



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

**“REFORZAMIENTO DE EDIFICIO DE 4 NIVELES, CONSTRUIDO DE CONCRETO ARMADO CON SISTEMA ESTRUCTURAL TIPO MARCOS, POR MEDIO DE DISIPADORES DE ENERGÍA, UBICADO EN EL CENTRO HISTÓRICO DEL MUNICIPIO DE QUETZALTENANGO, DEPARTAMENTO DE QUETZALTENANGO”**

**Ing. Luis Enrique Velásquez Calderón**

Asesorado por el Msc. Ing. Oscar Andrés García Valdez

Guatemala, octubre de 2019



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**“REFORZAMIENTO DE EDIFICIO DE 4 NIVELES, CONSTRUIDO DE CONCRETO ARMADO CON SISTEMA ESTRUCTURAL TIPO MARCOS, POR MEDIO DE DISIPADORES DE ENERGÍA, UBICADO EN EL CENTRO HISTÓRICO DEL MUNICIPIO DE QUETZALTENANGO, DEPARTAMENTO DE QUETZALTENANGO”**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

Ingeniero Luis Enrique Velásquez Calderón  
Asesorado por el Msc. Ing. Oscar Andrés García Valdez

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**Maestro en Estructuras**

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2019



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	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. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Armando Fuentes Roca
EXAMINADOR	Mtro. Oscar Andrés García Valdez
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:

**REFORZAMIENTO DE EDIFICIO DE 4 NIVELES, CONSTRUIDO DE CONCRETO ARMADO CON SISTEMA ESTRUCTURAL TIPO MARCOS, POR MEDIO DE DISIPADORES DE ENERGÍA, UBICADO EN EL CENTRO HISTÓRICO DEL MUNICIPIO DE QUETZALTENANGO, DEPARTAMENTO DE QUETZALTENANGO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de postgrado, con fecha octubre de 2017.

**Ingeniero Luis Enrique Velásquez Calderón**



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios:** Por sus bendiciones a mi vida, él ha sido mi guía, por seguir sus pasos he llegado a ser lo que soy, y a él le debo el permitirme concluir esta meta.
- A mis Padres:** Odilia Calderón y Luis Velásquez. Por su amor y consejos, que me han servido para alcanzar mis objetivos.
- A mis hermanos:** Jennifer, Linda, Shirly y Samuel. Por apoyarme incondicionalmente, por creer en mí y estar a mi lado en cada logro.
- A mi esposa:** Carolina Martini. Por aconsejarme y apoyarme durante esta etapa.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

**La Universidad de San  
Carlos de Guatemala**

Por ser la casa de estudios en la que  
me formé como profesional.

**La Escuela de Postgrado  
de la Facultad de Ingeniería**

Por otorgarme la especialización  
profesional.



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	13
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	17
ÍNDICE DE TABLAS.....	21
GLOSARIO .....	23
OBJETIVOS.....	25
INTRODUCCIÓN.....	27
ANTECEDENTES .....	29
JUSTIFICACIÓN .....	35
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	37
MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL .....	39
1. GENERALIDADES .....	55
1.1 Dispositivos disipadores de energía sísmica.....	55
1.2 Tipos de disipadores de energía. ....	55
1.2.1. Disipadores histeréticos.....	55
1.2.2. Disipadores de energía de fluido viscoso.....	57
1.2.3. Aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento ....	59
1.2.4. Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo:.....	60
1.3 Usos de los disipadores de energía.....	61
2. DISIPADORES DE ENERGÍA PARA EDIFICIOS DE CONCRETO	
65	
2.1 Localización de los disipadores de energía en edificios..	65
2.1.1 Disipador de fluido viscoso tipo muro. ....	66
2.1.2 Disipador de fluido viscoso tipo pistón.....	66

2.2	Descripción de los tipos de configuraciones. ....	68
2.2.1	Configuración diagonal. ....	68
2.2.2	Configuración Doble Diagonal. ....	69
2.2.3	Configuración Chevron. ....	70
2.3	Interpretación de la reducción de la aceleración sísmica. ....	70
2.4	Modificación del espectro de respuesta a utilizar. ....	77
3.	<b>DISIPADORES DE ENERGÍA DE FLUIDO VISCOSO. ....</b>	<b>81</b>
3.1	Características mecánicas de los disipadores de energía de fluido viscoso según el fabricante Taylor Devices inc. ....	81
3.2	Evaluación del amortiguamiento. ....	82
3.3	Efecto del amortiguamiento. ....	83
3.4	Recomendaciones sobre el uso de disipadores de energía en edificaciones. ....	85
3.4.1	En Función del tipo de sistema estructural ....	85
3.4.2	En Función del Nivel de Desempeño Deseado ....	86
3.4.3	En Función de la edad de la estructura ....	87
3.4.4	En Función de la Estética o Arquitectura del proyecto ....	87
3.4.5	En Función del Mantenimiento o Vida Util. ....	87
3.4.6	En Función del Costo y las condiciones del proyecto. ....	88
3.4.7	En Función de la Importancia de la Estructura ....	89
3.4.8	En Función del tipo de Dispositivo seleccionado ....	89
3.5	Método de modelado de un disipador de energía de fluido viscoso utilizando ETABS 2016 ....	89
3.5.1	Elementos Link en ETABS 2016. ....	90
4.	<b>ANÁLISIS DEL EFECTO DE LOS DISIPADORES DE ENERGÍA EN UN EDIFICIO DE CONCRETO ARMADO DE 4 NIVELES. ....</b>	<b>95</b>

<b>4.1</b>	<b>Descripción de la construcción.</b>	<b>95</b>
<b>4.2</b>	<b>Análisis estructural del edificio sin disipadores de energía.</b>	<b>106</b>
<b>4.3</b>	<b>Modelado de los disipadores de energía de fluido viscoso.</b>	<b>109</b>
<b>4.4</b>	<b>Análisis Tiempo Historia</b>	<b>122</b>
<b>4.5</b>	<b>Elección del tipo de disipador según su capacidad axial.</b>	<b>136</b>
<b>5.</b>	<b>DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO CONSTRUCTIVO</b>	<b>138</b>
<b>5.1</b>	<b>Requerimientos previos.</b>	<b>138</b>
<b>5.2</b>	<b>Identificación del acero existente por medio de escáner.</b>	<b>139</b>
<b>5.3</b>	<b>Perforaciones para anclaje de estructura metálica a estructura de concreto existente.</b>	<b>142</b>
<b>5.4</b>	<b>Piezas metálicas requeridas según el tipo de configuración de los disipadores de energía.</b>	<b>147</b>
	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>160</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>162</b>



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1 <b>Disipador de fluido viscoso</b> .....	30
Figura 2 <b>Espectro al 5% y al 30% de amortiguamiento crítico</b> .....	31
Figura 3 <b>Geometría de los disipadores metálicos</b> .....	40
Figura 4 <b>Dispositivos ADAS (flexión)</b> .....	40
Figura 5 <b>Disipadores Pall</b> .....	41
Figura 6 <b>Funcionamiento del disipador de fluido viscoso</b> .....	42
Figura 7 <b>Configuración Chevron Brace en un marco de concreto</b> ..	43
Figura 8 <b>Configuración diagonal</b> .....	44
Figura 9 <b>Configuración Scissor Jack</b> .....	45
Figura 10 <b>Aislador elastomérico de alto amortiguamiento</b> .....	46
Figura 11 <b>Aislador elastomérico con núcleo de plomo</b> .....	47
Figura 12 <b>Aisladores de péndulo</b> .....	49
Figura 13 <b>Reducción de aceleraciones por cambio de periodo</b> .....	51
Figura 14 <b>Geometría de los disipadores histeréticos</b> .....	56
Figura 15 <b>Comportamiento de los dispositivos histeréticos</b> .....	56
Figura 16 <b>Dispositivos ADAS (flexión)</b> .....	57
Figura 17 <b>Funcionamiento del disipador de fluido viscoso</b> .....	58
Figura 18 <b>Disipador de fluido viscoso Taylor Devices</b> .....	58
Figura 19 <b>Aislador elastomérico de alto amortiguamiento</b> .....	59
Figura 20 <b>Aislador elastomérico con núcleo de plomo</b> .....	61
Figura 21 <b>Ubicación de los disipadores histeréticos</b> .....	62
Figura 22 <b>Disipador de fluido viscoso tipo muro</b> .....	66
Figura 23 <b>Disipador de energía de fluido viscoso tipo pistón</b> .....	67
Figura 24 <b>Tipos de configuración para disipadores de energía de fluido viscoso</b> .....	68
Figura 25 <b>Fuerzas internas en una configuración diagonal</b> .....	69
Figura 26 <b>Fuerzas internas en una configuración doble diagonal</b> ..	69
Figura 27 <b>Fuerzas internas en una configuración doble diagonal</b> ..	70
Figura 28 <b>Espectro de respuesta ejemplo</b> .....	71

Figura 29 <b>Coefficiente sísmico.</b> .....	76
Figura 30 <b>Reducción del espectro de respuesta por la presencia de disipadores de energía.</b> .....	78
Figura 31 <b>Coefficiente sísmico.</b> .....	79
Figura 32 <b>Propiedades de los disipadores de energía de fluido viscoso.</b> .....	81
Figura 33 <b>Amortiguamiento viscoso equivalente.</b> .....	83
Figura 34 <b>Efecto del amortiguamiento en las demandas sísmicas.</b> .....	85
Figura 35 <b>Herramienta Link para modelado de disipadores</b> .....	91
Figura 36 <b>Creación del Link.</b> .....	92
Figura 37 <b>Propiedades del disipador de energía.</b> .....	93
Figura 38 <b>Herramienta Draw Links</b> .....	93
Figura 39 <b>Dibujo de la sección Link en un modelo.</b> .....	94
Figura 40 <b>Planta primer nivel</b> .....	96
Figura 41 <b>Planta segundo nivel</b> .....	97
Figura 42 <b>Planta tercer nivel</b> .....	98
Figura 43 <b>Planta cuarto nivel</b> .....	99
Figura 44 <b>Fotografías durante el proceso constructivo.</b> .....	100
Figura 45 <b>Planta de columnas primer nivel</b> .....	101
Figura 46 <b>Planta de columnas segundo, tercer y cuarto nivel</b> .....	101
Figura 47 <b>Detalles de columnas</b> .....	102
Figura 48 <b>Planta de losas y vigas primer nivel</b> .....	103
Figura 49 <b>Planta de losas y vigas segundo nivel</b> .....	103
Figura 50 <b>Planta de losas y vigas tercer y cuarto nivel</b> .....	104
Figura 51 <b>Detalles de vigas</b> .....	105
Figura 52 <b>Modelo del edificio en ETABS 2016</b> .....	106
Figura 53 <b>Rotación en el modo 1</b> .....	108
Figura 54 <b>Ángulo de inclinación del disipador diagonal.</b> .....	114
Figura 55 <b>Ubicación de los disipadores de energía.</b> .....	115
Figura 56 <b>Propiedades del disipador de energía</b> .....	116

Figura 57 desplazamientos en el cuarto nivel para los modos 1 y 2. .....	119
Figura 58 Registro de movimiento sísmico para Quetzaltenango con fecha 2017/09/07.....	123
Figura 59 Ejemplo de un registro calibrado a un determinado espectro de respuesta.....	124
Figura 60 Registro para el sentido Este-Oeste.....	125
Figura 61 Programa SeismoMatch2018 configuración del registro a calibrar.....	125
Figura 62 Registro cargado en el programa SeismoMatch2018. ...	126
Figura 63 Valores de tiempo y aceleración para el espectro de respuesta utilizado. ....	126
Figura 64 Espectro de respuesta cargado en el programa SeismoMatch2018.....	127
Figura 65 Periodos mínimo y máximo de calibración.....	128
Figura 66 Registro Original y registro calibrado. ....	128
Figura 67 Espectro de respuesta, registro original y registro calibrado.....	129
Figura 68 Tabla de registro original y registro calibrado. ....	130
Figura 69 Análisis tiempo historia desde ETABS.....	130
Figura 70 Funciones tiempo historia.....	131
Figura 71 Definición de las funciones creadas en los casos de carga. .....	132
Figura 72 Fuerza axial en los disipadores de energía.....	136
Figura 73 Equipo de detección Hilti PS 1000 S-Scan system.....	139
Figura 74 Utilización de equipo de escáner.....	140
Figura 75 Marcas de pintura en ubicación de refuerzo.....	141
Figura 76 Ubicación de perforaciones. ....	141
Figura 77 Equipo Hilti para perforación. ....	142
Figura 78 Fijación del equipo en el elemento de concreto. ....	143
Figura 79 Nivelación del equipo.....	144

Figura 80 <b>Equipo durante una perforación</b> .....	145
Figura 81 <b>Aplicación de epóxico</b> .....	146
Figura 82 <b>Instalación de pernos en columna</b> .....	146
Figura 83 <b>Instalación de pernos en viga</b> .....	147
Figura 84 <b>Plano constructivo configuración tipo Chevron</b> .....	148
Figura 85 <b>Plano constructivo configuración tipo Diagonal</b> .....	148
Figura 86 <b>Prueba de montaje de una platilla de madera</b> .....	149
Figura 87 <b>Equipo de perforación para platinas metálicas</b> .....	150
Figura 88 <b>Pieza perforada</b> .....	150
Figura 89 <b>Montaje de piezas metálicas</b> .....	151
Figura 90 <b>Marco tipo Chevron</b> .....	152
Figura 91 <b>Pre calentamiento de electrodos y limpieza de soldadura</b> .....	153
.....	
Figura 92 <b>Protección de un disipador de energía</b> .....	154
Figura 93 <b>Montaje de un disipador de energía</b> .....	154
Figura 94 <b>Engrasado de un pasador</b> .....	155
Figura 95 <b>Colocación de una argolla de seguridad</b> .....	155
Figura 96 <b>Disipadores en configuración Chevron</b> .....	156
Figura 97 <b>Disipador en configuración Diagonal</b> .....	156

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tipos de disipadores de energía sísmica.....	55
Tabla 2 Valores de periodo y aceleración para el espectro de ejemplo. ....	72
Tabla 3 Coeficientes y factores para diseño de sistemas sismorresistentes. ....	74
Tabla 4 Valores de $K_T$ y $X$ según el sistema estructural.....	75
Tabla 5 Factores de reducción de amortiguamiento. ....	84
Tabla 6 Recomendaciones según el nivel de desempeño esperado. ....	86
Tabla 7 Chequeo de derivas para los 4 niveles.....	107
Tabla 8 Participación de masa modal. ....	108
Tabla 9 Valores de $\phi_i$ normalizados.....	112
Tabla 10 Valores requeridos para encontrar el coeficiente $C$ . ....	113
Tabla 11 Valores de $m_i$ por cada nivel. ....	113
Tabla 12 Chequeo de derivas para los 4 niveles.....	117
Tabla 13 Participación de masa modal. ....	118
Tabla 14 Derivas obtenidas para el análisis tiempo historia.....	133



## **GLOSARIO**

<b>AGIES</b>	Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica.
<b>AMORTIGUADOR</b>	Cualquier dispositivo ideado para absorber y mitigar una fuerza.
<b>CEDENCIA</b>	Esfuerzo necesario para que un objeto empiece a deformarse permanentemente.
<b>CORTANTE BASAL</b>	Es la acumulación progresiva de las fuerzas cortantes de cada piso, las cuales se reflejan en la base del mismo.
<b>DERIVA</b>	Desplazamiento lateral de una estructura.
<b>DISIPADORES DE ENERGÍA</b>	Son dispositivos mecánicos que se instalan en un edificio y disipan la energía sísmica que entra al sistema.
<b>ELASTOMÉRICO</b>	Son aquellos tipos de compuestos que incluyen no metales en su composición y que muestran un comportamiento elástico.
<b>HISTÉRESIS</b>	Es la tendencia de un material a conservar una de sus propiedades, en ausencia del estímulo que la ha generado.

<b>PISTÓN</b>	Pieza que se mueve hacia arriba o hacia abajo impulsando un fluido o bien recibiendo el impulso de él.
<b>PORTICO</b>	Estructura formada por columnas y vigas que soporta cargas laterales y gravitacionales.
<b>REHABILITACIÓN</b>	Conjunto de intervenciones diseñadas para optimizar el funcionamiento de una estructura.
<b>SUB SUELO</b>	Parte del terreno que está por debajo de la superficie terrestre.
<b>VISCOSIDAD</b>	Es la resistencia que tienen las moléculas que conforman un líquido para separarse unas de otras, es decir, es la oposición de un fluido a deformarse.

## OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL

- Evaluar el efecto de la instalación de disipadores de energía en el edificio Nuestra América ubicado en el centro histórico de la ciudad de Quetzaltenango, buscando reducir su vulnerabilidad ante la afectación de sismos.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Analizar el efecto de los disipadores de energía para la reducción de derivas en la estructura.
2. Conocer la ubicación y cantidad óptima de disipadores de energía para el edificio.
3. Determinar si la implementación de disipadores de energía, haría que el edificio en estudio cumpla con las normativas actuales.



## INTRODUCCIÓN

Muchas de las edificaciones existentes en la ciudad de Quetzaltenango se han diseñado como un sistema de marcos de concreto armado, y en muchos casos por la antigüedad de las mismas, no tomaron en cuenta los aspectos mencionados en la normativa AGIES NSE 2010, ya que fueron construidas antes de su publicación.

El edificio Nuestra América, se encuentra ubicado en la ciudad de Quetzaltenango, en el centro histórico, zona 1. Este fue construido hace aproximadamente 10 años, por lo que se calcula que no cumple con requisitos en cuanto a los desplazamientos máximos requeridos por dicha norma. Es importante mencionar que se deben controlar estos desplazamientos para garantizar que, ante la afectación de un sismo, los elementos estructurales y no estructurales no sufran daños que obliguen a realizar trabajos de reparación o eventualmente, declarar el edificio como inhabitable.

Los disipadores de energía son dispositivos que absorben la energía de un sismo, y son utilizados para proporcionarle un amortiguamiento adicional a una estructura. Para la propuesta de reforzamiento de la estructura analizada, se propondrán disipadores del tipo viscoso lineal, los cuales son cilindros que se encuentran divididos en su interior por medio de cámaras, los cuales contienen un fluido de baja viscosidad, y disipan la energía por medio de la fricción entre el fluido y los orificios existentes en su interior.

Esta investigación demostró la importancia de colocar estos dispositivos a estructuras existentes, ya que garantiza la reducción de la aceleración de las fuerzas sísmicas, y así, reducir los esfuerzos y cargas sísmicas actuantes. Además, se determinaron su correcta ubicación para optimizar su funcionamiento.

Se calculó el diseño de la estructura sin tomar en cuenta la existencia de los disipadores de energía y luego se analizó el edificio tomando en cuenta la instalación de estos dispositivos, a fin de evaluar las mejoras estructurales y así justificar la importancia de su implementación.

En el capítulo uno de esta investigación, se darán a conocer los tipos de disipadores de energía y los materiales utilizados para su fabricación; el capítulo dos, dará a conocer los disipadores utilizados para estructuras de concreto y su modo de acoplamiento, en el siguiente capítulo se realizará la evaluación de la influencia de estas estructuras para la reducción de la demanda sísmica; en el capítulo cuatro, se realizará el análisis de la implementación de disipadores de energía a una estructura de concreto de 4 niveles, realizando modelos con y sin la colocación de estos dispositivos; para concluir en el último capítulo, con la documentación del método constructivo para implementar disipadores de energía en edificio existentes.

## ANTECEDENTES

Muchas de las estructuras de concreto en Guatemala, utilizadas para la ocupación de personas, fueron diseñadas y construidas en años donde no se contaba con un reglamento sismorresistente, que pudiera guiar a los diseñadores a cumplir con requerimientos mínimos y así garantizar el buen comportamiento de la estructura ante la afectación de un terremoto. Existen un gran número de parámetros relacionados con el desempeño de un edificio, uno de estos es el efecto sísmico, el cual no estaba o estaba pobremente considerado, en las normativas anteriores. Cuando fueron construidos estos edificios que están en servicio actualmente, no existían las normas AGIES, las cuales nos dan parámetros a tomar en cuenta en los diseños sísmicos, considerando la ubicación geográfica, y para la creación del espectro de respuesta específico para la estructura.

Los disipadores de energía comúnmente utilizados para el reforzamiento de edificios de concreto armado, son los de fluido viscoso, como se muestra en la figura 1. (Sadowski, 2015) Describe las configuraciones que se pueden utilizar, ubicando los arreglos para satisfacer las derivas máximas de entrepiso, en la cual se muestra que el de mayor eficiencia es el tipo chevron, con el cual obtuvo reducciones promedio de un 35% para los desplazamientos espectrales máximos.

**Figura 1 Disipador de fluido viscoso.**



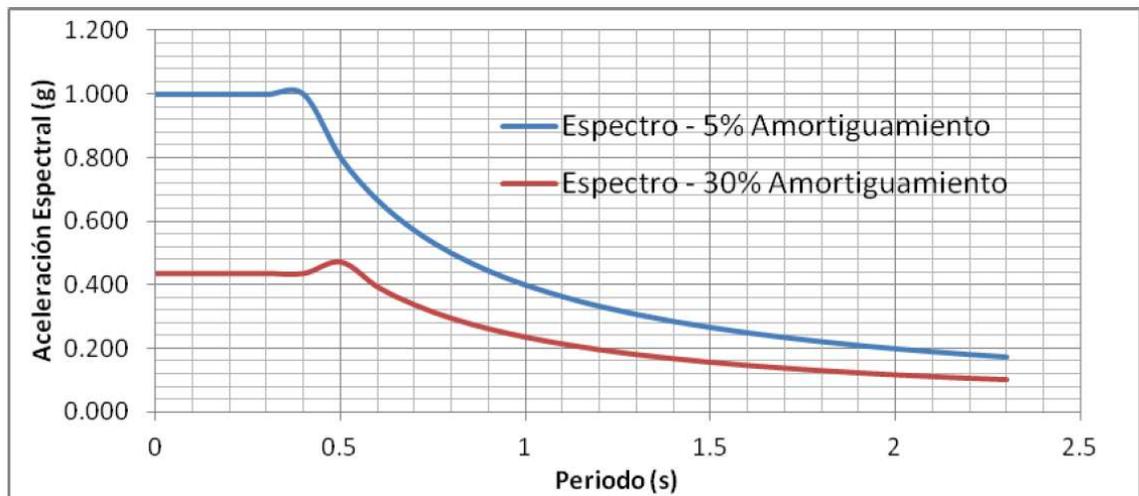
Fuente: Elaboración propia.

(Vargas, 2003) Describe la influencia que los dispositivos disipadores de energía tiene en el comportamiento de la estructura, cuando son sometidos a fuerzas sísmicas. Con lo cual busca esclarecer las variables que deben ser consideradas al diseñar estructuras con disipadores, así como la influencia que cada una de estas tiene en el diseño. Establece un método para el diseño sísmico, empleando este tipo de dispositivos reductores.

Para la ubicación de los tipos de configuraciones en un edificio, (Gutiérrez, 2015) presenta la evaluación del comportamiento de una familia de estructuras con disipadores de energía, ubicados en diversas posiciones y configuraciones; sometidas a sismo intenso, estudio que se realiza modelando mediante un programa de computo especial, muestra los resultados de los efectos del sismo realizando un análisis comparativo. Con lo cual se muestra que los resultados representan un avance en la necesidad de aplicar tecnologías y de ampliar los estudios.

En cuanto al reforzamiento de una estructura existente, (Díaz, 2012) en su estudio explica los metodos de reforzamiento, tradicionales y modernos, empleados en edificaciones, colocando dispositivos disipadores de fluido viscoso. Además, expone las formas de representación de las sollicitaciones sísmicas, metodos para estimar el amortiguamiento efectivo, con los cuales elabora comparaciones de la respuesta antes y despues de adicionarle los disipadores, como se muestra en la figura 2; describe la metodología a seguir para reducir la vulnerabilidad de las edificaciones.

Figura 2 **Espectro al 5% y al 30% de amortiguamiento crítico.**



Fuente: Protección de una edificación existente con disipadores de energía (Díaz, 2012)

En cuanto al tema del subsuelo, (Vázquez, 2014) en su artículo toma en cuenta las características dinámicas del subsuelo de la ciudad de México, considerándo la rehabilitación de una estructura de 16 niveles mediante amortiguadores viscosos no lineales. El incremento del porcentaje de amortiguamiento crítico aunado a un refuerzo específico del edificio, permiten que la estructura responda de una forma adecuada,

logrando así que sus desplazamientos cumplan con lo establecido en la normativa vigente.

(David, 2016) Con la finalidad de demostrar la efectividad los disipadores de energía, muestra el reforzamiento con dispositivos metálicos tipo ADAS, en un edificio de 5 niveles, describe las propiedades del disipador; sus resultados muestran que la estructura tiene una reducción en sus derivas de piso, llegando a ser un 53% como máximo, también, en los muros se logró reducir la deformación inelástica del acero de refuerzo, y con esto se demuestra que los disipadores producen una disminución de deformaciones en la estructura reduciendo daños.

Para la metodología de evaluación y modelación, (Reyes, 2008) muestra la forma de determinar la necesidad y alcance de una rehabilitación, así como selección del método más adecuado, en su estudio realiza una evaluación del desempeño inelástico, a dos edificios de concreto reforzado utilizando el criterio de energía elástica de deformación y energía disipada, de forma tal que se cumpla un balance.

(Rodas, 2011) Describe los modelos matemáticos empleados para predecir el comportamiento de la estructuras provistas con disipadores de energía, ante un sismo, realiza ejemplo que muestras la respuesta de los sistemas con y sin dispositivos de protección sísmica. Utilizando el programa SAP 2000, realiza un análisis tiempo historia para finalmente emitir las conclusiones en las que se expresan las ventajas del uso de disipadores de energía.

Para realizar una descripción experimental del funcionamiento de los disipadores de fluido visoco (Farfán, 2016) realiza un modelo a escala que permite recrear las características reales de un sismo, de la misma manera simula las condiciones reales de la estructura que se ve sometida a dicho fenomeno, lográndose captar en el modelo, la mayor cantidad de

características reales como los desplazamientos horizontales, la disipación de la energía ascendente en la estructura, entre otras. En el estudio también se pudo notar que en el momento de generarse una oscilación o balanceo, se transmite por la estructura de forma ascendente la energía describiendo un movimiento ondulatorio, se observa en el modelo que este movimiento es interrumpido por los disipadores que se instalaron en la parte intermedia de la estructura.

Los amortiguadores viscosos pueden diseñarse en edificios nuevos y estructuras existentes, (Pérez, 2012) menciona que son relativamente pequeños y discretos, pueden ser incorporados en una estructura sin el compromiso de su aspecto. Esto es especialmente útil en la restauración de edificios históricamente significativos. Pueden también ser agregados sin la modificación estructural significativa en la mayoría de los casos. Los amortiguadores pueden instalarse como miembros diagonales de varias maneras.

Muchas estructuras actuales trabajan en el rango inelásticos de deformación, (Verdugo, 2007) explica que para evitar la posibilidad de que la estructura trabaje en ese rango, se deben disminuir los desplazamientos de los centros de masa de cada piso, esto se puede lograr incorporando disipadores de energía en la estructura, además de impide la formación de rotulas plásticas y así se logra limitar los posibles mecanismos de falla.

Un análisis de tiempo-historia es una metodología moderna y más precisa (Mena, 2018) realizó este tipo de trabajo a dieciocho modelos de estructuras aporticadas con alturas de 12 a 60 metros. Para el análisis se emplearon cinco registros de acelerogramas de sismos reales, cada sismo fue aplicado a cada uno de los modelos y los resultados fueron obtenidos usando el programa SAP2000.



## JUSTIFICACIÓN

La presente investigación se realiza principalmente porque el edificio Nuestra América, se encuentra en una zona sísmica y fue diseñado cuando aún no se contaba con las normativas AGIES NSE 2010. Además, se evidencia la presencia de muchas otras edificaciones en funcionamiento y que fueron diseñados y construidos, en similares circunstancias, con lo cual se podrían replicar en los mismos, este mecanismo que reduciría su vulnerabilidad ante los sismos que afectan la región.

Este documento ayudará a los profesionales en la rama estructural, a poder aplicar la metodología para el análisis e implementación de disipadores de energía a edificios existentes, donde, además, se darán a conocer cómo realizar la ubicación óptima de estos dispositivos, los tipos de configuración que se pueden utilizar, y la incidencia que provocan en la reducción de las cargas sísmicas.

En cuanto a la reducción de las cargas sísmicas, cada dispositivo se comporta de forma diferente, por lo que se darán a conocer las capacidades que éstos tienen para reducir la aceleración provocada por la incidencia sísmica, por lo cual se presentarán los distintos tipos de disipadores de energía en el mercado, las ventajas y desventajas de cada uno de ellos, los materiales utilizados para su fabricación, el proceso constructivo y los métodos de instalación.

Con este análisis, se espera concluir que la implementación de disipadores de energía en el edificio en estudio es importante y necesario, para garantizar que este permanecerá en condiciones de operación, luego de la afectación de un sismo.

Dada la importancia de este tema, el estudio se realiza bajo la línea de investigación de: Nuevas tecnologías en Ingeniería Estructural, Aisladores sísmicos, que corresponde a la Maestría en Estructuras. Este material ayudará tanto a los profesionales de la rama, como a las autoridades encargadas de velar por el buen funcionamiento de los edificios en Guatemala, y así poder tomar mejores decisiones en cuanto al reforzamiento y a la construcción de nuevas estructuras, ya que se demuestra la influencia que tienen los disipadores de energía en los edificios.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El edificio Nuestra América, construido hace 10 años, no consideró los lineamientos descritos en las normas AGIES NSE 2010, por lo que estructuralmente puede estar vulnerable ante la afectación de un sismo.

Las causas por las cuales se cree que este edificio es vulnerable, son que actualmente se tienen antecedentes de sismos de gran magnitud en la región, y debido a la probabilidad de ocurrencia sísmica, se espera un terremoto de importancia en los próximos años, también se estima que, ante las fuerzas de un sismo, la estructura estaría subdiseñada, ya que fue calculada y construida con normativas que consideraban pobremente el efecto de las fuerzas sísmicas. Además, luego de una evaluación preliminar, se estableció que el mismo no cuenta con ningún mecanismo para disipación de energía, con lo cual se justifica este estudio y su eventual implementación.

Los disipadores de energía han sido utilizados en países de primer mundo como Japón y Estados Unidos, siendo efectivos, posterior a un evento sísmico, con lo cual se prevé replicar esta experiencia en Guatemala.

Los efectos en las edificaciones pueden ser el colapso parcial o total de la estructura ante un sismo de gran magnitud, provocando que los daños estructurales que pueden aparecer, inhabiliten el edificio.

### **Debido a la problemática del tema surge la pregunta central:**

- ¿Cómo afectan los disipadores de energía al comportamiento de la estructura del edificio?

**Preguntas secundarias:**

- ¿Se cumplen las solicitaciones de las normativas actuales con la implementación de disipadores de energía?
- ¿La implementación de disipadores de energía evitaría que la estructura colapse ante un terremoto de gran magnitud?
- ¿Se puede replicar el análisis en el edificio en estudio a otras estructuras con características similares?

**Principales causales:**

- Sismos no considerados o pobremente considerados.

## MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

### Disipadores de Energía

Son dispositivos mecánicos que se instalan en el edificio y disipan la energía sísmica que entra al sistema. Debido a que no modifican significativamente la rigidez lateral, el periodo fundamental del conjunto no varía considerablemente.

### Tipos de dispositivos

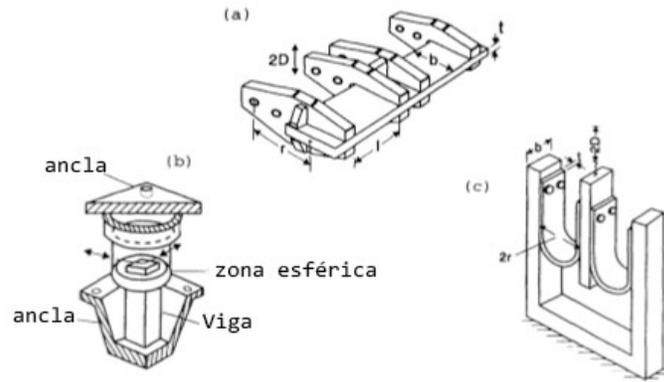
Existen disipadores histeréticos, que trabajan por medio de ciclos de desplazamiento inelástico; disipadores viscoelásticos, que funcionan en base al desplazamiento y la velocidad; y disipadores de fluido-viscoso, que actúan de manera proporcional a la velocidad.

### Disipadores histeréticos

Los disipadores histeréticos son aquellos que trabajan por medio del desplazamiento de entrepiso de la estructura y pueden ser de fluencia o friccionantes.

Los dispositivos por fluencia disipan energía introduciendo comportamiento inelástico en el metal mediante ciclos de deformación inelástica por flexión, corte, torsión o extrusión (Figura 3). En estos dispositivos la fuerza del disipador ( $F$ ) y el desplazamiento de entrepiso ( $\Delta$ ) guardan una relación.

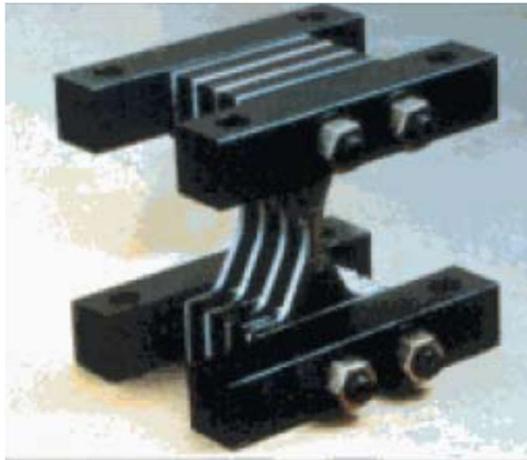
Figura 3 Geometría de los disipadores metálicos



Fuente: <http://www.imcyc.com>

Los disipadores por flexión llevan a la sección transversal del dispositivo a la fluencia de manera uniforme. Unos de los más conocidos son los dispositivos ADAS (Added Damping and Stiffness) que poseen una sección en forma de X (Figura 4).

Figura 4 Dispositivos ADAS (flexión)

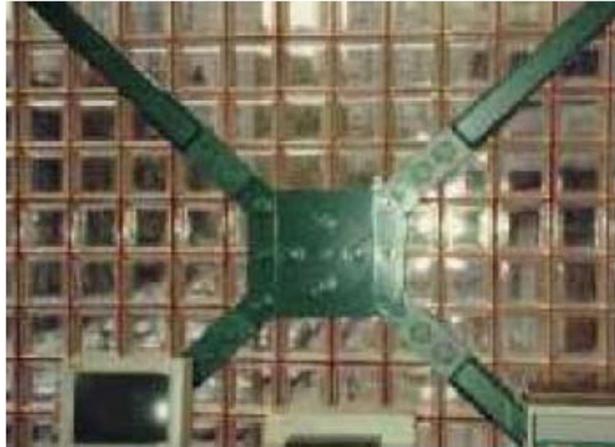


Fuente: [www.obrasweb.mx](http://www.obrasweb.mx)

Los disipadores friccionantes son aquellos que funcionan en base al desplazamiento relativo de 2 placas que están unidas con pernos de alta resistencia. Son diseñados para actuar a partir de una fuerza determinada (F)

y limitan la cantidad de energía que puede ingresar al sistema. Una de las marcas que comercializa este tipo de disipadores es Pall Dinamycs (Figura 5).

Figura 5 **Disipadores Pall**



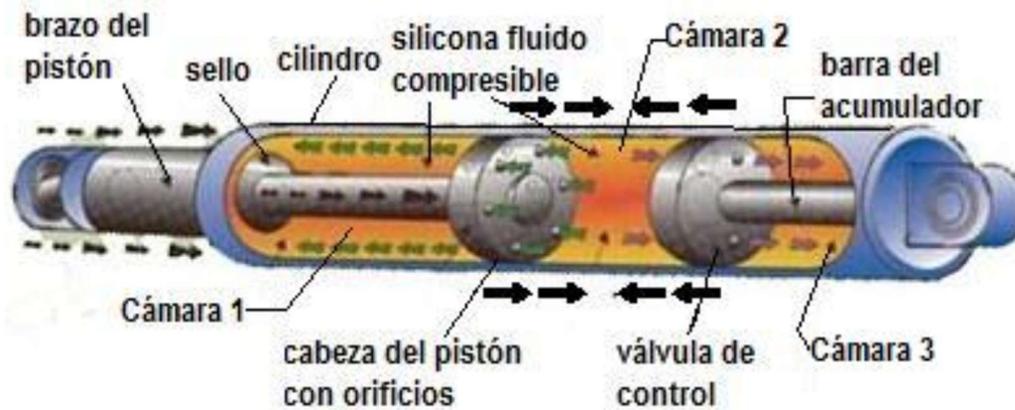
Fuente: [www.obrasweb.mx](http://www.obrasweb.mx)

### **Disipadores de energía de fluido viscoso**

Los disipadores de Fluido Viscoso son cilindros huecos que se encuentran divididos en tres cámaras. En su interior tienen un fluido que es de baja viscosidad, inerte, no combustible, no inflamable, no tóxico y además que no se degrada con el paso del tiempo.

Estos disipadores disipan energía debido a la fricción entre el fluido y los orificios de pistones que tienen en su interior. El movimiento de la edificación empuja el pistón hacia el interior del cilindro, comprimiendo el fluido de la cámara 2. Por los orificios de la cabeza del pistón pasa flujo de la cámara 2 a la 1, generando una fuerza de amortiguamiento que buscará igualar la presión en ambas cámaras. Al ser la presión en la cámara 2 mayor que en la cámara 3, por la válvula de control pasa líquido a la cámara 3, lo que evita que el pistón tenga un efecto de rebote.

Figura 6 **Funcionamiento del disipador de fluido viscoso**



Fuente: Elementos de un disipador de fluido viscoso (Taylor 1999)

### **Configuraciones de los Dispositivos**

Existen diversas maneras de colocar los disipadores. Cada una de ellas puede lograr una eficiencia diferente. La eficiencia ( $f$ ) se mide en función de la fuerza en el dispositivo en relación a la velocidad (o desplazamiento) de entrepiso.

Las disposiciones más comunes son las de Chevron, Diagonales y Scissor Jack.

### **Configuración Chevron Brace**

La configuración Chevron Brace (Figura 7) puede lograr una eficiencia de 1, es decir toda la capacidad del disipador sirve para controlar el movimiento lateral de la estructura. Para lograrlo es necesario que los arriostres que lo sostienen tengan una alta resistencia lateral.

Figura 7 **Configuración Chevron Brace en un marco de concreto**

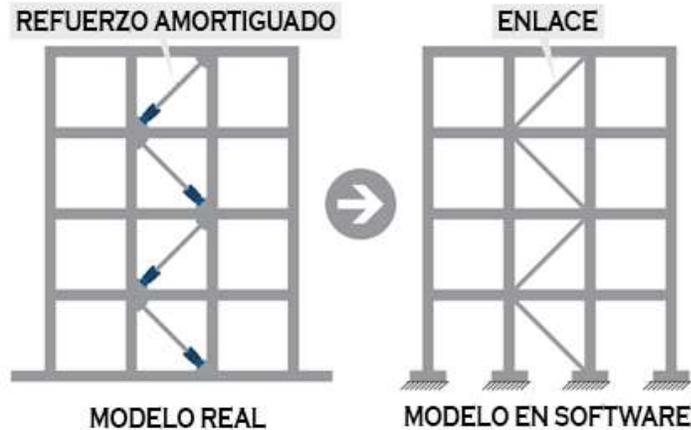


Fuente: Elaboración propia.

### **Configuración Diagonal**

La configuración Diagonal (Figura 8) es la más económica, debido a que sólo requiere de tubos metálicos para la instalación de los disipadores embargo, es la que tiene la menor eficiencia. La componente horizontal de la fuerza que se genere es la que brindará amortiguamiento. La eficiencia depende del ángulo de inclinación del brazo metálico que va a sostener al disipador, mediante la expresión  $f = \cos(\theta)$ .

Figura 8 **Configuración diagonal**



Fuente: [www.quaketek.com](http://www.quaketek.com)

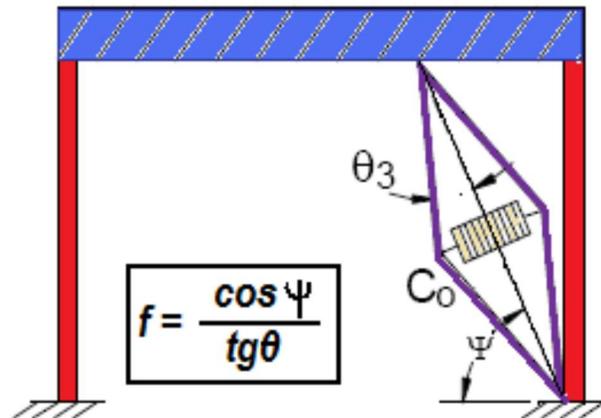
### **Configuración Scissor Jack**

La configuración Scissor Jack (Figura 9) aumenta el desplazamiento del pistón para un desplazamiento de entrepiso, razón por la cual tiene una eficiencia mayor a la unidad. La eficiencia depende del ángulo de inclinación del disipador ( $\psi$ ) y del ángulo de la armadura ( $\theta$ ) según la relación  $f = \cos(\psi) / \text{tg}(\theta)$ .

Otra ventaja de esta configuración es que ocupa un menor espacio, lo que no impide colocar una puerta o una ventana en su lado.

Esta configuración tiene un mayor precio, por lo que para tomar una decisión de cuál de las tres configuraciones utilizar será necesario comparar el costo asociado a la instalación y el costo de los disipadores a utilizarse.

Figura 9 Configuración Scissor Jack.



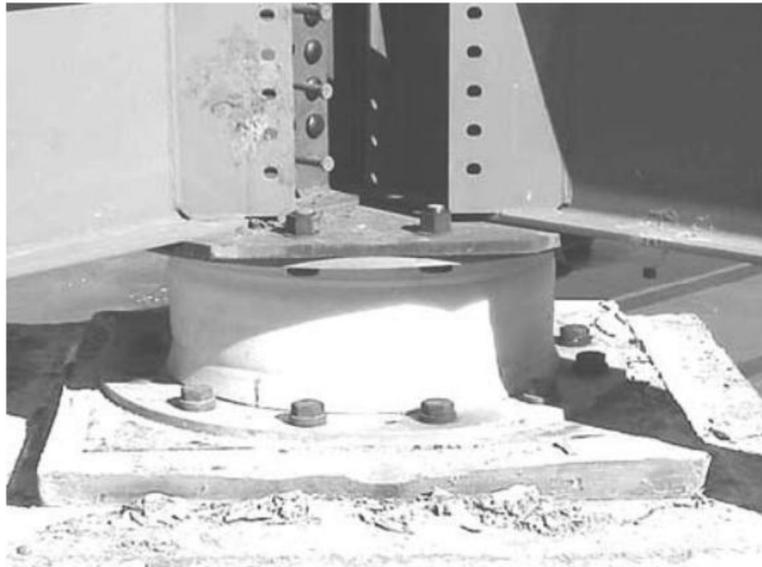
Fuente: [www.quaketek.com](http://www.quaketek.com)

### Aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento

Este tipo de aisladores son construidos con neopreno zunchado, intercalando intercalando placas delgadas de acero en un bloque cúbico o cilíndrico de neopreno, el principal aporte es que aumenta la rigidez vertical, manteniendo su flexibilidad lateral. Los aisladores de alto amortiguamiento están hechos de un compuesto especial de goma, obtenido con la adición de carbono extra fino, aceite negro, o resinas, que permite alcanzar valores más altos de amortiguamiento. El espesor de las capas de caucho varia, normalmente, entre los 8mm y 20 mm, y el espesor de la capa de acero oscila entre los 2 mm y los 4 mm.

Los valores de amortiguamiento varían entre 10% y el 20%, el análisis de estructuras aisladas con estos dispositivos se realiza como un sistema bilineal cuyas propiedades dependen de la razón de amortiguamiento efectivo y el módulo de deformación cuyos valores oscilan entre 0.4 MPa y 1.4 MPa.

Figura 10 **Aislador elastomérico de alto amortiguamiento.**



Fuente: [www.antisismos.blogspot.com](http://www.antisismos.blogspot.com)

#### **Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo:**

Estos aisladores son muy similares a los anteriores, con la diferencia que usan un núcleo de plomo que le proporciona una capacidad adicional de disipar energía y le brinda una rigidez inicial un poco más alta respecto a los anteriores, disminuyendo los desplazamientos para pequeños sismos y fuerzas de viento que actúen sobre la estructura.

Estos aisladores inicialmente fueron desarrollados y usados en Nueva Zelanda, de ahí que algunos autores se refieran a ellos como sistemas N-Z. El comportamiento del aislador depende de la fuerza lateral que se impone, si la fuerza es muy pequeña será asumida por el núcleo de plomo y el sistema tendrá una alta rigidez, cuando la carga lateral se aumenta, el núcleo de plomo se deforma y empieza a fluir, el comportamiento histerético se genera con la energía disipada por el núcleo de plomo, como consecuencia la rigidez lateral disminuye. El amortiguamiento generalmente se encuentra entre el 15% y el 35% y se puede realizar el modelado de este aislador empleando la teoría

bilineal. En su proceso de fabricación, es necesario que el hueco realizado en el caucho sea más pequeño que el diámetro del elemento de plomo para que éste sea forzado a entrar. Esta característica garantiza la uniformidad del bloque y la consiguiente deformación por cortante de todo el volumen del núcleo de plomo.

La plastificación del núcleo de plomo garantiza elevados valores de amortiguamiento, que originan, no sólo menores desplazamientos de la superestructura, sino también mayor rigidez lateral del tablero para niveles bajos de acciones horizontales. La tensión de cedencia a cortante del núcleo de plomo es de aproximadamente, 10 Mpa sobrepasado este valor, la rigidez del dispositivo es la rigidez del caucho, lo que proporciona al dispositivo rigidez bi-lineal. Este comportamiento es excelente, incluso a bajas temperaturas, pues el caucho presenta buenas características de resistencia a fatiga bajo estas condiciones. La rigidez inicial del aparato es cerca de 10 veces superior a la rigidez postelástica, resultante de la cadencia del núcleo de plomo. Este tipo de sistema de aislamiento sísmico es la solución más utilizada en puentes, dada su simplicidad, comportamiento y bajo costo.

Figura 11 **Aislador elastomérico con núcleo de plomo.**



Fuente: Sumitomo Mitsui Construction (1997)

## **Aislador Sísmico de Péndulo**

Este aislador deslizante se basa en el principio de funcionamiento de un péndulo (Figura 12). Este dispositivo permite los desplazamientos horizontales de la estructura, proporcionando el cambio necesario en el periodo natural de la misma. Al activarse debido a un terremoto, el aislador permite la disociación de la estructura soportada de los movimientos del terreno. Tras el evento sísmico, la fuerza gravitatoria restaura la posición inicial del dispositivo. El comportamiento del apoyo depende principalmente su radio de curvatura y coeficiente de fricción. Los aisladores deslizantes de péndulo desarrollan eficazmente las siguientes funciones:

- En condiciones de servicio, los dispositivos están diseñados para transmitir cargas verticales y permitir desplazamientos horizontales.
- En caso de sismo, se obtiene flexibilidad lateral debido al deslizamiento de un elemento sobre la superficie curva principal.
- Se produce disipación de energía debido a la fricción dinámica entre la superficie deslizante de acero inoxidable y el material deslizante de alto rendimiento.
- Finalmente, la función de recentrado se consigue mediante la combinación de la gravedad y las características geométricas del dispositivo.

Figura 12 **Aisladores de péndulo.**



Fuente: Universidad de Buffalo (2004).

### **Trabajabilidad:**

El aislamiento sísmico consiste fundamentalmente en apoyar la estructura sobre una base suficientemente flexible, que filtra las frecuencias altas de movimiento y alarga el periodo natural de vibración de la estructura. Si, además, el aislador está equipado con un disipador de energía, como es el caso de los apoyos laminados con un elemento de plomo en el centro, la mayor parte de la energía se disipa en el elemento aislador-disipador, en vez de hacerlo a través del daño estructural de los elementos que constituyen la estructura, lo que incrementa la eficiencia del sistema.

Para seleccionar un sistema de aislamiento deben considerarse los siguientes aspectos:

- Su capacidad para modificar el periodo de vibración del sistema de forma que efectivamente se reduzcan las ordenadas de los espectros.
- El incremento que produce en el amortiguamiento del sistema.

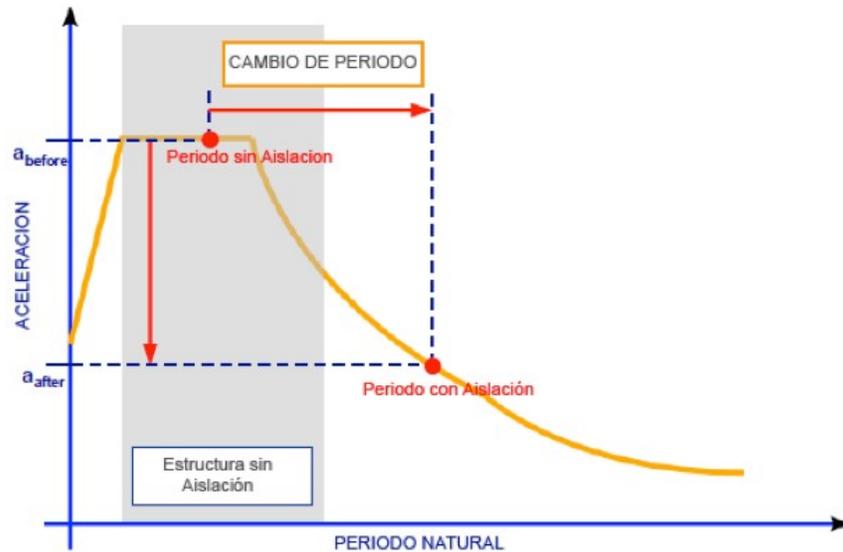
- Su capacidad de deformación ante cargas frecuentes de tipo cuasi estático.
- Su fuerza y desplazamiento de fluencia.
- Su desplazamiento último y comportamiento post último.
- Su capacidad para auto centrarse después de la deformación.
- Su rigidez vertical.

## **AISLAMIENTO SÍSMICO**

El aislamiento sísmico es básicamente la separación de una estructura de los movimientos del suelo que podrían afectarla. Para lograr esta separación, el sistema de aislamiento consiste en diferentes dispositivos sísmicos llamados aisladores; que por estar estratégicamente colocados en puntos específicos de la estructura, pueden desempeñar un papel importante durante la acción de un terremoto.

Los aisladores sísmicos proporcionan suficiente flexibilidad a la estructura para que el período natural de ésta se aleje lo suficiente del período natural del terremoto (Figura 13). La correcta elección de la modificación de dicho periodo evita principalmente la ocurrencia del efecto de resonancia que podrían ocasionar daños e incluso el colapso. Un sistema de aislamiento eficaz debe por lo tanto proporcionar las siguientes cuatro funciones:

Figura 13 Reducción de aceleraciones por cambio de periodo.



Fuente: [www.estructurando.net](http://www.estructurando.net)

- Tener un comportamiento adecuado bajo cualquier carga de servicio, tan eficaz como para los apoyos estructurales convencionales.
- Proporcionar la suficiente flexibilidad horizontal que se requiere para alcanzar el período natural establecido para el aislamiento de la estructura.
- Tener capacidad de re-centrado aún después de un fuerte sismo. Esto permite evitar la ocurrencia de movimientos residuales que podrían interrumpir el funcionamiento de la estructura.
- Proporcionar un nivel adecuado de disipación de energía, con el objetivo de controlar los movimientos que de otra manera podrían dañar otros elementos estructurales

## **DISIPACIÓN DE ENERGÍA / AMORTIGUAMIENTO**

La disipación de energía es esencial cuando se habla de protección sísmica. El uso de dispositivos eficaces capaces de disipar grandes cantidades de energía, aseguran que otros elementos estructurales no sean sometidos a requerimientos excesivos que podrían causarles daños significativos (Figura 8). Un de las mejores maneras de garantizar la seguridad de una estructura es combinando aislamiento sísmico y disipación de energía. Esta integración de ambos sistemas permite proporcionar un amortiguamiento adicional a la estructura, y por consiguiente una mejor respuesta dinámica durante un sismo. En estructuras donde el aislamiento sísmico no es una solución recomendable (por ejemplo, en suelos blandos), los sistemas de amortiguamiento con alta disipación de energía son la mejor opción.

## **CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS Y MODELAMIENTO DE LOS AISLADORES DE BASE**

Teóricamente, la no linealidad de una estructura aislada de su base proviene de dos fuentes: las deformaciones inelásticas en el sistema de resistencia sísmica de la estructura y el sistema de aislación: sin embargo, considerando que el sistema de resistencia sísmica es más rígido que el sistema de aislación, se espera que las deformaciones inelásticas se encuentren localizadas en los aisladores y la estructura sobre estos presente un comportamiento lineal.

Para hacer un uso seguro de los aisladores, las propiedades mecánicas de diferentes tipos de aisladores han sido investigadas intensamente. El modelo bilineal ha sido ampliamente aceptado para la investigación y el diseño, esto se debe a que caracteriza las propiedades mecánicas de los aisladores adecuadamente pero también a que es válido tanto para aisladores elastoméricos como para aisladores de fricción.

## **Parámetros del modelo bilineal**

El modelo bilineal usado para expresar la relación entre la fuerza cortante y el desplazamiento lateral, puede definirse por tres parámetros básicos: Rigidez Elástica, Rigidez Post-fluencia, Fuerza Característica. La fuerza característica se emplea a menudo para estimar la estabilidad del comportamiento histerético, cuando el aislador experimenta muchos ciclos de carga. Estos tres parámetros reflejan adecuadamente las características mecánicas de los aisladores de una forma simple y suministran una estimación satisfactoria del comportamiento no lineal de un aislador.



# 1. GENERALIDADES

## 1.1 Dispositivos disipadores de energía sísmica.

Son dispositivos mecánicos que utilizan sistemas pasivos para disipar la energía que es inducida a las estructuras por medio de sismos y al viento. Se les llama sistemas pasivos ya que estos se encuentran en reposo y el movimiento de la estructura es la que produce la fuerza que controla los dispositivos. Existen 3 tipos de dispositivos de disipación de energía: histeréticos, viscoelásticos y de vibración dinámica, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1 Tipos de disipadores de energía sísmica.

Tipo	Dispositivo	Principio de operación
Histeréticos	Fluencia	Fluencia de metales
	Fricción	Deslizamiento por fricción
Viscoelásticos	Sólidos viscoelásticos	Deformación de polímeros viscoelásticos
	Fluidos viscosos y viscoelásticos	Deformación de fluidos viscosos o flujo a través de orificios
Aisladores de base	Elastoméricos de alto amortiguamiento	Absorción de energía de la base
	Elastoméricos con núcleo de plomo	

Fuente: Elaboración propia.

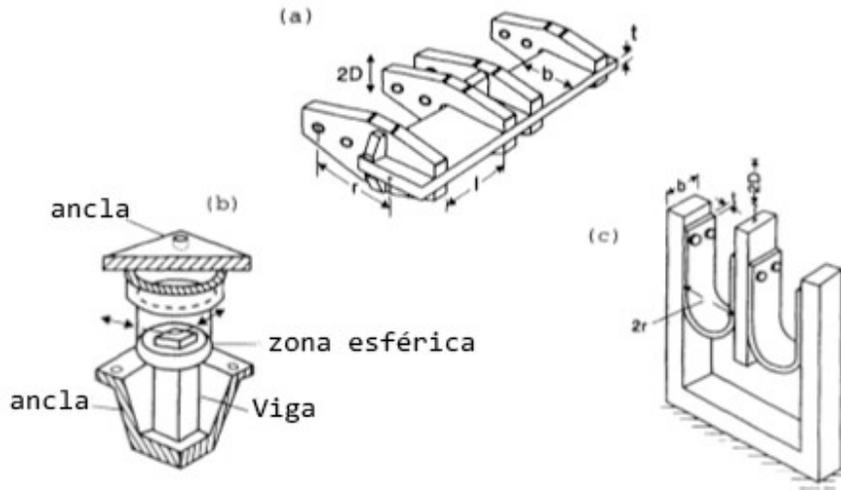
## 1.2 Tipos de disipadores de energía.

### 1.2.1. Disipadores histeréticos

Estos pueden ser de fluencia o fricciantes, trabajan por medio del desplazamiento de entrepiso de la estructura. Estos dispositivos trabajan por fluencia y disipan la energía introduciendo un comportamiento inelástico en el

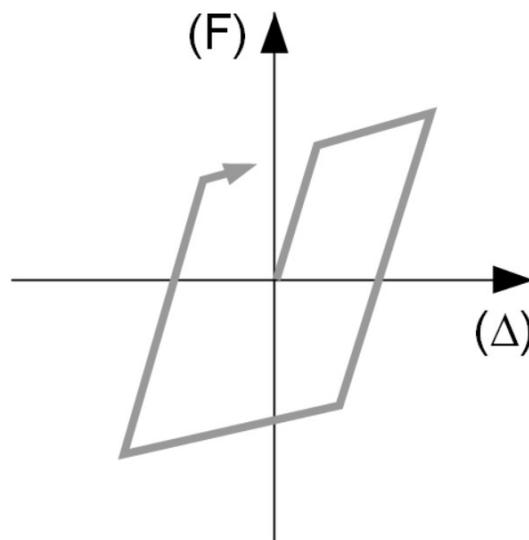
metal, en el cual actúan esfuerzos de corte, flexión y torsión. La geometría que utilizan estos dispositivos se muestra en la figura 14. El comportamiento de la relación fuerza ( $F$ ) desplazamiento ( $\Delta$ ), tiene una relación como la que se muestra en la figura 15.

Figura 14 **Geometría de los disipadores histeréticos.**



Fuente: <http://www.imcyc.com>

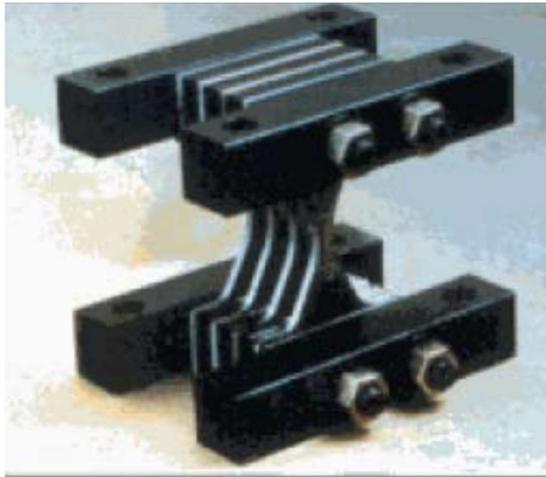
Figura 15 **Comportamiento de los dispositivos histeréticos**



Fuente: Elaboración propia

Los disipadores por flexión llevan la sección transversal del dispositivo a la fluencia de manera uniforme. Unos de los más conocidos son los dispositivos ADAS (Added Damping and Stiffness) que poseen una sección en forma de X (Figura 16).

Figura 16 **Dispositivos ADAS (flexión)**



Fuente: [www.obrasweb.mx](http://www.obrasweb.mx)

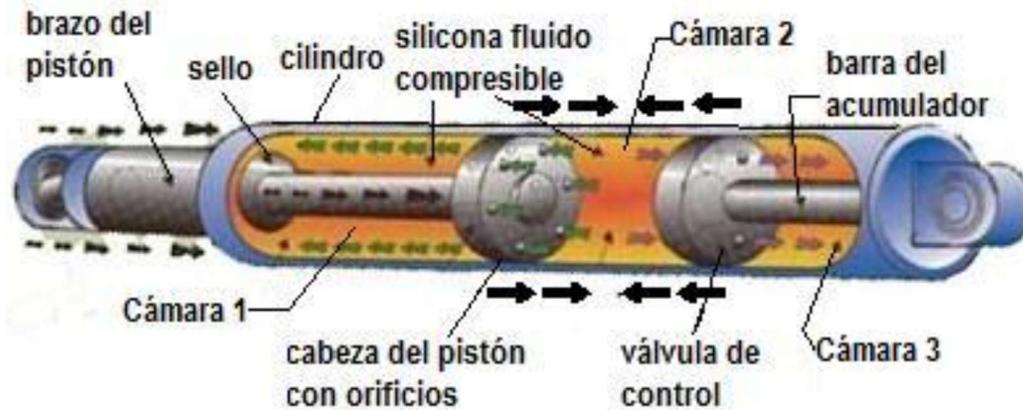
### **1.2.2. Disipadores de energía de fluido viscoso.**

Los disipadores de fluido viscoso son cilindros huecos que se encuentran divididos en tres cámaras. En su interior tienen un fluido que es de baja viscosidad, inerte, no combustible, no inflamable, no tóxico y además que no se degrada con el paso del tiempo.

Estos disipadores disipan energía debido a la fricción entre el fluido y los orificios de pistones que tienen en su interior. El movimiento de la edificación empuja el pistón hacia el interior del cilindro, comprimiendo el fluido de la cámara 2. Por los orificios de la cabeza del pistón pasa flujo de la cámara 2 a la 1, generando una fuerza de amortiguamiento que buscará igualar la presión en ambas cámaras. Al ser la presión en la cámara 2 mayor que en la cámara

3, por la válvula de control pasa líquido a la cámara 3, lo que evita que el pistón tenga un efecto de rebote.

Figura 17 **Funcionamiento del disipador de fluido viscoso**



Fuente: Elementos de un disipador de fluido viscoso (Taylor 1999)

Figura 18 **Disipador de fluido viscoso Taylor Devices**



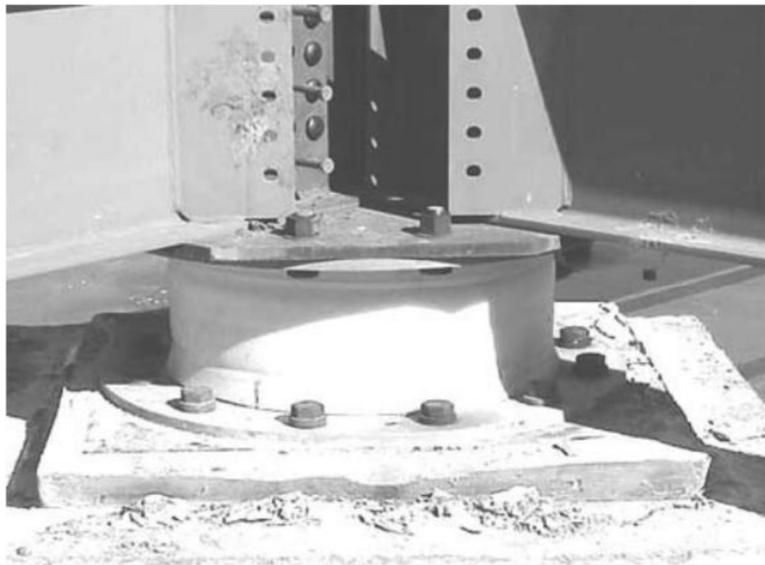
Fuente: Elaboración propia.

### 1.2.3. Aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento

Este tipo de aisladores son contruidos con neopreno zunchado, intercalando placas delgadas de acero en un bloque cúbico o cilíndrico de neopreno, el principal aporte es que aumenta la rigidez vertical, manteniendo su flexibilidad lateral. Los aisladores de alto amortiguamiento están hechos de un compuesto especial de goma, obtenido con la adición de carbono extra fino, aceite negro, o resinas, que permite alcanzar valores más altos de amortiguamiento. El espesor de las capas de caucho varia, normalmente, entre los 8mm y 20 mm, y el espesor de la capa de acero oscila entre los 2 mm y los 4 mm.

Los valores de amortiguamiento varían entre 10% y el 20%, el análisis de estructuras aisladas con estos dispositivos se realiza como un sistema bilineal cuyas propiedades dependen de la razón de amortiguamiento efectivo y el módulo de deformación cuyos valores oscilan entre 0.4 MPa y 1.4 MPa.

Figura 19 **Aislador elastomérico de alto amortiguamiento.**



Fuente: [www.antisismos.blogspot.com](http://www.antisismos.blogspot.com)

#### **1.2.4. Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo:**

Estos aisladores son muy similares a los anteriores, con la diferencia que usan un núcleo de plomo que le proporciona una capacidad adicional de disipar energía y le brinda una rigidez inicial un poco más alta respecto a los anteriores, disminuyendo los desplazamientos para pequeños sismos y fuerzas de viento que actúen sobre la estructura.

Estos aisladores inicialmente fueron desarrollados y usados en Nueva Zelanda, de ahí que algunos autores se refieran a ellos como sistemas N-Z. El comportamiento del aislador depende de la fuerza lateral que se impone, si la fuerza es muy pequeña será asumida por el núcleo de plomo y el sistema tendrá una alta rigidez, cuando la carga lateral se aumenta, el núcleo de plomo se deforma y empieza a fluir, el comportamiento histerético se genera con la energía disipada por el núcleo de plomo, como consecuencia la rigidez lateral disminuye. El amortiguamiento generalmente se encuentra entre el 15% y el 35% y se puede realizar el modelado de este aislador empleando la teoría bilineal. En su proceso de fabricación, es necesario que el hueco realizado en el caucho sea más pequeño que el diámetro del elemento de plomo para que éste sea forzado a entrar. Esta característica garantiza la uniformidad del bloque y la consiguiente deformación por cortante de todo el volumen del núcleo de plomo.

La plastificación del núcleo de plomo garantiza elevados valores de amortiguamiento, que originan, no sólo menores desplazamientos de la superestructura, sino también mayor rigidez lateral del tablero para niveles bajos de acciones horizontales. La tensión de cedencia a cortante del núcleo de plomo es de aproximadamente, 10 Mpa sobrepasado este valor, la rigidez del dispositivo es la rigidez del caucho, lo que proporciona al dispositivo rigidez bi-lineal. Este comportamiento es excelente, incluso a bajas temperaturas,

pues el caucho presenta buenas características de resistencia a fatiga bajo estas condiciones. La rigidez inicial del aparato es cerca de 10 veces superior a la rigidez poselástica, resultante de la cadencia del núcleo de plomo. Este tipo de sistema de aislamiento sísmico es la solución más utilizada en puentes, dada su simplicidad, comportamiento y bajo costo.

Figura 20 **Aislador elastomérico con núcleo de plomo.**



Fuente: Sumitomo Mitsui Construction (1997)

### **1.3 Usos de los disipadores de energía.**

#### **1.3.1 Disipadores histeréticos.**

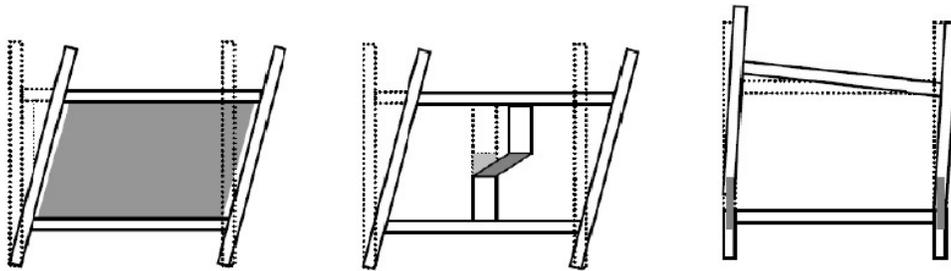
Los disipadores de energía histeréticos se utilizan en edificaciones de diferentes alturas y materiales, esta técnica utiliza componentes más simples que estratégicamente colocados en la estructura, estos intervienen en la respuesta de la edificación y controlan el daño concentrándolo en estos puntos, entre sus ventajas se puede mencionar:

- Requieren procedimientos sencillos para verificar su estado, y tomar decisiones en cuanto al mantenimiento reemplazo.
- Sencillez en los procedimientos de análisis y diseño estructural.

- Se pueden utilizar para la rehabilitación o reforzamiento estructural, sin modificar la arquitectura de la edificación.

Se instalan en el plano de los marcos que se requieren reforzar, como se muestra en la figura 21.

Figura 21 **Ubicación de los disipadores histeréticos**



Fuente: Disipadores Histeréticos metálicos como técnica de control de respuesta sísmica (Oviedo 2009).

En la parte izquierda, los disipadores conectan los elementos de los pisos en que el dispositivo está instalado; en el centro los disipadores conectan las vigas, controlando el desplazamiento relativo de entrepiso, y en la parte derecha los disipadores se instalan en las columnas, desconectando lo elementos estructurales para que los dispositivos trabajen y disipen la energía.

### 1.3.2 Disipadores viscoelásticos

Los dispositivos viscoelásticos han sido empleados con éxito, durante los últimos años, ya que reducen la respuesta de las edificaciones ante la acción sísmica y de viento. Actualmente se ha estudiado su utilización con fines de diseño sismorresistente.

El funcionamiento de los disipadores viscoelásticos se basa en el aumento del amortiguamiento estructural, presenta algunas ventajas con relación a los histeréticos, como:

- No requieren fuerza umbral para disipar la energía.
- No cambian significativamente los períodos de vibración, con lo cual es posible realizar una modelación más sencilla.

Como desventajas en su uso se pueden mencionar:

- La poca variación del período de vibración no evita que la estructura entre en resonancia.
- Los materiales viscoelásticos son sensibles a los cambios de temperatura, por lo que es necesario minimizar estos cambios para que su comportamiento resulte previsible.
- Para que en la estructura exista un aumento considerable de amortiguamiento, se requiere una gran cantidad de estos dispositivos.

En la industria de la construcción los disipadores de fluido viscoso se utilizan para reducir las cargas debido a la excitación sísmica, son ubicados en la estructura de forma estratégica, de tal forma que estos se activen cuando existan desplazamientos en los pisos.

El aislamiento sísmico consiste fundamentalmente en apoyar la estructura sobre una base suficientemente flexible, que filtra las frecuencias altas de movimiento y alarga el periodo natural de vibración de la estructura. Si además, el aislador está equipado con un disipador de energía, como es el caso de los apoyos laminados con un elemento de plomo en el centro, la mayor parte de la energía se disipa en el elemento aislador-disipador, en vez de hacerlo a través del daño estructural de los elementos que constituyen la estructura, lo que incrementa la eficiencia del sistema.

### **1.3.3 Aisladores de base.**

Para seleccionar un sistema de aislamiento deben considerarse los siguientes aspectos:

- Su capacidad para modificar el periodo de vibración del sistema de forma que efectivamente se reduzcan las ordenadas de los espectros.
- El incremento que produce en el amortiguamiento del sistema.
- Su capacidad de deformación ante cargas frecuentes de tipo cuasi estático.
- Su fuerza y desplazamiento de fluencia.
- Su desplazamiento último y comportamiento post último.
- Su capacidad para auto centrarse después de la deformación.
- Su rigidez vertical.

El aislamiento de base es más recomendable en estructuras rígidas sobre terrenos rígidos, en estructuras con elevada relación altura-ancho presenta el inconveniente de que los momentos de volteo son elevados. Su estrategia se bases en el desacoplamiento de la estructura del movimiento del suelo, y así protegerlas de las fuerzas sísmicas, se ubican entre los cimientos y la estructura. Su presencia alarga el período fundamental, con lo cual desacopla de forma parcial la estructura del movimiento del sismo.

## **2. DISIPADORES DE ENERGÍA PARA EDIFICIOS DE CONCRETO**

### **2.1 Localización de los disipadores de energía en edificios.**

En este capítulo se analizarán las posibles ubicaciones de los disipadores de energía en edificios de concreto armado, para este análisis se tomarán en cuenta los disipadores de fluido viscoso, comúnmente fabricados y distribuidos en Latinoamérica por Taylor Devices, su funcionamiento se ha descrito en el capítulo 1 por lo que a continuación solo se mencionaran criterios de ubicación según las plantas existentes.

Los disipadores de energía están diseñados para reducir la respuesta de la estructura ante un evento sísmico, tradicionalmente esto se logra al proveer a la estructura de mayor rigidez para que los desplazamientos sean menores, siempre con una ductilidad adecuada para que los elementos se comporten en su rango elástico y en algunos casos pasar al rango inelástico, ante una mayor sollicitación. Otra forma consiste en colocar elementos externos en la estructura, también llamados sistemas de control estructural, los disipadores de energía se clasifican en el sistema de control estructural pasivo.

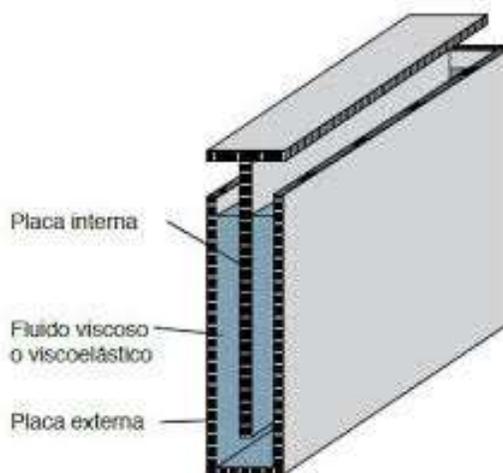
La forma en que los disipadores ayudan a la respuesta de la estructura, es proporcionando fuerzas de amortiguamiento adicional. Los disipadores de energía de fluido viscosos, son dependientes de la velocidad ya que aumentan el amortiguamiento de la estructura, y con esto ayudan a reducir el desplazamiento, la velocidad y la aceleración.

Existen 2 tipos de disipadores de energía de fluido viscoso, los cuales se describen a continuación:

### 2.1.1 Disipador de fluido viscoso tipo muro.

Esta configuración utiliza un tipo de recipiente para el fluido viscoso, el cual se conecta al piso inferior, dentro del mismo se coloca una placa que se conecta con el piso superior, como se muestra en la figura 22, el movimiento relativo entre los dos pisos provoca que la placa tenga que moverse en el interior del líquido viscoso, y así provocar esfuerzos de corte en las superficies de contacto y con esto el amortiguamiento deseado.

Figura 22 Disipador de fluido viscoso tipo muro.



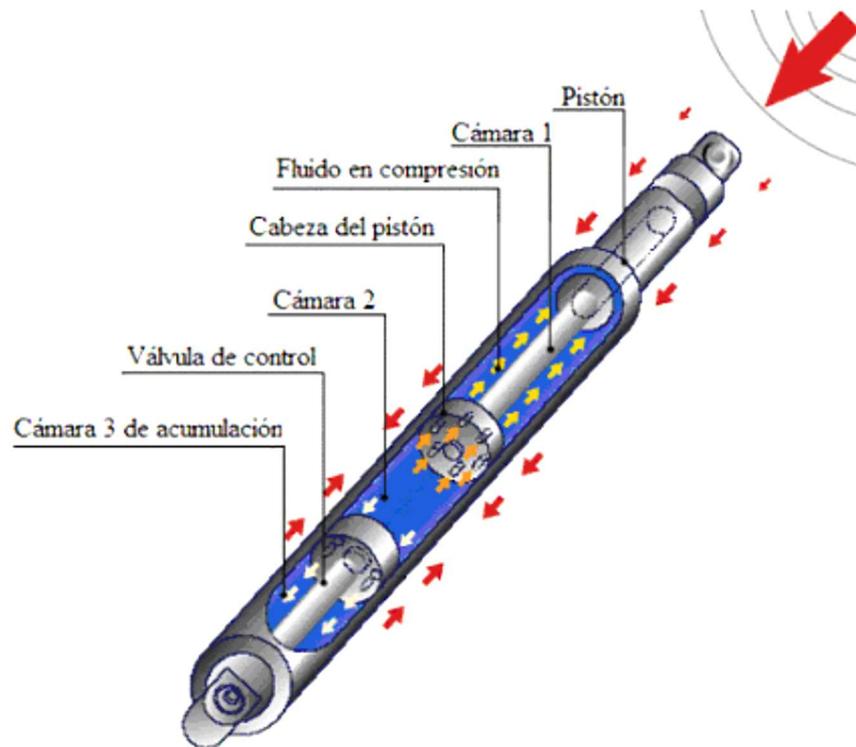
Fuente: [www.byron-hoffmann.blogspot.com](http://www.byron-hoffmann.blogspot.com)

### 2.1.2 Disipador de fluido viscoso tipo pistón.

Este disipador cuenta con una cápsula cilíndrica con líquido viscoso en su interior, dentro tiene un pistón cilíndrico capaz de deslizarse a través de la

capsula, el amortiguamiento se produce cuando el pistón se mueve a través del fluido.

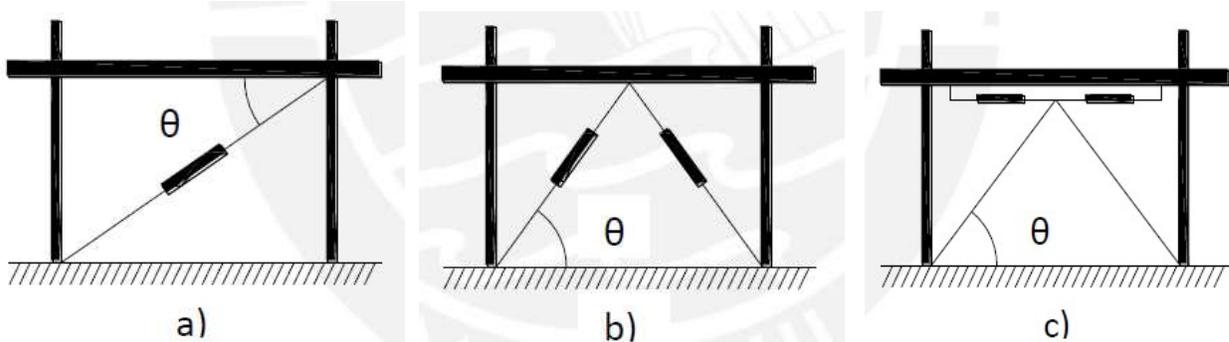
Figura 23 **Disipador de energía de fluido viscoso tipo pistón.**



Fuente: [construblogspain.wordpress.com](http://construblogspain.wordpress.com)

Los disipadores de energía son elementos externos a la estructura, el acoplamiento se realiza por medio de piezas metálicas, su colocación depende de la cantidad de amortiguamiento que se requiera en la estructura. Actualmente, se manejan 3 tipos de configuración para los disipadores de energía de fluidos viscosos, los cuales son a) configuración el diagonal, b) configuración doble diagonal c) configuración chevron. Como se muestra en la figura 24.

Figura 24 Tipos de configuración para disipadores de energía de fluido viscoso.



Fuente: Análisis sísmico de una edificación con disipadores de fluido viscoso (Fuentes, 2015).

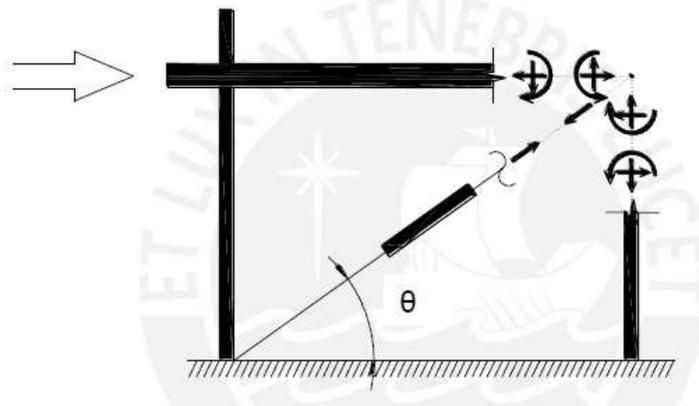
En la Norma ASCE 7-05, se menciona que el sistema de amortiguadores en una estructura debe tener al menos dos dispositivos por piso en cada dirección de análisis, y que deben distribuirse de forma que exista resistencia a la torsión, este requisito se tomará en cuenta para la ubicación de los disipadores en el edificio en estudio. Esta disposición de simetría ayudaría en lo arquitectónico en cuanto a la visual de los disipadores.

## 2.2 Descripción de los tipos de configuraciones.

### 2.2.1 Configuración diagonal.

En esta configuración se utiliza un solo disipadores, el cual va montado a una estructura metálica que une el disipador al nudo inferior de la unión viga-columnas, y por medio de una breiza metálica al nudo superior.

Figura 25 **Fuerzas internas en una configuración diagonal.**

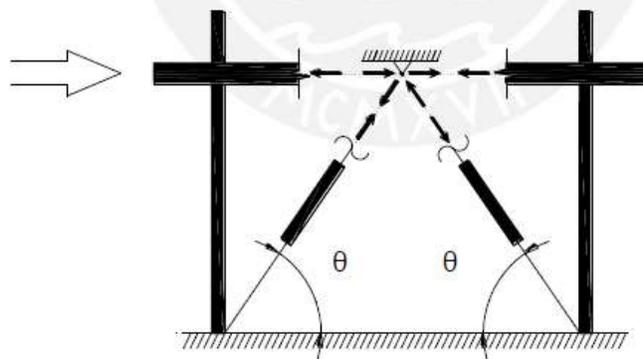


Fuente: Análisis sísmico de una edificación con disipadores de fluido viscoso (Fuentes, 2015).

### 2.2.2 Configuración Doble Diagonal.

En esta configuración, los disipadores están montados en una estructura metálica, la cual transmite las fuerzas al punto medio de la viga superior del marco. Debido a la simetría y a la geometría del marco, las componentes verticales de las fuerzas de los disipadores se cancelarán entre sí, quedando solamente las componentes horizontales que serán transferidas a las vigas superiores mediante una conexión de corte.

Figura 26 **Fuerzas internas en una configuración doble diagonal.**

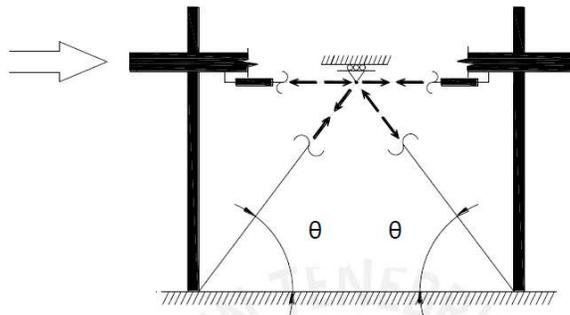


Fuente: Análisis sísmico de una edificación con disipadores de fluido viscoso (Fuentes, 2015).

### 2.2.3 Configuración Chevron.

Los elementos diagonales son perfiles metálicos (breizas) las cuales tienen conexión directa a la estructura en la parte inferior, y tienen un apoyo deslizable en la parte superior en donde se unen las breizas, en el punto medio de la viga, de forma similar a la configuración doble diagonal, debido a los efectos del movimiento sísmico las fuerzas verticales que pasan por las breizas se cancelan entre sí, quedando solamente las componentes horizontales, estas fuerzas pasan a través de los disipadores de energía de fluido viscoso, y se transfieren a los extremos de la viga superior.

Figura 27 **Fuerzas internas en una configuración doble diagonal.**



Fuente: Análisis sísmico de una edificación con disipadores de fluido viscoso (Fuentes, 2015).

### 2.3 Interpretación de la reducción de la aceleración sísmica.

Para explicar cómo se interpreta la reducción del espectro de respuesta en estructuras provistas de disipadores de energía, se tomará un espectro de respuestas para una estructura con un amortiguamiento de 5%, con los siguientes datos:

Índice de sismicidad = 4.

Parámetros iniciales:

Aceleración espectral para periodos cortos =  $S_{cr} = 1.5g$

Aceleración espectral para periodos de 1 segundo =  $S_{1r} = 0.55g$

$F_a = 1.0$

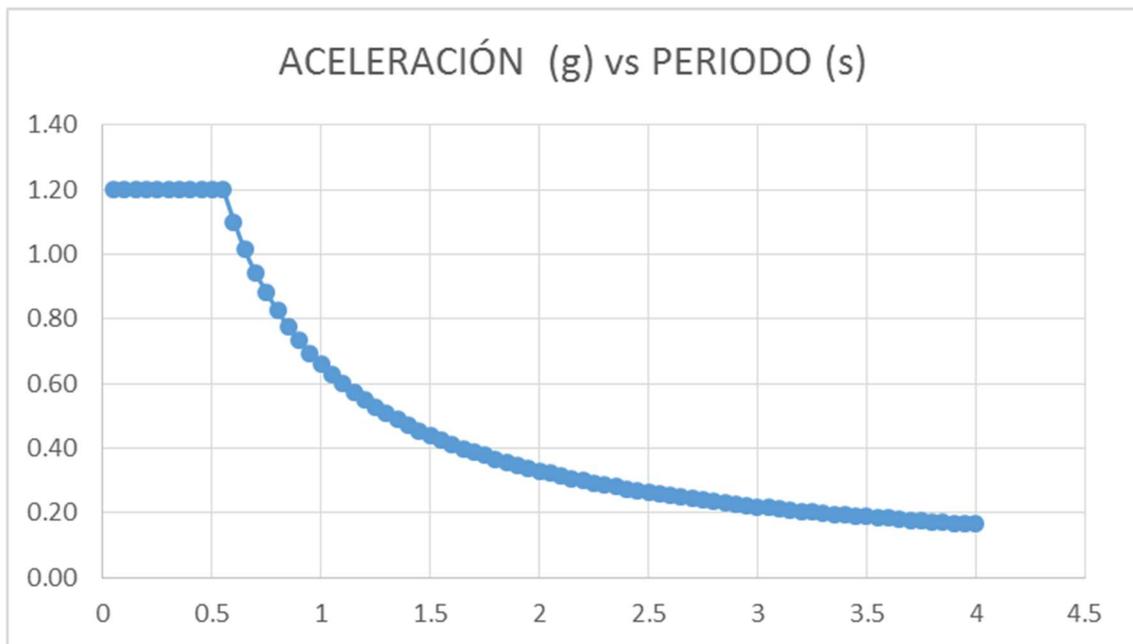
$F_v = 1.5$

$N_a = N_v = 1$

Factor de escala  $K_d = 0.80$

Los resultados de construir este espectro de respuesta se muestran en la figura 28, y en la tabla 2.

Figura 28 **Espectro de respuesta ejemplo.**



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2 **Valores de periodo y aceleración para el espectro de ejemplo.**

PERIODO (s)	ACELERACIÓN (g)
0.05	1.20
0.10	1.20
0.15	1.20
0.20	1.20
0.25	1.20
0.30	1.20
0.35	1.20
0.40	1.20
0.45	1.20
0.50	1.20
0.55	1.20
0.60	1.10
0.65	1.02
0.70	0.94
0.75	0.88
0.80	0.83
0.85	0.78
0.90	0.73
0.95	0.69
1.00	0.66
1.05	0.63
1.10	0.60
1.15	0.57
1.20	0.55
1.25	0.53
1.30	0.51
1.35	0.49
1.40	0.47
1.45	0.46
1.50	0.44
1.55	0.43
1.60	0.41
1.65	0.40
1.70	0.39
1.75	0.38
1.80	0.37
1.85	0.36
1.90	0.35
1.95	0.34
2.00	0.33

Fuente: Elaboración propia.

Para distribuir las fuerzas de sismo en la estructura, se utiliza el método de la carga sísmica estática equivalente, descrito en el código AGIES NSE 3-10, Para encontrar el cortante basal de la estructura la norma describe la siguiente ecuación.

$$V_B = C_s \times W_s \quad (1)$$

Fuente: Agies NSE 3-10.

$V_B$  = Cortante basal estático.

$C_s$  = Coeficiente sísmico de diseño.

$W_s$  = Masa sísmica de la estructura.

Para reducir las fuerzas sísmicas en la estructura se debe reducir el cortante basal, según la fórmula podríamos variar los valores de  $C_s$  o  $W_s$ , como se sabe la masa sísmica de la estructura no se puede reducir por lo que debemos reducir el Coeficiente sísmico, Para continuar con el análisis se muestra la ecuación para encontrar el  $C_s$ .

$$C_s = S_a(T) / R \quad (2)$$

Fuente: Agies NSE 3-10.

$S_a(T)$  = Demanda sísmica de diseño para una estructura con período T.

R = Factor de reducción de respuesta sísmica.

El factor R depende del tipo y clasificación de la estructura a analizar, como se en la tabla 6. Correspondiente a la tabla 1-1 de las normas AGIES nse 3-10.

**Tabla 3 Coeficientes y factores para diseño de sistemas sismorresistentes.**

	SISTEMA ESTRUCTURAL	Sistema Constructivo	R	$\Omega_r$	Cd	Límite de altura en metros Nivel de Protección			
						B	C	D	E
E1	SISTEMA DE MARCOS Marcos tipo A								
E1-A	De concreto reforzado	NSE 7.1	8	3	5.5	SL	SL	SL	SL
	De acero estructural	NSE 7.5	8	3	5.5	SL	SL	SL	SL
E1-B	Marcos tipo B De concreto reforzado	NSE 7.1	5	3	4.5	50	30	12	NP
	De acero estructural	NSE 7.5	4.5	3	4	50	30	12	NP
E1-C	Marcos tipo C De concreto reforzado	NSE 7.1	3	3	3	30	NP	NP	NP
	De acero estructural	NSE 7.5	3.5	3	2.5	30	NP	NP	NP
E2	SISTEMA DE CAJÓN Con muros estructurales								
	De concreto reforzado A		5	2.5	5	SL	75	50	30
	De concreto reforzado B		4	2.5	4	50	50	30	NP
	De mampostería reforzada A		5	2.5	3.5	30	30	20	12
	Paneles de concreto prefabricado		4	3	3.5	30	30	15	12
	Con paneles de madera		6	3	4	20	20	15	20
E3	SISTEMA GENERAL Con muros estructurales								
	De concreto reforzado A		6	2.5	5	SL	75	50	50
	De concreto reforzado B		5	2.5	4	SL	50	30	NP
	De mampostería reforzada A		5.5	3	3.5	SL	SL	50	50
	Paneles de concreto prefabricado		4.5	3	3.5	SL	30	30	20
	Marcos de acero arriostrado								
	Tipo A con riostras excéntricas		8	2	4	SL	50	50	30
	Tipo A con riostras concéntricas		6	2	5	SL	50	30	20
Tipo B con riostras concéntricas		3.5	2	3.5	30	12	12	NP	
E4	SISTEMA DUAL Marcos de concreto reforzado A								
	Con muros estructurales								
	De concreto reforzado A		7	2.5	5.5	SL	SL	SL	SL
	De mampostería reforzada A		5.5	3	5	SL	SL	SL	SL
	Marcos de acero tipo A								
	Con riostras excéntricas		8	2.5	4	SL	SL	SL	SL
	Con riostras concéntricas especiales		7	2.5	5.5	SL	SL	SL	SL
Marcos de concreto reforzado B Con muros estructurales: de concreto reforzado A		6.5	2.5	5	SL	SL	SL	SL	
E5	COLUMNAS VOLADIZO O PÉNDULO INVERTIDO De concreto reforzado confinado		2.5	1.2	2.5	12	12	12	12
	De estructura de acero con detalles sísmicos		2.5	1.2	2.5	12	12	12	12
	De estructura de madera		1.5	1.5	1.5	12	12	12	12
E6	OTRO TIPO Clasificar como E5, o bien, consultar exclusiones en NSE 3.1 NSE 4, NSE 5 O NSE 6								

Fuente: AGIES NSE 3-10 (2010).

Para interpretar la reducción se tomará un factor R de 5, el cual corresponde a un sistema E1 – B, marcos tipo B de concreto reforzado, para encontrar el coeficiente sísmico se debe tener el periodo de vibración de la estructura ( $T_a$ ), para luego encontrar la aceleración correspondiente a ese periodo, y al aplicarle el factor de reducción R, se encontraría el coeficiente sísmico.

Para el ejemplo se calculará un periodo de vibración empírico, según la ecuación (2-3) de las normas AGIES, para la cual se supone que la estructura tiene una altura de 35 metros.

$$T_a = K_T (h_n)^x \quad (3)$$

Fuente: Agies NSE 3-10.

$T_a$  = Período de vibración empírico.

$h_n$  = Altura total del edificio.

$K_T$  y  $X$  = Valores según el sistema estructural, Tabla 4.

**Tabla 4 Valores de  $K_T$  y  $X$  según el sistema estructural.**

Caso:	$K_t$	$x$	
a)	0.049	0.75	Para sistemas estructurales E2, E3, E4, E5
b)	0.047	0.9	Solamente para sistemas estructurales E1 de concreto reforzado que sean abiertos o con fachadas de vidrio o paneles livianos y pocas particiones rígidas (1)
c)	0.047	0.85	Para sistemas E1 de concreto reforzado con fachadas rígidas (2) o que no cumplan con el parrafo anterior
d)	0.072	0.8	Solamente para sistemas estructurales E1 de acero que sean abiertos o con fachadas de vidrio o paneles livianos y pocas particiones rígidas (3)
e)	0.072	0.75	Para sistemas E1 de acero rigidizados (4)

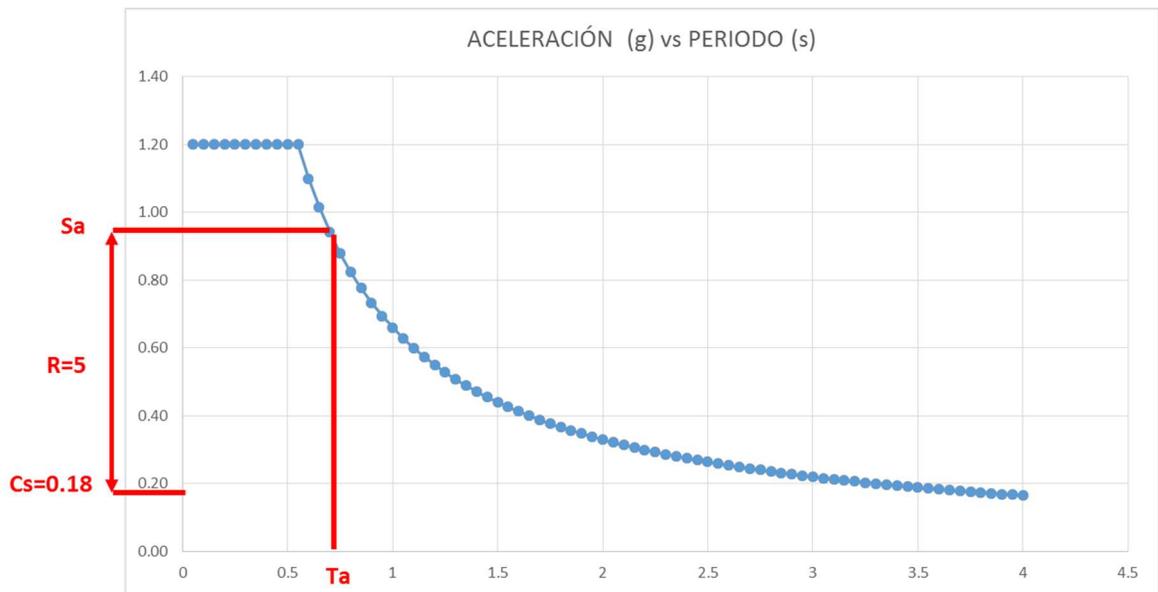
Fuente: AGIES NSE 3-10 (2010).

Si se toma la altura total de 35 metros, un sistema estructura E1 con valores  $K_T$  y  $X$  de 0.049 y 0.75 respectivamente, podríamos calcular el período empírico de la siguiente forma:

$$T_a = (0.049) \times (35^{0.75}) = 0.705 \text{ segundos.}$$

Teniendo el período empírico podemos encontrar la aceleración del edificio, y aplicando el factor  $R$  obtenemos el Coeficiente sísmico ( $C_s$ ), como se muestra en la figura 29.

Figura 29 **Coeficiente sísmico.**



Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente tiene un resultado de 0.18, si supones que el peso sísmico de la estructura es de 500 toneladas, podemos calcular el corte basal que se le aplicaría a la estructura.

$$V_B = (0.18) \times (400) = 72 \text{ Ton.}$$

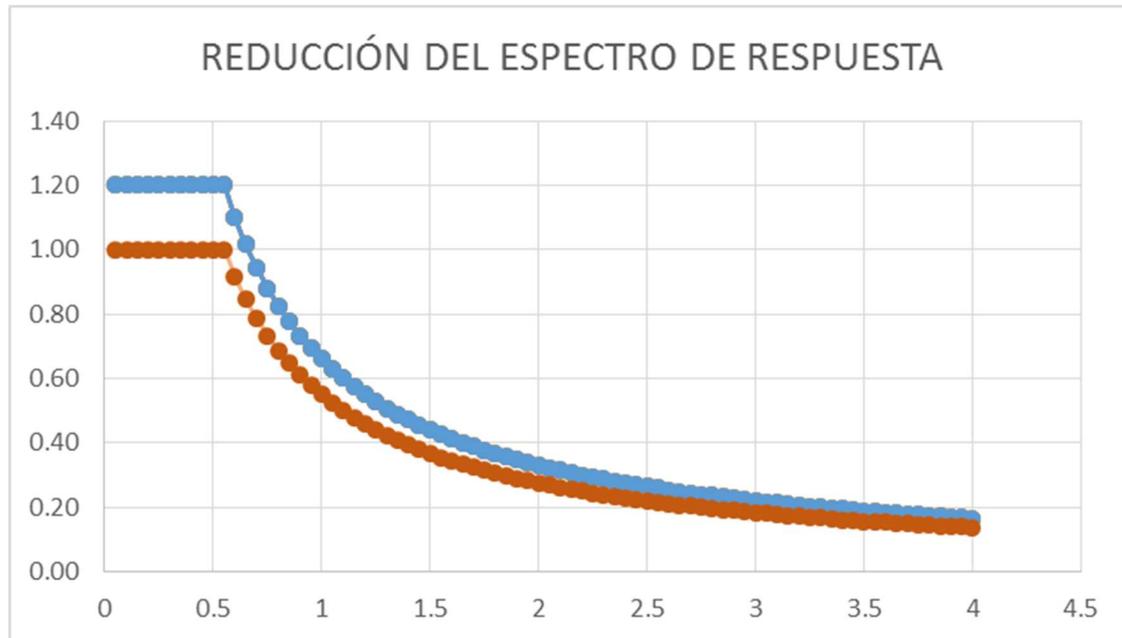
El cortante basal que se debe distribuir en el edificio da un resultado de 72 toneladas.

#### **2.4 Modificación del espectro de respuesta a utilizar.**

Analizando el caso de agregarle disipadores de energía a la estructura, estos dispositivos agregarían ductilidad en el sistema, por lo que el edificio tendría un mayor amortiguamiento. El aumento de amortiguamiento depende de la cantidad de disipadores que se le instalen, y a la configuración de los mismos, para esta explicación se supone que al instalarle disipadores de energía la estructura tendrá un amortiguamiento de 11% y ya no del 5%.

Para calcular el espectro para un amortiguamiento de 11%, debemos encontrar la ductilidad de la estructura y con ella el amortiguamiento efectivo, y por último el factor de reducción del espectro de respuesta. Este procedimiento se explicará en el capítulo 4 con el edificio modelo, para la interpretación supondremos que el factor de reducción encontrado reduce el espectro como se muestra en la figura 30.

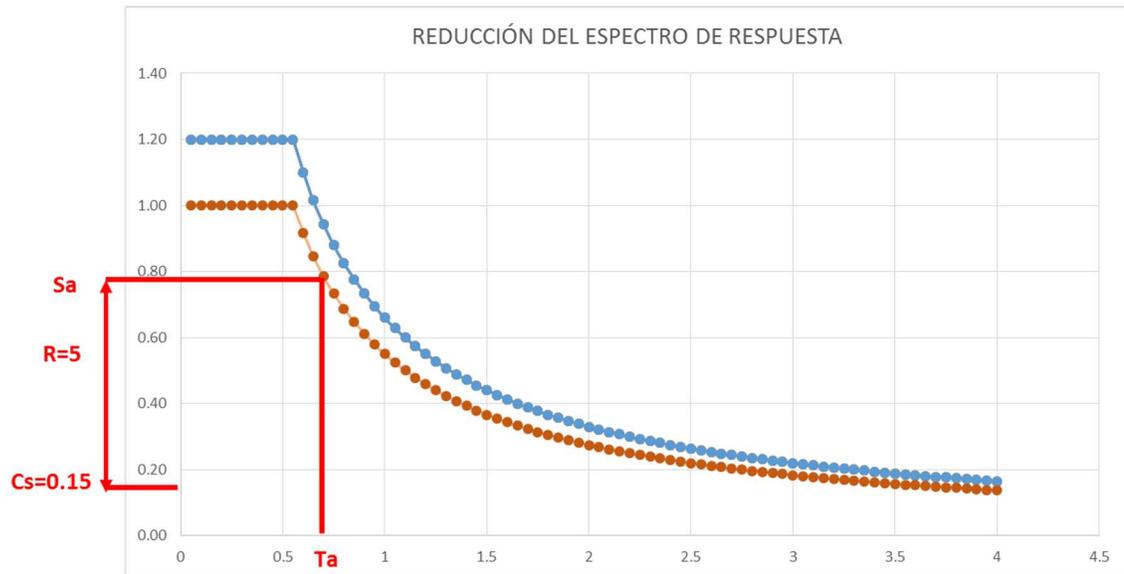
Figura 30 **Reducción del espectro de respuesta por la presencia de disipadores de energía.**



Fuente: Elaboración propia.

El valor coeficiente sísmico con el espectro de respuesta para la estructura con disipadores de energía, se muestra en la figura 31.

Figura 31 **Coefficiente sísmico.**



Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar el coeficiente sísmico disminuye con la implementación de disipadores en la estructura, por lo que el corte basal disminuye.

$$V_B = (0.15) \times (400) = 60 \text{ Ton.}$$

El corte basal disminuye de 70 toneladas a 60 toneladas, por lo que se puede concluir que la estructura se diseñará con menores fuerzas de sismo.

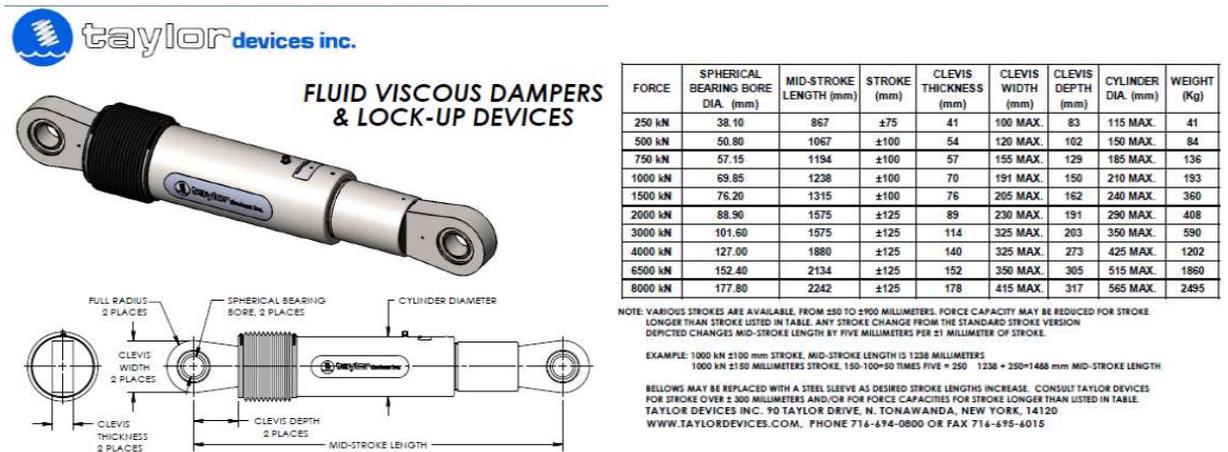


### 3. DISIPADORES DE ENERGÍA DE FLUIDO VISCOSO

#### 3.1 Características mecánicas de los disipadores de energía de fluido viscoso según el fabricante Taylor Devices inc.

El principal fabricante de estos dispositivos es la marca **TAYLOR DEVICES INC**, de origen estadounidense y líder mundial desde 1954 en la producción de elementos de absorción de shocks por medio de la compresión y control de fluidos, que permiten la disipación de energía. La empresa desarrolló y patentó conceptos tales como el control del fluido a través de orificios, la compresión dinámica de fluidos, los amortiguadores auto ajustables y el resorte líquido desarrollando productos para el sector comercial, militar e industrial. Una de las principales ventajas de estos dispositivos es que no requieren ningún mantenimiento antes, durante o después de haber sido sometidos a sollicitaciones de carga.

Figura 32 Propiedades de los disipadores de energía de fluido viscoso.



Fuente: <http://www.seismicdamper.com>

### 3.2 Evaluación del amortiguamiento

Con la implementación de los disipadores de energía, lo que se busca es reducir la vibración en la estructura, y esto se logra al añadirle amortiguamiento, en términos de ingeniería es la propiedad de los materiales a oponerse al movimiento. Entre mayor sea el amortiguamiento, el elemento regresa al reposo en menos tiempo desde su posición de desplazamiento, al agregarle amortiguamiento a una estructura esta cambia su periodo de vibración, como se define en la siguiente ecuación:

$$T_D = \frac{T}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad (4)$$

Fuente: Normas FEMA 360.

Donde:

$\beta$ =Amortiguamiento viscoso.

T= Periodo para un sistema sin amortiguamiento adicional.

$T_D$ = Periodo amortiguado.

Para tener una idea de la influencia en el cambio de periodo, se puede mencionar que en nivel comunes de amortiguamiento este cambio es insignificante, para un 5% de amortiguamiento el cambio es de aproximadamente 0.1% y para amortiguamiento de hasta 20% el periodo incrementa solo un 2%.

Amortiguamiento equivalente.

Los dispositivos disipadores de energía de fluido viscosos, convierten el amortiguamiento proveniente de fuentes como la elasticidad de los materiales a un amortiguamiento parecido al viscoso.

El amortiguamiento viscoso equivalente se define como:

$$\beta = \frac{W_D}{4\pi W_S} \quad (5)$$

Fuente: Normas FEMA 360.

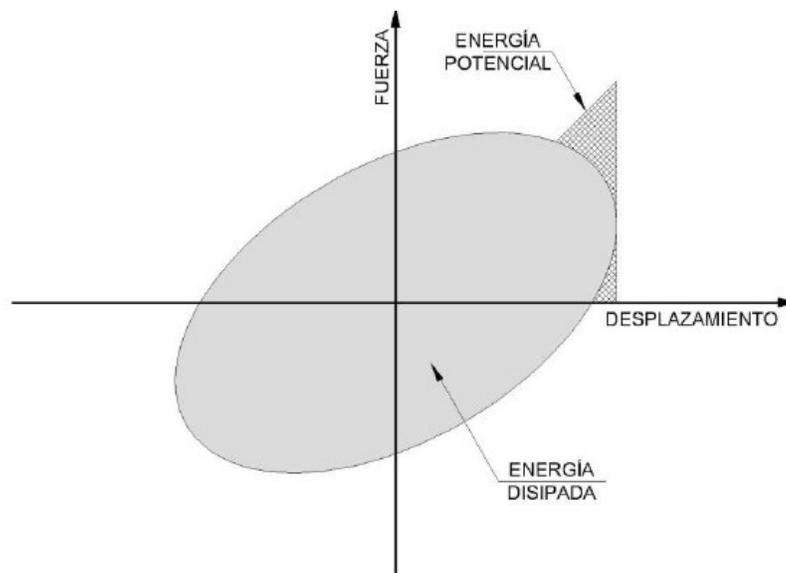
Donde:

$W_D$ = Energía cíclica disipada.

$W_S$ =Energía potencial.

La energía cíclica y potencial puede visualizarse en la figura 33.

Figura 33 **Amortiguamiento viscoso equivalente.**



Fuente: Comportamiento de estructuras ante acciones sísmicas, Cortés (2012).

### 3.3 Efecto del amortiguamiento.

Códigos como el FEMA aproximan el efecto de amortiguamiento al definir un coeficiente de amortiguamiento,  $\beta$ , que es una función del amortiguamiento viscoso equivalente. En la tabla 5 se muestran los valores según FEMA,

donde:  $\beta_s$  es el coeficiente para ajustar el espectro para un periodo corto,  $\beta_1$  se utiliza para ajustar el espectro en periodos mayores a un segundo.

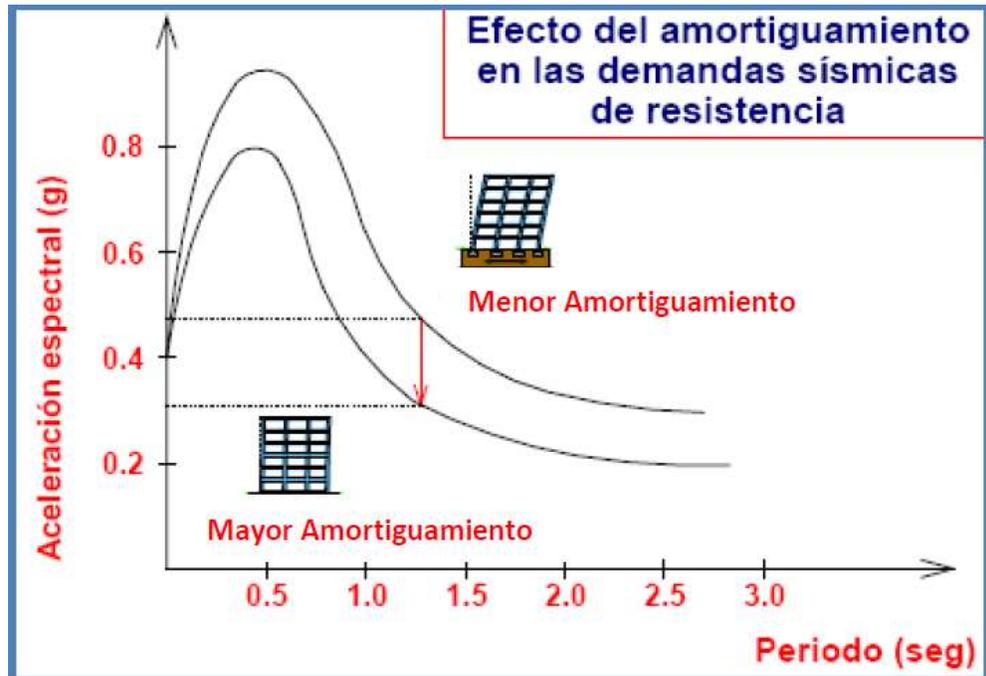
**Tabla 5 Factores de reducción de amortiguamiento.**

Amortiguamiento Efectivo $\beta$ , % del crítico	$B_s$	$B_1$
< 2	0.8	0.8
5	1	1
10	1.3	1.2
20	1.8	1.5
30	2.3	1.7
40	2.7	1.9
> 50	3	2

Fuente: Código FEMA 360.

El factor  $\beta_s$  se aplica a periodos arriba de  $T_o$  , que es el periodo característico del espectro de respuesta, definido como el periodo asociado con la transición del segmento de aceleración constante del espectro, al segmento de velocidad constante del espectro. Para periodos más largos que  $T_o$ , se aplica  $\beta_1$ .

Figura 34 **Efecto del amortiguamiento en las demandas sísmicas**



Fuente: Diseño de un edificio aporticado Torres (2012).

### 3.4 Recomendaciones sobre el uso de disipadores de energía en edificaciones.

A continuación, se describen los usos de los disipadores de energía en función a las variables más importantes en un edificio.

#### 3.4.1 En Función del tipo de sistema estructural

La capacidad de disipar energía de estos dispositivos se incrementa conforme el desplazamiento relativo en su interior aumenta. Estos dispositivos permiten aquellos desplazamientos gracias al fluido que llevan en el interior, el cual se activa una vez que inicia el movimiento que es el que somete la estructura a aceleraciones generando así altas velocidades en los amortiguadores.

Este comportamiento nos lleva a la conclusión de que la conveniencia en el uso de estos dispositivos depende exclusivamente de la flexibilidad o rigidez de la estructura. Así un sistema de muros tendría dispositivos destinados a controlar el daño con efectividad únicamente en las primeras etapas de agrietamiento, mientras que un sistema de pórticos o dual tendría la ventaja de controlar las derivas de entrepiso y el daño estructural generados durante todo el proceso.

### 3.4.2 En Función del Nivel de Desempeño Deseado

Para este punto de vista, se propone comparar el sistema de amortiguamiento con respecto a otro igualmente moderno, pero con un enfoque diferente, se trata del sistema de aislamiento sísmico.

El capítulo 9 del FEMA 274 nos muestra algunas recomendaciones en el uso de ambos sistemas de acuerdo a los diversos niveles de desempeño deseados como se muestra en la tabla 3.2. Por ejemplo, para los niveles de desempeño: Operativo, Inmediatamente Ocupable y Resguardo de la vida, los amortiguadores son especialmente útiles. Para el nivel Cerca al colapso es mejor recurrir a otros sistemas de reforzamiento o a la combinación de ambos.

Tabla 6 **Recomendaciones según el nivel de desempeño esperado.**

Desempeño		Aislamiento de la base	Amortiguamiento
Nivel	Rango		
Operativo	Control de daño	Muy recomendable	Recomendable
Inmediatamente Ocupable	Control de daño	Recomendable	Recomendable
Resguardo de la vida	Seguridad al limite	Limitado	Recomendable
Cerca al Colapso	Seguridad al limite	No Recomendable	Limitado

Fuente: normas FEMA 274.

### **3.4.3 En Función de la edad de la estructura**

En muchos países se usan estos dispositivos con fines de reforzamiento de estructuras existentes. Ciertamente esta es una opción atractiva porque se mejora el desempeño de la estructura sin adicionar elementos rigidizantes tales como muros de concreto armado y arriostres metálicos.

Adicionalmente su instalación demanda menores implicancias porque generalmente son adosadas a los pórticos. Aquí reside una gran ventaja en comparación con los sistemas de aislamiento sísmico.

En edificios nuevos, los amortiguadores han sido usados para controlar la excesiva vibración que pudiera ocasionar daño en los elementos no estructurales como equipos y/o artefactos. Inclusive su aplicación nos permite reducir secciones del casco estructural logrando así una reducción en el costo total del proyecto.

### **3.4.4 En Función de la Estética o Arquitectura del proyecto**

Debido a que estos dispositivos son generalmente integrados dentro del marco de un pórtico, pueden esconderse fácilmente detrás de muros de drywall y así tener un mínimo efecto en la integridad arquitectónica del edificio.

A pesar de esto cabe mencionar que algunos expertos del tema consideran una mejora arquitectónica la exposición de los amortiguadores, inclusive un incremento considerable del valor del proyecto.

### **3.4.5 En Función del Mantenimiento o Vida Util.**

Los dispositivos de fluido-viscoso TAYLOR DEVICES no requieren de ningún tipo de mantenimiento inclusive luego de algún evento sísmico. Esta afirmación cuenta con el respaldo de la industria militar que participó directamente en la investigación, inclusive existen muchas edificaciones a nivel mundial que demuestran la veracidad de esta propiedad.

### **3.4.6 En Función del Costo y las condiciones del proyecto**

El costo del análisis, diseño, fabricación e instalación de los amortiguadores en una estructura está en función de los siguientes factores:

- Movimiento del suelo y condiciones de suelo.
- Tipo de estructura.
- Desempeño deseado.
- Número de amortiguadores.
- Capacidad de cada disipador en fuerza, desplazamiento y velocidad.
- Refuerzo requerido de elementos estructurales existentes, conexiones o cimentaciones.
- Detalles de construcción e instalación.
- Interrupción en la ocupación del edificio durante la construcción o reforzamiento.

Se recomienda contar con especialistas en todos los campos de manera que pueda controlarse a la mayor medida todos estos factores.

Adicionalmente se debe tener en cuenta que el proyectista encargado debe contar con dos importantes requerimientos en función de minimizar los costos y seleccionar adecuadamente un amortiguador. El primero, un entendimiento claro de las propiedades de este sistema y segundo, un racional proceso de diseño teniendo muy en claro los objetivos de diseño establecidos.

### **3.4.7 En Función de la Importancia de la Estructura**

En estructuras importantes y esenciales, el costo relativo de implementar un sistema de amortiguamiento es relativamente bajo en comparación con los gastos que se tendrían que asumir en reparación estructural después del evento sísmico y los gastos originados por los daños del contenido del edificio.

La aplicación de sistemas modernos de amortiguamiento es un valor agregado también desde el punto de vista comercial para aquellos edificios destinados a oficinas o departamentos. El costo de venta de una oficina o departamento en un edificio con disipadores de energía siempre será superior al de un edificio convencional.

### **3.4.8 En Función del tipo de Dispositivo seleccionado**

Si se desea incrementar el amortiguamiento para movimientos sísmicos desde pequeños hasta severos, entonces los dispositivos visco elásticos y fluidoviscosos son apropiados, porque estos disipan energía en todos los niveles de movimiento. Dispositivos histeréticos y de fricción requieren de suficiente movimiento relativo para empezar su acción de disipación.

Si se desea aumentar la resistencia y rigidez lateral en un edificio, entonces el uso de dispositivos visco elásticos ó histeréticos es recomendable.

### **3.5 Método de modelado de un disipador de energía de fluido viscoso utilizando ETABS 2016**

El software ETABS 2016 es utilizado en la rama de la ingeniería estructural para el modelado de diferentes estructuras, el cual involucra

parámetros específicos como: materiales, tipos de sección, anclajes, apoyos y cargas, utilizando los códigos vigentes, como ACI o ASCE.

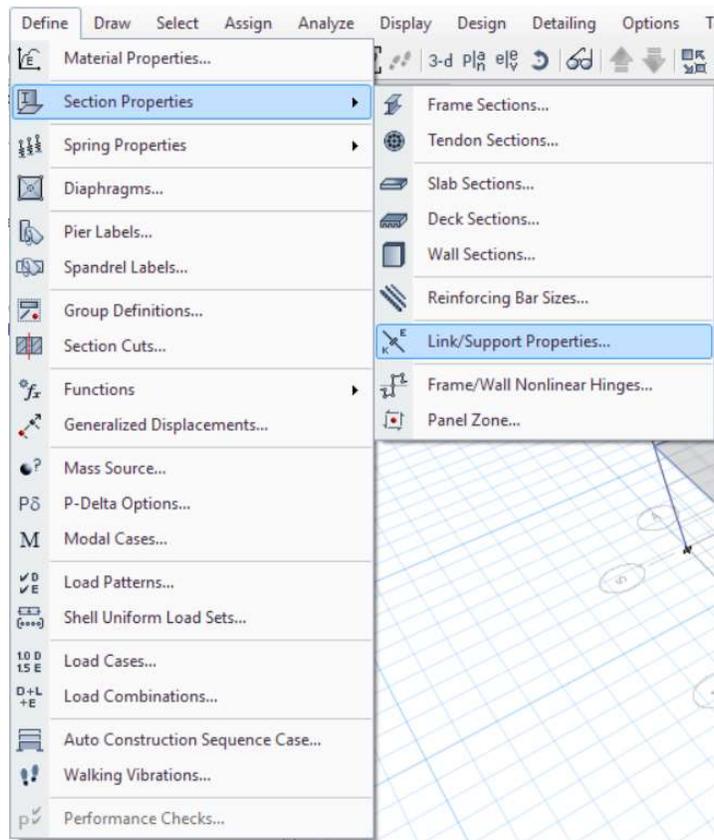
Los cálculos pueden realizarse en dos o tres dimensiones y el programa utiliza el método de elementos finitos para el análisis estructural. El programa fue elaborado por la empresa CSI (computers and structures inc), mediante ETABS 2016 es posible realizar modelos complejos, definir diferentes tipos de estado de carga, considerar pesos propios, así como el diseño de elementos en concreto o acero, basándose en las diferentes normativas con las que cuenta.

Para modelar los disipadores de energía de fluido viscosos, se utilizará una herramienta llamada elementos link, la cual permite modelar dispositivos de control pasivo para estructuras, los cuales pueden ser del tipo: friccional, plastificación, visco elástico y viscoso.

### **3.5.1 Elementos Link en ETABS 2016**

Para crear la sección adecuada en el programa se utiliza la herramienta Link/support Properties, que se encuentra en las herramientas Define y luego Section properties, como se muestra en la figura 35.

Figura 35 Herramienta Link para modelado de disipadores



Fuente: Elaboración propia.

Los valores como la rigidez, coeficiente de amortiguamiento y el exponente de velocidad, se calculan según las características de la estructura, para este caso se tomará:

Rigidez = 10,000 T/m

Coeficiente de rigidez = 1,500 T-s/m

Exponente de velocidad = 1

Se creará una nueva sección de link, se le coloca el nombre requerido en la pestaña llamada Link Property Name, en este caso se le coloca "Disipador" el tipo de elemento se modifica en la pestaña de Link Type, para modelar un disipador de fluido viscoso tipo lineal se coloca "Damper –Lineal", como se muestra en la figura 36.

Figura 36 Creación del Link.

The image shows a software dialog box titled "Link Property Data". It is divided into three main sections: "General", "Total Mass and Weight", and "Directional Properties".

- General:** "Link Property Name" is "disipador". "Link Type" is a dropdown menu set to "Linear". There are "Modify/Show Notes..." and "Modify/Show..." buttons.
- Total Mass and Weight:** "Mass" is 0 ton, "Weight" is 0 kN. "Rotational Inertia 1", "Rotational Inertia 2", and "Rotational Inertia 3" are all 0 ton-m<sup>2</sup>.
- Directional Properties:** A table with columns for "Direction" and "Fixed".

Direction	Fixed	Properties	Direction	Fixed
<input type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for All	<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>

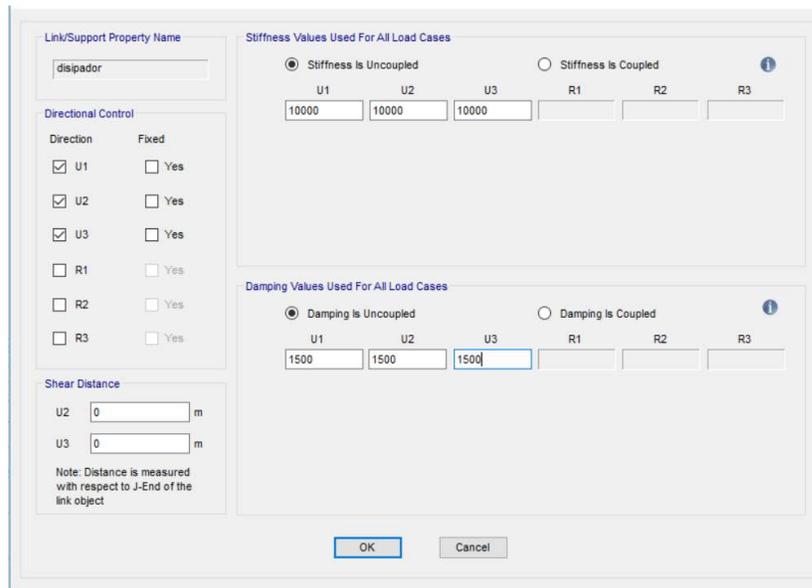
Below the table are "Fix All" and "Clear All" buttons.

At the bottom are "OK" and "Cancel" buttons.

Fuente: Elaboración propia.

Para ingresar los valores de la rigidez y coeficiente de rigidez, en la sección de propiedades de dirección (Directional Properties) se enciende el check en U1, U2, U3. Al presionar el click sobre el botón properties, despliega una nueva ventana en la cual se ingresan los valores respectivos, como se muestra en la figura 37.

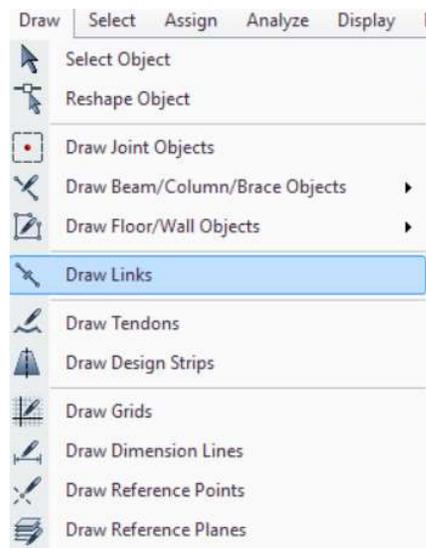
Figura 37 **Propiedades del dissipador de energía.**



Fuente: Elaboración propia.

Ya que se tiene creada la sección con las propiedades del dissipador de energía de fluido viscoso, se procede a agregarlo en el modelo, para dibujarlo se utiliza la herramienta Draw Links, que se encuentra en la pestaña de Draw, como se muestra en la figura 38.

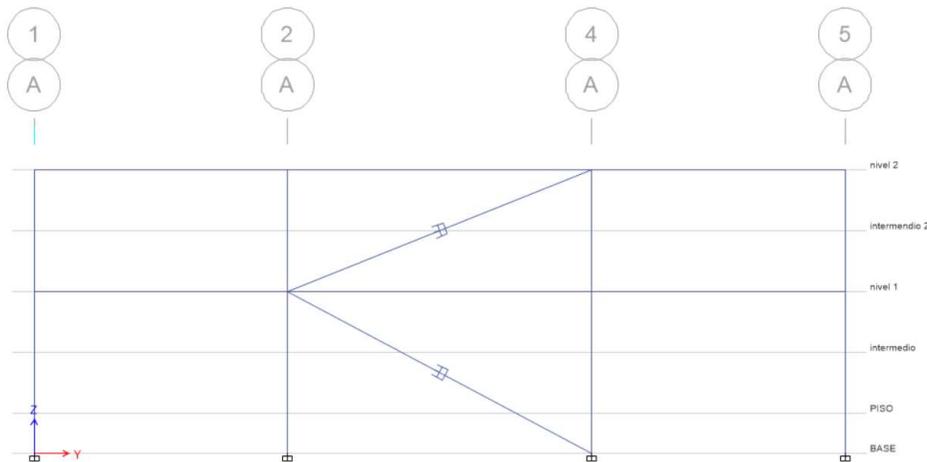
Figura 38 **Herramienta Draw Links**



Fuente: Elaboración propia.

Se elige la sección creada con el nombre “Disipador” y se procede a unir los nodos en donde se ubicarán los disipadores de energía, como se muestra en la figura 39.

Figura 39 **Dibujo de la sección Link en un modelo.**



Fuente: Elaboración propia.

#### **4. ANÁLISIS DEL EFECTO DE LOS DISIPADORES DE ENERGÍA EN UN EDIFICIO DE CONCRETO ARMADO DE 4 NIVELES.**

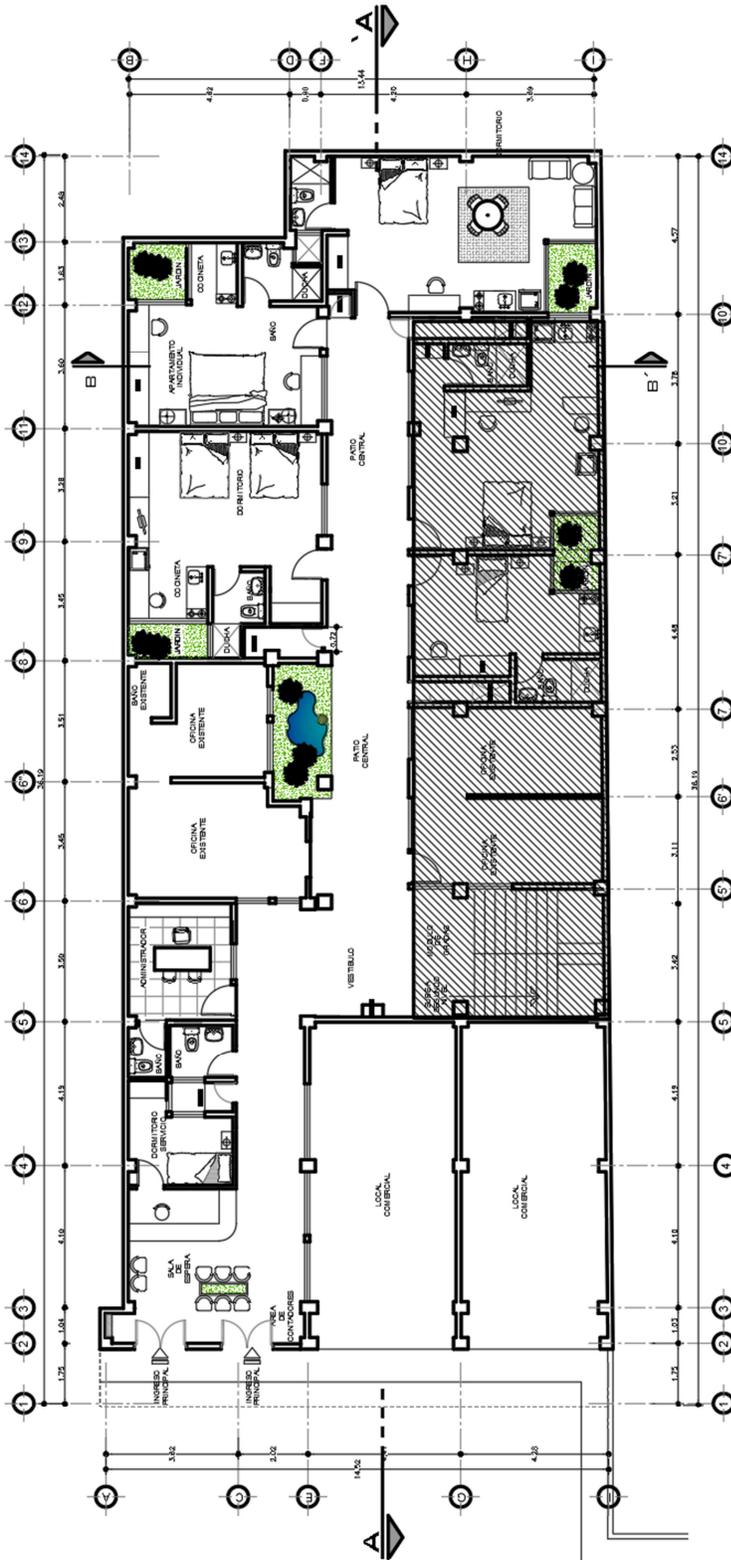
##### **4.1 Descripción de la construcción.**

El edificio Nuestra América se encuentra ubicado en la zona 1 de la ciudad de Quetzaltenango, fue construido con un sistema estructural de marcos de concreto reforzado, cuenta con 4 niveles los cuales se utilizan para instalaciones de apartamentos, este fue construido hace aproximadamente 10 años, y según los dueños del inmueble, los planos no fueron realizados por un Ingeniero estructural, por lo que se cree que al realizar el análisis, se encontraría que no cumple con requerimientos actuales en cuanto a resistencia a los sismos. El área a analizar es una ampliación del edificio ya que la totalidad del área cuenta con construcción tipo mampostería y una estructura de marcos.

Ya que no se cuenta con una memoria de cálculo se procede a realizar el análisis estructural considerando los materiales y el armado que aparece en los planos constructivos, cabe mencionar que lo descrito en los planos puede variar a la situación actual, ya que durante la construcción no se realizó una adecuada supervisión y control de calidad de los materiales, las cargas que se proponen corresponden a las descritas en las normas AGIES.

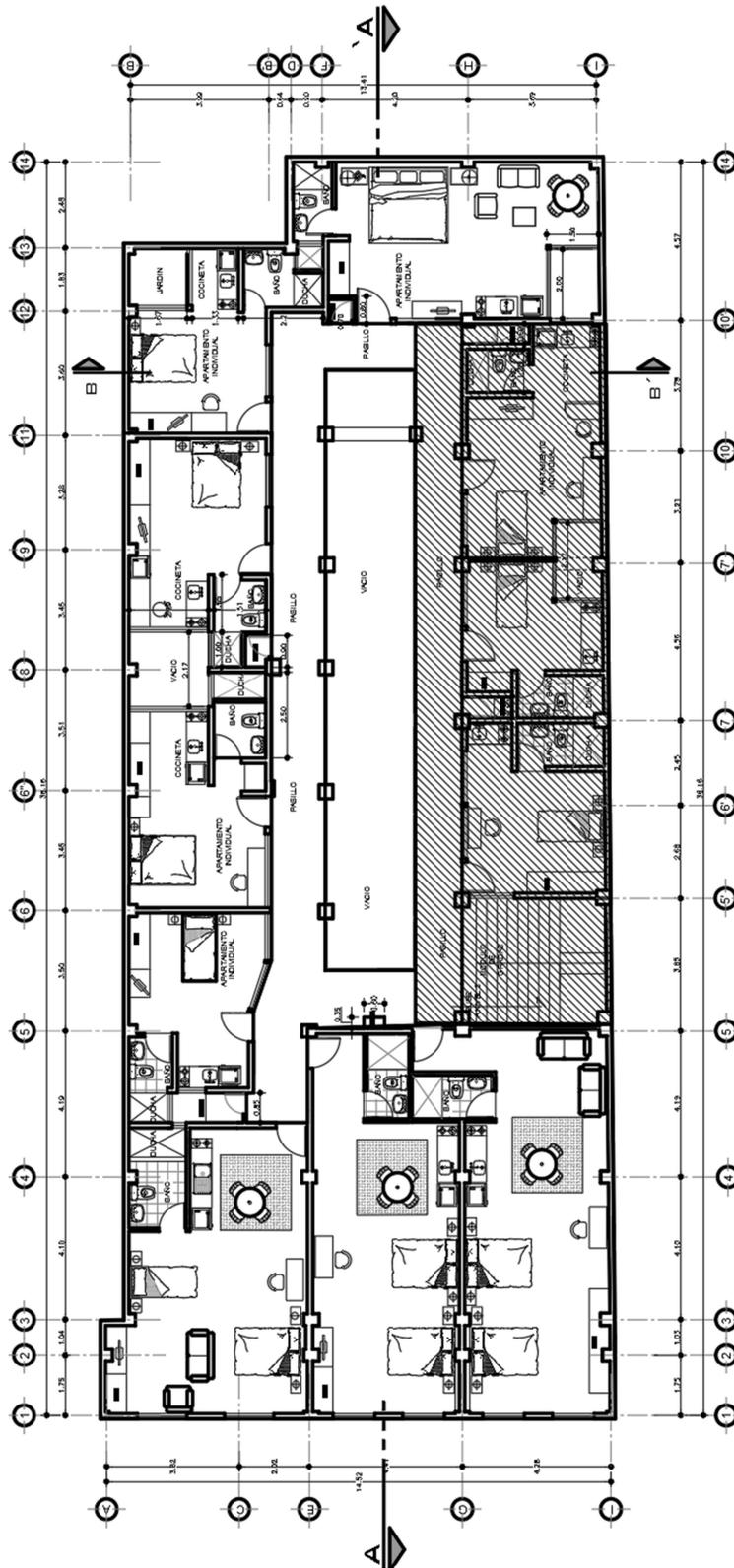
A continuación, se muestran las plantas correspondientes a cada nivel.

Figura 40 Planta primer nivel



Fuente: Juego de planos edificio Nuestra América.

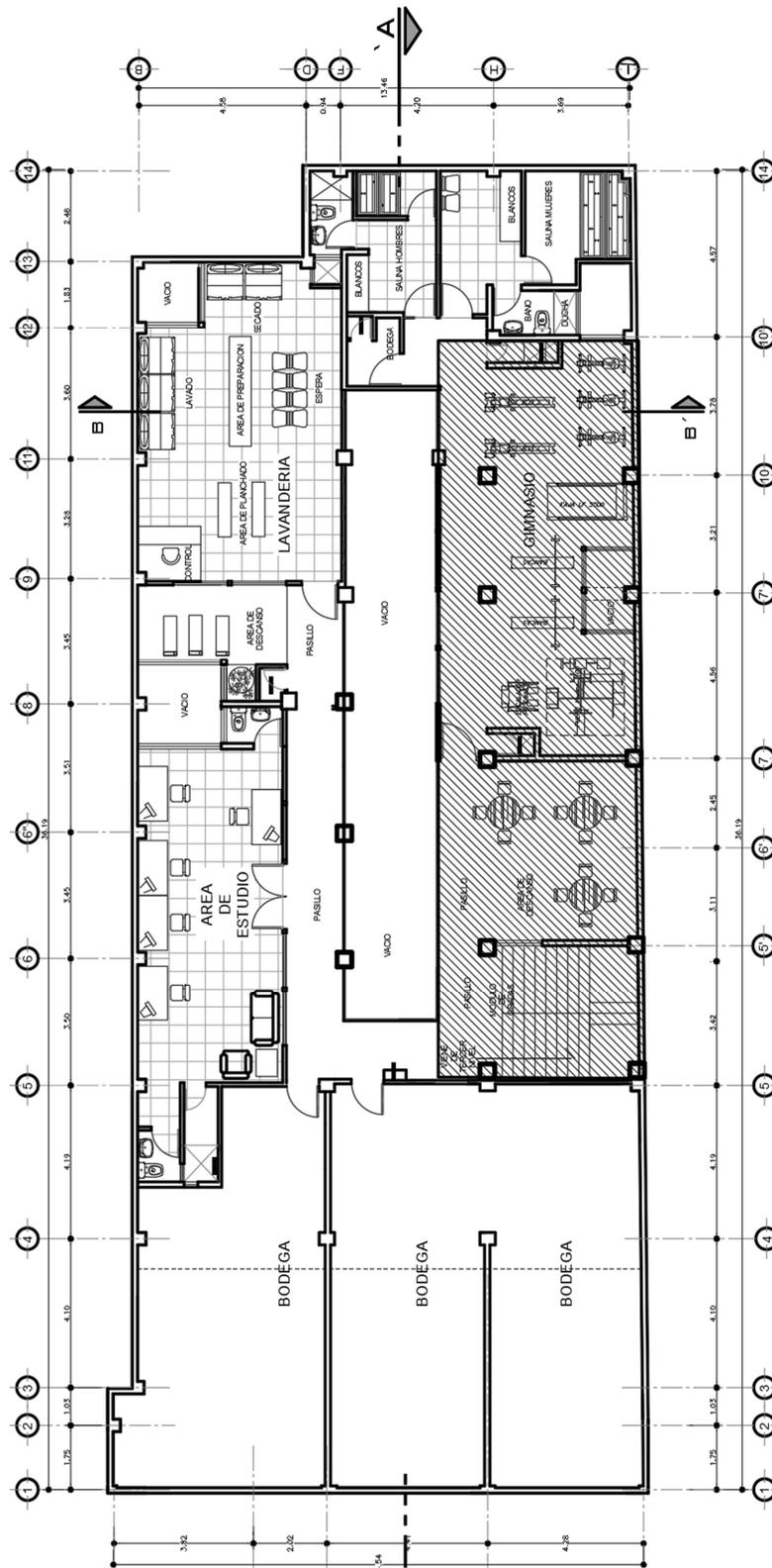
Figura 41 Planta segundo nivel



Fuente: Juego de planos edificio Nuestra América.



Figura 43 Planta cuarto nivel



Fuente: Juego de planos edificio Nuestra América.

El área a analizar se muestra sombreada con líneas a 45 grados, se elige esta área ya que esta se encuentra construida con el sistema estructural de marcos de concreto reforzado, para la cual se estudiará su comportamiento al agregarle disipadores de energía, se puede observar que el área cuenta con un módulo de gradas el cual hará más complejo el análisis, debido a la distribución de rigidez, en los primeros 3 niveles el área cuenta con apartamentos, en el cuarto nivel se tiene un gimnasio y una cafetería.

Se pudo tener acceso a unas fotografías durante la construcción, las cuales ayudarán a corroborar los materiales y cantidades de acero que aparecen en planos, de igual forma se realizó una visita al edificio para medir alturas y anchos de todos los elementos estructurales (vigas, losas y columnas) sobre la estructura de la cimentación, no se cuenta con fotografías, el análisis que se hará tomando en cuenta que la estructura se encuentra empotrada en su base, por lo que es indiferente tomar en cuenta correctamente la cimentación.

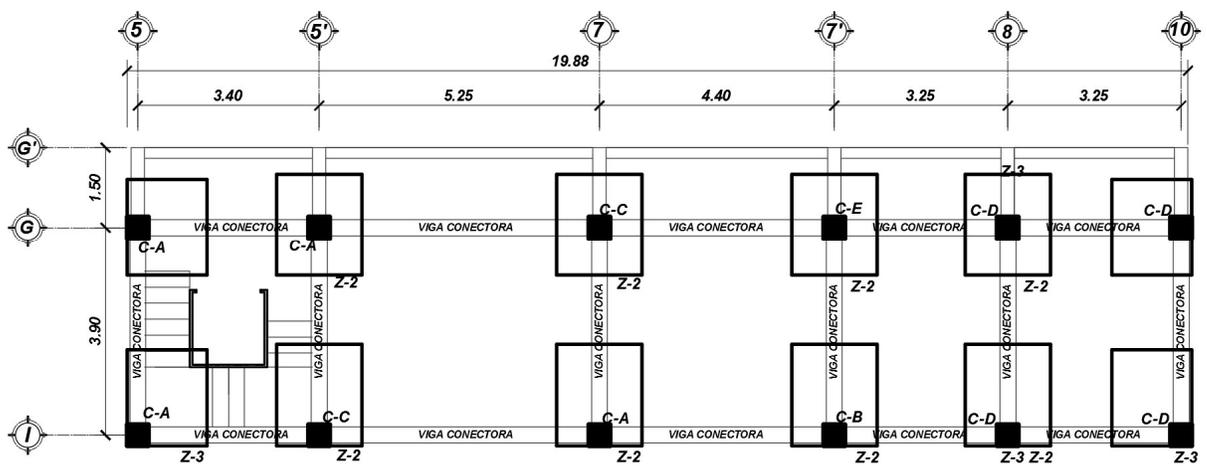
**Figura 44 Fotografías durante el proceso constructivo.**



Fuente: Base de datos oficinas edificio Nuestra América.

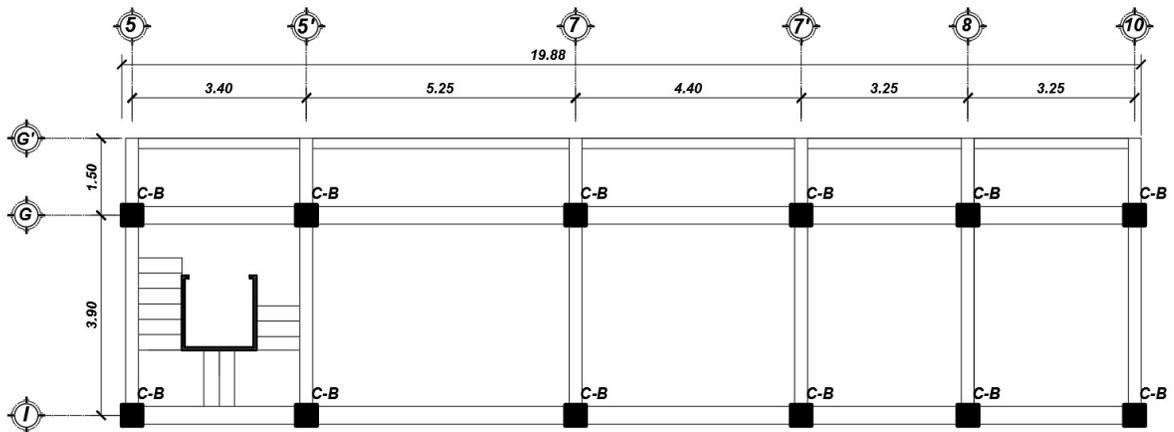
Los planos estructurales muestran los tipos de columnas y vigas utilizados, así como el armado para la losa. Se muestran 5 tipos de columnas, todas de 0.40X0.40 mts y 6 tipos de vigas de diferentes dimensiones, los planos muestran la cantidad de refuerzo colocado en cada elemento y comparándolo con las fotografías se puede concluir que, si coinciden. A continuación se muestran los planos de columnas y vigas para cada nivel, así como los detalles de las secciones utilizadas.

Figura 45 Planta de columnas primer nivel



Fuente: Juego de planos edificio Nuestra América.

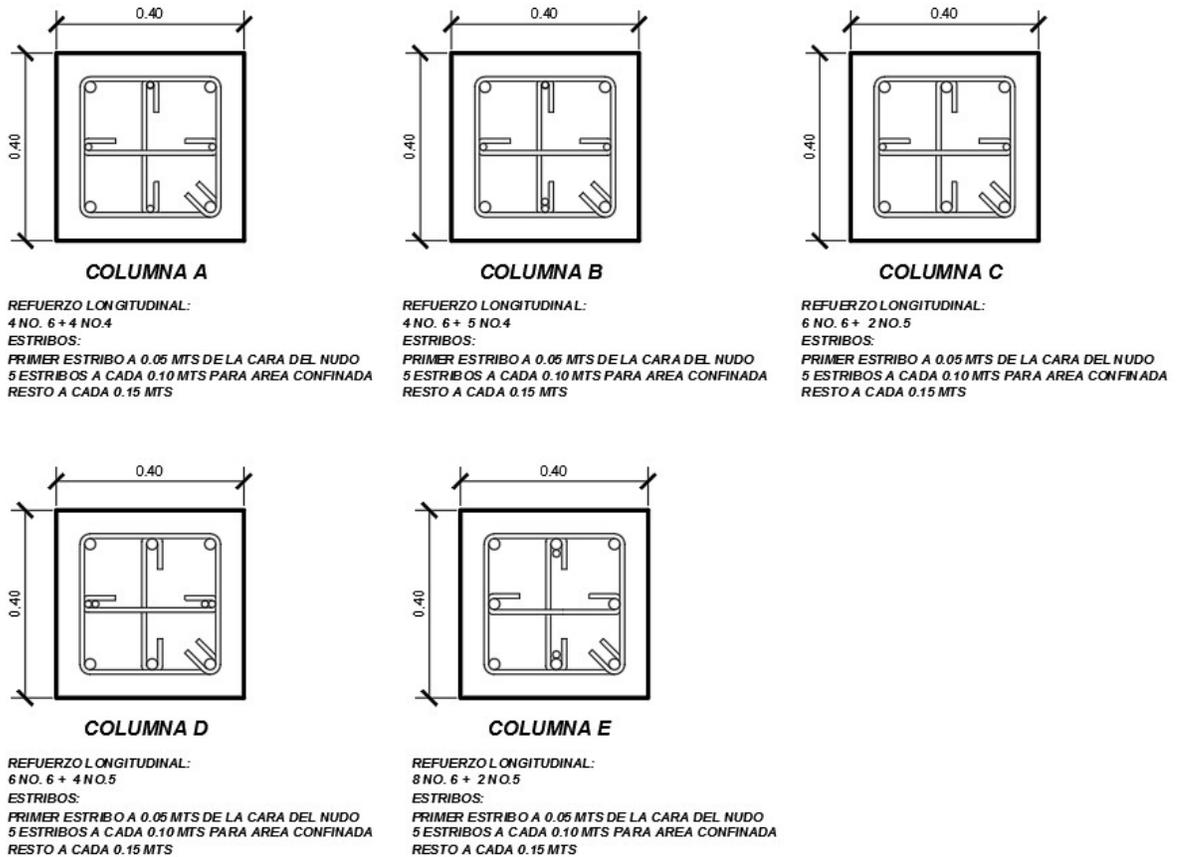
Figura 46 Planta de columnas segundo, tercer y cuarto nivel



Fuente: Juego de planos edificio Nuestra América.

En la figura 47 se muestran los detalles para los 5 tipos de columnas, las secciones y la cantidad de acero se tomará en cuenta para el modelo elaborado en ETABS.

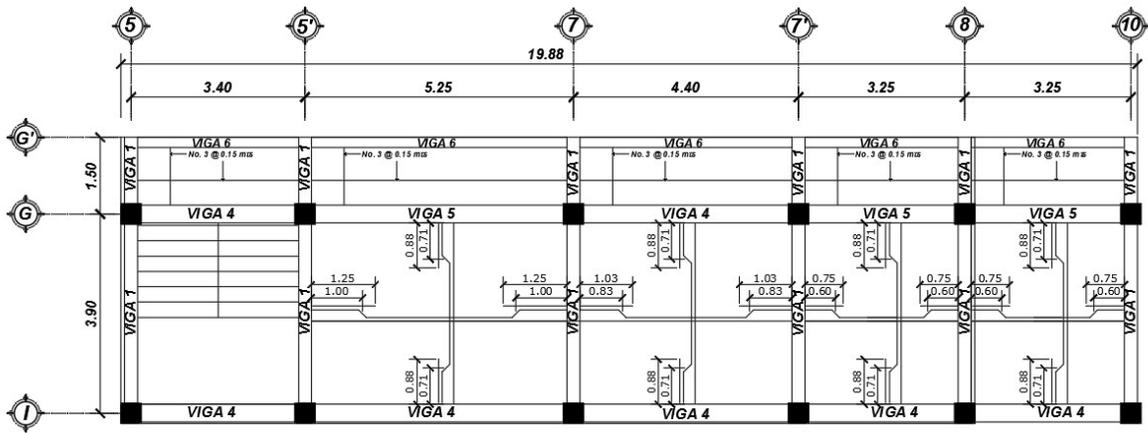
Figura 47 Detalles de columnas



Fuente: Juego de planos edificio Nuestra América.

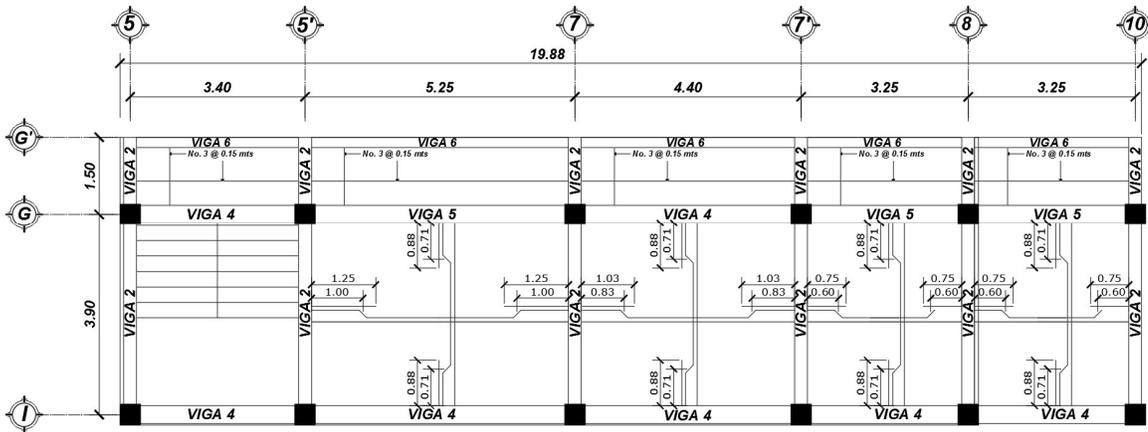
De igual forma se muestran las plantas de vigas y armados de losa para los 4 niveles.

Figura 48 Planta de losas y vigas primer nivel



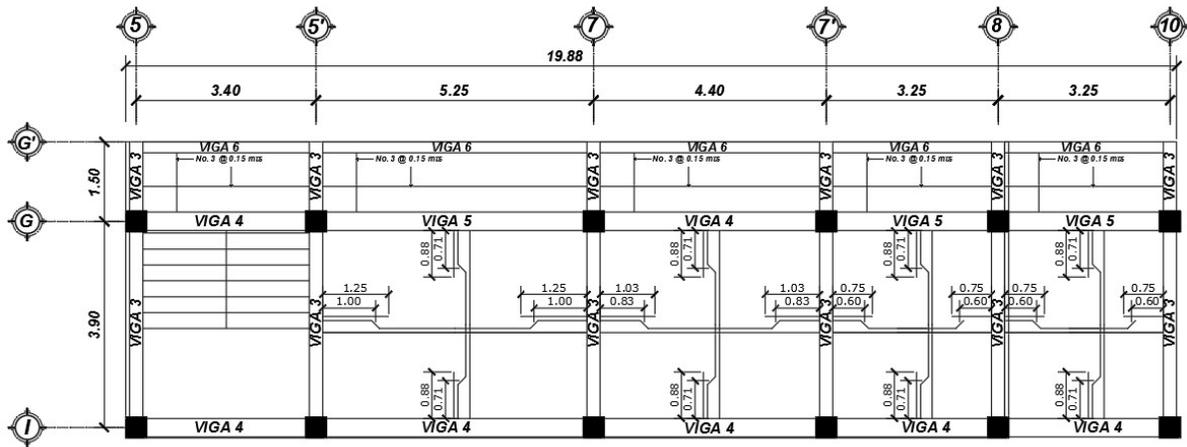
Fuente: Juego de planos edificio Nuestra América.

Figura 49 Planta de losas y vigas segundo nivel



Fuente: Juego de planos edificio Nuestra América.

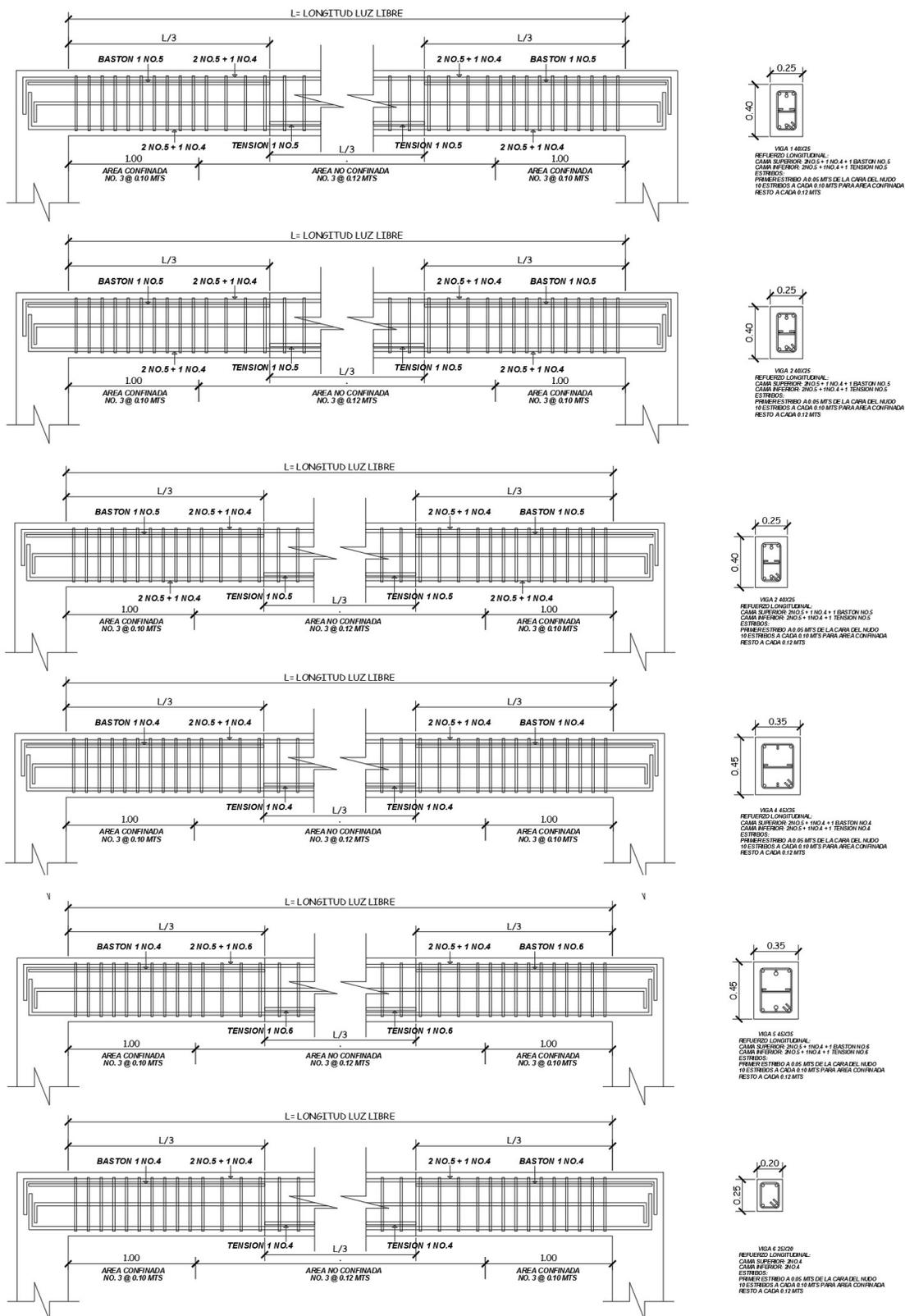
Figura 50 Planta de losas y vigas tercer y cuarto nivel



Fuente: Juego de planos edificio Nuestra América.

Los detalles de armado longitudinal y espaciamiento de estribos en las vigas, se muestran en la figura 51.

### Figura 51 Detalles de vigas

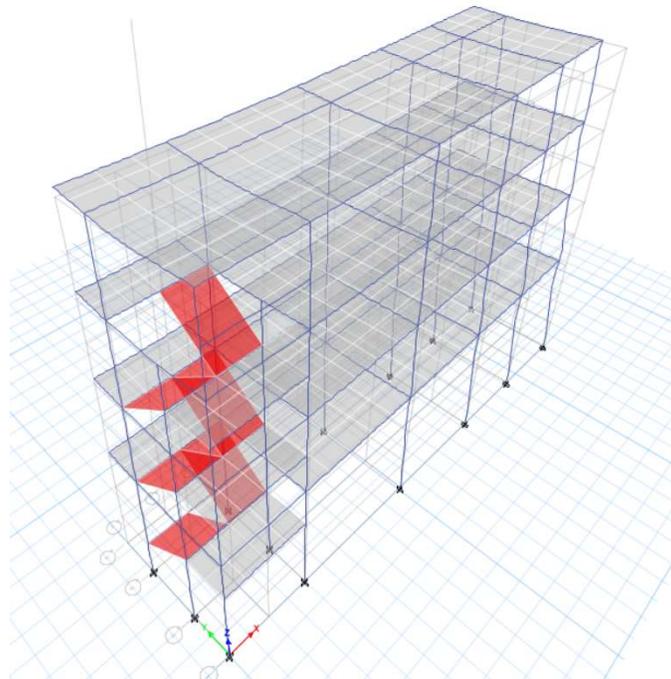


Fuente: Juego de planos edificio Nuestra América.

## 4.2 Análisis estructural del edificio sin disipadores de energía.

Tomando las secciones descritas anteriormente se realizó un modelo para el análisis estructural utilizando el programa ETABS 2016, se le asignó una carga viva en pasillos de 300 kg/m<sup>2</sup>, en las áreas de habitaciones de 250 kg/m<sup>2</sup>, se le agregó una sobrecarga de 150 kg/m<sup>2</sup> en todas las áreas, debido a los pesos del piso, rellenos, instalaciones y mobiliario.

Figura 52 **Modelo del edificio en ETABS 2016**



Fuente: Elaboración propia.

Se procedió a realizar los chequeos de derivas, utilizando los parámetros descritos en las normas AGIES, para una edificación general con una clasificación de obra importante, se considera  $0.020H_p$ , donde  $H_p$  es la altura del piso en análisis, se tomó el factor  $C_d$  para marcos resistentes a momento tipo B, el cual tiene un valor de 4.5, para el primer nivel se realizó el análisis utilizando una altura de piso de 4.7mts, contando el desplante hacia el cimiento, y en los niveles 2,3 y cuatro se tomó una altura de 3.20 mts. Los resultados de las derivas se muestran en la tabla 7.

Tabla 7 Chequeo de derivas para los 4 niveles.

PRIMER NIVEL								
NODO	Desplazamiento en BASE (X)	Desplazamiento nivel 1 (X)	Desplazamiento en BASE (Y)	Desplazamiento nivel 1 (Y)	Deriva (X)	Deriva (Y)	Estado Deriva X	Estado Deriva Y
G-5	0	1.7	0	1.08	1.7	1.08	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
G-5'	0	1.7	0	2.19	1.7	2.19	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
G-7'	0	1.7	0	3.89	1.7	3.89	SI CHEQUEA	NO CHEQUEA
G-7''	0	1.7	0	5.32	1.7	5.32	SI CHEQUEA	NO CHEQUEA
G-8	0	1.7	0	6.37	1.7	6.37	SI CHEQUEA	NO CHEQUEA
G-10	0	1.7	0	7.43	1.7	7.43	SI CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-5	0	1.72	0	1.06	1.72	1.06	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
I-5'	0	1.72	0	2.19	1.72	2.19	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
I-7'	0	1.72	0	3.89	1.72	3.89	SI CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-7''	0	1.72	0	5.32	1.72	5.32	SI CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-8	0	1.72	0	6.37	1.72	6.37	SI CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-10	0	1.72	0	7.43	1.72	7.43	SI CHEQUEA	NO CHEQUEA

SEGUNDO NIVEL								
NODO	Desplazamiento nivel 1 (X)	Desplazamiento nivel 2 (X)	Desplazamiento nivel 1 (Y)	Desplazamiento nivel 2 (Y)	Deriva (X)	Deriva (Y)	Estado Deriva X	Estado Deriva Y
G-5	1.7	2.48	1.08	1.44	0.78	0.36	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
G-5'	1.7	2.48	2.19	3.55	0.78	1.36	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
G-7'	1.7	2.48	3.89	6.82	0.78	2.93	SI CHEQUEA	NO CHEQUEA
G-7''	1.7	2.48	5.32	9.55	0.78	4.23	SI CHEQUEA	NO CHEQUEA
G-8	1.7	2.48	6.37	11.57	0.78	5.2	SI CHEQUEA	NO CHEQUEA
G-10	1.7	2.48	7.43	13.59	0.78	6.16	SI CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-5	1.72	2.52	1.06	1.43	0.8	0.37	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
I-5'	1.72	2.52	2.19	3.55	0.8	1.36	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
I-7'	1.72	2.52	3.89	6.82	0.8	2.93	SI CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-7''	1.72	2.52	5.32	9.55	0.8	4.23	SI CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-8	1.72	2.52	6.37	11.57	0.8	5.2	SI CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-10	1.72	2.52	7.43	13.59	0.8	6.16	SI CHEQUEA	NO CHEQUEA

TERCER NIVEL								
NODO	Desplazamiento nivel 2 (X)	Desplazamiento nivel 3 (X)	Desplazamiento nivel 2 (Y)	Desplazamiento nivel 3 (Y)	Deriva (X)	Deriva (Y)	Estado Deriva X	Estado Deriva Y
G-5	2.48	3.26	1.44	1.93	0.78	0.49	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
G-5'	2.48	3.26	3.55	4.76	0.78	1.21	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
G-7'	2.48	3.26	6.82	9.14	0.78	2.32	SI CHEQUEA	NO CHEQUEA
G-7''	2.48	3.26	9.55	12.8	0.78	3.25	SI CHEQUEA	NO CHEQUEA
G-8	2.48	3.26	11.57	15.51	0.78	3.94	SI CHEQUEA	NO CHEQUEA
G-10	2.48	3.26	13.59	18.22	0.78	4.63	SI CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-5	2.52	3.34	1.43	1.94	0.82	0.51	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
I-5'	2.52	3.34	3.55	4.76	0.82	1.21	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
I-7'	2.52	3.34	6.82	9.14	0.82	2.32	SI CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-7''	2.52	3.34	9.55	12.8	0.82	3.25	SI CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-8	2.52	3.34	11.57	15.51	0.82	3.94	SI CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-10	2.52	3.34	13.59	18.22	0.82	4.63	SI CHEQUEA	NO CHEQUEA

CUARTO NIVEL								
NODO	Desplazamiento nivel 3 (X)	Desplazamiento nivel 4 (X)	Desplazamiento nivel 3 (Y)	Desplazamiento nivel 4 (Y)	Deriva (X)	Deriva (Y)	Estado Deriva X	Estado Deriva Y
G-5	3.26	4.2	1.93	3.3	0.94	1.37	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
G-5'	3.26	4.2	4.76	6.35	0.94	1.59	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
G-7'	3.26	4.2	9.14	11.06	0.94	1.92	SI CHEQUEA	NO CHEQUEA
G-7''	3.26	4.2	12.8	15.01	0.94	2.21	SI CHEQUEA	NO CHEQUEA
G-8	3.26	4.2	15.51	17.92	0.94	2.41	SI CHEQUEA	NO CHEQUEA
G-10	3.26	4.2	18.22	20.84	0.94	2.62	SI CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-5	3.34	4.27	1.94	3.3	0.93	1.36	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
I-5'	3.34	4.27	4.76	6.35	0.93	1.59	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
I-7'	3.34	4.27	9.14	11.06	0.93	1.92	SI CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-7''	3.34	4.27	12.8	15.01	0.93	2.21	SI CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-8	3.34	4.27	15.51	17.92	0.93	2.41	SI CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-10	3.34	4.27	18.22	20.84	0.93	2.62	SI CHEQUEA	NO CHEQUEA

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que las derivas máximas de piso no chequean en algunos nodos del en el sentido Y, por la forma en planta del edificio se puede visualizar con facilidad que no posee un buen comportamiento en cuanto a los desplazamientos en el sentido Y, ya que tiene una configuración rectangular.

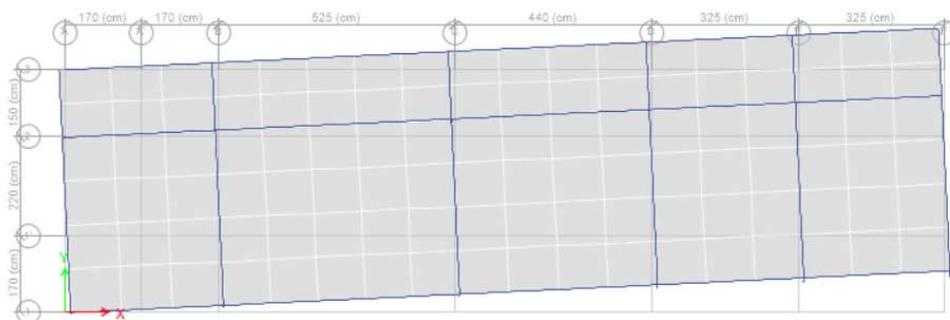
Se realizó el chequeo de la participación de masa en cada modo, estos valores se presentan en la tabla 4.2, se puede observar que en los modos 1 y 2 existe una participación del 30% de la masa, por lo cual se puede predecir que no tendrá un buen comportamiento debido a la torsión generada, en la figura 4.14 se muestra los desplazamientos para el modo 1, con el cual se comprueba que en el edificio existe rotación.

**Tabla 8 Participación de masa modal.**

	UY	UZ	Sum UX	Sum UY	Sum UZ	RX	RY	RZ	Sum RX	Sum RY	Sum RZ
	0.6022	0	0.0003	0.6022	0	0.1044	2.449E-05	0.3007	0.1044	2.449E-05	0.3007
	0.0002	0	0.9075	0.6024	0	0.0002	0.1328	0.0001	0.1045	0.1329	0.3007
	0.2756	0	0.9075	0.878	0	0.0606	0.0001	0.5811	0.1651	0.1329	0.8819
	0.0711	0	0.9075	0.9491	0	0.5374	0	0.0146	0.7024	0.1329	0.8964
	0.0023	0	0.9776	0.9514	0	0.0095	0.639	0.0055	0.712	0.772	0.902
	0.0227	0	0.9834	0.9741	0	0.1091	0.0488	0.0734	0.8211	0.8208	0.9754
	0.0153	0	0.9835	0.9894	0	0.0644	0.0014	0.0026	0.8856	0.8222	0.978
	0.0002	0	0.9969	0.9897	0	0.0018	0.1526	0.0002	0.8874	0.9748	0.9782
	0.0051	0	0.997	0.9948	0	0.0736	0.0008	0.0174	0.961	0.9756	0.9956
	0.0031	0	0.9971	0.9978	0	0.0246	0.0004	0.0001	0.9856	0.976	0.9957

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 53 Rotación en el modo 1.**



Fuente: Elaboración propia.

### 4.3 Modelado de los disipadores de energía de fluido viscoso.

#### Elección de la deriva objetivo.

La deriva objetivo será el desplazamiento máximo por nivel permitido por las normas AGIES, en la cual se debe definir previamente, la clasificación de la obra, el tipo de estructura, la altura del nivel y el valor del factor de desplazamiento post elástico ( $C_d$ ). La deriva máxima calculada en la estructura por medio del programa ETABS, se encuentra en el nodo I-10 del primer nivel, por lo que se presenta el cálculo del valor de la deriva máxima de piso para el primer nivel del edificio.

Altura de piso = 4.7 mts

Clasificación de obra = Importante

Tipo de estructura = Marcos resistentes a momento tipo B

Factor  $C_d$  = 4.5

Deriva ultima máxima tolerable = 0.020 Hp (altura de piso) (Tabla 4-1 AGIES NSE 3-10)

La deriva última para el primer nivel será la altura de piso multiplicada por la deriva última máxima tolerable.

$$\Delta u = 0.020 \times Hp = 0.020 \times 470 \text{ cm} = 9.4 \text{ cm}$$

La deriva plástica será la deriva última dividida entre el factor  $C_d$ .

$$\Delta cd = \frac{\Delta u}{C_d} = \frac{9.4 \text{ cm}}{4.5} = 2.09 \text{ cm}$$

La deriva máxima será la deriva plástica multiplicada por 1.2.

$$\Delta max = 1.2 \times \Delta cd = 1.2 \times 2.09 \text{ cm} = 2.5 \text{ cm}$$

La deriva máxima permitida para el primer nivel es de 2.5 cm la cual le llamaremos deriva objetivo, mientras que la máxima deriva que presenta la estructura en el primer nivel es de 7.43 cm, la reducción de esta deriva se logrará por medio del amortiguamiento que añadirá la presencia de los disipadores de energía.

### **Determinación del amortiguamiento viscoso.**

Se determina el valor de la relación entre la deriva máxima de la estructura, y la deriva objetivo el cual le llamaremos cociente B.

$$B = \frac{\text{Deriva máxima}}{\text{Deriva objetivo}} = \frac{7.43 \text{ cm}}{2.50 \text{ cm}} = 2.96 \quad (6)$$

Fuente: ASCE 2010.

Para calcular el amortiguamiento efectivo que debe tener la estructura para obtener la deriva objetivo, se utilizará la fórmula de Newmark.

$$B = \frac{2.31 - 0.41 \ln(5)}{2.31 - 0.41 \ln(B_{eff})} \quad (7)$$

Fuente: ASCE 2010.

Iterando valores para  $B_{eff}$ , para obtener un valor B de 2.96 obtener el amortiguamiento efectivo.

$$B_{eff} = 72\%$$

Por último, para encontrar el valor del amortiguamiento requerido por los disipadores, se debe restar del amortiguamiento efectivo, el valor de amortiguamiento de la estructura el cual es de 5%.

$$B_{visc} = B_{eff} - 5\% = 72\% - 5\% = 67\%$$

El amortiguamiento que requieren los disipadores para llegar a la deriva objetivo es de 67%.

### **Exponente de velocidad $\alpha$ .**

El análisis de los disipadores de energía en la estructura, se realiza por medio del programa ETABS, en el cual se modelan los disipadores según su ubicación y características, los disipadores se consideran tipo lineales por su facilidad en cuanto al modelamiento y análisis, los amortiguadores lineales y los no lineales producen una reducción muy similar en los desplazamientos laterales. El exponente de velocidad define el comportamiento de los disipadores en el rango inelástico, para dispositivos no lineales su valor es menor de 1, se recomienda un valor entre 0.40 a 0.60 para edificios con pocas irregularidades en planta, y para dispositivos lineales el exponente de velocidad es igual a 1.

### **Coefficiente de amortiguamiento C.**

Este coeficiente es la propiedad principal de un amortiguador, y depende de las características del fluido del dispositivo, este valor es definido por el calculista, y está definido según las propiedades de la estructura y resultados del análisis de la estructura.

Para amortiguadores lineales, este valor se puede obtener con la ecuación del FEMA274.

$$B_{visc} = \frac{T \cdot \sum_i C \cdot \emptyset_{ri}^2 \cdot \cos^2 \theta_i \cdot N}{4\pi \cdot \sum_i m_i \cdot \emptyset_i^2} \quad (8)$$

Fuente: ASCE 2010.

Donde:

$B_{visc}$  = Amortiguamiento viscos objetivo.

$T$  = Periodo de la estructura (s).

$C$  = Coeficiente de amortiguamiento (t-s/m)

$\emptyset_i$  = Desplazamiento lateral máximo de cada piso.

$\emptyset_{ri}$  = Desplazamiento lateral máximo relativo de cada piso.

$\Theta_i$  = Ángulo de inclinación del dissipador con respecto a la horizontal (rad).

$m_i$  = Masa de entrepiso (t-s<sup>2</sup>/m)

$N$  = Número de amortiguadores utilizados por piso en cada dirección

Los valores de los desplazamientos se deben normalizar, dividiendo el valor de cada piso entre el valor del último piso.

Para encontrar los valores de  $\emptyset_i$ , se tomarán los valores de los desplazamientos del nodo I-10 del primer al cuarto nivel, para luego dividirlos entre el desplazamiento del cuarto nivel y así obtener los valores normalizados, como se muestra en la tabla 9.

Tabla 9 **Valores de  $\emptyset_i$  normalizados.**

DESPLAZAMIENTOS PARA $\emptyset_i$		$\emptyset_i$ Normalizados
NIVEL 1	7.34	0.352207294
NIVEL 2	13.59	0.652111324
NIVEL 3	18.22	0.87428023
NIVEL 4	20.84	1

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 10 aparecen los valores para obtener las expresiones en sumatoria, que aparecen en la ecuación para encontrar  $C$ , tanto en numerador como en el denominador.

Tabla 10 Valores requeridos para encontrar el coeficiente C.

Piso	$\theta_i$	$\theta_{ri}$	$m_i$	$\text{Cos}\theta_i$	$\sum_i \theta_{ri}^2 \text{Cos}^2\theta_i$	$\sum_i m_i \theta_i^2$
nivel 1	0.352	0.352	19.740	0.812	0.082	2.449
nivel 2	0.652	0.300	19.390	0.812	0.059	8.246
nivel 3	0.874	0.222	19.780	0.812	0.033	15.119
nivel 4	1.000	0.126	18.090	0.812	0.010	18.090
TOTAL					0.184	43.903

Fuente: Elaboración propia.

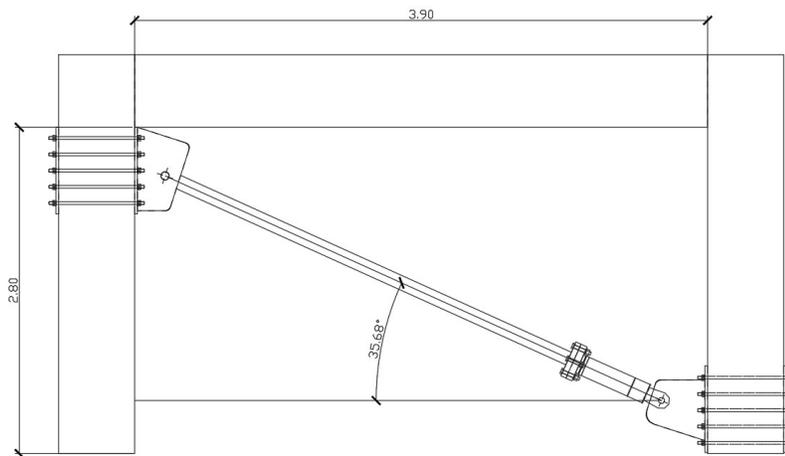
Los valores de  $\theta_{ri}$  se obtuvieron restando el valor de  $\theta_i$  del nivel correspondiente menos el del nivel anterior, los valores de  $m_i$  se obtuvieron del programa ETABS, los cuales son los valores de la masa por cada nivel, como se muestra en la tabla 11, Los valores de  $\theta_i$  se determinaron según la posición del disipador, el cual según las medidas de la construcción forma un ángulo de  $35.68^\circ$  con respecto a la horizontal como se muestra en la figura 54, el coseno de 35.68 grados es 0.812.

Tabla 11 Valores de  $m_i$  por cada nivel.

Story	Diaphragm	Mass X tonf-s <sup>2</sup> /m	Mass Y tonf-s <sup>2</sup> /m
Story1	D1	19.74416	19.74416
Story2	D2	19.39918	19.39918
Story3	D3	19.78487	19.78487
Story4	D4	18.09648	18.09648

Fuente: Elaboración propia.

Figura 54 **Ángulo de inclinación del dissipador diagonal.**



Fuente: Elaboración propia.

Por último, para calcular el valor de C, se encuentra el valor del periodo de vibración T según el análisis estructural en ETABS, el cual es de 1.48 s, teniendo el amortiguamiento viscoso de 67%, y un valor de N igual a 1 ya que se modeló solamente un dissipador por nivel para el sentido Y.

$$C = \frac{B_{visc} * 4\pi * \sum_i m_i * \delta_i^2}{T * (\sum_i \delta_{ri}^2 * \cos^2 \theta_i) * N} \quad (8)$$

Fuente: ASCE 2010.

$$C = \frac{67 * 4\pi * 43.903}{1.48 * 0.184 * 1} = 1357.37 \text{ t} - \text{s/m}$$

### **Rigidez del perfil metálico.**

Se considera colocar un perfil metálico tipo HSS10X8X3/16 el cual tiene las siguientes propiedades:

$$a = 6.06 \text{ pulg}^2 = 0.0039 \text{ m}^2$$

$$h = 10 \text{ pulg} = 0.254 \text{ mts}$$

$$b = 8 \text{ pulg} = 0.2032 \text{ mts}$$

Módulo de elasticidad = 29000 Ksi =  $2.03 \times 10^7$  ton/m<sup>2</sup>

Longitud = 199 pulg = 5.05 mts

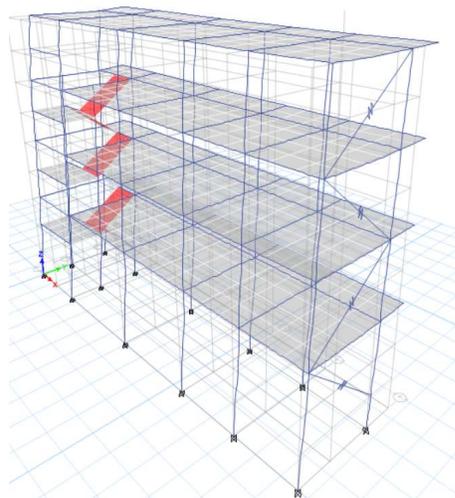
Para obtener la rigidez axial se utilizará la siguiente fórmula:

$$K = \frac{E * A}{l}$$
$$K = \frac{2.03 \times 10^7 \times 0.0039}{5.05} = 15,677.22 \text{ ton/m}$$

### **Modelado con disipadores de energía.**

Al modelo anteriormente realizado, se le agregaron los elementos link en la ubicación propuesta para los disipadores, se realizaron varias configuraciones para la posición en X y Y, pero debido a la geometría de la planta, se puede visualizar que en el sentido X no requiere dispositivos, y todas las derivas en ese sentido checan, en el sentido Y existe rotación debido a la cantidad de rigidez que aportan las gradas, por esta razón se ubicaron los dispositivos en el eje 10, como se muestra en la figura 55.

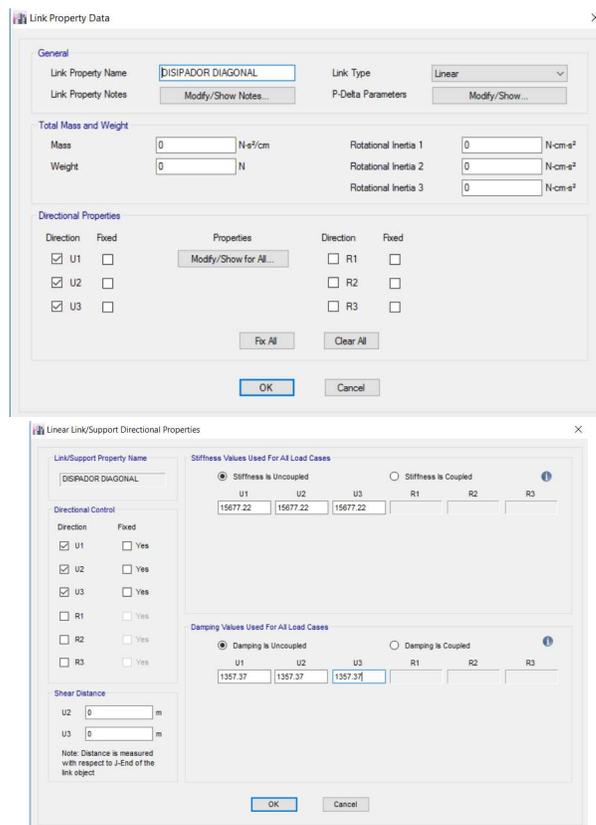
Figura 55 **Ubicación de los disipadores de energía.**



Fuente: Elaboración propia.

La forma de crear correctamente el elemento Link, se describe en el capítulo 3, para el edificio se modeló un link tipo lineal, con coeficiente de amortiguamiento  $C$  de 1,357.37 t-m/s, rigidez de 15,677.22 ton/m, el exponente de velocidad no lo solicita el programa ya que para tipo lineal asume un valor de 1. Los valores ingresados se muestran en la figura 56.

Figura 56 **Propiedades del disipador de energía**



Fuente: Elaboración propia.

El resultado de las derivas de piso, se tabularon de igual forma para la estructura con los disipadores de energía, los resultados se muestran en la tabla 12.

Tabla 12 Chequeo de derivas para los 4 niveles.

PRIMER NIVEL								
NODO	Desplazamiento en BASE (X)	Desplazamiento nivel 1 (X)	Desplazamiento en BASE (Y)	Desplazamiento nivel 1 (Y)	Deriva (X)	Deriva (Y)	Estado Deriva X	Estado Deriva Y
G-5	0	2.42	0	2.5	2.42	2.5	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
G-5'	0	2.42	0	2.41	2.42	2.41	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
G-7	0	2.42	0	2.27	2.42	2.27	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
G-7'	0	2.42	0	2.14	2.42	2.14	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
G-8	0	2.42	0	2.05	2.42	2.05	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
G-10	0	2.42	0	1.96	2.42	1.96	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
I-5	0	2.42	0	2.45	2.42	2.45	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
I-5'	0	2.42	0	2.41	2.42	2.41	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
I-7	0	2.42	0	2.27	2.42	2.27	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
I-7'	0	2.42	0	2.14	2.42	2.14	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
I-8	0	2.42	0	2.05	2.42	2.05	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
I-10	0	2.42	0	1.96	2.42	1.96	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA

SEGUNDO NIVEL								
NODO	Desplazamiento nivel 1 (X)	Desplazamiento nivel 2 (X)	Desplazamiento nivel 1 (Y)	Desplazamiento nivel 2 (Y)	Deriva (X)	Deriva (Y)	Estado Deriva X	Estado Deriva Y
G-5	2.42	3.53	2.5	3.75	1.11	1.25	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
G-5'	2.42	3.53	2.41	3.66	1.11	1.25	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
G-7	2.42	3.53	2.27	3.51	1.11	1.24	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
G-7'	2.42	3.53	2.14	3.38	1.11	1.24	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
G-8	2.42	3.53	2.05	3.29	1.11	1.24	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
G-10	2.42	3.53	1.96	3.2	1.11	1.24	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
I-5	2.42	3.52	2.45	3.71	1.1	1.26	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
I-5'	2.42	3.52	2.41	3.66	1.1	1.25	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
I-7	2.42	3.52	2.27	3.51	1.1	1.24	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
I-7'	2.42	3.52	2.14	3.38	1.1	1.24	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
I-8	2.42	3.52	2.05	3.29	1.1	1.24	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
I-10	2.42	3.52	1.96	3.2	1.1	1.24	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA

TERCER NIVEL								
NODO	Desplazamiento nivel 2 (X)	Desplazamiento nivel 3 (X)	Desplazamiento nivel 2 (Y)	Desplazamiento nivel 3 (Y)	Deriva (X)	Deriva (Y)	Estado Deriva X	Estado Deriva Y
G-5	3.53	4.64	3.75	4.98	1.11	1.23	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
G-5'	3.53	4.64	3.66	4.86	1.11	1.2	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
G-7	3.53	4.64	3.51	4.67	1.11	1.16	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
G-7'	3.53	4.64	3.38	4.51	1.11	1.13	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
G-8	3.53	4.64	3.29	4.4	1.11	1.11	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
G-10	3.53	4.64	3.2	4.28	1.11	1.08	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
I-5	3.52	4.65	3.71	4.97	1.13	1.26	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
I-5'	3.52	4.65	3.66	4.86	1.13	1.2	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
I-7	3.52	4.65	3.51	4.67	1.13	1.16	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
I-7'	3.52	4.65	3.38	4.51	1.13	1.13	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
I-8	3.52	4.65	3.29	4.4	1.13	1.11	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
I-10	3.52	4.65	3.2	4.28	1.13	1.08	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA

CUARTO NIVEL								
NODO	Desplazamiento nivel 3 (X)	Desplazamiento nivel 4 (X)	Desplazamiento nivel 3 (Y)	Desplazamiento nivel 4 (Y)	Deriva (X)	Deriva (Y)	Estado Deriva X	Estado Deriva Y
G-5	4.64	5.94	4.98	6.65	1.3	1.67	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
G-5'	4.64	5.94	4.86	6.45	1.3	1.59	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
G-7	4.64	5.94	4.67	6.27	1.3	1.6	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
G-7'	4.64	5.94	4.51	5.79	1.3	1.28	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
G-8	4.64	5.94	4.4	5.44	1.3	1.04	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
G-10	4.64	5.94	4.28	5.08	1.3	0.8	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
I-5	4.65	5.94	4.97	6.65	1.29	1.68	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
I-5'	4.65	5.94	4.86	6.45	1.29	1.59	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
I-7	4.65	5.94	4.67	6.27	1.29	1.6	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
I-7'	4.65	5.94	4.51	5.79	1.29	1.28	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
I-8	4.65	5.94	4.4	5.44	1.29	1.04	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA
I-10	4.65	5.94	4.28	5.08	1.29	0.8	SI CHEQUEA	SI CHEQUEA

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar todas las derivas chequean en los 4 niveles, por lo que se puede comprobar la eficiencia de los disipadores de energía, el primer nivel es el que está más afectado por los desplazamientos debido a la mayor participación de masa ya que cuenta con una altura de piso mayor debido al desplante de la cimentación, la mayor deriva de piso corresponde al nodo I-5 del primer nivel con un valor de 2.45 cm, cuando la deriva máxima es de 2.5 cm, con esto se puede observar que el modelamiento y los cálculos son satisfactorios, ya que la deriva máxima del modelo sin disipadores es de 7.43 cm, se fijó una deriva objetivo de 2.5 cm y se obtuvo una de 2.45 cm.

Con los valores de las derivas se puede observar que el comportamiento del edificio, en cuanto a la torsión ha mejorado, ya que su comportamiento en cuanto a desplazamientos es simétrico, en la tabla 13 se puede observar que la participación de masa para la rotación en los modos 1 y 2, es, 0.014 y 0.016 respectivamente.

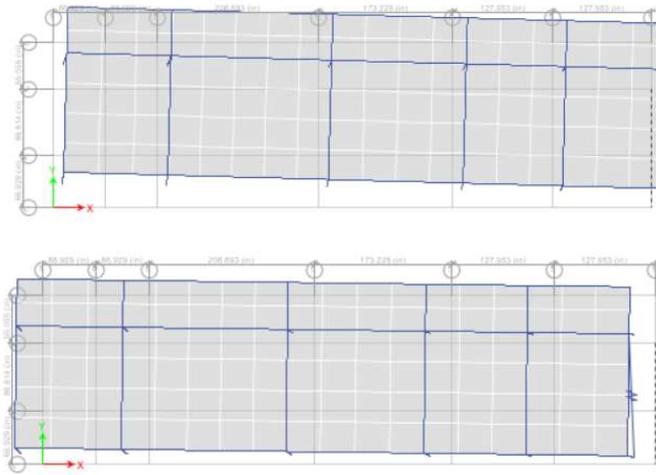
**Tabla 13 Participación de masa modal.**

Modal Participating Mass Ratios											
de 12   Reload Apply											
	UY	UZ	Sum UX	Sum UY	Sum UZ	RX	RY	RZ	Sum RX	Sum RY	Sum RZ
▶	0.7178	0	0.1514	0.7178	0	0.1414	0.0263	0.014	0.1414	0.0263	0.014
	0.1434	0	0.9085	0.8612	0	0.0297	0.1227	0.0025	0.1711	0.1491	0.0166
	0.0263	0	0.9085	0.8874	0	0.0025	0.0001	0.8705	0.1737	0.1491	0.887
	0.0745	0	0.9097	0.9619	0	0.4694	0.0124	0.026	0.6431	0.1615	0.913
	0.0014	0	0.9835	0.9634	0	0.0112	0.6667	0.0002	0.6542	0.8282	0.9132

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 57 se pueden observar los desplazamientos para los modos 1 y 2 en el cuarto nivel.

Figura 57 desplazamientos en el cuarto nivel para los modos 1 y 2.



Fuente: Elaboración propia.

Por último, se deben chequear las fuerzas axiales en los brazos metálicos propuestos, el perfil elegido fue un HSS10X8X3/16 con un área de 6.06 pulg<sup>2</sup>, el tipo de acero es un A992 el cual tiene una resistencia a la fluencia de 50,000 lbs/pulg<sup>2</sup>. Con un factor de seguridad de 0.9.

En el modelo se encontraron las fuerzas máximas de compresión y tensión debido al sismo en Y, los valores son  $T_u = 208,861.42$  lbs fuerza de tensión,  $P_u = 220,193.22$  lbs.

## Chequeo por tensión.

### CHEQUEO POR TENSIÓN

Acero=	A572	
Fy=	50000	lb/pulg <sup>2</sup>
Fu=	65000	lb/pulg <sup>2</sup>
Longitud=	150	pulg
K (factor de longitud efectiva)=	1	
Tensión a resistir=	208861.42	lbs
Ø=	0.9	

Tipo de perfil=	HSS10X8X3/16	
Ag=	6.06	pulg <sup>2</sup>
r=	3.28	

### Chequeo de esbeltez

Kl/r=	45.7317073	<300, SI CHEQUEA
-------	------------	------------------

### Resistencia a la fluencia

$P_n = \phi * F_y * A_g =$	272700	> 208861.42, SI CHEQUEA
----------------------------	--------	-------------------------

El perfil propuesto si resiste la fuerza de tensión máxima en la estructura.

## Chequeo por compresión.

### CHEQUEO POR COMPRESION

Acero=	A572	
Fy=	50	klb/pulg2
Fu=	65	klb/pulg2
Longitud=	150	pulg
K (factor de longitud efectiva) =	1	
Compresión a resistir=	220193.22	lbs
Ø=	0.9	
Módulo de elasticidad=	29000	klb/pulg2

Tipo de perfil=	HSS10X8X3/16	
Ag=	6.06	pulg2
r=	3.28	

### Chequeo de esbeltez

Kl/r=	45.7317073
-------	------------

### Tensión crítica de pandeo

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{kl}{r}\right)^2} = 136.855707 \text{ klb/pulg}^2$$

### Esfuerzo crítico

$$\text{Si } \frac{kl}{r} \leq 4.71 * \sqrt{\frac{E}{F_y}} \text{ o } F_e \geq 0.44F_y \quad F_{cr} = 42.9100621 \text{ klb/pulg}^2$$

$$\text{Si } \frac{kl}{r} > 4.71 * \sqrt{\frac{E}{F_y}} \text{ o } F_e \leq 0.44F_y \quad F_{cr} = 120.022455 \text{ klb/pulg}^2$$

$$4.71 * \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 113.431821$$

Fcr= 2684.06 klb/pulg2

Resistencia a la compresión

$P_u = \phi * F_{cr} * A_g =$  14638.8632 klb/pulg2

14638863.2 lb/pulg2

>22019.22, SI  
CHEQUEA

#### 4.4 Análisis Tiempo Historia

Para realizar un análisis dinámico de la estructura se utilizará el método tiempo historia, brindará resultados más precisos ya que se tomarán registros de la zona de construcción en este caso Quetzaltenango. En el capítulo 16 del código ASCE 7-16 se explican las consideraciones que se deben tomar para realizar este tipo de análisis.

El código ASCE en la sección 16.2.2 versión 2016 explica que para este análisis se requiere un mínimo de 11 registros, en versiones anteriores se solicitaba un mínimo de 3 registros, debido a que en la actualidad es limitado el acceso a este tipo de información, para el presente estudio se tomarán 3 registros los cuales se pueden descargar de forma gratuita en la página <https://acelerored.ingenieria.usac.edu.gt>, los registros tomados son los siguientes:

Quetzaltenango con fecha 7 de septiembre de 2017

San Marcos con fecha 1 de febrero de 2019

San Marcos con fecha 2 de febrero de 2019

El archivo que se descarga de la página es un documento con extensión .csv, el cual se puede abrir con cualquier versión de Microsoft Excel, los datos los presenta separados por medio de una coma, y en el siguiente orden: tiempo, Norte –Sur, Elevación, Este-Oeste, los cuales para el efecto del

análisis se interpretarán como: tiempo, Y, Z, X. Como se muestra en la imagen 58.

**Figura 58 Registro de movimiento sísmico para Quetzaltenango con fecha 2017/09/07**

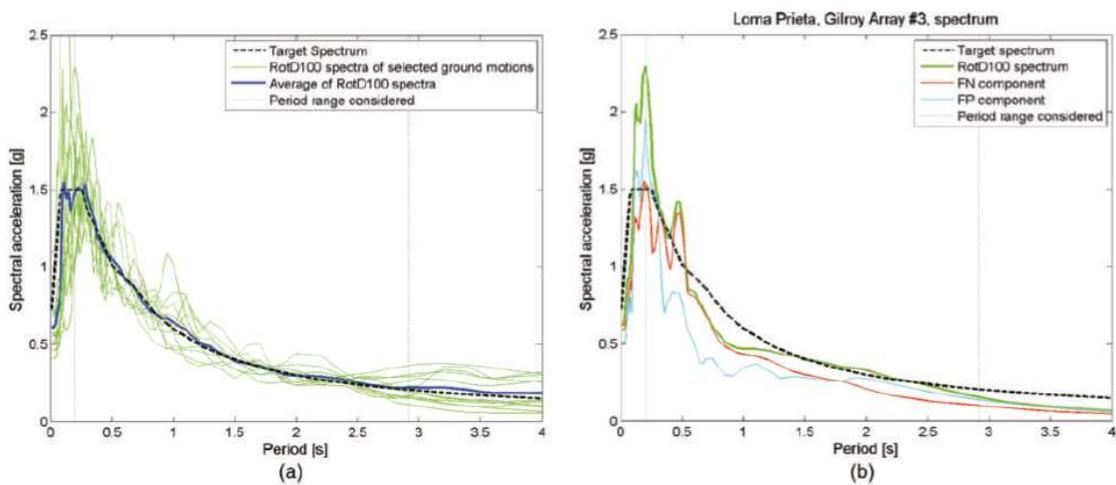
1	Acceleration - 2017/09/07 22:48:41 XELA: Estacion CUNOC, Ingenieria			
2	Time (sec), N-S, Z, E-W			
3	0.000	0.120	-0.106	-0.186
4	0.010	-0.137	-0.090	0.293
5	0.020	0.149	-0.038	-0.388
6	0.030	-0.102	-0.020	0.280
7	0.040	-0.034	0.079	-0.117
8	0.050	-0.012	-0.003	-0.064
9	0.060	-0.105	-0.019	0.282
10	0.070	0.136	0.087	-0.292
11	0.080	-0.037	-0.004	0.260
12	0.090	0.111	-0.035	-0.159
13	0.100	0.010	-0.041	-0.004
14	0.110	-0.129	0.021	0.161
15	0.120	0.054	0.008	-0.279
16	0.130	-0.069	-0.044	0.249
17	0.140	0.117	0.063	-0.138

Fuente: Elaboración propia.

Estos valores de aceleración se encuentran en  $\text{cm/s}^2$ , los registros se tienen un salto de 0.01 segundos, lo que nos da 15,900 valores de aceleración.

Los valores antes mencionados deben ser calibrados o ajustados según el espectro de respuesta que se utilizará para el análisis, en la sección 16.2.3.1 el código ASCE 7-16, explica para que rango de valores se debe ajustar, según el periodo fundamental de la estructura, en ediciones anteriores el código solicitaba un ajusta entre 0.5T a 1.5T, pero en la versión 2016 se requiere un rango entre 1.5T a 2.0T, en la figura C16.2-2 del código ASCE se muestra un ejemplo de un registro calibrado a un espectro de respuesta, el cual se muestra en la figura 59.

Figura 59 Ejemplo de un registro calibrado a un determinado espectro de respuesta.

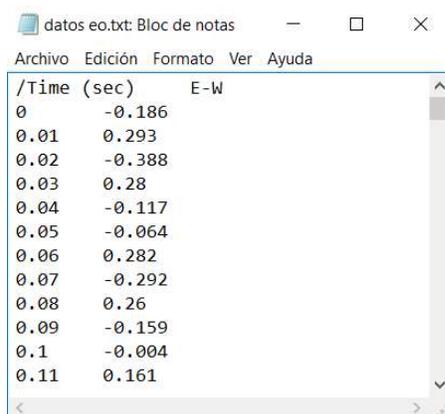


Fuente: Elaboración propia.

Para realizar la calibración de los registros antes mencionados se utilizó un programa especializado en este tipo de necesidades, llamado, SeismoMatch2018 en su versión de prueba de 30 días. El programa solicita 3 pasos, cargar y configurar el registro de tiempo aceleración, definir el espectro de respuesta al cual será calibrado el registro, y definir el rango del periodo al que será ajustado.

En el primer paso el cual es cargar el registro se creará un archivo de extensión .txt, el cual tendrá en la primera fila el tiempo y en la segunda fila la aceleración registrada, como se muestra en la figura 60.

Figura 60 Registro para el sentido Este-Oeste.

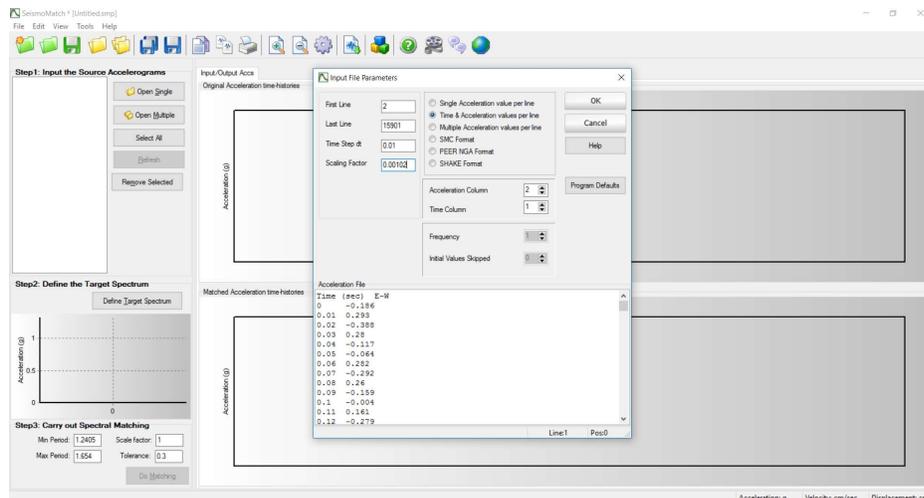


Time (sec)	E-W
0	-0.186
0.01	0.293
0.02	-0.388
0.03	0.28
0.04	-0.117
0.05	-0.064
0.06	0.282
0.07	-0.292
0.08	0.26
0.09	-0.159
0.1	-0.004
0.11	0.161

Fuente: Elaboración propia.

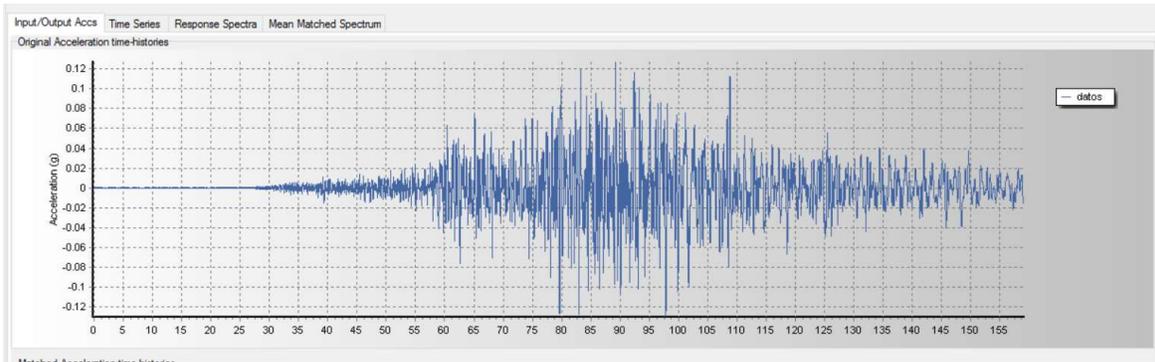
Este registro será cargado al programa, posteriormente se despliega una ventana para las configuraciones necesarias, automáticamente se detecta la cantidad de filas del archivo, en que fila inician los datos, los saltos de tiempo a cada 0.01, y se debe modificar la escala factor ya que el programa los requiere en unidades g y los registros se encuentran en  $\text{cm/s}^2$ , para encontrar este valor se debe dividir la unidad entre 980 para la conversión de  $\text{cm/s}^2$  a g,  $1/980=0.00102$ .

Figura 61 Programa SeismoMatch2018 configuración del registro a calibrar.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 62 **Registro cargado en el programa SeismoMatch2018.**



Fuente: Elaboración propia.

Para el segundo paso se debe crear un archivo de extensión .txt, con los valores de tiempo y aceleración para el espectro de respuesta del lugar de estudio. Como se muestra en la figura 63. En la primera columna aparecen los valores del tiempo y en la segunda los valores de aceleración.

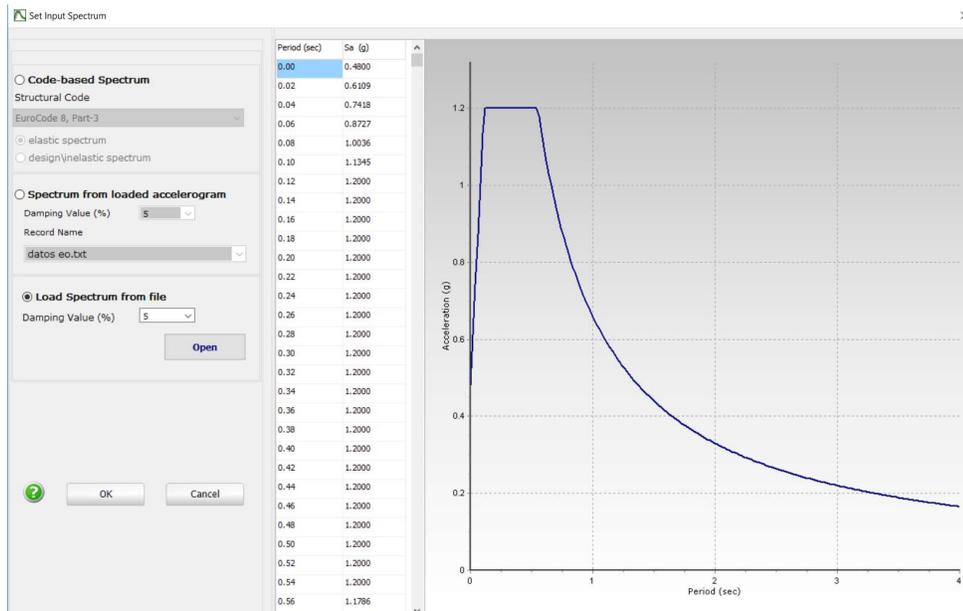
Figura 63 **Valores de tiempo y aceleración para el espectro de respuesta utilizado.**

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
0	0.4800			
0.01	0.5455			
0.02	0.6109			
0.03	0.6764			
0.04	0.7418			
0.05	0.8073			
0.06	0.8727			
0.07	0.9382			
0.08	1.0036			
0.09	1.0691			
0.1	1.1345			
0.11	1.2000			
0.12	1.2000			

Fuente: Elaboración propia.

El programa solicita el archivo anteriormente descrito al cual en escala factor se debe color un valor de 1 ya que este se encuentra en unidades g. al seleccionar este archivo el programa realiza una gráfica del espectro de respuesta como se muestra en la figura 64.

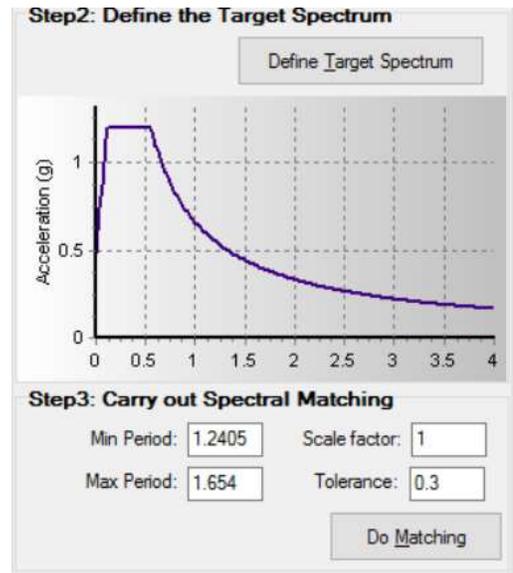
Figura 64 Espectro de respuesta cargado en el programa SeismoMatch2018.



Fuente: Elaboración propia.

Para el paso 3 se debe definir el periodo mínimo y máximo al cual será calibrado el registro, como se mencionó anteriormente el código ASCE 7-16 solicita que este rango esté entre  $1.5T$  a  $2.0T$ , el periodo fundamental de la estructura para el primer modo es de 0.827 seg, por lo tanto, los valores de  $1.5T$  y  $2.0T$  serán: 1.2405 y 1.654 respectivamente, los valores ya ingresados al programa se muestran en la figura 65.

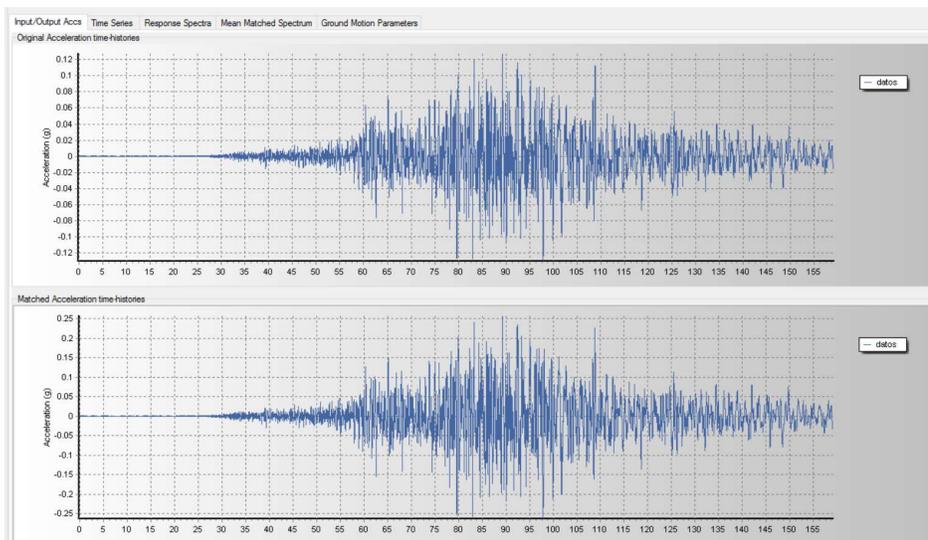
Figura 65 **Periodos mínimo y máximo de calibración.**



Fuente: Elaboración propia.

Al correr el análisis el programa muestra una gráfica con el registro original y el ya calibrado.

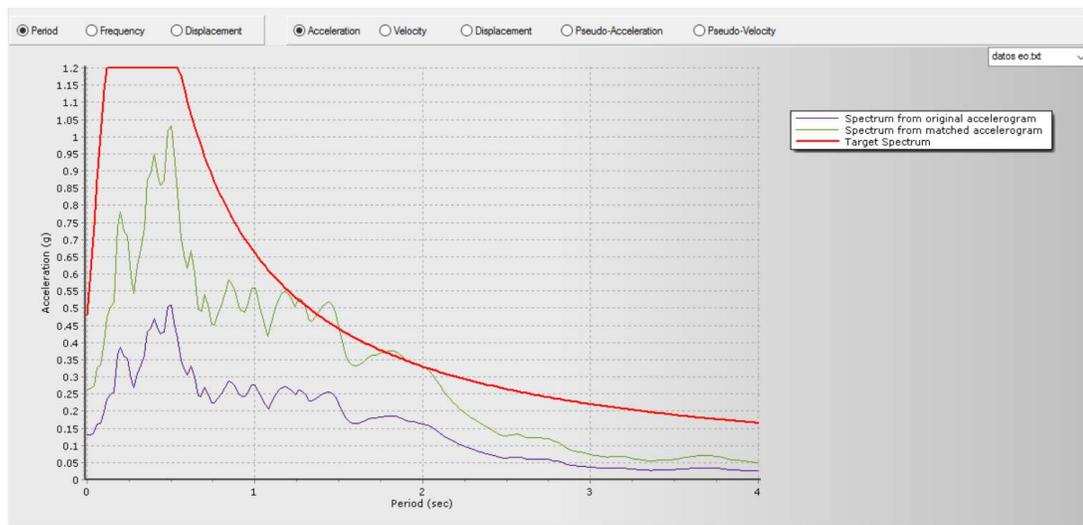
Figura 66 **Registro Original y registro calibrado.**



Fuente: Elaboración propia.

Para una mejor interpretación de los resultados el programa grafica el registro montado sobre el espectro, en la figura 67 se muestra en color rojo el espectro de respuesta, en color verde el registro calibrado y en color morado el registro original.

Figura 67 **Espectro de respuesta, registro original y registro calibrado.**



Fuente: Elaboración propia.

Por último, el programa muestra los valores en una tabla, de la cual se tomarán las columnas de tiempo y aceleración, que son los valores ya calibrados, los cuales serán utilizados para el análisis dinámico en ETABS.

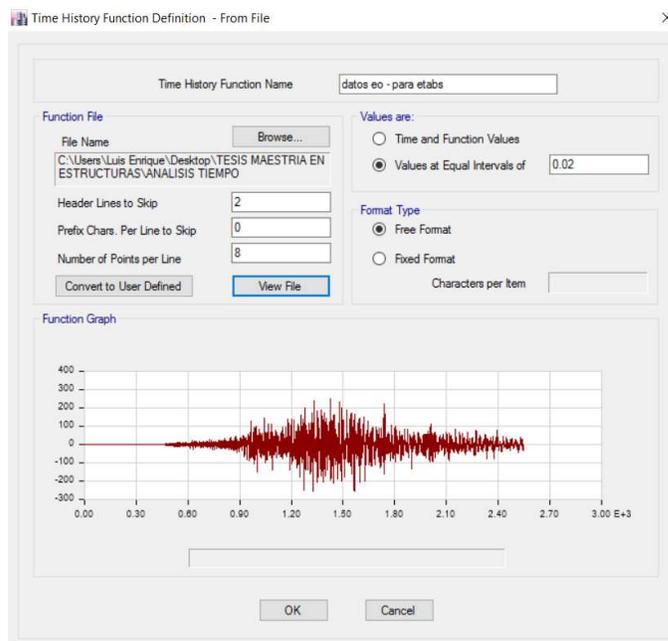
Figura 68 Tabla de registro original y registro calibrado.

Parameters from Original Accelerogram Spectrum						Parameters from Matched Accelerogram Spectrum					
Period (s)	Acc (g)	Vel (cm/sec)	Disp (cm)	Pseudo-Acc (g)	Pseudo-Vel (cm/	Period (s)	Acc (g)	Vel (cm/sec)	Disp (cm)	Pseudo-Acc (g)	Pseudo-Vel (cm/
0.00000	0.12953	0.00000	0.00000	0.12953	0.00000	0.00000	0.26180	0.00000	0.00000	0.26180	0.00000
0.02000	0.13114	0.05762	0.00130	0.13112	0.40944	0.02000	0.26505	0.11645	0.00263	0.26502	0.82755
0.04000	0.13565	0.21980	0.00539	0.13561	0.84694	0.04000	0.27418	0.44425	0.01090	0.27410	1.71182
0.06000	0.16129	0.44650	0.01441	0.16109	1.50908	0.06000	0.32599	0.90246	0.02913	0.32559	3.05012
0.08000	0.16479	1.08642	0.02616	0.16450	2.05465	0.08000	0.33307	2.19585	0.05288	0.33248	4.15283
0.10000	0.19819	2.04919	0.04911	0.19763	3.08557	0.10000	0.40059	4.14179	0.09926	0.39944	6.23649
0.12000	0.23384	2.88490	0.08343	0.23316	4.36833	0.12000	0.47263	5.83090	0.16863	0.47125	8.82919
0.14000	0.24857	3.98605	0.12065	0.24773	5.41491	0.14000	0.50241	8.05654	0.24386	0.50070	10.94452
0.16000	0.25498	5.41535	0.16156	0.25397	6.34448	0.16000	0.51535	10.94539	0.32654	0.51332	12.82334
0.18000	0.36534	8.79287	0.29307	0.36401	10.23012	0.18000	0.73842	17.77198	0.59235	0.73574	20.67693
0.20000	0.38646	11.41191	0.38259	0.38491	12.01931	0.20000	0.78111	23.06552	0.77328	0.77797	24.29320
0.22000	0.35929	10.64376	0.43044	0.35790	12.29343	0.22000	0.72620	21.51296	0.87000	0.72338	24.84724
0.24000	0.35091	12.82294	0.49944	0.34894	13.07528	0.24000	0.70926	25.91747	1.00946	0.70527	26.42750
0.26000	0.29455	11.84812	0.49193	0.29285	11.88808	0.26000	0.59534	23.94719	0.99428	0.59191	24.02795
0.28000	0.26868	10.68428	0.52213	0.26801	11.71649	0.28000	0.54305	21.59486	1.05531	0.54170	23.68114
0.30000	0.30825	9.94763	0.68743	0.30738	14.39749	0.30000	0.62302	20.10595	1.38942	0.62127	29.09993
0.32000	0.33273	12.40217	0.84383	0.33162	16.56848	0.32000	0.67252	25.06701	1.70553	0.67027	33.48789
0.34000	0.36223	16.61164	1.03637	0.36078	19.15198	0.34000	0.73213	33.57511	2.09468	0.72921	38.70961
0.36000	0.43076	20.77465	1.38182	0.42908	24.11734	0.36000	0.87065	41.98933	2.79291	0.86725	48.74550
0.38000	0.44148	23.16684	1.57802	0.43978	26.09204	0.38000	0.89232	46.82436	3.18946	0.88887	52.73672

Fuente: Elaboración propia.

El programa ETABS tiene herramientas para realizar el análisis dinámico tiempo historia, en la pestaña definir, funciones y tiempo historia, se pueden cargar los registros anteriormente calibrados por medio de la opción archivo de texto, como se muestra en la figura 69.

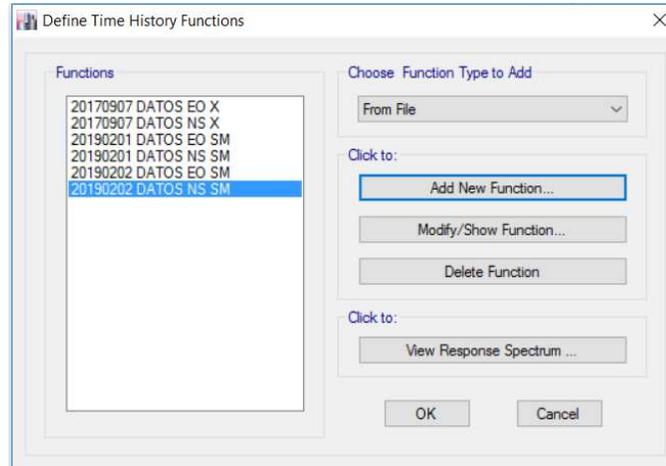
Figura 69 Análisis tiempo historia desde ETABS.



Fuente: Elaboración propia.

De esta forma se cargarán los archivos para los sentidos X y Y de cada registro, para tener en total 6 funciones tiempo historia en ETABS.

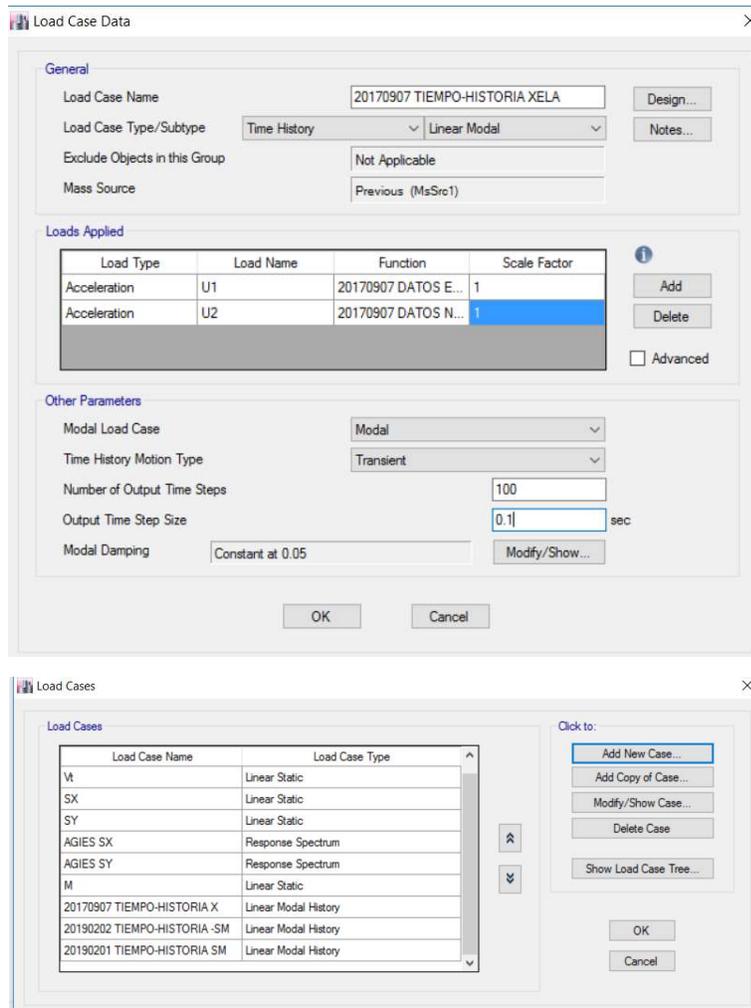
**Figura 70 Funciones tiempo historia.**



Fuente: Elaboración propia.

Estas funciones creadas se deben definir en los casos de carga, como se muestra en la figura 71.

Figura 71 **Definición de las funciones creadas en los casos de carga.**



Fuente: Elaboración propia.

Al correr el análisis se encontraron los desplazamientos máximos para cada nodo, para los 3 registros de tiempo historia, estos valores se tabularon para conocer las derivas de piso de la estructura.

**Tabla 14 Derivas obtenidas para el análisis tiempo historia.**

PRIMER NIVEL								
NODO	Desplazamiento en BASE (X)	Desplazamiento nivel 1 (X)	Desplazamiento en BASE (Y)	Desplazamiento nivel 1 (Y)	Deriva (X)	Deriva (Y)	Estado Deriva X	Estado Deriva Y
G-5	0	4.07	0	5.12	4.07	5.12	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
G-5'	0	4.07	0	4.81	4.07	4.81	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
G-7'	0	4.07	0	4.33	4.07	4.33	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
G-7'	0	4.07	0	3.93	4.07	3.93	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
G-8	0	4.07	0	3.63	4.07	3.63	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
G-10	0	4.07	0	3.34	4.07	3.34	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-5	0	4.19	0	4.99	4.19	4.99	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-5'	0	4.18	0	4.81	4.18	4.81	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-7	0	4.18	0	4.33	4.18	4.33	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-7'	0	4.18	0	3.93	4.18	3.93	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-8	0	4.18	0	3.63	4.18	3.63	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-10	0	4.18	0	3.34	4.18	3.34	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA

SEGUNDO NIVEL								
NODO	Desplazamiento nivel 1 (X)	Desplazamiento nivel 2 (X)	Desplazamiento nivel 1 (Y)	Desplazamiento nivel 2 (Y)	Deriva (X)	Deriva (Y)	Estado Deriva X	Estado Deriva Y
G-5	4.07	5.93	5.12	7.63	1.86	2.51	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
G-5'	4.07	5.93	4.81	7.23	1.86	2.42	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
G-7'	4.07	5.93	4.33	6.62	1.86	2.29	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
G-7'	4.07	5.93	3.93	6.11	1.86	2.18	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
G-8	4.07	5.93	3.63	5.73	1.86	2.1	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
G-10	4.07	5.93	3.34	5.36	1.86	2.02	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-5	4.19	6.1	4.99	7.55	1.91	2.56	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-5'	4.18	6.1	4.81	7.23	1.92	2.42	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-7	4.18	6.1	4.33	6.62	1.92	2.29	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-7'	4.18	6.1	3.93	6.11	1.92	2.18	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-8	4.18	6.1	3.63	5.73	1.92	2.1	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-10	4.18	6.1	3.34	5.36	1.92	2.02	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA

TERCER NIVEL								
NODO	Desplazamiento nivel 2 (X)	Desplazamiento nivel 3 (X)	Desplazamiento nivel 2 (Y)	Desplazamiento nivel 3 (Y)	Deriva (X)	Deriva (Y)	Estado Deriva X	Estado Deriva Y
G-5	5.93	7.83	7.63	10.22	1.9	2.59	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
G-5'	5.93	7.83	7.23	9.68	1.9	2.45	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
G-7'	5.93	7.83	6.62	8.83	1.9	2.21	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
G-7'	5.93	7.83	6.11	8.13	1.9	2.02	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
G-8	5.93	7.83	5.73	7.62	1.9	1.89	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
G-10	5.93	7.83	5.36	7.1	1.9	1.74	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-5	6.1	8.1	7.55	10.21	2	2.66	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-5'	6.1	8.09	7.23	9.68	1.99	2.45	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-7	6.1	8.09	6.62	8.83	1.99	2.21	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-7'	6.1	8.09	6.11	8.13	1.99	2.02	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-8	6.1	8.09	5.73	7.62	1.99	1.89	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-10	6.1	8.09	5.36	7.1	1.99	1.74	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA

CUARTO NIVEL								
NODO	Desplazamiento nivel 3 (X)	Desplazamiento nivel 4 (X)	Desplazamiento nivel 3 (Y)	Desplazamiento nivel 4 (Y)	Deriva (X)	Deriva (Y)	Estado Deriva X	Estado Deriva Y
G-5	7.83	10.05	10.22	14.72	2.22	4.5	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
G-5'	7.83	10.05	9.68	13.62	2.22	3.94	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
G-7'	7.83	10.05	8.83	11.92	2.22	3.09	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
G-7'	7.83	10.05	8.13	10.506	2.22	2.376	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
G-8	7.83	10.05	7.62	9.45	2.22	1.83	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
G-10	7.83	10.05	7.1	8.4	2.22	1.3	NO CHEQUEA	SI CHEQUEA
I-5	8.1	10.44	10.21	14.71	2.34	4.5	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-5'	8.09	10.45	9.68	13.62	2.36	3.94	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-7	8.09	10.45	8.83	11.92	2.36	3.09	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-7'	8.09	10.45	8.13	10.5	2.36	2.37	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-8	8.09	10.45	7.62	9.45	2.36	1.83	NO CHEQUEA	NO CHEQUEA
I-10	8.09	10.45	7.1	8.4	2.36	1.3	NO CHEQUEA	SI CHEQUEA

Fuente: Elaboración propia.

La deriva máxima que presenta el análisis es de 4.99 cm, que corresponde al nodo I-5 del primer nivel, este valor no chequea para los requerimientos de AGIES el cuál solicita un desplazamiento de 2.5 cm. La deriva máxima en el modelo sin disipadores de energía es de 7.43cm, con lo cual se observa que el sistema si adiciona amortiguamiento a la estructura. Ya que el análisis tiempo historia es dinámico y provee resultados más

exactos, con esto podemos visualizar que la adición de un sistema de disipadores de energía si aumenta el amortiguamiento efectivo de la estructura, pero tiene un límite, utilizando la metodología descrita en la sección 4.3 se calcula el amortiguamiento efectivo real a la que llega la estructura.

Se determina el valor de la relación entre la deriva máxima de la estructura, y la deriva que se obtuvo al adicionar el sistema de disipadores de energía.

$$B = \frac{\text{Deriva máxima}}{\text{Deriva objetivo}} = \frac{7.43 \text{ cm}}{4.99 \text{ cm}} = 1.49$$

Para calcular el amortiguamiento efectivo que debe tener la estructura para obtener la deriva objetivo, se utilizará la fórmula de Newmark.

$$B = \frac{2.31 - 0.41 \ln(5)}{2.31 - 0.41 \ln(B_{eff})}$$

Iterando valores para  $B_{eff}$ , para obtener un valor B de 1.49 obtener el amortiguamiento efectivo.

$$B_{eff} = 19\%$$

Para encontrar el valor del amortiguamiento viscoso, se debe restar del amortiguamiento efectivo, el valor de amortiguamiento de la estructura el cual es de 5%.

$$B_{visc} = B_{eff} - 5\% = 19\% - 5\% = 14\%$$

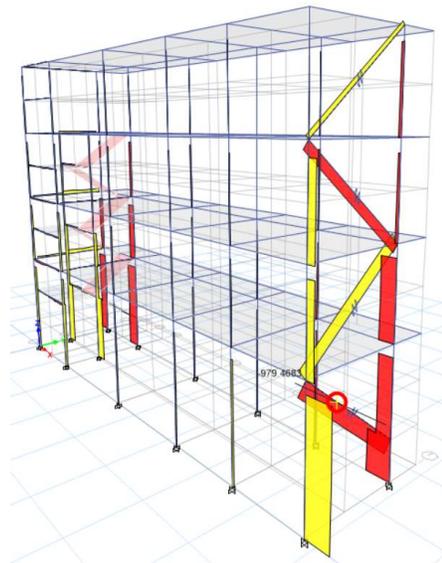
Para el análisis tiempo historia, el adicionar un sistema de disipadores de energía le aumentó a la estructura un amortiguamiento de 14%, para ampliar la mejoría del comportamiento de la estructura se puede mencionar que sin

este sistema el desplazamiento máximo en el cuarto nivel es de 20.84 cm, y al agregarle los disipadores de energía el desplazamiento máximo en el cuarto nivel en el mismo punto es de 14.72 cm.

#### 4.5 Elección del tipo de disipador según su capacidad axial.

En la figura 32 del capítulo 3, se presentan las propiedades de los disipadores de fluido viscoso, entre ella aparece una columna con los valores de la fuerza axial que soportan los dispositivos, los valores se presentan en kN, la fuerza axial máxima que deben de soportar se puede encontrar con facilidad en el modelo elaborado en ETABS, como se muestra en la figura 72.

Figura 72 Fuerza axial en los disipadores de energía.



Fuente: Elaboración propia.

El valor obtenido es de 979.46 kN, por lo que se elige un disipador con una resistencia axial de 1000 kN, el cual tiene un peso de 193 kg.



## 5. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO CONSTRUCTIVO

En el presente capítulo se describe el procedimiento constructivo para el reforzamiento de una estructura de concreto armado, instalando marcos metálicos que acoplan los disipadores de energía de fluido viscoso con la estructura, se muestran fotografías, tablas, normas, especificaciones y planos, utilizados en un reforzamiento ya realizado, en el cual se tuvo acceso durante toda la fase de construcción, por lo que todas las figuras y tablas mostradas son de elaboración propia.

### 5.1 Requerimientos previos.

Como información inicial a la construcción se debe de contar con:

**Memoria de cálculo:** En esta se describen las configuraciones utilizadas para cada marco, esfuerzos principales en cada pieza metálica, el amortiguamiento que tendrá la estructura y la reducción de sus derivas.

**Planos constructivos:** Los planos deben contener información suficiente para la elaboración de las piezas metálicas, ubicación en la estructura a reforzar, diámetros de pernos a utilizar para anclar las piezas metálicas a la estructura existente, distancias entre orejas en donde se colocarán los disipadores y espesores de las placas de metal.

**Especificaciones técnicas:** En estas especificaciones se menciona todo lo concerniente a las consideraciones que se deben de tomar durante el montaje, descripción de los materiales a utilizar como sus resistencias, marcas, y

duración, también se describen las recomendaciones en cuanto a la seguridad industrial del proceso constructivo.

## 5.2 Identificación del acero existente por medio de escáner.

Para unir la estructura metálica a la estructura de concreto a reforzar, se perforarán los elementos de concreto para instalarle pernos y por medio de estos fijar las piezas de acero.

Aunque se cuente con los planos constructivos de la estructura a reforzar, es recomendable realizar los trabajos de escaneo de cada elemento, para identificar la posición exacta de las varillas de refuerzo, como sus respectivos diámetros, y así evitar encontrar acero durante la perforación de la estructura.

Actualmente existe la tecnología para poder identificar el acero dentro de un elemento de concreto, una de las empresas que ofrece productos de detección es Hilti, el equipo más avanzado con el que cuentan hasta el momento es de la línea PS 1000 S-Scan system como se muestra en la figura 73, el cual se puede adquirir desde la página de internet [www.hilti.com](http://www.hilti.com).

Figura 73 **Equipo de detección Hilti PS 1000 S-Scan system**



Fuente: [www.hilti.com](http://www.hilti.com)

El equipo cuenta con un manual de usuario, aunque se puede solicitar la asesoría por parte del personal de la empresa, este equipo cuenta con cuatro rodos en su parte posterior, los cuales sirven para deslizar el escáner en la totalidad del elemento que se desea detectar como se muestra en la figura 74, por medio de una pantalla digital, la cual esta provista por una cuadrícula, este dispositivo muestra la ubicación de las varillas de acero, así como su diámetro aproximado.

**Figura 74 Utilización de equipo de escáner.**



Fuente: Elaboración propia.

Durante el escaneo, se van colocando marcas en los elementos de concreto, los cuales indican los centros de las varillas, posterior a esto se trazan según el ancho que indica el equipo, estos trazos pueden realizarse con pintura comercial como se muestra en la figura 75, preferiblemente de base de aceite para que no exista el riesgo de que se despinte al estar en contacto con el agua.

Figura 75 **Marcas de pintura en ubicación de refuerzo.**



Fuente: Elaboración propia.

Posterior a estos trabajos, se debe trazar la ubicación de las perforaciones en las cuales se instalarán los pernos de anclaje como se muestra en la figura 76, si existiera el inconveniente de que alguna de estas marcas coincide con el acero existente, se debe de analizar la opción de correr la perforación a un lugar libre de acero, respetando las distancias mínimas entre centros de agujeros, y entre centro de agujero y orilla de placa.

Figura 76 **Ubicación de perforaciones.**



Fuente: Elaboración propia.

### 5.3 Perforaciones para anclaje de estructura metálica a estructura de concreto existente.

Para realizar los trabajos de perforación en los elementos de concreto, puede utilizarse un equipo saca núcleos, dependiendo de los diámetros necesarios, la empresa hilti distribuye una amplia variedad de barrenos y saca núcleos, los diámetros de las perforaciones necesarios para este tipo de trabajo puede estar entre  $\frac{1}{2}$  pulgadas hasta 2 pulgadas, en la figura 77 se muestra el equipo hilti con una broca de  $1\frac{3}{4}$  de pulgada.

Figura 77 **Equipo Hilti para perforación.**



Fuente: Elaboración propia.

El equipo se fija al elemento de concreto por medio de una perforación de  $\frac{1}{2}$  pulgada, que se introduce aproximadamente 7 centímetros, en esta perforación se coloca un tarugo para luego montar el equipo y fijarlo con un tornillo como se muestra en la figura 78.

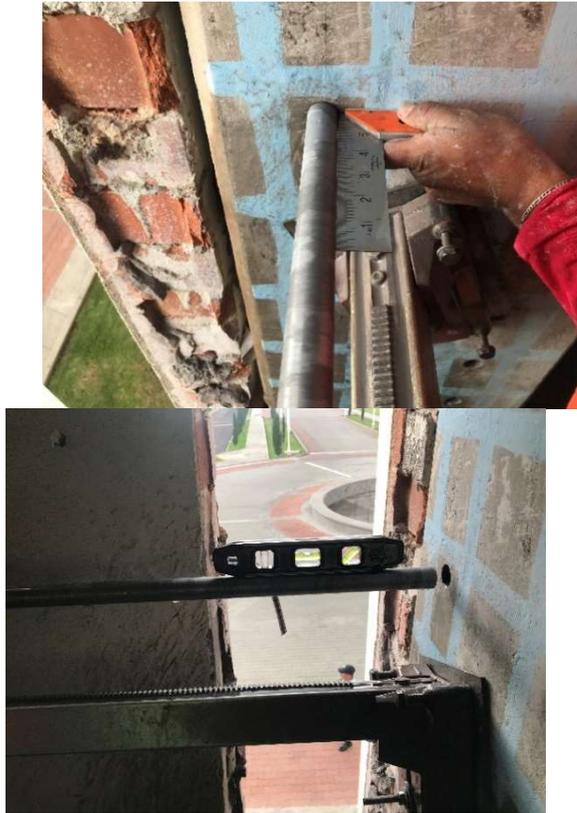
Figura 78 **Fijación del equipo en el elemento de concreto.**



Fuente: Elaboración propia

Antes de iniciar la perforación se debe revisar que la broca se tenga una correcta horizontalidad, utilizando un nivel de burbuja, y que ingrese al elemento formando 90 grados con la cara en donde se ha montado el equipo, como se muestra en la figura 79. El equipo cuenta con 4 tornillos en su base, que sirve para ajustar su posición.

Figura 79 Nivelación del equipo.



Fuente: Elaboración propia.

Durante la perforación el equipo debe ingresar a una velocidad constante, para garantizar la duración máxima de la broca y el equipo, esta velocidad es de aproximadamente 5 centímetros por minuto, además el perforador cuenta con un sistema de lubricación a base de agua, se conecta una manguera al equipo y este cuenta con una válvula para abrir y cerrar el paso de agua, y así permitirlo solamente durante el tiempo que el equipo se encuentra trabajando. En la figura 80 se muestra el equipo durante una perforación y se puede visualizar la manguera de agua.

Figura 80 **Equipo durante una perforación.**



Fuente: Elaboración propia.

Luego de realizar la perforaciones es recomendable colocar los pernos de anclaje durante las próximas 24 horas, ya que se le ha reducido la sección de concreto al elemento y esto puede inducir a la aparición de grietas, previo a colocar los pernos el agujero debe limpiarse y así garantizar que esté libre de polvo o de pasta del polvo de cemento que deja la perforación, de igual forma se debe limpiar los pernos eliminado impurezas u oxido, se puede realizar con una tela sintética y thinner, también utilizar un cepillo con cerdas de alambre.

El diámetro de los pernos es de 1/8 de pulgada menor que el agujero, esto es para que el epóxico de fijación cubra por completo el perno. El epóxico a utilizar debe estar descrito en las especificaciones técnicas del proyecto, y este debe tener una resistencia a la compresión no menor que la del elemento de concreto, se recomienda que esta resistencia no sea mucho mayor a la del elemento ya que esto puede crear zonas rígidas y durante un sismo puede crear esfuerzos no previstos. Para la aplicación del epóxico se coloca un tapón en la parte posterior del agujero se introduce la boquilla y se aplica el material, luego se introduce el perno a presión, hasta que el epóxico empieza a salir los lados del perno, se retira el tapón posterior, se introduce el perno hasta la

distancia deseada y luego se le colocan unos topes en las parte de abajo para que el perno se mantenga en el centro del agujero hasta que se haya cumplido el tiempo de secado.

**Figura 81 Aplicación de epóxico.**



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 82 Instalación de pernos en columna.**



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 83 Instalación de pernos en viga.**

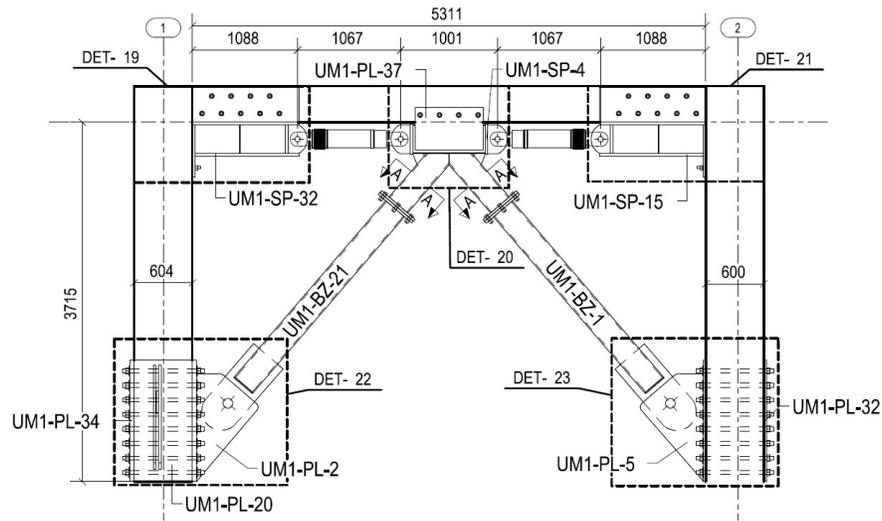


Fuente: Elaboración propia.

#### **5.4 Piezas metálicas requeridas según el tipo de configuración de los disipadores de energía.**

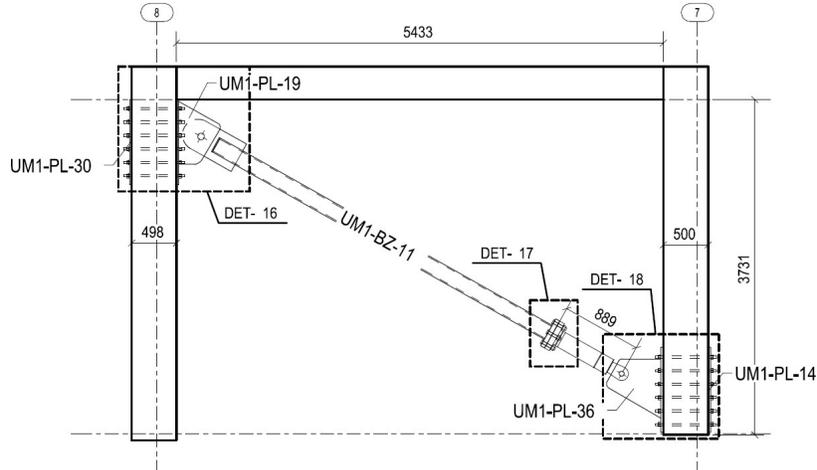
Los tipos de configuración anteriormente descritos, son chevron y diagonal, a continuación, se presentan una ilustración de un plano constructivo para cada tipo de marco.

Figura 84 **Plano constructivo configuración tipo Chevron.**



Fuente: Elaboración propia.

Figura 85 **Plano constructivo configuración tipo Diagonal.**



Fuente: Elaboración propia.

Para la explicación del montaje de las piezas metálicas, se tomará el marco en el que se construirá una configuración tipo Chevron, antes de iniciar el montaje se deben de perforar las piezas de acero, las perforaciones se realizan en la obra para poder realizar una plantilla de la ubicación de los

pernos, y así perforar en base a esa muestra, sería muy complicado perforar las piezas en fabrica y pretender que los pernos se encuentran ubicados como se muestra los planos, alguna pequeña desviación puede provocar que las platinas no concuerden con los agujeros, y tener dificultades con el montaje, en algunas ocasiones es permitido enderezar los pernos en frio, a modo de corregir alguna desviación. La plantilla puede ser de madera y tener un espesor similar a las placas a instalar, en ella se realizarán las perforaciones para hacer las pruebas en el elemento de concreto, como se muestra en la figura 86.

**Figura 86 Prueba de montaje de una platilla de madera.**



Fuente: Elaboración propia.

Al comprobar que la plantilla concuerda con los pernos y no existe ningún problema en el montaje, se puede proceder a trazar la plantilla en la pieza metálica, para la perforación en el acero, se utilizar un equipo con una broca llamada comúnmente como fresa.

Figura 87 **Equipo de perforación para platinas metálicas.**



Fuente: Elaboración propia.

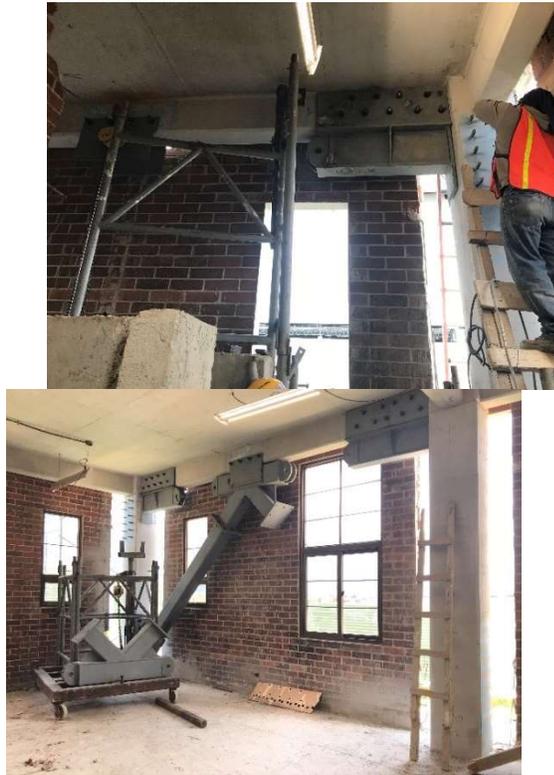
Figura 88 **Pieza perforada.**



Fuente: Elaboración propia.

Para el montaje de las piezas, se debe de contar con un control de seguridad industrial apropiado, ya que estas pueden tener pesos entre 500 a 2,000 libras, se debe contar con equipo para carga como polipastos y pallets truck.

Figura 89 **Montaje de piezas metálicas.**



Fuente: Elaboración propia.

Figura 90 Marco tipo Chevron.



Fuente: Elaboración propia.

Para la soldadura de las placas se deben revisar las especificaciones técnicas para comprobar que se están utilizando tanto materiales como equipo adecuado. Previo a iniciar se debe precalentar el electrodo al menos durante 10 minutos, teniendo claro el tipo de soldadura a utilizar, se deben de revisar las dimensiones y el tipo de cordón, al finalizar cada cordón se debe de limpiar la soldadura para evitar que el carbón quede embebido por la soldadura, como se muestra en la figura 91.

Figura 91 **Pre calentamiento de electrodos y limpieza de soldadura.**



Fuente: Elaboración propia.

Al finalizar el montaje de las piezas metálicas, previo a instalar los disipadores de energía, se deben de llenar los espacios vacíos entre placas metálicas y elementos de concreto, para este trabajo se puede utilizar un grout con una resistencia igual o mayor a la del concreto utilizados en la viga o columna, se debe revisar en las especificaciones del fabricante las proporciones de material a utilizar, al igual que la forma de aplicación.

Para la instalación de los disipadores de energía, previo al traslado y montaje se deben proteger para evitar rayones o golpes, como se muestra en la figura 78. Describiendo un ejemplo en la forma de montaje, se puede armar una torre de andamios con la altura necesaria, colocar dos polipastos para subir el disipador sosteniéndolo desde sus dos extremos, como se muestra en la figura 93.

**Figura 92 Protección de un dissipador de energía.**



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 93 Montaje de un dissipador de energía.**



Fuente: Elaboración propia.

El dissipador se debe unir a las orejas de las piezas metálicas mediante un pasador, este es fabricado por la empresa que provee los dissipadores, dependiendo del modelo puede tener un diámetro de 2 pulgadas, antes de colocarlo se debe engrasar para facilitar su instalación, como se muestra en la figura 94. Al tener colocado el pasador se debe fijar mediante 2 argollas, para evitar que durante el movimiento el pasador salga del eje de los agujeros.

Figura 94 **Engrasado de un pasador.**



Fuente: Elaboración propia.

Figura 95 **Colocación de una argolla de seguridad.**



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 96 Disipadores en configuración Chevron.**



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 97 Disipador en configuración Diagonal.**



Fuente: Elaboración propia.



## CONCLUSIONES

Los disipadores de energía mejoran el comportamiento de la estructura ante la afectación de un sismo, disminuyen las derivas y los efectos de torsión.

Los resultados del análisis modal muestran que al adicionarle disipadores de energía a la estructura se pueden reducir las derivas hasta las máximas permitidas por las normas AGIES, con el análisis dinámico no se logran disminuir los desplazamientos hasta el punto deseado.

La metodología descrita se puede replicar en edificios de concreto armado, cuando se requiere analizar el comportamiento al adicionarle disipadores de energía.

Las derivas del edificio si disipadores de energía no cumplen con los límites establecidos en las normas AGIES 3-10, sin embargo, en los nodos cercanos al módulo de gradas estas derivas si cumplen, debido a la rigidez que aporta la estructura de las gradas.

Las derivas máximas de piso no chequean en algunos nodos en el sentido Y, esto se debe a la forma rectangular que el edificio presenta en planta.

La deriva objetivo se fijó con un valor de 2.5 cm, según las solicitudes de las normas AGIES 3-10. Al realizar el análisis modal de la estructura con disipadores de energía, introduciendo las propiedades calculadas para los disipadores, dio como resultado una deriva de 2.45 cm, el cual es bastante cercano a la deriva objetivo, por lo cual los métodos y cálculos utilizados son satisfactorios.

La deriva máxima para la estructura construida es de 7.43 cm, y al realizar el análisis dinámico tiempo historia, la deriva máxima es de 4.99 cm,

es decir, que el desplazamiento disminuye un 32.83%, lo cual es más acertado, según el comportamiento que se espera para este tipo de refuerzos.

De acuerdo con los modelos realizados, se pudo observar que se requería agregar amortiguamiento solamente en el eje más alejado al módulo de gradas, dado que las normas solicitaban colocar los disipadores manteniendo una simetría en planta por cada nivel.

La correcta colocación de los disipadores de energía, no solamente puede disminuir los desplazamientos laterales, sino también reduce los efectos de torsión debido a la excentricidad en la estructura.

Con la adición de un sistema de disipación de energía a una estructura de concreto armado existente, los resultados del análisis modal muestran que se pueden disminuir las derivas hasta el punto deseado.

Al incluir elementos link en la estructura el programa ETABS reconoce que la estructura cuenta con un amortiguamiento mayor al 5%, lo cual disminuye las derivas laterales, esto es equivalente a disminuir el espectro de respuesta al porcentaje del amortiguamiento efectivo calculado.

## RECOMENDACIONES

Utilizar la metodología propuesta para el diseño del reforzamiento de estructuras de concreto armado, con sistema estructural de marcos de concreto, para cualquier dimensión en planta y elevación.

Para la propuesta de la estructura metálica a utilizar, se debe realizar un diseño más preciso al mostrado en el presente documento, en el capítulo 4 se realiza un chequeo de la capacidad de la breiza, pero también se deben chequear las placas que van en las columnas.

Los procedimientos descritos en el capítulo 5 para la construcción de estos refuerzos, se pueden modificar, debido a que cada estructura puede contar con distintas características, con lo cual, según el criterio de los profesionales responsables, con lo cual se pueden utilizar distintos procedimientos para la obtención de los mismos resultados.

Utilizar la configuración diagonal para el refuerzo en una estructura con pocos ejes en cada sentido. Para estructuras de mayor tamaño, se recomienda utilizar la configuración chevron, ya que esta tiene un mejor comportamiento para disminuir las derivas laterales.

Se recomienda usar la configuración de un disipador lineal, para el modelado del disipador de energía con la herramienta Link, ya que sus resultados son similares a los disipadores no lineales, pero muestran valores más conservadores.



## BIBLIOGRAFÍA

- AISC. (2010). *Specification Structural Steel Buildings*. Chicago, Illinois.
- ASCE. (2016). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. Reston, Virginia.
- David, J. C. (2016). *Diseño de disipadores de energía metálicos para una edificación de baja altura de concreto armado*. Lima, Perú.
- Díaz, L. J. (2012). *Protección de una edificación existente con disipadores de energía*. Lima, Perú.
- Diaz, M. J. (2002). *Criterios de diseño de puentes con aisladores y disipadores de energía*. Barcelona.
- Duran, F. (2015). *Implementacion de aisladores sismicos y disipadores de energia en Puentes de Japón*. Lima.
- Farfán, D. F. (2016). *Modelo didáctico de una estructura utilizando disipadores de energía de fluido viscoso*. Bogotá.
- Galindo, C. M. (2013). *Beneficios y Ventajas de los sistemas de proteccion sismica*. San José.
- Garcia, N. P. (2007). *Comportamiento dinámico de puentes en arco con amortiguadores viscosos*. Bogotá.
- Gonzales, J. V. (2011). *Evaluación experimental de la capacidad de aislamiento de los dispositivos de apoyo de un puente vehicular*. Toluca.
- Gutiérrez, C. E. (2015). *Evaluación del comportamiento sismorresistente de una estructura con disipadores de energía, ubicados en diversas prosiciones y con distintas configuraciones*. Caracas, Venezuela.
- Leocadio, R. P. (2012). *Uso de aisladores de base en puentes de concreto simplemente apoyados*. Bogotá.
- López, E. E. (2013). *Aislación sísmica del edificio bloque de hospitalización D (análisis comparativos de comportamiento y costos con un edificio tradicional)*. Quito, Ecuador.
- Martínez, Á. J. (2015). *Comportamiento de un dispositivo disipador de energía por extrusión de plomo en edificaciones de concreto armado y acero*. Caracas, Venezuela.
- Mena, M. H. (2018). *Desempeño sísmico en edificaciones con aisladores elastoméricos y amortiguadores de fluido viscoso*. Piura.
- Oviedo, J. A. (2009). *Disipadores histeréticos metálicos como técnica de control de respuesta sísmica en edificaciones colombianas*. Medellín, Colombia.
- Parra, M. V. (2010). *Análisis de aisladores sísmicos elastoméricos construidos en el Ecuador*. Sangolquí.

- Patiño, J. C. (2007). *Dispositivos de control de respuesta sísmica para estructuras de concreto*. Medellín.
- Pérez, J. J. (2012). *Comportamiento de estructuras ante acciones sísmicas utilizando amortiguadores viscosos como sistemas de disipación pasiva de energía*. Mexico DF.
- Porres, R. C. (2008). *Optimización del acondicionamiento sísmico en puentes mediante el aislamiento en la base del tablero*. Madrid.
- Reyes, J. C. (2008). *Modelación inelástico de edificios de concreto con disipadores de energía histeréticos*. Perú.
- Rodas, P. T. (2011). *Estudio de los disipadores de energía en el diseño sísmoresistente*. Cuenca, Ecuador.
- Sadowski, J. C. (2015). *Análisis sísmico de una edificación con disipadores de fluido viscoso*. Lima, Perú.
- Vargas, E. G. (2003). *Comportamiento dinámico de los edificios provistos con dispositivos disipadores de energía*. Mexico.
- Vargas, E. G. (2003). *Comportamiento dinámico de los edificios provistos con dispositivos disipadores de energía*. Nuevo León, Mexico.
- Vázquez, R. L. (2014). *Rehabilitación estructural de un edificio de 16 niveles mediante disipadores de energía viscosos no lineales*. Puerto Vallarta, Jalisco, Mexico.
- Verdugo, J. P. (2007). *Control de la respuesta dinámica de estructuras mediante el uso de disipadores de energía de fluido viscoso del tipo lineal*. Valdivia.
- Zellat, K. (2015). *Influencia del sistema de aislación sísmica en la respuesta de los puentes*. Algeria.