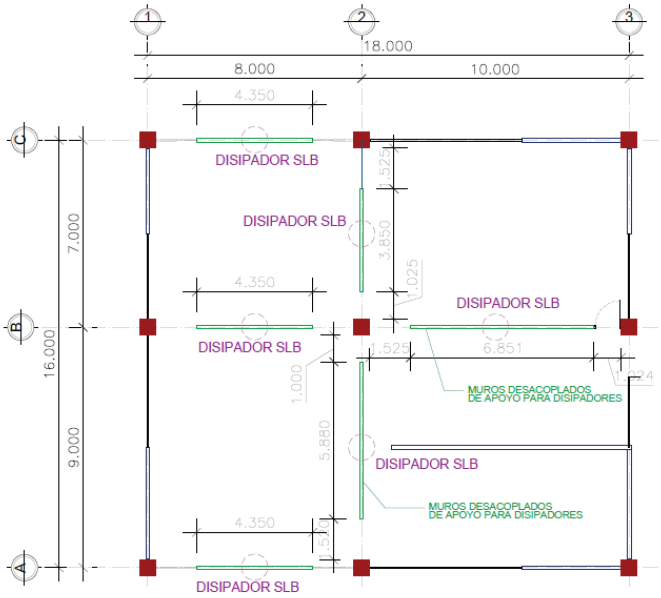
Para incorporar los disipadores SLB al edificio, se pretende utilizar los muros desacoplados como elementos de apoyo y de transmisión de carga de los dispositivos.

> Los muros desacoplados son paneles disipativos que no transmiten esfuerzos axiales hacia los elementos con los que conecta. Los muros de concreto armado sirven como soporte base de los disipadores SLB, su rigidez lateral y su resistencia frente a fuerzas cortantes producidos por sismos, hacen que sea un complemento perfecto para el buen desempeño del disipador, además limitan la fuerza y proporcionan ductilidad. (Enciso Navarro, F., 2019, pág. 53)

Los muros desacoplados, no necesariamente existen en todos los pisos, ni nacen en las cimentaciones, permiten de forma más segura al diseño clásico emplear muros discontinuos dotando de rigidez y ductilidad al sistema. Lo anterior genera que los muros desacoplados pueden ir en cualquier piso que sea necesario, además estos muros, no necesariamente deben estar dispuestos en una misma línea vertical, la ubicación de cada muro es independiente, siempre y cuando se controlen factores de irregularidad. (Enciso Navarro, F., 2019, pág. 56).

A continuación, se presenta la figura 37 la ubicación de los muros desacoplados existentes y la propuesta de incorporación de los disipadores sísmicos SLB.

Figura 36. **Propuesta de ubicación de disipadores SLB**



Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD 2020.

Los muros de mampostería, en su parte superior están separados 2.5 cm con las vigas del edificio, por esta razón será necesario considerar qué parte de dichos muros se deberán demoler para la incorporación de los disipadores. En ciertos casos será necesario construir una solera de remate de hormigón reforzado para el apoyo del dispositivo y mochetas de hormigón reforzado en los lados del muro.

Figura 37. **Muro desacoplado previo a la incorporación de disipadores**

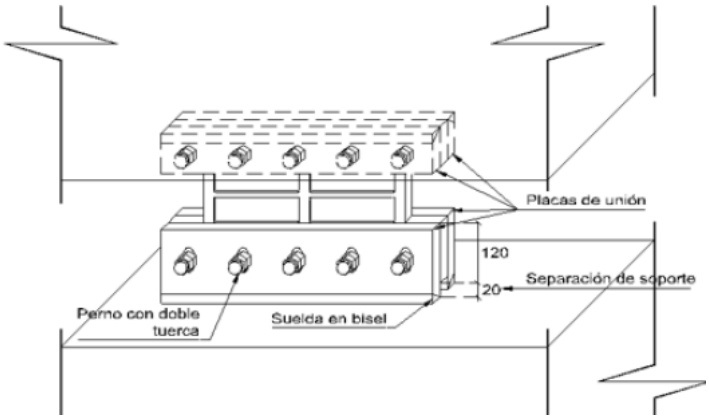
Fuente: Bozzo, L. (2021). *Dossier-disipadores SLB para diseño sismo resistente*. Consultado el 5 de junio de 2022. Recuperado de https://luisbozzo.com/wp-content/uploads/2018/05/Dossier_disipadores_2017_V6.pdf.

En la la figura 37, se observa que los muros desacoplados, también pueden ser de concreto reforzado.

Los disipadores SLB se ubican en la parte superior de cada muro. En cuanto al conjunto muro desacoplado con disipador SLB, estos deben ubicarse por debajo de los pórticos, solo interesa que el disipador conecte por debajo con los muros y por la parte superior con la viga, esto con la

finalidad de generar desplazamientos relativos que inicien el trabajo de los disipadores. (Enciso Navarro, F., 2019, pág. 58)

Figura 38. **Disipador SLB en muro desacoplado**



Fuente: Enciso Navarro, F. (2019). *Análisis comparativo del diseño sísmico de una estructura con muros continuos y con muros desacoplados incorporando disipadores SLB en la ciudad de Huncayo*. pág. 58.

Se observa que la parte superior del disipador SLB se une a la viga superior y a la parte inferior sobre el muro desacoplado, el disipador SLB no llega al borde del soporte, sino que existe una separación de 2cm el cual le permite desplazarse verticalmente, el desplazamiento vertical esperado es menor a la cantidad indicada, de manera que el disipador no topará al muro desacoplado y en consecuencia la fuerza axial será cero.

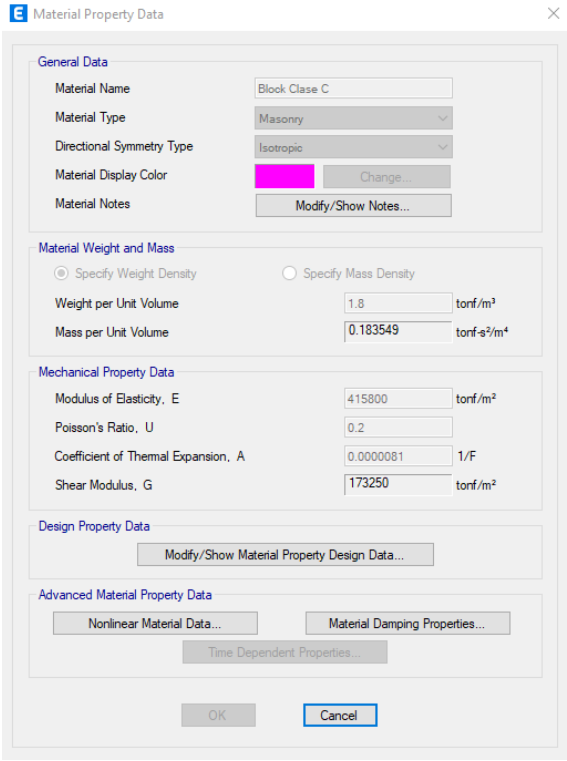
3.2. Modelado e incorporación de disipadores SLB en edificio existente

Se procede a modelar los elementos de soporte y los disipadores SLB en el programa.

3.2.1. Modelado de muros desacoplados

Previo a la incorporación de los dispositivos SLB es necesario modelar los muros desacoplados dentro del programa. Para ello es necesario definir el material del muro, que será mampostería de concreto clase C, cuyas características están definidas por Comisión Guatemalteca de Normas, 2022. En la pestaña *define* se selecciona material *property* y allí se crea el material a utilizar en el muro.

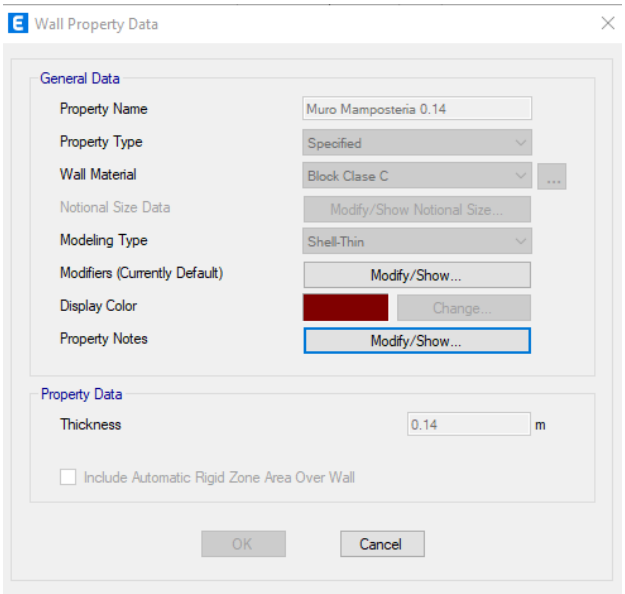
Figura 39. **Material muro desacoplado en ETABS**



Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS 19.1.0.

Definido el material, se procede a definir el muro ingresando en *define, section properties, wall sections* y allí se crea un nuevo muro.

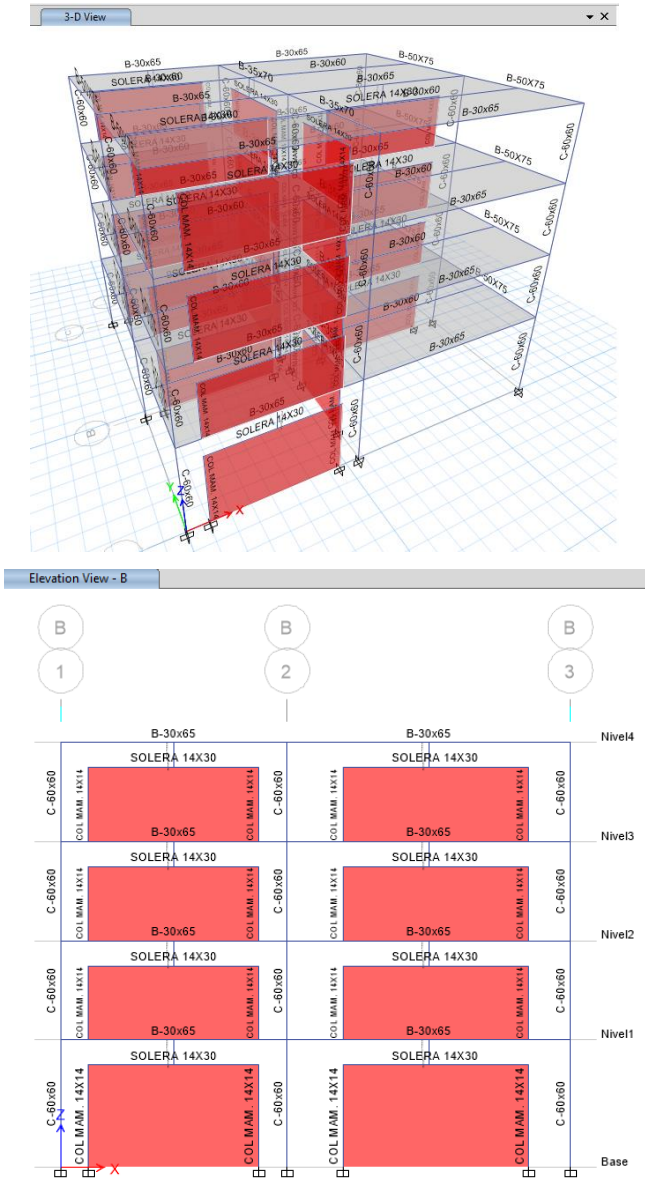
Figura 40. **Creación de muro desacoplado en ETABS**



Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS 19.1.0.

Definido el material y la sección del muro se procede a modelar los elementos en el programa con base en el criterio definido en la figura 41.

Figura 41. **Modelado de muros desacoplados en ETABS**



Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS 19.1.0.

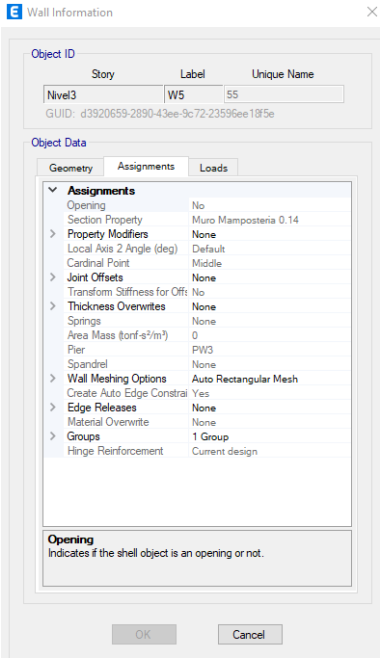
Se puede notar que se incorporaron columnas en los extremos en los muros y una solera de remate y de apoyo para el disipador en el extremo superior.

Adicional a esto es importante considerar que se realizaron los siguientes ajustes dentro el programa al momento de estar modelando los muros.

- Se cambiaron las conexiones de los muros del nivel 1 de articuladas a empotradas, debido a que estos muros están cargados sobre una cimentación en este nivel.
- Se eliminaron las cargas distribuidas anteriormente consideradas para los muros existente y se reemplazaron por los muros a modelar.
- Se considera crear un mallado de 0.5 m x 0.5 m en la opción de *wall meshing option* y se selecciona la opción autorectangular mesh. Esto sirve para discretizar un análisis de elementos finitos para la revisión del muro.

La revisión y análisis de los muros desacoplados se realiza fuera del programa, utilizando la fuerza axial horizontal que genera el disipador sobre el muro. Al no estar anclados a la estructura principal, los muros no aportan rigidez al sistema y únicamente sirven de apoyo al disipador, además de trasladar masa sísmica al edificio. Es importante mencionar que si los muros formaran parte del sistema sismorresistente debería de analizarse el elemento utilizando una sección con un espesor transformado para representar de manera correcta la rigidez que aportaría al sistema; sin embargo, no es la situación del caso de estudio.

Figura 42. **Información del muro modelado en ETABS**



Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS 19.1.0.

3.2.2. Modelado de disipadores sísmicos SLB

Previo al inicio del modelado, se definirán los dispositivos disipadores mediante un elemento *frame*. Para ello se ingresa en la pestaña *define*, luego *section properties, frame sections, add new property* y se selecciona un elemento tipo *I/wide flange section*. Definida esta sección, con características semejantes a la sección del disipador, se ingresan las dimensiones y material de un disipador inicial, el cual puede elegirse aleatoriamente de la tabla de parámetros de diseño para disipadores SLB.

Tabla XV. **Parámetros para diseño de disipadores SLB**

PARÁMETROS DE DISEÑO DE DISIPADORES SLB (SHEAR LINK BOZZO)								
Tipo	**espesor del disipador (mm)**	**espesor de ventana (mm)**	**rigidizador lateral (mm)**	**K1 (kN/cm)**	**K2 (kN/cm)**	**Fy (kN)**	**Fmáx (kN)**	**n (yielding exponent)**
SLB2 6_2	19	2	13	724	14.5	99.0	126.4	1
SLB2 8_2	19	2	15	980	19.6	129.0	165.4	1
SLB2 8_3	**19**	**3**	**15**	**1120**	**22.4**	**135.0**	**177.4**	**1**
SLB2 8_4	**19**	**4**	**15**	**1340**	**26.8**	**139.0**	**189.9**	**1**
SLB2 8_5	**19**	**5**	**15**	**1420**	**28.4**	**148.0**	**201.8**	**1**
SLB2 8_6	**19**	**6**	**15**	**1660**	**33.2**	**150.0**	**213.6**	**1**
SLB2 10_2	19	2	20	1300	26.0	177.0	225.5	1
SLB2 10_3	19	3	20	1600	32.0	183.0	243.1	1
SLB2 10_4	**19**	**4**	**20**	**1840**	**36.8**	**190.0**	**259.7**	**1**
SLB2 10_5	**19**	**5**	**20**	**2080**	**41.6**	**197.0**	**276.1**	**1**
SLB2 10_6	**19**	**6**	**20**	**2320**	**46.4**	**203.0**	**291.8**	**1**
SLB2 15_2	19	2	20	1800	36.0	194.0	262.3	1
SLB2 15_3	19	3	20	2320	46.4	208.0	296.6	1
SLB2 15_4	19	4	20	2800	56.0	223.0	330.2	1
SLB2 15_5	**19**	**5**	**20**	**3200**	**64.0**	**240.0**	**363.7**	**1**
SLB2 15_6	**19**	**6**	**20**	**3600**	**72.0**	**258.0**	**396.4**	**1**
SLB2 20_2	19	2	25	2760	55.2	268.0	373.2	1
SLB2 20_3	19	3	25	3400	68.0	292.0	422.9	1
SLB2 20_4	19	4	25	4000	80.0	317.0	470.7	1
SLB2 20_5	19	5	25	4600	92.0	340.0	517.9	1
SLB2 20_6	**19**	**6**	**25**	**5200**	**104.0**	**363.0**	**563.6**	**1**
SLB2 25_2	19	2	30	3360	67.2	324.0	451.3	1
SLB2 25_3	19	3	30	4280	85.6	352.0	516.9	1
SLB2 25_4	19	4	30	5120	102.4	383.0	580.3	1
SLB2 25_5	19	5	30	5880	117.6	416.0	642.5	1
SLB2 25_6	19	6	30	6720	134.4	444.0	703.1	1
SLB2 30_2	19	2	30	3760	75.2	339.0	482.3	1
SLB2 30_3	19	3	30	4960	99.2	376.0	566.2	1
SLB2 30_4	19	4	30	5560	111.2	435.0	648.0	1
SLB2 30_5	19	5	30	7040	140.8	456.0	728.0	1
SLB2 30_6	19	6	30	7960	159.2	498.0	806.7	1
SLB2 40_2	19	2	30	4720	94.4	371.0	552.5	1
SLB2 40_3	19	3	30	6360	127.2	427.0	672.1	1
SLB2 40_4	19	4	30	7760	155.2	488.0	788.9	1
SLB2 40_5	19	5	30	9200	184.0	546.0	903.2	1
SLB2 40_6	19	6	30	10560	211.2	607.0	1017.5	1
SLB2 50_2	19	2	30	5600	112.0	429.0	644.1	1

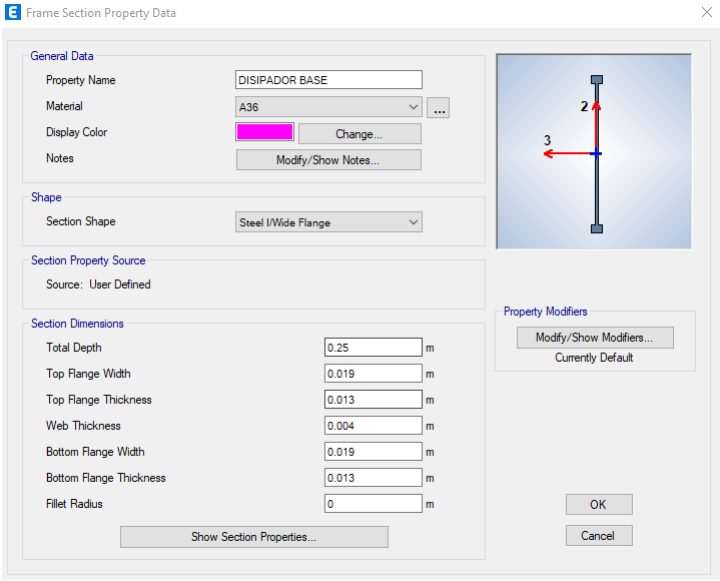
Continuación de la tabla XV.

SLB2 50_3	19	3	30	7800	156.0	496.0	798.6	1
SLB2 50_4	19	4	30	9680	193.6	574.0	950.0	1
SLB2 50_5	19	5	30	11440	228.8	655.0	1099.3	1
SLB2 50_6	19	6	30	13120	262.4	736.0	1246.8	1
Dispositivos en negrita plastifican, primero por flexión antes que por cortante								

Fuente: elaboración propia, con información tomada de Bozzo, L. (2022), pág. 1.

Se toma como referencia la sección del disipador SLB2 15_4, que tiene un ancho de 25 mm, un espesor de 19 mm y un espesor de ventana de 4 mm, el material con el que se fabrica el disipador es acero A36 (36,000 psi).

Figura 43. **Propiedad inicial de disipador**

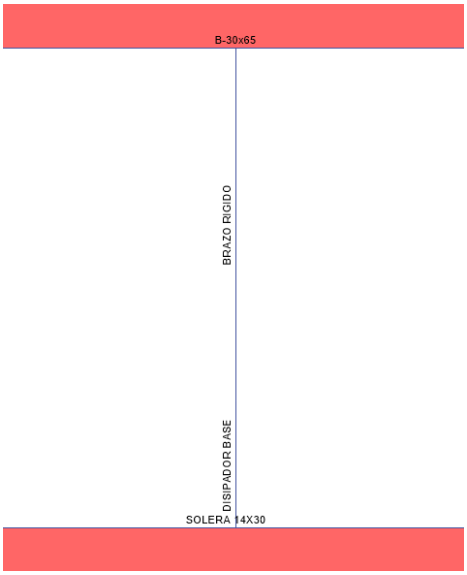


Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS 19.1.0.

Definido esto, se modela el elemento *frame* en el programa, en la posición especificada en la figura 41.

Se debe considerar que para ello se modela un elemento rígido que va de la viga al disipador, que reemplaza el peralte de la viga, y luego se modela el disipador que va del brazo rígido al muro desacoplado.

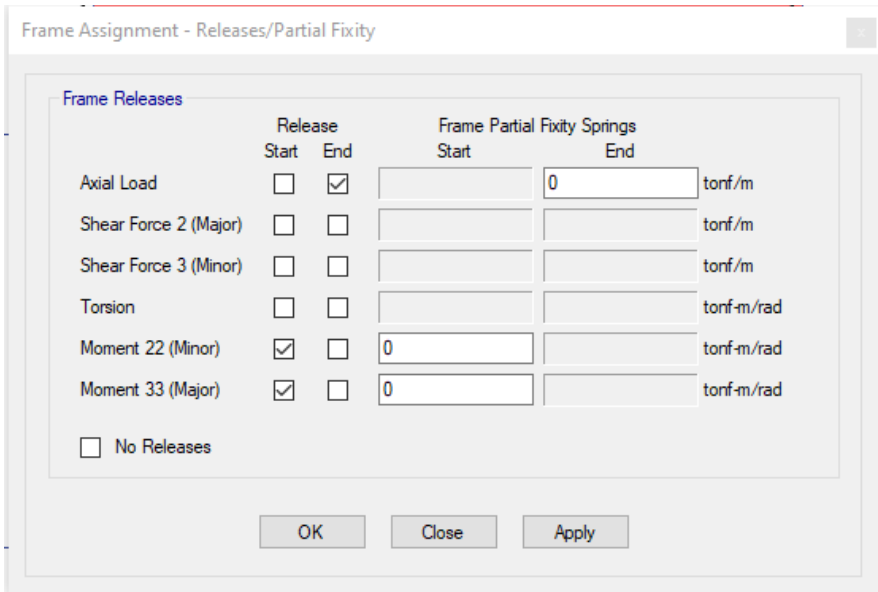
Figura 44. **Modelado de disipador SLB en ETABS**



Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS 19.1.0.

Se debe de recordar que el disipador tiene una base articulada al muro por medio de una placa con pernos y no recibe carga gravitacional en la parte superior debido a que está separado de la viga utilizando un mecanismo tipo diente. Por esta razón, se debe crear una conexión en la base sin la presencia de momento flector y eliminar la presencia de la carga axial en la parte superior del disipador. Para ello se selecciona el menú *assign*, luego seleccionar la opción *frame* y, por último, se entra a la opción *releases/partial fixity* en donde se cambian las conexiones en los extremos del disipador.

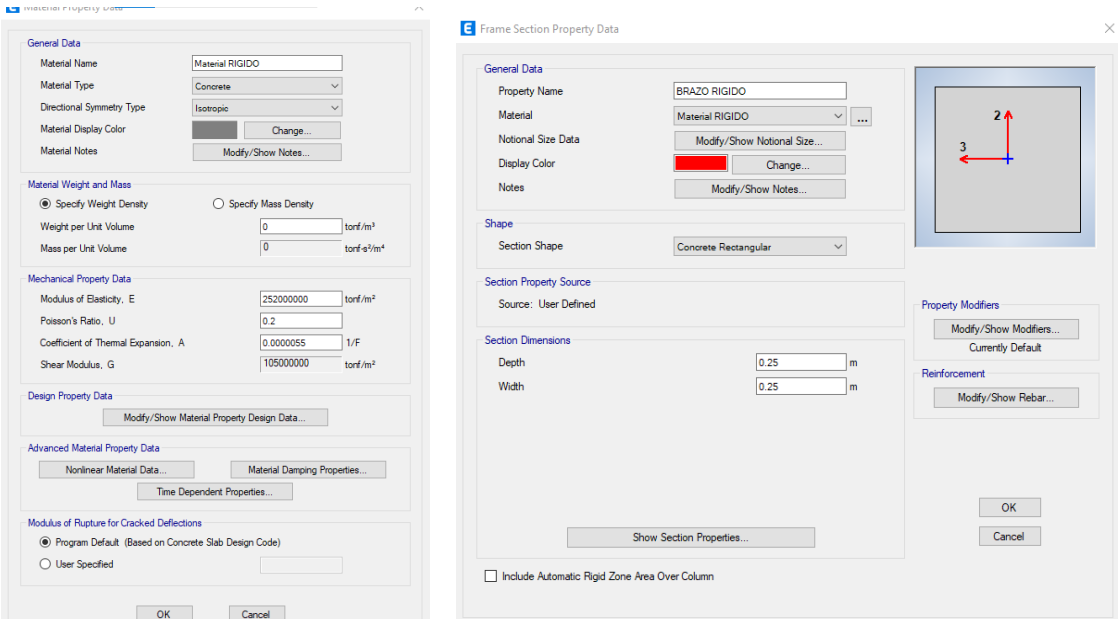
Figura 45. **Configuración de conexiones de disipador en ETABS**



Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS 19.1.0.

Para crear el brazo rígido se debe de crear una nueva sección cuadrada y se le asigna un material con un módulo de elasticidad muy alto.

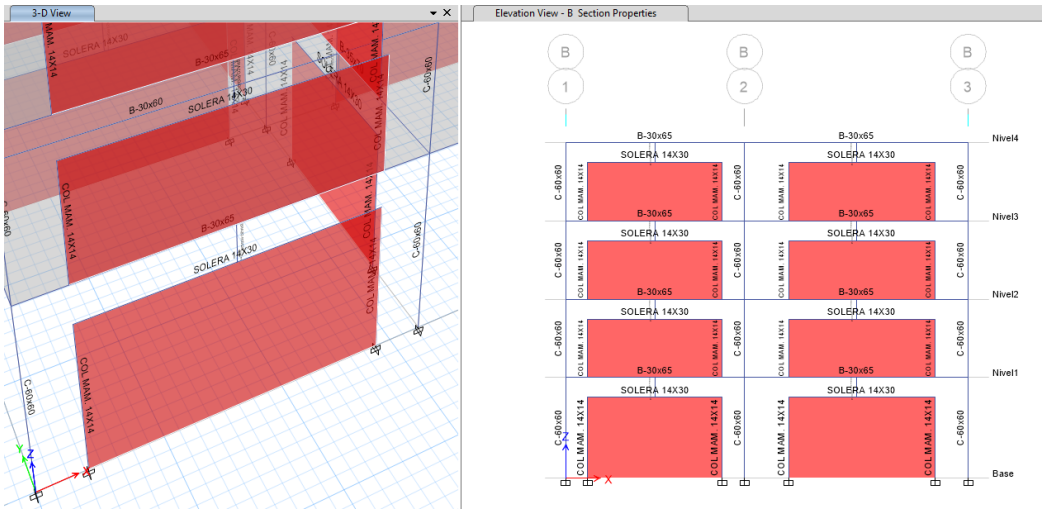
Figura 46. **Configuración de sección de brazo rígido en ETABS**



Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS 19.1.0.

De esta forma se procede a modelar todos los disipadores de energía SLB propuestos para el reforzamiento del edificio.

Figura 47. **Modelado de disipadores SLB en todo el edificio con ETABS**

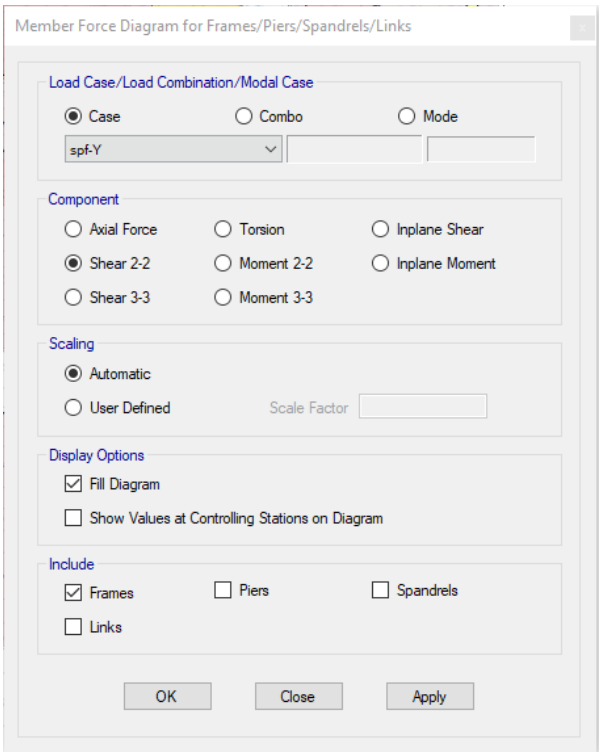


Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS 19.1.0.

Terminado el modelado, se procede a correr el análisis en el modelo para obtener las fuerzas cortantes a las que estarán sometidos los disipadores.

Una vez el programa haya finalizado el análisis, seleccionar el menú *display*, luego *force/stress diagrams* y luego se elige la opción *frame/link forces*.

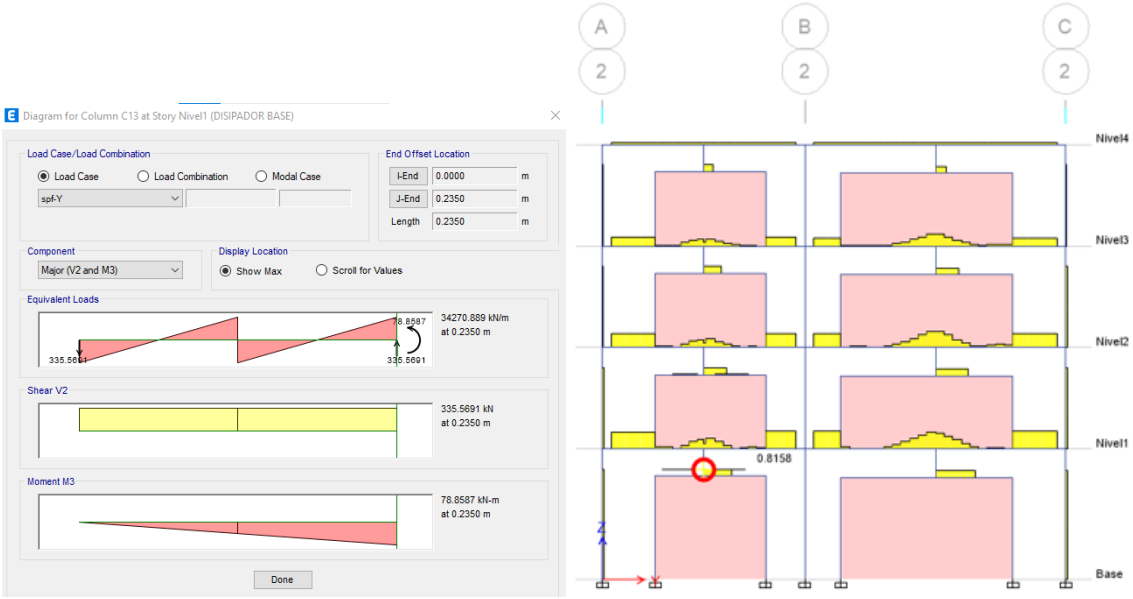
Figura 48. **Visualización de fuerza cortante en disipadores**



Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS 19.1.0.

Dentro de esta opción se selecciona el caso de carga de sismo de diseño y el componente de fuerza cortante en la dirección del análisis. Luego el programa permite la opción de visualizar la fuerza cortante que está recibiendo el disipador

Figura 49. **Diagrama de fuerza cortante de disipadores SLB**



Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS 19.1.0.

Utilizando esta herramienta se determina la demanda de cortante que recibe cada disipador de energía y utilizando la tabla XV se selecciona el dispositivo Shear Link Bozzo (SLB) de acuerdo con su demanda cortante (Fy-Fuerza de plastificación) para cada uno de los puntos.

A continuación, se presenta la tabla XVI en donde se visualiza la demanda de cortante de cada dispositivo y el disipador elegido para cada uno de ellos.

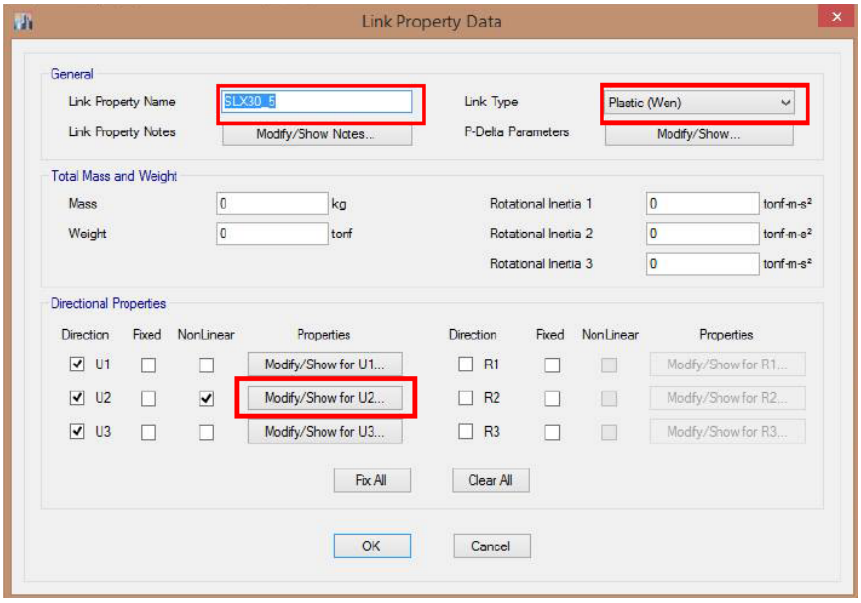
Tabla XVI. **Selección de disipadores de energía SLB para edificio**

Ubicado sobre eje	Nivel	Ubicado entre ejes	Fuerza cortante ETABS(KN)	Tipo disipador SLB	FY(KN)
2	Nivel 1	A-B	335.57	SLB2 20_5	340
2	Nivel 1	B-C	477.42	SLB2 30_6	498
2	Nivel 2	A-B	271.86	SLB2 20_3	292
2	Nivel 2	B-C	387.39	SLB2 30_4	435
2	Nivel 3	A-B	215.45	SLB2 15_4	223
2	Nivel 3	B-C	281.36	SLB2 20_3	292
2	Nivel 4	A-B	113.48	SLB2 8_2	129
2	Nivel 4	B-C	134.66	SLB2 8_3	135
A	Nivel 1	1-2	493.24	SLB2 30_6	498
A	Nivel 2	1-2	448.25	SLB2 30_5	456
A	Nivel 3	1-2	325.3	SLB2 25_3	352
A	Nivel 4	1-2	147.43	SLB2 10_2	177
B	Nivel 1	1-2	457.16	SLB2 30_6	498
B	Nivel 1	2-3	448.77	SLB2 30_5	456
B	Nivel 2	1-2	412.82	SLB2 30_4	435
B	Nivel 2	2-3	340.14	SLB2 25_3	352
B	Nivel 3	1-2	304.74	SLB2 20_4	317
B	Nivel 3	2-3	265.1	SLB2 20_2	268
B	Nivel 4	1-2	141.64	SLB2 10_2	177
B	Nivel 4	2-3	125.33	SLB2 8_2	129
C	Nivel 1	1-2	421.72	SLB2 25_6	444
C	Nivel 2	1-2	379.81	SLB2 25_4	383
C	Nivel 3	1-2	274.68	SLB2 20_3	292
C	Nivel 4	1-2	124.67	SLB2 8_2	129

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Con los dispositivos SLB definidos se debe de cambiar la sección del disipador y el brazo rígido por un solo elemento tipo link. Para ello se debe de ingresar *a la pestaña define, section properties* y seleccionar *link/support properties*. En esta ventana: “se asigna la respuesta no lineal de las conexiones SLB utilizando el modelo plástico de *wen* por medio de elementos no lineales tipo link. Considerar que se deberá liberar la fuerza axial en estos elementos” (Bozzo L, Gaxiola G. y Gonzales H., 2021, pág. 25).

Figura 50. **Asignación de propiedades no lineales a link (disipador SL)**

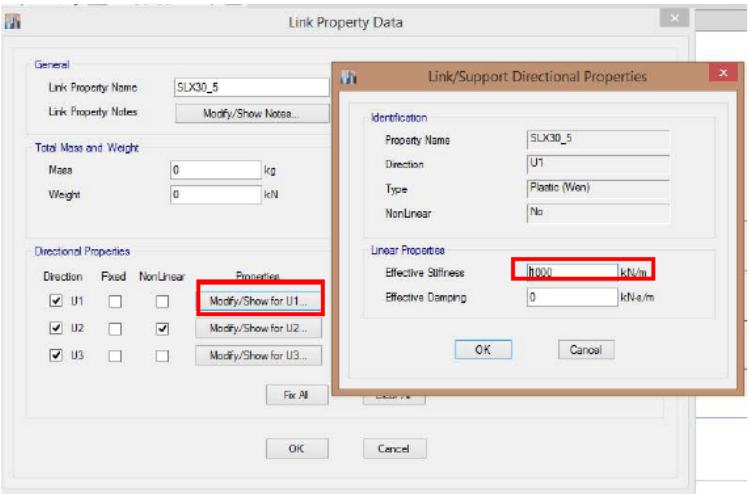


Fuente: Bozzo, L., Gaxiola, G. y Gonzales H. (2021). *Proceso de análisis y diseño utilizando disipadores sísmicos tipo SLB.* pág. 26.

Dentro de esta opción se realizan los siguientes pasos:

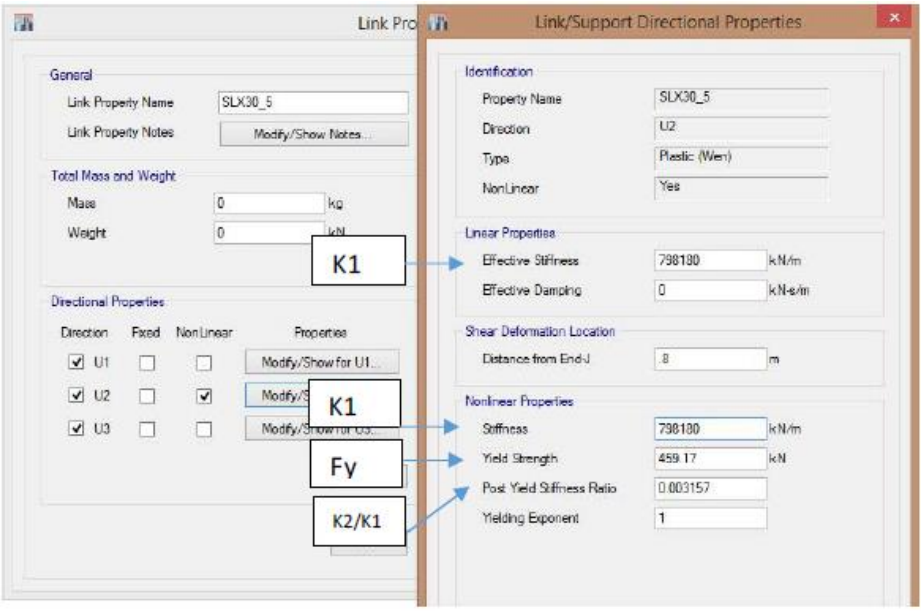
- Incluir la dirección en que trabaja el disipador dentro del mismo nombre del elemento link para facilidad de identificación.
- Asignar el modelo histérico *wen* para la representación no lineal del dispositivo.
- Indicar la dirección donde se desarrollará el comportamiento del disipador, para el caso en donde el disipador actúa en el eje X global (plano ZX) las propiedades no lineales deberán incluirse para U2, si el comportamiento se desarrolla en el eje Y global (plano ZY) las propiedades no lineales deberán definirse para U3.
- Restringir el desplazamiento del disipador usando los apartados fixed, pero se recomienda ampliamente asignar una rigidez suficiente para limitar este desplazamiento. (Bozzo L, Gaxiola G. y Gonzales H., 2021, pág. 26)

Figura 51. **Asignación de rigidez lateral del disipador**



Fuente: Bozzo, L., Gaxiola, G. y Gonzales H. (2021). *Proceso de análisis y diseño utilizando disipadores sísmicos tipo SLB*. pág. 26.

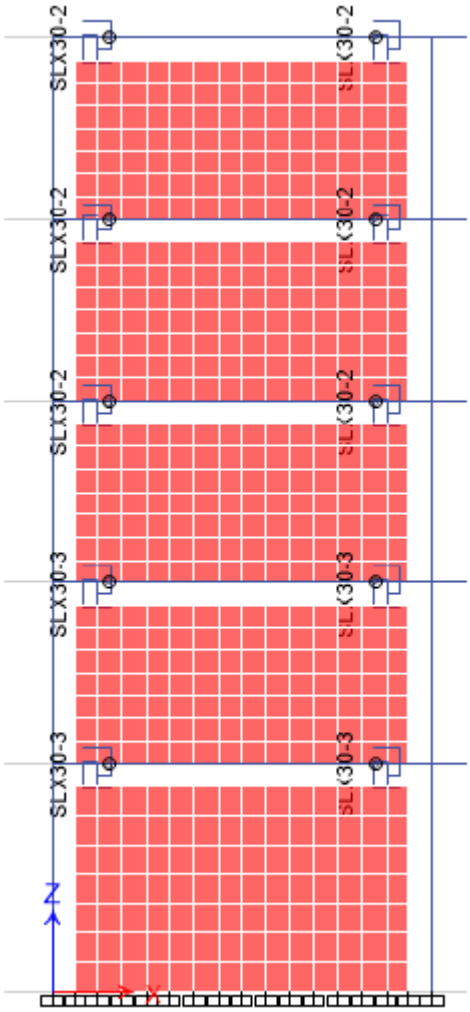
Figura 52. **Asignación los parámetros de diseño del disipador**



Fuente: Bozzo, L., Gaxiola, G. y Gonzales, H. (2021). *Proceso de análisis y diseño utilizando disipadores sísmicos tipo SLB*. pág. 26.

Configurado en el programa cada disipador a utilizar, se procede a asignar cada disipador de acuerdo con el prediseño hecho con el disipador inicial usado de base.

Figura 53. **Asignación de los disipadores de acuerdo con el prediseño en cada dirección respectivamente**



Fuente: Bozzo, L., Gaxiola, G. y Gonzales H. (2021). *Proceso de análisis y diseño utilizando disipadores sísmicos tipo SLB*. pág. 28.

Por último, se debe de volver a correr el modelo con los disipadores asignados para determinar nuevamente los componentes de cortante de cada uno.

Si hubiera un disipador cuya componente de cortante supere la fuerza de plastificación FY, se cambia el disipador a uno más grande. Esto debe repetirse hasta que todos los disipadores cumplan con este requisito.

En el capítulo siguiente se exponen y analizan los resultados obtenidos del periodo fundamental analítico y las derivas de la estructura, luego de realizar el reforzamiento de la edificación utilizando disipadores de energía SLB.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y BENEFICIOS DEL USO DE DISIPADORES DE ENERGÍA SLB

4.1. Revisión de periodo fundamental de la estructura

Una vez terminado el análisis del edificio existente, incorporando disipadores sísmicos SLB, se procede a verificar nuevamente los periodos fundamentales de la estructura y determinar que cumplan con los límites establecidos por la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica (AGIES), 2020c. Para ello se selecciona la opción *display* en el programa, luego *show tables, analysis results, structure output, modal information, modal periods.*

Figura 54. **Periodos fundamentales analíticos de edificio con disipadores SLB**

Modal Periods And Frequencies

File Edit Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted Hidden Columns: No Sort: None Modal Periods And Frequencies
Filter: None

Case	Mode	Period sec	Frequency cyc/sec	CircFreq rad/sec	Eigenvalue rad²/sec²
Modal	1	0.594	1.682	10.5706	111.7384
Modal	2	0.566	1.768	11.1107	123.448
Modal	3	0.458	2.185	13.7293	188.4931
Modal	4	0.206	4.859	30.5299	932.0758
Modal	5	0.156	6.401	40.2209	1617.7187
Modal	6	0.136	7.337	46.0979	2125.0137

Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS 19.1.0.

En la figura 55 se verifica el nuevo periodo analítico del sistema es 0.594 segundos, el cual es menor al periodo fundamental máximo permitido por la Norma NSE 3 de AGIES.

Tf $\leq$ 0.7528 seg
0.594 $\geq$ 0.7528 seg

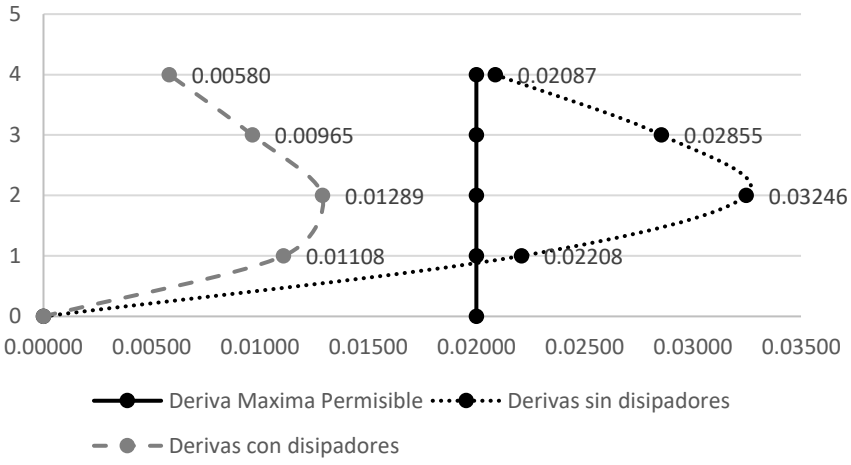
Analizando el resultado, se determina que la implementación de los disipadores tipo SLB ha disminuido el periodo fundamental de la estructura a un 49.6 % del valor original y al cumplir con lo especificado en la norma, la estructura podrá limitar su desplazamiento, controlando el periodo de vibración de la misma, lo que conllevará a una mejor respuesta sísmica.

4.2. Revisión de derivas de estructura

Al reducir el periodo fundamental de la estructura, se controlan los desplazamientos de piso, por lo que se procede a verificar las derivas obtenidas en cada dirección luego de la implementación de los disipadores de energía SLB.

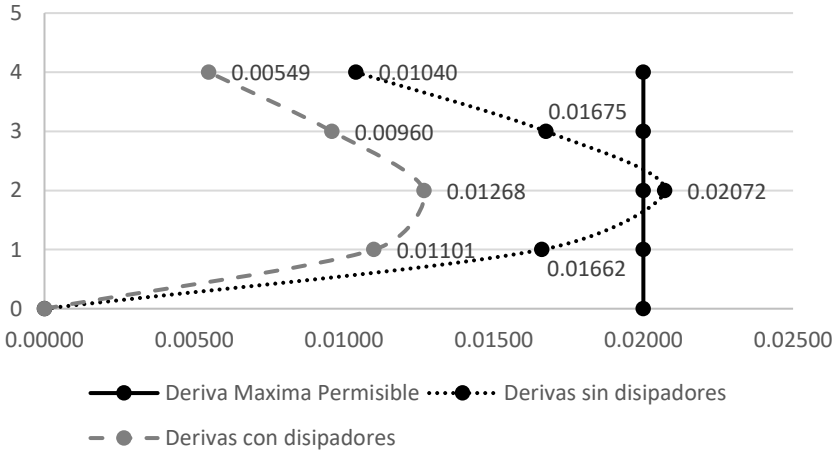
Para chequear las derivas del edificio se elige la opción *display*, luego seleccionar *story response plots* y aparece una ventana en donde se tienen varias opciones. En dicha ventana se seleccionará la opción de *max story drifts* y seleccionar un caso de carga sísmica nuevo para cada dirección, utilizando el espectro de respuesta sin calibrar.

Figura 55. **Revisión de deriva de entrepiso máxima (eje x) =0.01289-cumple**



Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 56. **Revisión de deriva de entrepiso máxima (eje y) = 0.01268-cumple**



Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

La deriva máxima tolerable para edificaciones en general y categoría II es de 0.020, con base en lo especificado en la tabla XIV. Como se puede observar en las figuras 56 y 57, las derivas del edificio, luego de la incorporación de los disipadores, cumplen con los valores máximos tolerables del reglamento.

4.3. Consideraciones adicionales

Durante el análisis del edificio existente es necesario considerar que es posible que los elementos de concreto del sistema estructural principal no tengan la serviciabilidad requerida y requieran reforzamiento para aumentar su capacidad.

También es importante considerar que los disipadores de energía deben de ser anclados mediante platinas y pernos de acero. Dependiente de la forma de la implementación de los disipadores, se deberán diseñar dichos anclajes y reforzar los muros desacoplados que sirven de apoyo.

4.3.1. Consideraciones adicionales para los disipadores SLB

Para el correcto funcionamiento de los dispositivos es necesario realizar las siguientes consideraciones.

4.3.1.1. Placa base y anclajes entre muro y disipador

La conexión del disipador de energía y el muro desacoplado es una conexión articulada que consiste en una platina metálica cuadrada con pernos anclados al muro de mampostería.

Para el diseño de esta placa base se deberán de realizar los chequeos que se describen en el siguiente apartado.

4.3.1.1.1. Estimación de las fuerzas a tracción en los anclajes del disipador

Utilizando el disipador sobre el eje 2, nivel 1, entre ejes A-B para el análisis, se tienen los datos que se muestran en la tabla XVII.

Tabla XVII. **Fuerzas a tracción en los anclajes de los disipadores**

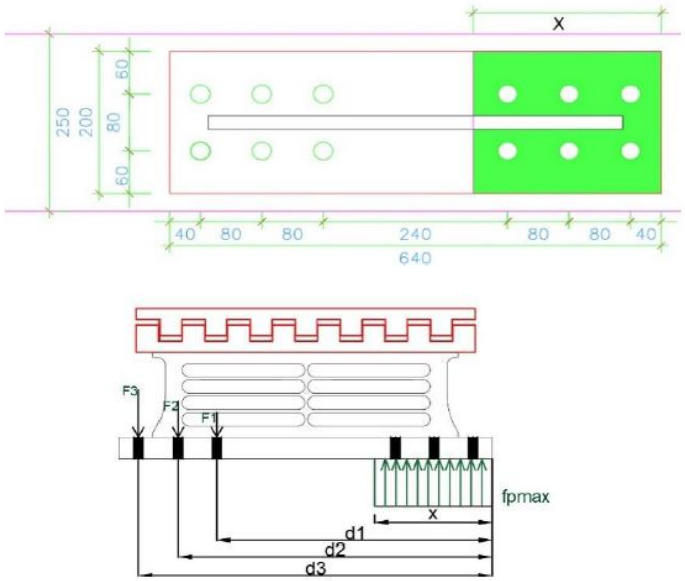
DISIPADOR	SLB2 20_5	Tabla XV
k2 (KN/cm)	92	Tabla XV
Fy disipador (KN)	340	Tabla XV
f'c solera muro (kgf/cm2)	210	Resistencia a compresión del concreto
Ancho de solera	14	cm
V (ton)=(Fy)*(k2*2cm)	**53.43**	Fuerza cortante que demanda la conexión
M(ton) = V * excentricidad	**3.74**	Momento flector que demanda la conexión

Continuación de la tabla XVII.

X(cm)	16.5	
d1(cm)	24	
d2(cm)	29	
d3(cm)	34	
F1(ton) = (0.65*0.85*f´c*X*B) / (1 + [(d2-X)/(d-X)] + [(d-X)/(d-X)])	**5.36**	Se obtiene por equilibrio de fuerzas verticales
F2(ton) = (F1/(d1-X)) * (d2-X)	**8.93**	
F3(ton) = (F1/(d1-X)) * (d3-X)	**12.51**	
F1a (ton)	**2.68**	Fuerza en cada perno según su fila
F2a (ton)	**4.47**	Fuerza en cada perno según su fila
F3a (ton)	**6.25**	Fuerza en cada perno según su fila

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 57. **Placa base y anclajes entre muro y disipador**



Fuente: Bozzo, L. (2021). *Análisis y diseño uilizando disipadores sísmicos tipo SLB*. págs. 84-85.

4.3.1.1.2. Cálculo de espesor de placa base

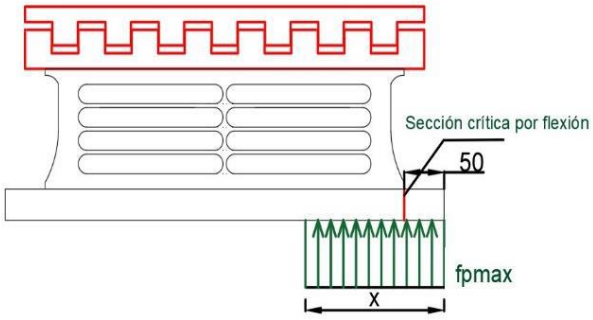
"Se determina la demanda a flexión de la placa base del disipador considerando la sección crítica en el extremo de este" (Bozzo, Luis, 2022b, pág. 86). Utilizando un espesor de placa de acero A36 de 2.54 cm se tiene lo siguiente:

Tabla XVIII. **Cálculo de espesor de placa base**

Largo del disipador (mm)	200.00	
Largo de la placa (mm)	300.00	
Largo de voladizo(cm)	5.00	
Φfp max (Kgf/m2) = 0.65*0.85*f´c	1.160,250.00	
Mupl(ton*m/m)=(m2*Φfp max)/2	1.45	Demanda a flexión de la placa
tp(cm)	**2.54**	Espesor de la placa propuesto (1")
Fy placa (Kgf/cm2)	2,530.00	Acero A36
ΦMnpl(ton*m/m)= ((0.9*tp2)/6)*Fypl	2.45	Capacidad elástica de la sección transversal de la placa en la sección crítica
Mupl/Φmnpl <1	0.59	Demanda capacidad por flexión en la placa en la zona de compresión.
Mupl(ton*m/m)=[(m-4cm)*2*F3a]/B	0.89	
Mupl/Φmnpl <1	0.36	

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 58. **Sección crítica a flexión en placa base de disipador**



Fuente: Bozzo, L. (2021). *Análisis y diseño uilizando disipadores sísmicos tipo SLB*. pág. 86.

4.3.1.2. Reforzamientos en muro desacoplado

La solera que servirá de apoyo para el disipador se dimensionará dependiendo de los resultados y las solicitudes estructurales de los anclajes de los pernos de la placa base. Es decir, si los pernos necesitan una longitud de empotramiento mínima de 20 cm, la solera no podrá tener menos de 25 cm de peralte y si la sección de arrancamiento de concreto es muy grande, posiblemente sea necesario tener una solera con un ancho mayor. También será necesario realizar un chequeo a flexo compresión y el muro utilizando la fuerza cortante horizontal inducida por el disipador de energía.

4.3.1.2.1. Revisiones en solera de apoyo

Los anclajes deben diseñarse para que no ocurra falla en el material del anclaje ni en el elemento de concreto de apoyo.

Para ello hay que realizar un análisis de la resistencia en tracción de los anclajes y la resistencia al arrancamiento del concreto de anclajes por tracción y cortante. La resistencia requerida para los anclajes se describe en la tabla XIX.

Tabla XIX. **Resistencia requerida para los anclajes**

Modo de falla	Un anclaje	Anclaje individual en un grupo	Anclajes como grupo
Resistencia del acero en tracción.	φNsa ≥ Nua	φNsa ≥ Nua,i	
Resistencia al arrancamiento del concreto en tracción.	φNcb ≥ Nua		φNcbg ≥ Nua,g
Resistencia de adherencia de anclaje adherido en tracción	φNa ≥ Nua		φNag ≥ Nua,g
Resistencia del acero en cortante	φVsa ≥ Vua	φVsa ≥ Vua,i	
Resistencia del concreto por corte	φVcb ≥ Vua		φVcbg ≥ Vua,g

Fuente: elaboración propia, con información tomada de Jiménez, A. M. A. (2020). *Diseño estructura de fachadas de mampostería para edifcios de marcos de concreto sismo resistentes*. pág. 73.

Tabla XX. **Análisis de resistencia en tracción y al arrancamiento de los anclajes**

DISEÑO DE ANCLAJES 1ª, 1b & 1c		
Datos de apoyo		
Alto	30.00	cm
Ancho (mitad de solera)	10.00	cm
f'c	210.00	Kgf/cm2
Datos de anclaje		
X=	16.50	cm
fy=	4,200.00	Kgf/cm2
Varrilla núm.	8.00	
Separación=	5.00	cm
Profundidad anclaje=	85.80	cm

Continuación de la tabla XX.

λa=	0.80	
Ω=	1.00	
φN	0.45	
φV	0.70	
Resistencia del acero de los anclajes a tracción		
futa=	7,980.00	Kgf/cm2
Ase,N=	5.04	cm2
Nsa=	132,723.36	Kgf
Kc (Postinstalados/preinstalados)	10.00	Preinstalados
Ca min	50.40	cm
hef	85.80	cm
Nb	92,136.26	Kgf
F3a(mayor fuerza a tracción)<ϕNb	6,250.00	Kgf
Resistencia al arrancamiento del concreto a anclajes a traccion		
Anc	218,640.71	distancia entre pernos
Anco	66,254.76	cm2
Ψec,N	1.00	
Ψed,N	1.00	
Ψc,N	1.00	
Ψcp,N	1.00	
Ncbg	304,049.65	Kgf
Ft(suma F1a, F2a y F3a) < φNcbg	13,400.00	Kgf
Resitencia básica a la adherencia en tracción de un anclaje adherido		
dVarilla	2.54	cm
Tcr	11.20	Kgf/cm2
Nba	6,134.51	Kgf
Resistencia a la adherencia en tracción de anclajes adheridos		
Tumcr	18.20	Kgf/cm2
Cna	12.35	cm
ANa	2,012.90	cm2
ANao	609.97	cm2

Continuación de la tabla XX.

Ψec,Na	1.00	
Ψed,Na	1.00	
Ψcp,Na	1.00	
Nag	20,243.88	Kgf
Ft(suma F1a, F2a y F3a) < φNag	13,400.00	Kgf
Resistencia del acero de los anclajes a corte		
futa=	7,980.00	Kgf/cm2
Ase, V=	5.04	cm2
Vsa=	4,391,936.64	Kgf
Corte en fila de 3 pernos(1/4*53.43) < φVsa	13,357.50	Kgf
Resistencia básica al arrancamiento de un anclaje a corte		
le	85.80	cm
ca1	8.33	cm
Vb a	1,282.12	Kgf
Vb	1,973.63	Kgf
Resistencia al arrancamiento del concreto de anclajes a corte		
Acv	37,721.38	cm2
Avco	11,430.72	cm2
Ψec,V	1.00	
Ψed,V	1.00	
Ψc,V	1.40	
Ψh,V	3.89	
Vcb	35,455.44	Kgf
Corte en fila de 3 pernos (1/4*53.43) < ϕVcb	13,357.50	Kgf

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

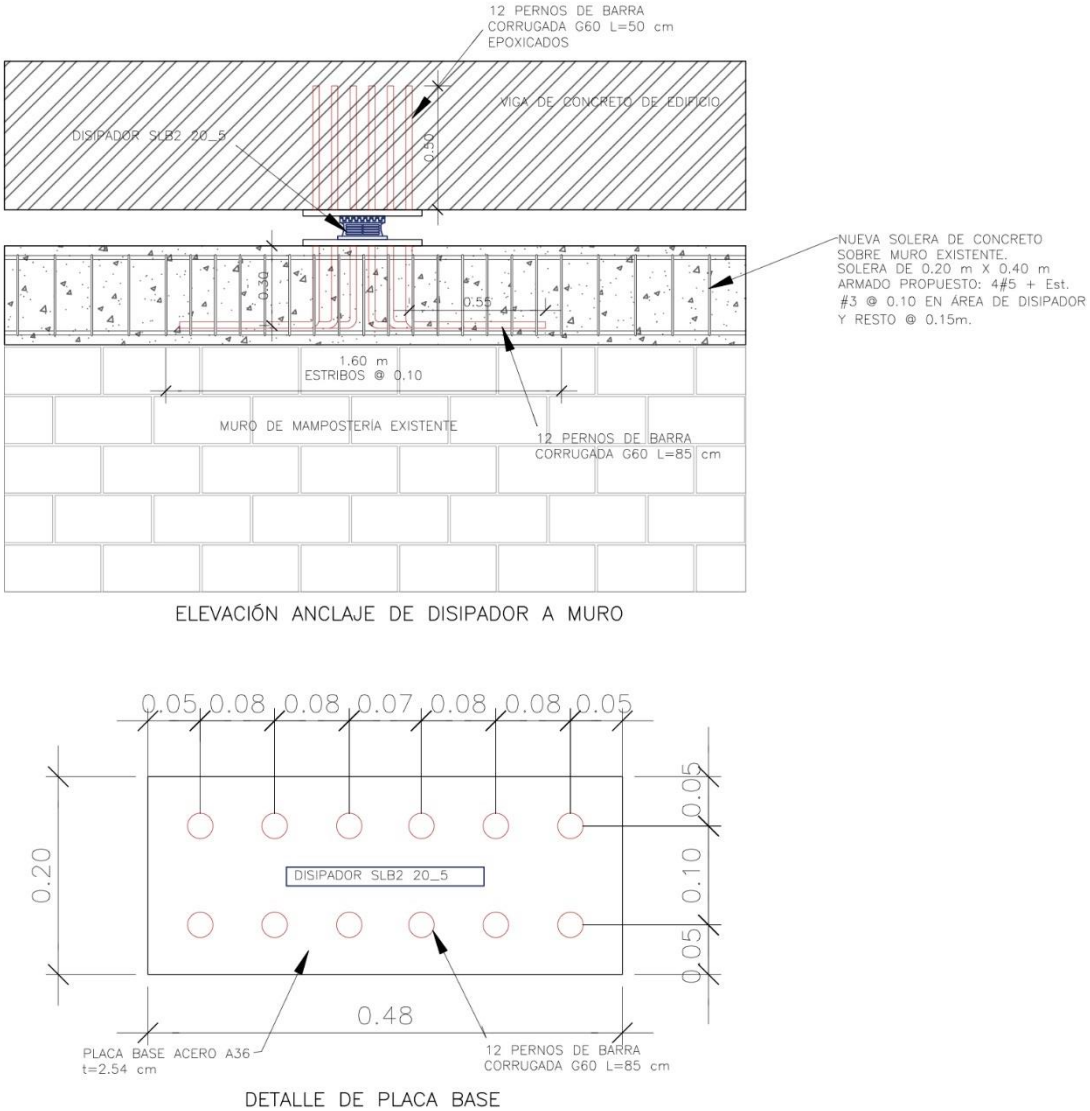
Tomar en cuenta que se realizó el análisis para una fila de anclajes de un solo lado. Es decir, 3 barras empotradas en un ancho de solera de 10 cm.

Con base en el análisis, es posible utilizar 12 pernos de 1” de varilla corrugada Fy=4 200 Kg/cm^2 soldados a una platina de 0.20 m de ancho y 0.48 m de largo. Los pernos deberán tener un empotramiento hef = 0.85 m en una solera de 0.20 m de ancho y 0.40 m de alto de concreto de f´c = 210 Kg/cm^2.

Para el anclaje de la placa dentada sobre el disipador se debe de realizar el mismo análisis que la placa base, sin embargo, aquí se tiene la ventaja de que el elemento de concreto es más grande y resiste mejor los esfuerzos de tracción, pero se debe considerar el diseño con anclajes posinstalados por medio de un epóxido especial para estos casos. El epóxido Hilti Re 500 V3 puede ser una buena opción.

La solera de remate, además de cumplir la función de soporte de la placa base, también se chequea a flexión y corte, utilizando la carga axial derivada del momento flector de la placa base.

Figura 59. **Detalle de anclaje de disipador y placa base**



Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD 2020.

4.3.1.2.2. Revisión de flexocompresión en muro desacoplado

"En cada extremo de un segmento de pared en flexocompresión habrá una mocheta, con sección apropiada, funcionando en conjunto con la mampostería propiamente dicha" (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica (AGIES), 2020e, pág. 18).

Utilizando la fuerza cortante horizontal que general la conexión (V=53.43 Ton) se realiza el chequeo a flexocompresión del muro de 0.14 m de espesor, 5.88 m de largo y 2.77 m de alto de block clase C (fm= 35 Kg/cm^2 sobre área bruta) sobre el eje 2 del nivel 1 entre los ejes A-B.

Tabla XXI. **Diseño a flexocompresión de muro desacoplado**

f'c	3000	psi
Fy	4200	Kg/cm2
f´m(0.7*fm)	24.5	Kg/cm2
Momento	148,268.25	Kg*m
Esf máximo(fm)	10.00	Kg/cm2
Compresión C	16,258.74	Kg
Tensión T	12,146.85	Kg
fs	1,609.22	Kg/cm2
As min	5.7624	cm2
As diseño	7.54829108	cm2
Usar mocheta de borde (0.25x0.30) con 6 barras G60 #4 + Est. #3 @ 0.15 m		

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

4.3.1.2.3. Revisión de corte en muro desacoplado

La mampostería es un ensamble en el cual la resistencia en tracción es una fracción de su resistencia en compresión; por lo tanto, su resistencia cortante está regida por los esfuerzos de tracción que se inducen al sujetarla a corte: esta es la llamada tracción diagonal. En consecuencia, cuando se instalan refuerzos verticales y horizontales colocados entre los bordes de una pared de mampostería, estos absorben las tracciones diagonales y la capacidad de corte inherente se ve incrementada. (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica (AGIES), 2020e, pág. 20).

Utilizando la fuerza cortante horizontal que general la conexión (V=53.43 ton) se realiza el chequeo por cortante del muro de 0.14 m de espesor, 5.88 m de largo y 2.77 m de alto de block clase C (fm= 35 Kg/cm^2 sobre área bruta) sobre el eje 2 del nivel 1 entre los ejes A-B.

Tabla XXII. **Diseño por cortante de muro desacoplado**

Vb	53,430.00	Kg
f´m(0.7*fm)	24.5	Kg/cm2
Pv (Esf.actuante)	18.5275446	Kg/cm2
Fv (Esf. resistente)	0.39542595	Kg/cm2
Asmin	5.76097092	cm2
As diseño	20.3606512	cm2
Se necesitan barras G60 # 3 @ 0.20		

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

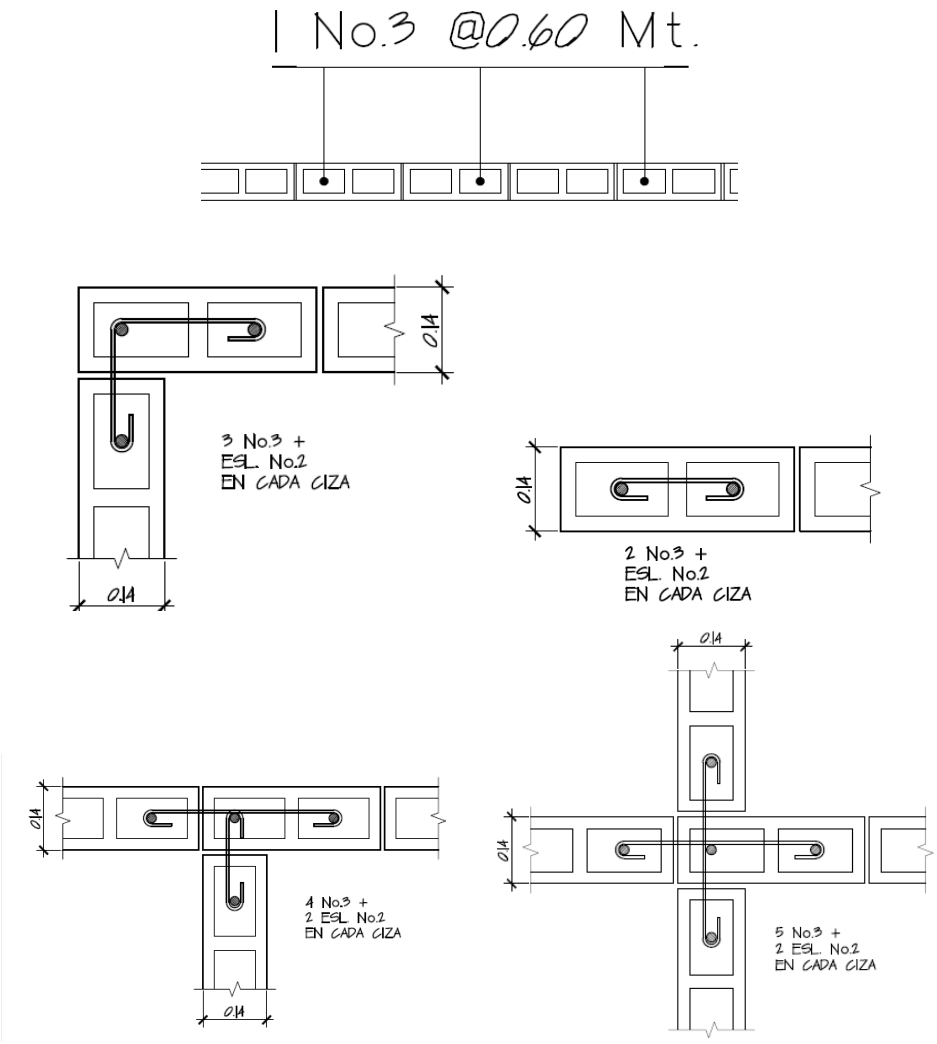
Con estos chequeos se puede determinar si el refuerzo del muro existente es suficiente para resistir los esfuerzos inducidos por la acción del disipador.

Tomando como ejemplo un detalle de mampostería muy utilizado en Guatemala, se puede observar lo siguiente:

- El refuerzo de borde de los muros solamente tiene 2 barras de 3/8” interblock confinadas con un eslabón de 1/4” en cada hilada. Para reforzar los bordes del muro que resistirán los esfuerzos de flexo compresión se deberá de construir una nueva mocheta de borde de 0.20m x 0.30 m con 6 varillas grado 60 de 1/2”.

- En el refuerzo entre bordes solamente se tienen barras de 3/8” @ 0.60m. Para reforzar el muro y asegurar que resista los esfuerzos por cortante será necesario instalar barras adicionales, sin embargo, al ser un muro existente este proceso puede llegar a ser muy destructivo. La mejor opción puede ser realizar un encamisado de concreto y refuerzo de acero alrededor del muro para mejorar su rigidez y comportamiento ante estos nuevos esfuerzos.

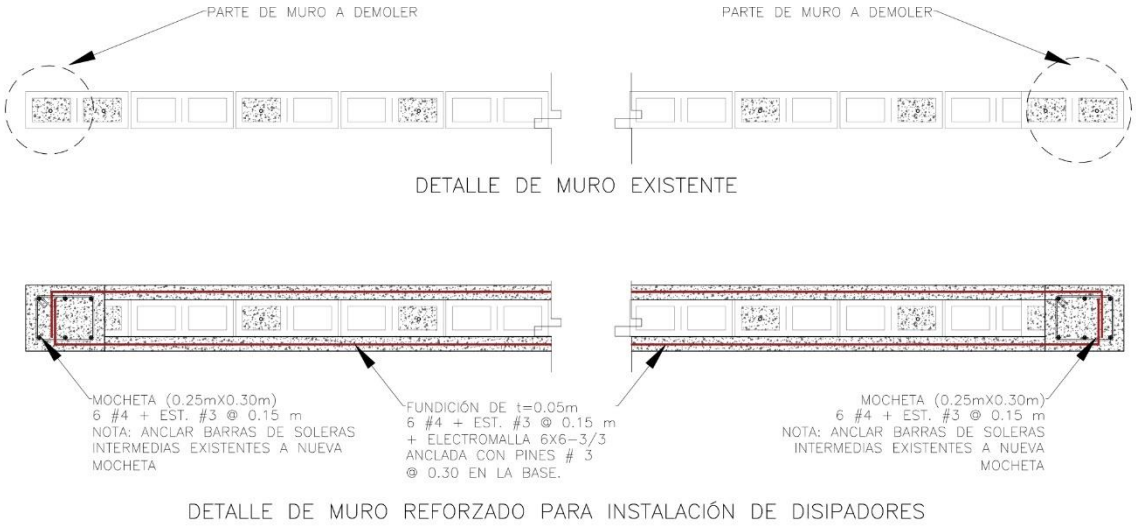
Figura 60. **Detalles tipos de refuerzo de muros desacoplados de mampostería en Guatemala**



Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD 2020.

En la imagen de la figura 61, se presentan detalles esquemáticos de cómo podría ser el reforzamiento.

Figura 61. **Refuerzo de muro desacoplado existente**



Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD 2020.

4.3.2. Reforzamiento de sistema estructural existente

A pesar de haber incrementado la ductilidad de la estructura, es posible que sea necesario reforzar algunos elementos del sistema estructural principal por las siguientes causas:

- “Actualización de reglamentos
- Cambio de uso e incremento de cargas
- Diseño inadecuado
- Errores y defectos de la construcción
- Daños estructurales por eventos sísmicos
- Corrosión en el acero de refuerzo
- Eliminación total o parcial de elementos estructurales existentes”. (Yagual Quimi, Dussan Danilo, S.F., pág. 2)

“Los métodos de reforzamiento pueden causar cambios en la rigidez, ductilidad y amortiguamiento de los edificios. Estas propiedades deben ser tomadas en consideración cuando se modifica la capacidad de la carga de la estructura” (Yagual Quimi, Dussan Danilo, S.F., pág. 6).

Algunos sistemas de reforzamiento de estructuras pueden ser las siguientes:

- “Arriostramientos metálicos
- Pantallas en concreto reforzado
- Encamisado en concreto reforzado
- Encamisado metálico
- Platinas metálicas
- Adición de perfiles metálicos
- Contrafuertes
- Postensado externo
- Materiales especiales como la fibra de carbono” (Yagual Quimi, Dussan Danilo, S.F., pág. 10).

4.4. Análisis económico del uso de disipadores tipo SLB

El precio de los disipadores tipo SLB es de $300 a $700 dólares americanos y a este precio hay que considerar un precio de exportación de $ 200.00 si el proyecto se encuentra fuera de Perú. Adicional a esto se deben de considerar el precio de los trabajos de estructura metálica adicionales que hay que realizar para la incorporación de los disipadores y el reforzamiento de alguna estructura existente (Bozzo, 2018).

Tomando como base el edificio analizado en este documento, se presenta una tabla con los costros posibles para la implementación de los disipadores.

Tabla XXIII. **Precio estimado para el reforzamiento de la estructura utilizando disipadores tipo SLB**

Descripción	Cantidad	Unidad	Precio unitario	Subtotal
Disipador de energía SLB	24	Unidad	Q 3,950.00	Q 94,800.00
Importación	24	Unidad	Q 1,580.00	Q 37,920.00
Construcción de solera para anclaje	118.52	ml	Q 392.06	Q 46,467.31
Construcción de columnas para anclaje y encamisado de concreto + malla	Global	1	Q 293,545.04	Q 293,545.04
Instalación de disipadores y estructura metálica auxiliar	24	Unidad	Q 1,000.00	Q 24,000.00
		Precio total de reforzamiento		**Q 496,732.35**
	Porcentaje del precio del inmueble			**11.5 %**
Estructura existente	1152	m2	Q 3,750.00	Q 4,320,000.00

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

En la tabla XXIII, se observa que el precio del reforzamiento es del 11.5 % del valor total del edificio, sin incluir el terreno. Haciendo un análisis del costo beneficio esta inversión puede ser una gran alternativa que puede garantizar un buen desempeño del edificio ante un evento sísmico y evitar pérdidas millonarias por daños futuros producidos por un fenómeno natural.

5. ENSAYOS EXPERIMENTALES Y PROYECTOS CON DISIPADORES SLB

En este capítulo se ejemplifican algunos proyectos en donde fueron utilizados los dispositivos tipo SLB, así como ensayos experimentales realizados en varios países para la validación y comprobación de esta tecnología.

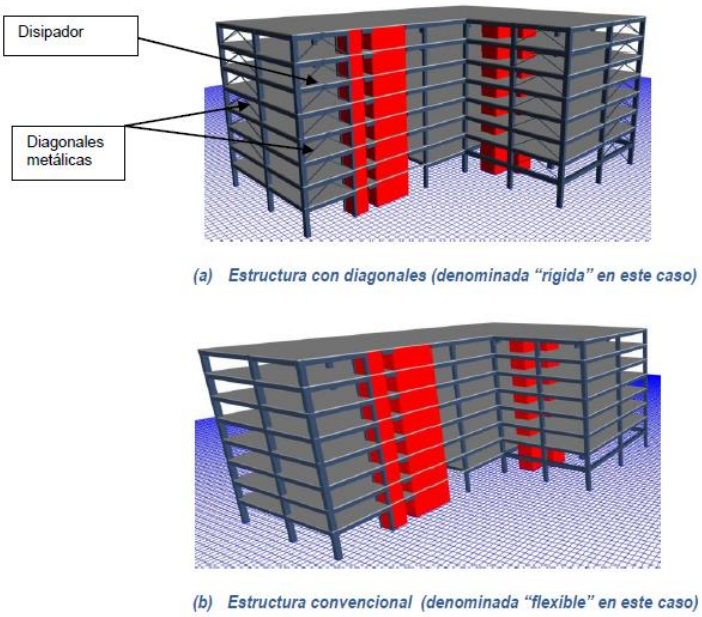
5.1. Proyectos con disipadores SLB

Los proyectos más significativos mencionados por Bozzo, L, Gaxiola, G. (2021) se tiene lo siguiente:

5.1.1. Edificio Industrial Nettalco –Perú

El edificio industrial Nettalco es un edificio de 8 niveles con intereje aproximado de 14mx14m resuelto con losas postensadas aligeradas de 40cm de espesor sobre un marco tridimensional de trabes y muros. En este caso las conexiones SLB se emplearon para darle una mayor seguridad a la estructura frente a solicitaciones sísmicas severas. Para ello se dispusieron diagonales metálicas sobre distintos vanos, algunos no continuos hasta la planta baja. (Bozzo L, Gaxiola G., 2021, págs. 3-4)

Figura 62. **Edificio Industrial Nettalco-Perú**



Fuente: Bozzo, L., Gaxiola, G. (2021). *El concepto rígido-flexible-dúctil y las conexiones SLB*. pág. 4.

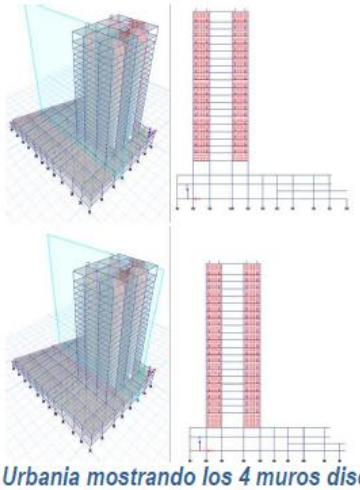
5.1.2. Edificio Urbania -México

Es un proyecto en Guadalajara, Jalisco con 80 m de altura y planta rectangular. En los sótanos con uso de estacionamiento se tiene una distribución arquitectónica muy distinta a las plantas superiores con uso de vivienda, lo cual dificulta el uso de muros en toda la altura. Los únicos muros en toda la altura que encajan con la arquitectura son los de comunicación ubicados en un extremo de la planta y originando fuerte torsión. Un primer cálculo sin muros adicionales mostró que los desplazamientos de entrepiso eran excesivos y se necesitaba de muros. Por otra parte, en las plantas superiores y dividiendo departamentos se podían añadir muros, por tanto, la dificultad radicaba en que estos muros no podían estar hasta la cimentación.

En este punto se tenían dos opciones: (a) muros discontinuos convencionales con trabes de transferencia en planta baja o (b) muros acoplados conectados mediante conexiones SLB, que fue la opción seleccionada. Con respecto al tipo de suelo este es intermedio, como se da en muchas áreas de Guadalajara.

> La alternativa propuesta consiste en muros de 15 cm de espesor desacoplados del marco donde se ubican, pero conectados en su extremo superior mediante 2 conexiones tipo SLB en sus extremos cercanos a las columnas. Estas conexiones están diseñadas para no transferir fuerza axial por lo que solo están solicitadas a cortante (elemento importante para evitar transferir carga axial acumulativa entre plantas). Para diseñar preliminarmente el tipo de conexión SLB se realiza un cálculo espectral convencional especificando los dispositivos como barras rectangulares metálicas. De esta forma como para cualquier elemento estructural clásico se determina su cortante y en base a dicho valor y mediante la tabla de diseño de Hurtado et. al (2008) se predimensiona cada dispositivo. Un posterior análisis convencional espectral permitiría verificar los disipadores propuestos, aunque normalmente las diferencias son poco significativas. (Bozzo L, Gaxiola G., 2021, pág. 11)

Figura 63. **Edificio Urbania -México**



Modelo ETABS de edificio Urbania mostrando los 4 muros discontinuos necesarios para reducir el desplazamiento de entrepiso, todos en la dirección Y.

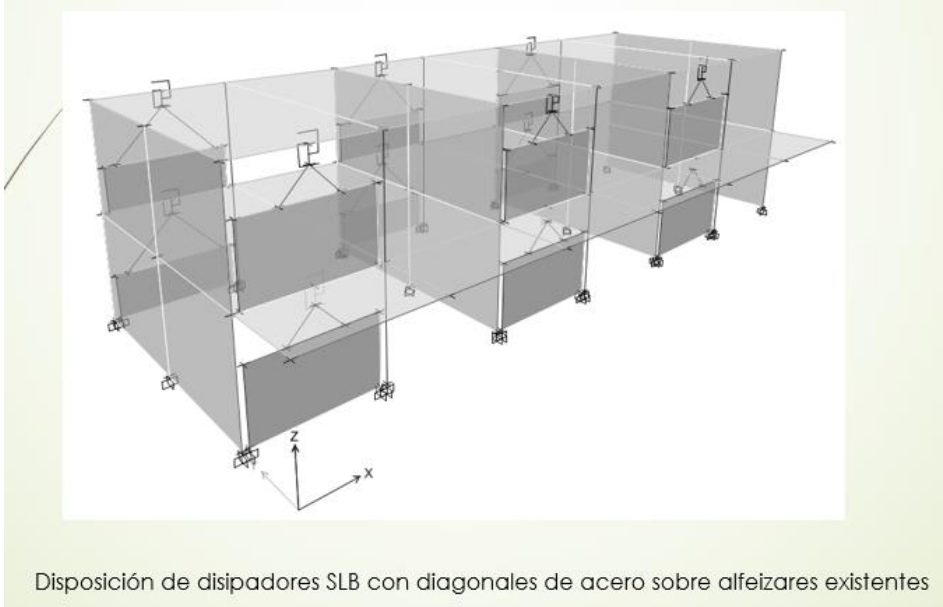
Fuente: Bozzo, L., Gaxiola, G. (2021). *El concepto rígido-flexible-dúctil y las conexiones SLB.* pág. 11.

5.1.3. Escuelas peruanas

- Instituciones educativas diseñadas con la norma de 1977.
- Estructuras flexibles en dirección longitudinal debido al sistema aporticado que presentan.
- Estructuras rígidas en dirección transversal debido a la incorporación de muros de albañilería en pórticos.
- Entrepisos a base de losas aligeradas en una dirección.
- Problemas de columna corta debido a la ausencia de juntas entre muros de albañilería y columnas de concreto que conforman los pórticos de la estructura. (Postensa, s.f.)

“Con la finalidad de mejorar el comportamiento sísmico de la estructura, así como dotarle de mayor ductilidad ante eventos sísmicos se dispuso de disipadores de energía” (Postensa, s.f.).

Figura 64. **Escuelas peruanas**



Fuente: Postensa. (s.f.) Consultado el 21 de marzo de 2023. Recuperado de https://postensa.pe/empresa-postensado/.

5.1.4. Hotel Ceibo Dorado-Ecuador

“En el terremoto de abril de 2016 se dañó seriamente el hotel Ceibo Dorado. En menos de 7 meses después se reinauguró completamente reforzado incorporando 40 unidades de SLB” (Bozzo L, 2021, pág. 18).

Figura 65. **Hotel Ceibo Dorado**

Fuente: Bozzo, L. (2021). *Análisis y diseño uilizando disipadores sísmicos tipo SLB*. pág. 18.

5.2. Ensayos experimentales con disipadores tipo SLB

"El sistema de disipación de energía SLB ha sido probado en los laboratorios del Instituto Sperimentale Modelli e Strutture (ISMES) en Italia, en el laboratorio LNEC de Portugal y en la Universidad Católica del Perú, presentando resultados muy favorables" (Bozzo L, 2021, pág. 10).

5.2.1. Ensayos en Universidad Federico II en Nápoles, 2016. Set up por Lolanda Nuzzo

Se fabricaron en Lima 10 disipadores y se exportaron a Italia. Los dispositivos ensayados fueron 2 disipadores SLB50_3, 2 SLB50_5, 2 SLB 40_3,

2 SLB 40_5 y 2 SLB 30_3. También se realizaron ensayos de platinas estándares.

> El disipador de energía (SLB) tiene una apariencia similar a un perfil tipo I con rigidizadores transversales. El peralte total generalmente es de 500 mm y este hecho de acero de alta ductilidad (sin soldadura). Los ensayos demuestran que no es necesario cambiarlo después de un sismo severo. Solo es necesaria una simple inspección visual. Este disipador es capaz de absorber la energía generada por terremotos de grado 8. Cuando se producen sismos de gran intensidad los disipadores se activan absorbiendo la energía en puntos específicos protegiendo así al resto. (Bozzo L, 2021, pág. 10)

Figura 66. **Ensayos en Universidad Federico II en Nápoles**

Fuente: Bozzo, L. (2022). *Filosofía del diseño de proyectos con disipación de energía*. pág. 90.

5.2.2. Ensayo pórticos +SLB- UNAM -2017

“Pórtico ensayado en la UNAM para estudio de conexiones. Ensayo cíclico estático con pórtico de carga. En este ensayo experimental se ensayaron disipadores SLB2 8_2 y el SLB2 15_3” (Bozzo L, 2021, pág. 11).

Figura 67. **Ensayo pórticos +SLB- UNAM -2017**

Fuente: Bozzo, L. (2022). *Filosofía del diseño de proyectos con disipación de energía*. pág. 101.

CONCLUSIONES

1. La implementación de los disipadores de energía tipo SLB (Shear Link Bozzo) en el edificio de análisis indujo el aumento en la rigidez de la estructura, provocando la disminución de los periodos de vibración y las derivas, lo cual demostró ser un método de reforzamiento factible para edificios existentes de este tipo en Guatemala.

2. Los disipadores de energía tipo SLB son un mecanismo para reforzar estructuras que aún no se han empleado en Guatemala, su función y características son factibles para el uso en las edificaciones del país.

3. Las estructuras de marcos de concreto reforzado, cuyas derivas y periodos superan el límite establecido por las normas NSE de AGIES, son candidatas para el uso de disipadores de energía tipo SLB.

4. Los disipadores de energía tipo SLB proporcionan rigidez y ductilidad a la estructura existente, disipando la energía que introduce el sismo y protegiendo a los demás elementos que sufran daño.

5. Los disipadores de energía y el refuerzo planteado permiten reducir el desplazamiento lateral casi a la mitad, es decir, la rigidez de la estructura es casi el doble de la original con la ventaja adicional de la ductilidad que permite controlar mejor los cambios de frecuencia de los sismos.

6. El empleo de disipadores SLB con muros desacoplados permiten reforzar la estructura sin necesidad de modificar la configuración estructural original y, por lo tanto, es menor su costo y tiempo de ejecución, manteniendo la funcionalidad original del edificio y cumpliendo con la normativa actual de diseño sismorresistente.

7. La implementación de los dispositivos SLB es un reforzamiento estructural que se logra con la menor intervención posible, y por lo tanto, menor costo y tiempo de ejecución. Logrando un comportamiento satisfactorio, que cumple con las normas actuales de diseño sismorresistente NSE de AGIES.

8. Los disipadores de energía al incursionar en el rango no lineal incrementan la ductilidad y amortiguamiento de la estructura, esto origina que las fuerzas cortantes disminuyan y, por tanto, menores demandas sísmicas actuantes en el edificio.

9. La inversión económica utilizando los dispositivos SLB para la mejora del desempeño estructural de un edificio es mínimo, a comparación del gasto que ocasionaría la reparación o reconstrucción de una estructura ante un evento sísmico.

RECOMENDACIONES

1. Realizar un análisis modal espectral definido por la Norma NS3 de AGIES y así lograr obtener los periodos de vibración más precisos. Para el estudio estructural de una edificación existente, en donde se planifica utilizar disipadores tipo SLB.

2. Considerar el uso de los disipadores de energía como método de reforzamiento de una estructura debido a su bajo costo de ejecución.

3. Utilizar un análisis estructural de historia de tiempo para obtener datos más precisos. En un estudio estructural para el reforzamiento de una edificación existente utilizando disipadores tipo SLB.

4. Considerar el uso de los disipadores tipo SLB en Guatemala, ya que estos no son fabricados en el país y se deben de importar desde Perú.

5. Realizar el análisis a flexocompresión y corte del muro para determinar si este soporta las fuerzas inducidas por el dispositivo SLB. Para la implementación de los disipadores sobre un muro desacoplado.

6. Reforzar el muro y una opción puede ser un encamisamiento con concreto y refuerzo de acero, cuando los muros de mampostería no tengan la suficiente resistencia para resistir los esfuerzos inducidos por el disipador.

7. Utilizar diagonales metálicas de acero para la base de los disipadores tipo SLB. Estos elementos pueden ser tubos cuadrados tipo HSS, vigas WF, entre otros. Para edificios en donde no se cuenten con muros desacoplados

8. Utilizar muros desacoplados de concreto reforzado, debido a que el concreto es un material que proporciona más rigidez y se adapta mejor a los ciclos de histéresis del disipador; cuando por algún motivo arquitectónico no sean funcionales las diagonales metálicas.

REFERENCIAS

1. Aguiar, R., Bozzo, L., Coyago, H. y Andino, C. (2021). *Análisis sísmico de bloque estructural* 4 ESPE. Recuperado de https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/ciencia/article/download/182/188.

2. American Concrete Institute. (2014). *Requisitos de reglamento para concreto estructural.* Norma e informe, American Concrete Institute, Farmington Hill.

3. American Society of Civil Engineers, ASCE. (2000). *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings, FEMA 356.* Washinton, D.D. Estados Unidos.

4. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (AGIES). (2018). *Normas de seguridad estructural de edificaciones y obras de infraestructura para la república de Guatemala. Norma técnica, asociación guatemalteca de ingeniería estructural y sísmica.* Recuperado de: https://www.agies.org/bibliotecas/.

5. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica (AGIES). (2020a). NSE 1. *Generalidades, administración de las normas y supervisión técnica*. Guatemala.

6. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica (AGIES). (2020b). *NSE 2 Demandas estructurales y condiciones de sitio*. Guatemala.

7. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica (AGIES). (2020c). *NSE 3 Diseño estructural de edificaciones*. Guatemala.

8. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica (AGIES). (2020d). NSE 7.1 *Diseño de concreto reforzado*. Guatemala.

9. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estuctural y Sísmica (AGIES). (2020e). NSE 7.4 *Diseño de mampostería reforzada*. Guatemala.

10. Bozzo, L. (2018). *Curso de diseño de disipadores sismicos SLB*. Recuperado de https://www.google.com/wp-content/uploads/2018/05/Dossier_disipadores_2017_V6.pdf.

11. Bozzo. L. (2021a). *Manual SLB.* Recuperado de http://luisbozzo.com/wp-content/uploads/2018/05/Dossier_disipadores_2017_V6.pdf.

12. Bozzo L. *Manual SLB.* (2021b). Recuperado de https://es.scribd.com/document/373670566/1-Proyectos-Con-Disipadores-Casos-de-Estudio-Ing-Luis-Bozzo.

13. Bozzo L. (2021c). *Manual SLB.* Recuperado de https://www.prostructural.es/wp-content/uploads/2019/12/Manual-SLB-Devices.pdf.

14. Bozzo, L. (2022). *Curso de diseño de disipadores sismicos SLB. https://postensa.pe/disipadores-sismicos-slb/.* Recuperado de https://www.dropbox.com/s/898g258abilhyqk/Manual%20SLB%20Devices_Enero_2020.pdf?dl=0.

15. Bozzo, L. (2022a). *Filosofía del diseño. DOC PLAYER.* Recuperado de https://docplayer.es/72658797-Filosofia-del-diseno-de-proyectos-con-disipacion-de-energia-casos-de-estudio-diseno-de-proyectos-con-disipacion-de-energia.html.

16. Bozzo, L. (2022b). *Tablas de diseño*. Recuperado de https://luisbozzo.com/wp-content/uploads/2018/06/180611-tablas-de-dise%c3%91o-SLB.pdf.

17. Bozzo, L., Gaxiola, G. (2021). Recuperado de https://www.academia.edu/30347209/el_concepto_rigido-flexible-ductil_y_las_conexiones_slb.

18. Bozzo, L., Gaxiola, G. y Gonzales, H. (2021a). *luisbozzo.com*. Recuperado de http://luisbozzo.com/wp-content/uploads/2018/05/Procedimiento-para-el-dise%C3%B1o-con-SLB-Rev7.pdf.

19. Bozzo, L. y Hurtado F. (2021). Recuperado de http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.554.4703&rep=rep1&type=pdf.

20. Bozzo, L. M. y Gaxiola, G. (2021). *pdfcoffee*. Recuperado de Bozzo, L. M. & Gaxiola, G. (2015). El conhttps://pdfcoffee.com/el-concepto-quot-rigido-flexible-ductil-quot-y-las-conexiones-slb-pdf-free.html.

21. Comisión Guatemalteca de Normas. (2022). *Bloques huecos de concreto para muros. Especificaciones*. Recuperado de https://static1.squarespace.com/static/5f1737898fbf332b34b8d7aa/t/5f5bbf3d1f43e540214bf7ac/1599848254763/NTG+41054++Bloques+huecos+de+concreto+para+muros.+Especificaciones.pdf.

22. Condori, P. (2021). *Protección sísmica*. Recuperado el 12 de mayo de 2021. Recuperado de https://es.scribd.com/document/266938168/.

23. Cuevas, G. (2002). *Análisis estructural .* Noruega: Limusa.

24. Instituto del Concreto y del Cemento de Guatemala. (2018). *Ensayos no destructivos para evaluación de la resistencia del concreto endurecido*. *Boletín técnico 06*.

25. Instituto del Cemento y del Concreto de Guatemala. (2019). *Núcleos perforados para la evaluación de la resistencia a compresión del concreto endurecido*. *Boletín técnico 07*.

26. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto AC. *Construcción, tecnología en concreto*. (2021). Recuperado de http://www.imcyc.com/revistacyt/en11/ingenieria.htm.

27. León, L. (2016). *Disipadores y aisladores sísmicos, modelo de puente vehicular con disipador y sin disipador de energía, comparación de la respuesta.* Tesis de licenciatura. Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia. Recuperado de https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/13931/4/Laura%20Tatiana%20Leon_Trabajo%20de%20grado.pdf.

28. Marco, H. (2018). *Desempeño sísmico en edificaciones con aisladores elastomericos y amortiguadores de flujo viscoso.* Tesis de licenciatura. Universidad de Piura, Departamento de Ingenieria, Piura. Recuperado de https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/3246.

29. McCormac, J. C. (s.f.). *Diseño de concreto reforzado.* México: Alfaomega.

30. Monzón, H. (2021). *Las dos maneras de enfrentar amenazas naturales*. Recuperado de agies.org: https://www.agies.org/wp-content/uploads/2018/10/Arti%CC%81culo-1-Las-dos-maneras-de-enfrentar-amenazas-naturales.pdf.

31. Monzón, H. (2021). *Lecciones repetidas del terremoto del 7 de noviembre*. Recuperado de https://www.agies.org/wp-content/uploads/2018/02/Lecciones-repetidas-del-terremoto-del-07-de-noviembre.pdf.

32. Monzón, H. (2021). *Riesgos sísmicos.* Recuperado de file:///C:/Users/https://www.agies.org/biblioteca/riesgos-sismicos-edificios-fragiles/.

33. Morales, L. y Contreras, J. (2012). *Protección de una edificación existente con disipadores de energía.* Tesis de licenciatura. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.

34. Navarro, E. F. (2019). *Análisis comparativo del diseño sísmico de una estructura con muros continuos y con muros desacoplados incorporando disipadores SLB en la ciudad de Huncayo.* Tesis de licenciatura. Universidad Nacional del Centro de Perú, Huncayo. Recuperado de http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/5046/T010_72237105_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

35. Ovalle, J. y Reyes, M. (2021). Recuperado de https://es.scribd.com/document/279886951/Sistemas-de-proteccion-sismica-en-Chile.

36. Oviedo, J. y Duque, M. (2021). Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1794-12372009000100005&script=sci_abstract&tlng=es.

37. Pontificia Universidad Católica del Perú. (s.f.). *Sistemas modernos de protección sísmica*. Recuperado de https://es.scribd.com/document/283503540/sistemas-modernos-de-proteccion-sismica.

38. Postensa. (s.f.). *Postensa.* Recuperado de https://postensa.pe/empresa-postensado/.

39. Sánchez, F. (2016). *Procedimiento general de diseño de estructuras de concreto reforzado utilizadas en el sistema de construcción industrializado en serie.* Tesis de licenciatura. Universidad de San Carlos de Guatemala. Recuperado de http://repositoriosiidca.csuca.org/Author/Home?author=S%C3%A1nc.

40. Yagual Quimí, D. (s.f.). *Reforzamiento der estructuras*. *https://es.scribd.com/.* Recuperado de https://es.scribd.com/document/331452490/reforzamiento-de-estructuras.