

**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL**



**TESIS**

**“Análisis sísmico comparativo entre modelos tipo corte de marcos planos de varios grados de libertad en suelos S0, S1, S2 y S3 con y sin disipadores de energía visco-elásticos”**

**PARA OPTAR:**

**TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL**

**PRESENTADO POR:**

Bach. Jorge Junior Atau Cama

Bach. Kevinc Yosep Valdivia Berrios


TACNA – PERÚ

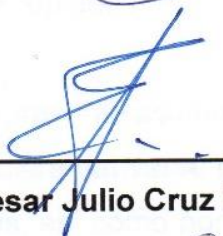
2018

**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL**

**Tesis de investigación**  
**“Análisis sísmico comparativo entre modelos tipo corte de marcos planos de varios grados de libertad en suelos tipo S0, S1, S2 y S3 con y sin disipadores de energía visco-elásticos”**

Tesis sustentada y aprobada el 21 de junio; estando el jurado calificador integrado por:

**PRESIDENTE:**   
\_\_\_\_\_  
**Mtro. Wilber Percy Mendoza Ramírez**

**SECRETARIO:**   
\_\_\_\_\_  
**Ing. Cesar Julio Cruz Espinoza**

**VOCAL:**   
\_\_\_\_\_  
**Mtro. Edgar Hipólito Chaparro Quispe**

## DECLARACION DE ORIGINALIDAD

Yo Kevinc Yosep Valdivia Berrios, en calidad de: Bachiller de la Escuela Profesional de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Privada de Tacna, identificado (a) con DNI 72969824

Declaro bajo juramento que:

1. Soy autor (a) de la tesis titulada:

“Análisis sísmico comparativo entre modelos tipo corte de marcos planos de varios grados de libertad en suelos tipo S0, S1, S2 y S3 con y sin disipadores de energía visco-elásticos.”

La misma que presento para optar:

El título profesional de Ingeniero Civil.

2. La tesis no ha sido plagiada ni total ni parcialmente, para la cual se han respetado las normas internacionales de citas y referencias para las fuentes consultadas.

3. La tesis presentada no atenta contra derechos de terceros.

4. La tesis no ha sido publicada ni presentada anteriormente para obtener algún grado académico previo o título profesional.

5. Los datos presentados en los resultados son reales, no han sido falsificados, ni duplicados, ni copiados.

Por lo expuesto, mediante la presente asumo frente a LA UNIVERSIDAD cualquier responsabilidad que pudiera derivarse por la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la tesis, así como por los derechos sobre la obra y/o invención presentada. En consecuencia, me hago responsable frente a LA UNIVERSIDAD y a terceros, de cualquier daño que pudiera ocasionar, por el incumplimiento de lo declarado o que pudiera encontrar como causa del trabajo presentado, asumiendo todas las cargas pecuniarias que pudieran derivarse de ello en favor de terceros con motivo de acciones, reclamaciones o conflictos derivados del incumplimiento de lo declarado o las que encontrasen causa en el contenido de la tesis, libro y/o invento.

De identificarse fraude, piratería, plagio, falsificación o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente; asumo las consecuencias y sanciones que de mi acción se deriven, sometiéndome a la normatividad vigente de la Universidad Privada de Tacna.

Tacna, 28 de mayo del 2018

Firma: 

Nombres y apellidos: Kevin Yosep Valdivia Berrios

DNI: 72969824

## DECLARACION DE ORIGINALIDAD

Yo Jorge Junior Atau Cama, en calidad de: Bachiller de la Escuela Profesional de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Privada de Tacna, identificado (a) con DNI 71258111

Declaro bajo juramento que:

1. Soy autor (a) de la tesis titulada:

“Análisis sísmico comparativo entre modelos tipo corte de marcos planos de varios grados de libertad en suelos tipo S0, S1, S2 y S3 con y sin disipadores de energía visco-elásticos.”

La misma que presento para optar:

El título profesional de Ingeniero Civil.

2. La tesis no ha sido plagiada ni total ni parcialmente, para la cual se han respetado las normas internacionales de citas y referencias para las fuentes consultadas.

3. La tesis presentada no atenta contra derechos de terceros.

4. La tesis no ha sido publicada ni presentada anteriormente para obtener algún grado académico previo o título profesional.

5. Los datos presentados en los resultados son reales, no han sido falsificados, ni duplicados, ni copiados.

Por lo expuesto, mediante la presente asumo frente a LA UNIVERSIDAD cualquier responsabilidad que pudiera derivarse por la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la tesis, así como por los derechos sobre la obra y/o invención presentada. En consecuencia, me hago responsable frente a LA UNIVERSIDAD y a terceros, de cualquier daño que pudiera ocasionar, por el incumplimiento de lo declarado o que pudiera encontrar como causa del trabajo presentado, asumiendo todas las cargas pecuniarias que pudieran derivarse de ello en favor de terceros con motivo de acciones, reclamaciones o conflictos derivados del incumplimiento de lo declarado o las que encontrasen causa en el contenido de la tesis, libro y/o invento.

De identificarse fraude, piratería, plagio, falsificación o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente; asumo las consecuencias y sanciones que de mi acción se deriven, sometiéndome a la normatividad vigente de la Universidad Privada de Tacna.

Tacna, 28 de mayo del 2018

Firma:



Nombres y apellidos: Jorge Junior Atau Cama

DNI: 71258111

## **DEDICATORIA**

A quienes son mi inspiración y ejemplo de humildad, honradez y amor, mis padres “Ricardo y Tihany” que siempre creyeron en mí y me acompañaron en este largo proceso que parecía inacabable.

A mis hermanos “Johao y Abram”, por su paciencia y compañía. A todos ellos les dedico esta Tesis.

**Kevinc Valdivia B.**

## **DEDICATORIA**

Dedicado a mis padres Jorge y Bertha a quienes amo ya que son los pilares fundamentales de mi formación académica y familiar, como también para mis padrinos Juan Carlos y Nelly en los cuales siempre tuve su respaldo y apoyo incondicional.

**Jorge Atau C.**



## **AGRADECIMIENTOS**

Un agradecimiento especial a nuestro asesor Ing. José Acero, por su apoyo, preocupación y paciencia a lo largo del desarrollo de esta tesis.

Así mismo un agradecimiento a los: Ing. Genner Villarreal Castro (Perú), Ing Luis Bozzo Rotondo (Perú), Ing. Roberto Aguiar Falconi (Ecuador), Ing. Rubén Boroschek (Chile), los cuales comparten desinteresadamente su material académico por internet.

Finalmente, gracias al Ing. José Velásquez por aconsejarnos y guiarnos de forma desinteresada.

## INDICE GENERAL

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>2</b>
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>2</b>
1.1    DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	2
1.2.    FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.3.    JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	3
1.4.    OBJETIVOS .....	3
1.4.1.    Objetivo general .....	3
1.4.2.    Objetivos Específicos .....	3
1.5.    HIPÓTESIS .....	4
1.5.1.    Hipótesis general.....	4
1.5.2.    Hipótesis específicas.....	4
<b>CAPITULO II.....</b>	<b>5</b>
<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>5</b>
2.1.    ANTECEDENTES DEL ESTUDIO .....	5
2.2.    BASES TEÓRICAS.....	5
2.2.1.    Análisis sísmico moderno .....	6
2.2.2.    Principales parámetros de los terremotos.....	7
a)    Sismicidad .....	7
b)    Ondas sísmicas.....	8
c)    Sismogramas .....	9
d)    Magnitud.....	10
e)    Intensidad.....	10
f)    Peligrosidad sísmica.....	11
g)    Sismicidad en el Perú .....	12
2.2.3.    Diseño sismorresistente tradicional .....	13
2.2.4.    Técnicas avanzadas de diseño sismorresistente.....	15
a)    Sistemas pasivos.....	15
2.2.5.    Estructuras con disipadores de energía.....	15
a)    Disipadores de tipo histeréticos o metálicos .....	18
b)    Disipadores tipo friccionantes .....	22
c)    Disipadores de tipo fluido viscoso.....	24
d)    Disipadores de tipo visco-elásticos .....	27
2.2.6.    Proveedores .....	29

2.2.7.	Disposición de los sistemas de disipación pasivos .....	30
a)	Configuración Diagonal .....	31
2.2.8.	Dinámica estructural.....	32
a)	Sistemas de 1 grado de libertad amortiguados .....	32
b)	Comportamiento dinámico de las estructuras .....	33
c)	FI (Fuerza de Inercia) .....	34
d)	FD (Fuerza de Amortiguamiento) .....	34
e)	FS (Fuerza Elástica).....	34
f)	Sistemas de 1 grado de libertad amortiguados en vibración libre .....	35
2.2.9.	Energía disipada por amortiguamiento viscoso .....	38
2.2.10.	Amortiguamiento y curvas de histéresis .....	41
2.2.11.	Sistemas de varios grados de libertad.....	41
a)	Frecuencias y modos de vibración naturales .....	41
b)	Ortogonalidad de modos .....	42
2.2.12.	Amortiguamiento en estructuras .....	43
a)	Origen de las fuerzas de amortiguamiento .....	43
b)	Matriz de amortiguamiento clásico.....	44
c)	Amortiguamiento proporcional de Rayleigh .....	44
d)	Amortiguamiento proporcional de Penzien – Wilson .....	45
e)	Matriz de amortiguamiento no clásico.....	46
f)	Matriz de amortiguamiento para el caso plano .....	49
2.2.13.	Modelo de marco tipo corte.....	50
2.2.14.	Comportamiento dinámico de un disipador visco-elástico .....	51
a)	Visco-elasticidad.....	53
b)	Comportamiento de un material visco-elástico sujeto a una fuerza sinusoidal .....	53
c)	Ecuaciones del disipador visco-elástico.....	55
d)	Características del módulo de almacenamiento por cortante ( $G'$ ) y módulo de pérdida por cortante ( $G''$ ).....	56
e)	Interacción de los disipadores en un marco plano de 1gdl.....	57
f)	Respuesta sísmica de un sistema de 1 grado de libertad amortiguado con disipadores visco-elásticos.....	58
2.2.15.	Análisis dinámico modal espectral con disipadores de energía .....	59
2.2.16.	Sistemas con valores característicos de valor real .....	60
a)	Vibración libre.....	60
b)	Expansión modal .....	61

c)	Ecuaciones modales .....	61
d)	Respuestas modales .....	62
e)	Respuesta total.....	63
f)	Respuestas modales máximas .....	63
g)	Reglas de combinación modal.....	63
2.2.17.	Análisis dinámico modal espectral con disipadores de energía .....	64
2.2.18.	Balance energético .....	65
2.2.19.	Análisis sísmico .....	65
a)	Aspectos generales .....	65
2.2.20.	Parámetros sísmicos.....	66
a)	Espectro de Diseño E-030 .....	66
a.1)	Factor de zona "Z" .....	66
a.2)	Factor de uso "U" .....	66
a.3)	Condiciones geotécnicas "S" .....	67
a.4)	Factor "C" .....	67
a.5)	Coefficiente básico de reducción " <b>R<sub>0</sub></b> " .....	68
b)	Procedimientos de análisis .....	69
2.2.21.	Normativas y requerimientos.....	70
a)	Evolución de la normativa.....	70
2.2.22.	Especificaciones del ASCE 7-10 .....	70
2.2.23.	Método de superposición modal.....	71
2.2.24.	Amortiguamiento no clásico en el ETABS .....	71
2.2.25.	Análisis de respuesta espectral.....	72
a)	Reducción de la respuesta, coeficiente "B" .....	73
b)	Modificación del espectro de respuestas .....	73
c)	Amortiguamiento objetivo .....	76
2.2.26.	Definición de los objetivos de diseño .....	76
a)	Deriva objetivo.....	76
b)	Niveles de amenaza sísmica. ....	78
c)	Niveles de desempeño. ....	79
d)	Importancia de la edificación .....	80
e)	Objetivos múltiples de desempeño .....	80
f)	Deriva y daño estructural.....	82
2.2.27.	Metodología de diseño de los disipadores visco-elásticos .....	83
a)	Colocación de los dispositivos.....	83
b)	Distribución horizontal del sistema disipativo .....	84

c)	Distribución vertical del sistema disipativo .....	84
d)	Disposición diagonal.....	85
e)	Propiedades de los disipadores.....	85
e.1)	Coeficiente de Amortiguamiento (C) .....	85
e.2)	Rigidez equivalente.....	86
2.2.28.	Resumen de metodología general .....	88
2.3.	DEFINICIÓN DE TÉRMINOS.....	88
<b>CAPITULO III:</b>	.....	<b>90</b>
<b>MARCO METODOLÓGICO</b>	.....	<b>90</b>
3.1	TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	90
a)	Tipo de investigación .....	90
b)	Diseño de investigación .....	90
3.2	POBLACIÓN Y/O MUESTRA DE ESTUDIO .....	90
3.3	OPERACIONALIZACION DE VARIABLES .....	90
3.4	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS .....	91
3.5	PROCESAMIENTO Y ANALISIS DE DATOS .....	91
<b>CAPITULO IV</b>	.....	<b>92</b>
<b>RESULTADOS</b>	.....	<b>92</b>
4.1.	MARCOS PLANOS DE 2 GRADOS DE LIBERTAD.....	92
4.1.1.	Cálculo manual en suelo tipo s0 .....	92
4.1.2.	Cálculo mediante ETABS en suelo tipo s0.....	98
4.1.3.	Cálculo mediante ETABS en suelo tipo s1 .....	99
4.1.4.	Cálculo mediante ETABS en suelo tipo s1 con disipadores .....	107
4.1.5.	Cálculo mediante ETABS para un suelo tipo s2.....	112
4.1.6.	Cálculo mediante ETABS en suelo tipo s2 con disipadores .....	115
4.1.7.	Cálculo mediante ETABS para un suelo tipo s3.....	119
4.2.	MARCOS PLANOS DE 3 GRADOS DE LIBERTAD.....	121
4.2.1.	Cálculo mediante ETABS en suelo tipo S0 .....	121
4.2.2.	Cálculo mediante ETABS en suelo tipo s1 .....	121
4.2.3.	Cálculo mediante ETABS en suelo tipo s1 con disipadores .....	123
4.2.4.	Cálculo mediante ETABS en suelo tipo s2.....	127
4.2.5.	Cálculo mediante ETABS en suelo tipo s2 con disipadores .....	128
4.3.	MARCOS PLANOS DE 4 GRADOS DE LIBERTAD.....	133
4.3.1.	Cálculo mediante ETABS en suelo tipo s0.....	133
4.3.2.	Cálculo mediante ETABS en suelo tipo s1 .....	134

4.3.3. Cálculo mediante ETABS en suelo tipo s1 con disipadores .....	139
<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>144</b>
<b>DISCUSIÓN.....</b>	<b>144</b>
CONCLUSIONES .....	145
RECOMENDACIONES.....	148
REFERENCAS BIBLIOGRÁFICAS .....	149
ANEXOS.....	151

## INDICE DE TABLAS

<b>TABLA 2.1:</b> Relación para describir un sismo.....	10
<b>TABLA 2.2:</b> Relación aproximada entre la intensidad de Mercalli modificada y la aceleración pico (máxima) del suelo (peak ground acceleration).....	11
<b>TABLA 2.3:</b> Cuadro de sismos más notables del Perú.....	12
<b>TABLA 2.4:</b> Clasificación de las técnicas de control de respuesta sísmica.....	18
<b>TABLA 2.5:</b> Tipos de disipadores pasivos de energía.....	32
<b>TABLA 2.6:</b> Respuestas estáticas modales.....	62
<b>TABLA 2.7:</b> Valores de “U” para cada categoría de edificación.....	67
<b>TABLA 2.8:</b> Valores de “S” para cada tipo de suelo y valor de “z”.....	67
<b>TABLA 2.9:</b> Periodos “tp” y “tl” para cada perfil de suelo.....	68
<b>TABLA 2.10:</b> Factores de reducción “R” según el tipo de estructura.....	68
<b>TABLA 2.11:</b> Derivas según el tipo de material.....	69
<b>TABLA 2.12</b> Coeficiente de amortiguamiento, $b_{v+1}$ , $B_{1d}$ , $B_r$ , $B_{1m}$ , $B_{md}$ , $B_{mm}$ , (donde el periodo de la estructura $\geq t_0$ ).....	74
<b>TABLA 2.13:</b> Clasificación según tipo de estructura.....	77
<b>TABLA 2.14:</b> Relación de estado de daño-deriva según tipo de estructura.....	78
<b>TABLA 2.15:</b> Niveles de amenaza sísmica según niveles de SEAOC .....	79
<b>TABLA 2.16:</b> Niveles de desempeño según la propuesta del SEAOC .....	79
<b>TABLA 2.17:</b> Matriz de desempeño.....	81
<b>TABLA 2.18:</b> Desempeño esperado para edificios comunes en la costa peruana....	82
<b>TABLA 3.1:</b> Operacionalización de variables.....	90
<b>TABLA 3.2:</b> Ejemplo de tabla para comparación de resultados.....	91
<b>TABLA 4.1:</b> Resultados obtenidos del ETABS v.16.....	98
<b>TABLA 4.2:</b> Resultados obtenidos del ETABS v.16.....	99
<b>TABLA 4.3:</b> Características de los sismos.....	100
<b>TABLA 4.4:</b> Respuesta del edificio sin disipadores.....	102
<b>TABLA 4.5:</b> Respuesta del edificio con disipadores.....	108
<b>TABLA 4.6:</b> Derivas máximas del análisis tiempo-historia (‰).....	108
<b>TABLA 4.7:</b> Respuesta de la estructura.....	108
<b>TABLA 4.8:</b> Respuesta del edificio sin disipadores.....	113
<b>TABLA 4.9:</b> Las características de los sismos.....	113
<b>TABLA 4.10:</b> Derivas máximas del análisis tiempo-historia (‰).....	115
<b>TABLA 4.11:</b> Respuesta del edificio con disipadores.....	116
<b>TABLA 4.12:</b> Derivas máximas del análisis tiempo-historia (‰) iteración 1.....	116
<b>TABLA 4.13:</b> Derivas máximas del análisis tiempo-historia (‰) iteración 2.....	116

<b>TABLA 4.14:</b> Respuesta del edificio sin disipadores.....	119
<b>TABLA 4.15:</b> Tabla resumen, comparación de resultados para marcos de 2 grados de libertad.....	120
<b>TABLA 4.16:</b> Resultados obtenidos del ETABS v.16.....	121
<b>TABLA 4.17:</b> Resultados obtenidos del ETABS v.16.....	122
<b>TABLA 4.18:</b> Derivas máximas del análisis tiempo-historia (‰).....	122
<b>TABLA 4.19:</b> Resultados obtenidos del ETABS v.16.....	123
<b>TABLA 4.20:</b> Derivas máximas del análisis tiempo-historia (‰).....	123
<b>TABLA 4.21:</b> Características de los sismos.....	124
<b>TABLA 4.22:</b> Resultados obtenidos del ETABS v.16.....	127
<b>TABLA 4.23:</b> Derivas máximas del análisis tiempo-historia (‰).....	128
<b>TABLA 4.24:</b> Resultados obtenidos del ETABS v.16.....	128
<b>TABLA 4.25:</b> Respuesta de la estructura.....	132
<b>TABLA 4.26:</b> Tabla resumen, comparación de resultados para marcos de 3 grados de libertad.....	132
<b>TABLA 4.27:</b> Resultados obtenidos del ETABS v.16.....	133
<b>TABLA 4.28:</b> Resultados obtenidos del ETABS v.16.....	134
<b>TABLA 4.29:</b> Derivas máximas del análisis tiempo-historia (‰).....	134
<b>TABLA 4.30:</b> Resultados obtenidos del ETABS v.16.....	139
<b>TABLA 4.31:</b> Tabla resumen, comparación de resultados para marcos de 4 grados de libertad.....	142
<b>TABLA 5.1:</b> Comparación de desplazamientos y derivas de entrepiso.....	146
<b>TABLA 5.2:</b> Matriz de consistencia.....	152



## INDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 2.1:</b> Principales placas tectónicas, en el mundo.....	6
<b>FIGURA 2.2:</b> Zona de subducción.....	6
<b>FIGURA 2.3:</b> Distribución de la sismicidad en el mundo. Pueden observarse los principales cinturones sísmicos.....	7
<b>FIGURA 2.4:</b> Las ondas sísmicas.....	8
<b>FIGURA 2.5:</b> Sismógrafo o sismómetro.....	9
<b>FIGURA 2.6:</b> Registro del sismo de Bam.....	9
<b>FIGURA 2.7:</b> Propagación de la energía desde el epicentro hasta la estructura.....	12
<b>FIGURA 2.8:</b> Distribución de la sismicidad en Perú.....	13
<b>FIGURA 2.9:</b> Sistema de disipación (DS) y sistema de resistencia a la fuerza sísmica (SFRS).....	14
<b>FIGURA 2.10:</b> Tres tipos de instalaciones principales de sistemas pasivos.....	15
<b>FIGURA 2.11:</b> Clasificación de los disipadores de energía.....	16
<b>FIGURA 2.12:</b> Dispositivos Ensayados por Kelly (1975) (a) Disipador por Rolado de U, (b) Disipador Torsional, (c) Disipador por Flexión Pura.....	19
<b>FIGURA 2.13:</b> (a) Comportamiento del dispositivo histerético ADAS, (b) Dispositivo histerético tipo ADAS.....	20
<b>FIGURA 2.14:</b> (a) Esquema de la aplicación dispositivo histerético tipo TADAS, (b) Dispositivo histerético tipo TADAS.....	20
<b>FIGURA 2.15:</b> Dispositivo histerético tipo panal Honeycomb (HDS).....	20
<b>FIGURA 1.16:</b> Dispositivo histerético tipo SL Shear Link (a) vista frontal, (b) vista en planta.....	21
<b>FIGURA 2.17:</b> (a) Dispositivo histerético por Rolado en U (b) Dispositivo histerético por Rolado U utilizado en la Torre Titanium, Chile.....	21
<b>FIGURA 2.18:</b> (a) Disipador por fricción Pall y Marsh (b) instalación del dispositivo.....	22
<b>FIGURA 2.19:</b> (a) Disipador por fricción uniaxial manufacturado por Sumitomo Metal Industries, (b) detalles de instalación.....	23
<b>FIGURA 2.20:</b> Conexión tipo SBC (Slotted Bolted Connection).....	23
<b>FIGURA 2.21:</b> Disipador Fluido-viscoso HiDAM, (b) Montaje del Disipador HiDAM.....	25
<b>FIGURA 2.22:</b> (a) Disipador de tipo Fluido-viscoso Taylor, (b) Contravientos con Disipador de fluido viscoso Taylor.....	25
<b>FIGURA 2.23:</b> Disipador tipo GERB o cilíndrico de fluido.....	26
<b>FIGURA 2.24:</b> (a) Disipador muro viscoso, (b) Comportamiento del WVD.....	26

<b>FIGURA 2.25:</b> (a) Disipador de tipo viscoelástico 3M. (Fuente Repositorio PUCP).....	28
<b>FIGURA 2.26:</b> (a) Disipador VE tipo sándwich, (b) Disipador VE cilíndrico, (c) Disipador VE tipo cajón-perfil.....	28
<b>FIGURA 2.27:</b> Esquema del disipador SAVE.....	29
<b>FIGURA 2.28:</b> Rollos de material visco-elástico.....	30
<b>FIGURA 2.29:</b> Diferentes configuraciones que se pueden emplear con los disipadores; a) diagonal; b) chevron; c) scissor-jack; d) abrazadera inferior; e) abrazadera superior.....	31
<b>FIGURA 2.30:</b> Configuración Diagonal.....	31
<b>FIGURA 2.31:</b> Componentes de un Sistemas de 1 Grado de Libertad Amortiguado.....	33
<b>FIGURA 2.32:</b> a) Sistema; (b) componente de rigidez; (c) componente de amortiguamiento; (d) componente de masa.....	34
<b>FIGURA 2.33:</b> Pórtico sometido a una fuerza estática lateral ( $f_s$ ) a lo largo de GDL u.....	35
<b>FIGURA 2.34:</b> Relación lineal entre el desplazamiento $u$ y la fuerza $f_s$ .....	35
<b>FIGURA 2.35:</b> Vibración Libre Sistemas 1GDL Sub-amortiguados, Críticamente amortiguado y Sobre-amortiguados.....	37
<b>FIGURA 2.36:</b> Decremento exponencial de la amplitud del desplazamiento debido al amortiguamiento. Consecuencias del amortiguamiento.....	38
<b>FIGURA 2.37:</b> Lazos de histéresis para (a) un amortiguador viscoso, (b) un resorte y un amortiguador viscoso en paralelo.....	39
<b>FIGURA 2.38:</b> a) Energía disipada en un amortiguador viscoso lineal y energía de deformación elástica; b) Energía disipada en un ciclo de vibración en un experimento.....	40
<b>FIGURA 2.39:</b> (a) Respuesta Histerética típica de disipadores viscoelásticos y de fluido viscoso; (b) Respuesta Histerética típica de dispositivos disipadores por plastificación metálica y de fricción.....	41
<b>FIGURA 2.40:</b> (a) Amortiguamiento proporcional a la masa; (b) Amortiguamiento proporcional a la rigidez.....	44
<b>FIGURA 2.41:</b> Amortiguamiento proporcional de Rayleigh.....	45
<b>FIGURA 2.42:</b> Amortiguamiento de Penzien y Wilson o superposición modal.....	45
<b>FIGURA 2.43:</b> Desarrollo matricial de un pórtico con disipadores visco-elásticos de tres GDL.....	48
<b>FIGURA 2.44:</b> Deformación modal de amortiguadores para el modo $i$ .....	49

<b>FIGURA 2.45:</b> Relaciones de amortiguamiento modal a partir del MSE para la distribución de amortiguamiento cercanamente proporcional.....	50
<b>FIGURA 2.46:</b> Modelo de masas concentradas de un pórtico plano.....	50
<b>FIGURA 2.47:</b> Modelo de Kelvin-Voigt.....	52
<b>FIGURA 2.48:</b> Modelo de la diagonal con disipador ensamblada.....	52
<b>FIGURA 2.49:</b> Esfuerzo y deformación debido a una carga sinusoidal.....	54
<b>FIGURA 2.50:</b> Diagrama esfuerzo vs deformación para un material viscoelástico.....	55
<b>FIGURA 2.51:</b> Variación aproximada del Módulo de almacenamiento de cortante $G'$ con respecto a la frecuencia y la temperatura ambiente.....	56
<b>FIGURA 2.52:</b> Variación aproximada del Módulo de pérdida de cortante $G''$ con respecto a la frecuencia y la temperatura ambiente.....	56
<b>FIGURA 2.53:</b> Comparación de valores del módulo de almacenamiento y pérdida por cortante calculados a partir de una ecuación con los resultados obtenidos de ensayos.....	57
<b>FIGURA 2.54:</b> (a) Sistema de 1GDL con disipadores visco-elásticos, (b) Diagrama de cuerpo libre.....	58
<b>FIGURA 2.55:</b> Esquema de análisis dinámico moda espectral.....	64
<b>FIGURA 2.56:</b> Esquema de análisis sísmico de estructuras con sistemas de disipación pasiva de energía.....	64
<b>FIGURA 2.57:</b> Ilustración Cap.2-43: Mapa y valores de "Z".....	66
<b>FIGURA 2.58:</b> Principio de análisis modal.....	73
<b>FIGURA 2.59:</b> Efecto de amortiguamiento añadido (amortiguamiento viscoso).....	75
<b>FIGURA 2.60:</b> Efecto de amortiguamiento y rigidez añadidos.....	75
<b>FIGURA 2.61:</b> Curva de capacidad sectorizada de una estructura y niveles de desempeño.....	80
<b>FIGURA 2.62:</b> Curvas de fragilidad para 4 niveles de daños.....	82
<b>FIGURA 2.63:</b> Subsistemas estructurales de una estructura sismorresistente con disipadores de energía.....	84
<b>FIGURA 2.64:</b> Distribución vertical del sistema disipativo.....	85
<b>FIGURA 2.65:</b> Coordenadas globales para el sistema brazo-disipador.....	87
<b>FIGURA 4.1:</b> Pórtico de 2gdl.....	92
<b>FIGURA 4.2:</b> Modo de vibrar 1 de 2gdl.....	93
<b>FIGURA 4.3:</b> Modo de vibrar 2 de 2gdl.....	94
<b>FIGURA 4.4:</b> Modo de vibrar 1 de 2gdl con amortiguamiento.....	96
<b>FIGURA 4.5:</b> Modo de vibrar 2 de 2gdl con amortiguamiento.....	96

<b>FIGURA 4.6</b> Parámetros sísmicos y espectro de respuesta para s0.....	96
<b>FIGURA 4.7:</b> Acelerogramas para suelo tipo s1.....	100
<b>FIGURA 4.8:</b> Consideraciones para los disipadores.....	103
<b>FIGURA 4.9:</b> Parámetros sísmicos y espectro de respuesta reducido.....	106
<b>FIGURA 4.10:</b> Función pulso.....	109
<b>FIGURA 4.11:</b> Curva tiempo vs desplazamiento para amortiguadores con $\alpha = 1.00$ .....	109
<b>FIGURA 4.12:</b> Balance energético de los sismos en suelo tipo s1.....	111
<b>FIGURA 4.13:</b> Curvas histeréticas de acelerogramas en suelo tipo s1.....	112
<b>FIGURA 4.14:</b> Acelerogramas usados para este tipo de suelo s2.....	113
<b>FIGURA 4.15:</b> Balance energético del marco a diferentes solicitaciones sísmicas.....	117
<b>FIGURA 4.16:</b> Curvas histeréticas del marco a diferentes solicitaciones sísmicas.....	118
<b>FIGURA 4.17:</b> Balances de energía del marco de 3gdl sometido a diferentes acelerogramas.....	125
<b>FIGURA 4.18:</b> Curvas histeréticas del marco de 3gdl sometido a diferentes acelerogramas.....	126
<b>FIGURA 4.19:</b> Balances de energía del marco de 3gdl sometido a diferentes acelerogramas.....	130
<b>FIGURA 4.20:</b> Curvas histeréticas del marco de 3gdl sometido a diferentes acelerogramas.....	130
<b>FIGURA 4.21:</b> Balances de energía del marco de 3gdl sometido a diferentes acelerogramas.....	140
<b>FIGURA 4.22:</b> Curvas histeréticas del marco de 3gdl sometido a diferentes acelerogramas.....	141
<b>FIGURA 4.23:</b> Pórticos a cortante sin disipadores utilizados para análisis comparativo.....	143
<b>FIGURA 4.24:</b> Pórticos a cortante con disipadores utilizados para análisis comparativo.....	143

**INDICE DE ANEXOS**

ANEXO 01: Matriz de consistencia.....152

## RESUMEN

En vista del aumento de la aplicación de sistemas modernos de protección sísmica en el Perú como son los aisladores y disipadores sísmicos, la presente investigación “Análisis sísmico comparativo entre modelos tipo corte de marcos planos de varios grados de libertad en suelos S0, S1, S2 y S3 con y sin disipadores de energía visco-elásticos” analiza la respuesta sísmica de estos sistemas pasivos de protección sísmica, determinando, así mismo, las derivas y desplazamientos, siendo el objetivo de la presente investigación realizar un análisis sísmico comparativo entre modelos convencionales y modelos con implementación de disipadores visco-elásticos, de acuerdo a la NTE E030 y los códigos internacionales FEMA 356 Y ASCE 7-10 con la finalidad de cumplir con la reducción de daño moderado frente a un sismo raro con periodo de retorno de 475 años a un umbral máximo de 0.0058 como deriva permisible y hasta un 40% de amortiguamiento proporcionado por los disipadores visco-elásticos, que en suelos tipo S0 no será necesaria su aplicación puesto que requiere de tan solo un 3.2 % de amortiguamiento requerido, cantidad ínfima que pudiera ser proporcionada por un dimensionamiento ligeramente mayor de columnas, sin embargo, para el suelo tipo S1 el amortiguamiento requerido supera el 15% en todos los casos e incrementa mientras más grados de libertad se evalúen, en un S2 requerirá de más de un 50% lo cual se hace inviable para el dispositivo, y finalmente un S3 que por ejemplo desde el marco de 2 grados de libertad exige una cantidad de amortiguamiento de 35% que conduce a errores teóricos al querer comprobar de forma manual sus respuestas, lo que lo hace inviable teóricamente. Finalmente se valida el modelo numérico bajo las restricciones mencionadas y se comprueba el comportamiento histerético elipsoidal con pendiente positiva propio de un disipador visco-elástico.

## ABSTRACT

In view of the increase in the application of modern seismic protection systems in Peru such as seismic isolators and dissipaters, the present investigation "Comparative simian analysis between flat type cutting models of several degrees of freedom in soils S0, S1, S2 and S3 with and without visco-elastic energy dissipaters" analyzes the seismic response of these passive systems of seismic protection, determining, likewise, the drifts and displacements, being the objective of the present investigation to carry out a comparative seismic analysis between conventional models and models with visco-elastic dissipater implementation, according to NTE E030 and international codes FEMA 356 and ASCE 7-10 in order to comply with the reduction of moderate damage against a rare earthquake with return period of 475 years to a maximum threshold of 0.0058 as permissible drift and up to 40% of damping provided by the heatsinks isco-elastic, that in S0 type soils, its application will not be necessary since it requires only 3.2% of required damping, a very small amount that could be provided by a slightly larger sizing of columns, however, for soil type S1 the required damping exceeds 15% in all cases and increases the more degrees of freedom are evaluated, in a S2 it will require more than 50% which is unfeasible for the device, and finally an S3 that for example from the framework of 2 degrees of freedom requires a damping amount of 35% that leads to theoretical errors when wanting to manually check their answers, which makes it theoretically unfeasible. Finally, the numerical model is validated under the mentioned restrictions and the ellipsoidal hysteretic behavior with positive slope characteristic of a visco-elastic dissipator is checked.

## INTRODUCCIÓN

El Perú es un país eminentemente sísmico, donde la convergencia entre las placas Sudamericana y Nazca originan movimientos telúricos importantes, es por ello que el diseño sismorresistente cumple un rol neurálgico al momento de concebir estructuras. También se sabe que la ductilidad es un método que se viene utilizando desde los 70's y ofrece resultados confiables y seguros, pero según el Ph.D. Ing Bozzo esta técnica puede mejorarse mediante el desarrollo y aplicación de técnicas avanzadas de diseño sismorresistente que nos permiten alcanzar esa misma ductilidad de una manera más segura y controlada.

Cuando una estructura es afectada por un sismo, parte de la energía entregada por éste vuelve al suelo a través de la misma estructura y el resto de la energía es absorbida por el sistema estructural. Esta última es parte del proceso disipativo intrínseco de la edificación y está inherentemente asociada al daño estructural. En respuesta a esto, se pueden usar elementos dedicados exclusivamente a esa función disipadora, de modo que la estructura se mantenga siempre en el rango elástico de deformaciones, evitando daños en ella y posiblemente disminuyendo los daños en los elementos no estructurales. Dichos dispositivos son los disipadores sísmicos, los cuales se arriostran a la estructura en los pórticos, salvaguardando la estructura mediante el aumento considerable de amortiguamiento estructural.

Pero toda esta energía disipada y formulaciones teóricas tienen un límite físico de aplicación en función a las fórmulas utilizadas como, ecuación característica y ecuación de espacio-estado, que se muestran en capítulos posteriores.

En el capítulo I, se describen los aspectos fundamentales y formales de la presente tesis, como descripción, la justificación, objetivos e hipótesis.

En el capítulo II, se detalla, todo el marco teórico, como antecedentes y procedimiento numérico que se utilizará para el capítulo IV.

En el capítulo III, se ve el aspecto metodológico y estadístico, la definición de nuestras variables y procesamiento de datos, mediante cuadros excel comparativos.

En el capítulo IV, se obtienen las soluciones a las interrogantes establecidas en el capítulo II, el desarrollo y explicación de los diferentes casos puestos como alcance, que son los pórticos de 2, 3 y 4 grados de libertad con y sin disipadores visco-elásticos en diferentes tipos de suelo (S0, S1, S2, S3) según NTE E030, para parametrizar su uso, y se aprecian las desventajas de usar la ecuación característica y el conveniente uso de la ecuación espacio-estado para la obtención de autovalores y autovectores, que son propiedades fundamentales para la estimación de demás parámetros dinámicos, logrando así una disminución en derivas y desplazamientos



## CAPÍTULO I

### 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La filosofía del diseño propuesto por la NTE E030 pone como prioridad el resguardo a la vida de los usuarios de las estructuras, entonces es fácil llegar a la conclusión de que se debe verificar un correcto desempeño sísmico estructural bajo ciertos parámetros como las derivas y desplazamientos, esto sumado al inevitable suceso de eventos geofísicos obliga a que los ingenieros civiles se encuentren en constante capacitación en busca de técnicas vanguardistas de protección sísmica entre ellas la utilización de disipadores sísmicos.

La utilización de estos sistemas se hace cada vez más notable, ya en Chile se ha puesto en marcha proyectos de reforzamiento de viviendas con estos dispositivos, donde el Ing. Juan Carlos De la Llera es el encargado de estas aplicaciones, y actualmente el gobierno peruano viene realizando un proyecto similar con el Ing. Luis Bozzo para la utilización de disipadores tipo SLB en viviendas prefabricadas.

Debido a que las normativas no plantean un procedimiento de cálculo, sino una verificación de resultados y además que la NTE E.030 actual incluye a estos sistemas de protección sísmica exhortando a utilizar la normativa ASCE 7-10 a falta de parámetros para evaluarlos, es importante entender cómo funcionan desde un punto de vista teóricos para evitar caer en una mera aplicación del software.

#### 1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Problema general

¿Cómo realizar un análisis sísmico comparativo entre modelos tipo corte de marcos planos de varios grados de libertad en suelos tipo S0, S1, S2 Y S3 con y sin disipadores de energía visco-elásticos?

Problemas específicos

¿Cuánto de amortiguamiento puede proporcionar un disipador visco-elástico a una estructura convencional?

¿En qué porcentaje disminuyen las derivas y desplazamientos una vez implementado disipadores visco-elásticos a los modelos numéricos?

¿Cómo se comportan histeréticamente los disipadores visco-elásticos?

### **1.3. JUSTIFICACION E IMPORTANCIA**

La presente investigación se justifica por las siguientes razones:

Desde el aspecto sísmico, porque según Tavera y Bernal (2004) “A nivel mundial, el Perú es uno de los países de mayor potencial sísmico debido a que forma parte del denominado Cinturón de Fuego del Pacífico. Dentro de este contexto, la actividad sísmica está asociada al proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana y tiene su origen, en la fricción de ambas placas produciendo los sismos de mayor magnitud con relativa frecuencia y en la deformación interna de ambas placas, siendo los sismos más destructores los que se producen a niveles superficiales”. (p.19). Esto nos obliga a una investigación exhaustiva en el comportamiento sísmico de las edificaciones y formas de mitigar sus daños.

Desde el aspecto estructural, se justifica por que la información sobre la utilización de disipadores de energía es muy escasa en el Perú, por lo que la información proporcionada en la presente tesis sirve de base para futuras investigaciones que pudieran desarrollarse.

Desde el aspecto normativo, se justifica por que la NTE E.030 ya contempla el uso de estos sistemas pasivos de energía y porque la norma no plantea un procedimiento de cálculo sino una verificación de resultados apoyándose en otros códigos como el ASCE y el FEMA.

### **1.4. OBJETIVOS**

#### **1.4.1. Objetivo general**

- Realizar un análisis sísmico comparativo entre modelos tipo corte de marcos planos de varios grados de libertad en suelos tipo S0, S1, S2 y S3 con y sin disipadores de energía visco-elásticos.

#### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- Verificar el nivel de amortiguamiento presentado por las estructuras a las cuales serán aplicados los disipadores visco-elásticos.
- Determinar el porcentaje de disminución de derivas y desplazamientos entre los modelos con y sin disipadores visco-elásticos una vez aplicado los códigos NTE E030, ASCE/SEI 7-10 y FEMA 356.

- Diferenciar el funcionamiento entre un disipador de energía de comportamiento visco-elástico con un disipador viscoso, a través de las curvas histeréticas.

## **1.5. HIPOTESIS**

### **1.5.1. Hipótesis general**

Para los estudios de comportamiento sísmico se espera obtener resultados que favorezcan a la estructura al minimizar sus daños frente a sollicitaciones sísmicas severas, por lo que los 3 modelos en sus 4 diferentes tipos de suelo deberían demostrar una disminución de respuestas en términos de derivas, desplazamientos y energía.

### **1.5.2. Hipótesis específicas**

Como los modelos numéricos tendrán las mismas propiedades iniciales de rigidez y masa, la necesidad de amortiguamiento no será la misma en todos los casos puesto que esta dependerá tanto del tipo de suelo donde se emplace como de la cantidad de grados de libertad que posea.

Al determinar resultados de respuesta entre modelos con y sin disipadores deberá mostrarse una considerable mejora en la respuesta estructural en términos de derivas, desplazamiento y energía, así como la necesidad de implementar estos dispositivos en uno y otro tipo de suelo.

El disipador visco-elástico debería mostrar unos lazos o curvas histeréticas con pendiente positiva proporcionada por la rigidez del disipador visco-elástico, y no una elipse sin pendiente que evidenciaría puro amortiguamiento, propio de un disipador viscoso.

## CAPITULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

Los dispositivos pasivos de energía vienen siendo materia de investigación y durante los últimos años su importancia y utilización en el país ha ido incrementando, motivando así el desarrollo de temas de tesis referidos a este campo nuevo de técnicas de construcción moderna, no obstante la publicación de libros y textos no se ha hecho esperar, pudiendo destacarse los siguientes; Edificaciones con disipadores de energía (libro premio nacional ANR 2008) elaborado por el Ph.D. Genner Villarreal Castro, así como las investigaciones realizadas por Oviedo (2009), en la que estudia y compara los tipos de disipadores (metálicos, fricción, viscosos y visco-elásticos) utilizando un edificio existente de uso esencial (clínica) y la investigación realizada por Morales (2012), comparando un edificio de aulas de la PUCP de cuatro niveles rehabilitándolos con disipadores de energía. Resaltando que todas las anteriores investigaciones mencionadas ponían su confianza en el software ETABS (Extended 3D Analysis of Building Systems) para la obtención de resultados, siendo bastante eficaz, y demostrando así la reducción de distorsiones de entrepiso y demás respuestas al incorporar dichos dispositivos a la estructura.

Sin embargo, la presente tesis tiene como finalidad demostrar matemática y analíticamente el uso de disipadores de energía afianzando primero los conocimientos previos al desarrollo numérico definitivo inteligible para así obtener resultados acordes a las investigaciones hechas, comparando dichos resultados con los que se obtendrán al utilizar el software ETABS y validar así los modelos numéricos.

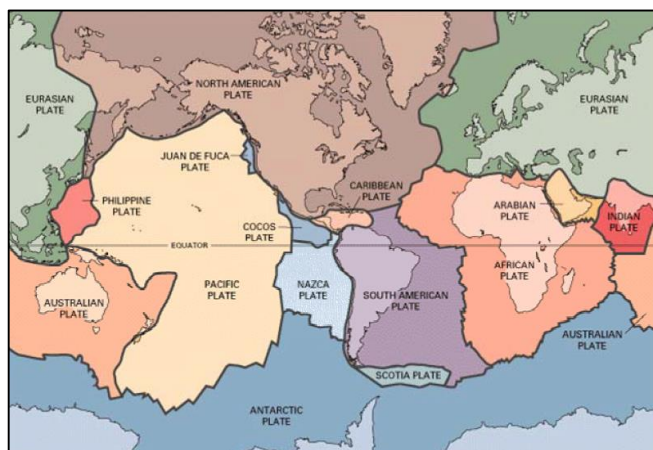
#### 2.2. BASES TEÓRICAS

Es menester para esta parte debido a la complejidad de la investigación subdividir este apartado en diferentes temas que deben conocerse antes de la aplicación directa de las ecuaciones necesarias para el desarrollo y obtención de resultados.

Explícitamente se expondrán los conocimientos previos, citas y recomendaciones personales y proporcionadas por otros autores para que el texto sea digerible y tratable a los ojos del lector o interesado que desee ahondar o aportar en este tema en particular.

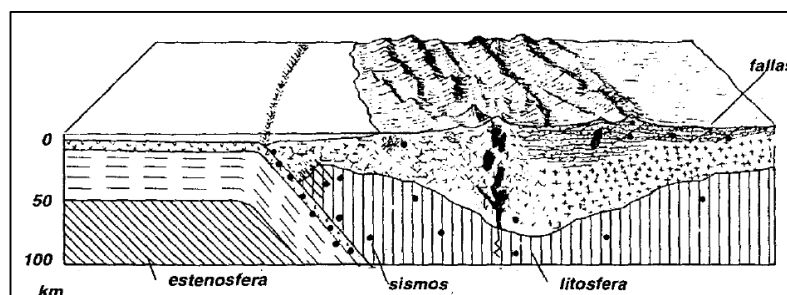
### 2.2.1. Análisis sísmico moderno

Los sismos o terremotos son vibraciones de la corteza terrestre ocasionados por distintos fenómenos, como la actividad volcánica, la caída de techos de cavernas subterráneas y hasta por explosiones. Sin embargo, la teoría principal que explica el origen de los sismos es la tectónica de placas como se muestra en la figura 2.1. Esta teoría se basa en que la corteza terrestre está formada por varias placas, las cuales están unidas entre sí. Las placas se mueven unas con otras sobre las capas de rocas que son más viscosas y que se encuentran por debajo de ellas.



*Figura 2.1.* Principales placas tectónicas, en el mundo (Fuente Aguiar, 2008: Análisis sísmico de edificios) comentario: La corteza terrestre presenta 15 placas tectónicas principales y 32 placas secundarias como constata la imagen anterior.

Los tres tipos más importantes de movimiento de placas son; friccionante, divergente y convergente (subducción), describiendo las placas de Nazca y Sudamericana el fenómeno de subducción que se puede apreciar en la figura 2.2.



*Figura 2.2.* Zona de subducción (Fuente García, 1998: Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico) comentario: el movimiento convergente o de subducción es el principal culpable de los sismos.

## 2.2.2. Principales parámetros de los terremotos

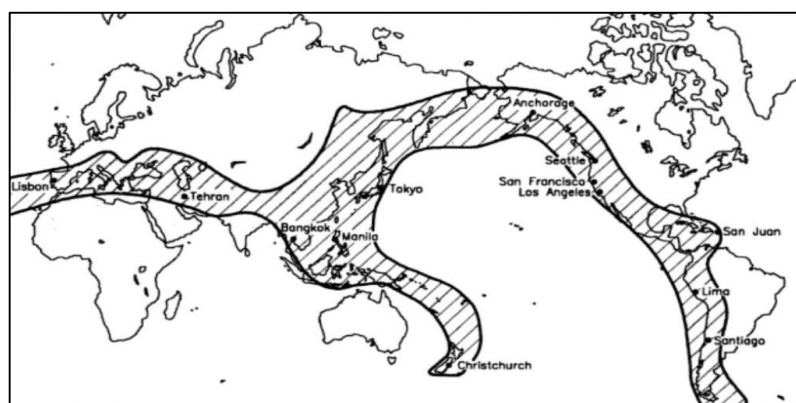
Dado que la superficie de la roca en la falla no es lisa ni uniforme, la propagación de la ruptura a través de ella no ocurre a una velocidad constante, sino a través de una serie de movimientos súbitos. Esto explica, en alguna manera, la forma irregular y aleatoria de las ondas que produce el sismo. La zona de ruptura se extiende a partir del foco o hipocentro en todas las direcciones, llegando hasta la superficie en algunos casos.

En general los sismos se dividen en: superficiales o someros, cuando ocurren a profundidades menores de 60 km, de foco intermedio, entre 60 y 300 km, y profundos cuando su profundidad es mayor de 300 km

### a. Sismicidad

La sismicidad, que originalmente ha sido considerada como la distribución espacio-tiempo de los terremotos en la Tierra y de sus efectos destructivos, obtenidos a partir de la recopilación histórica de los datos, ha dado origen a los catálogos sísmicos.

La distribución geográfica de los epicentros, mostrados en la figura 2.3, de los terremotos en el planeta muestra cuales son las zonas sísmicas más activas. La primera, el denominado cinturón Circum-Pacífico, que tiene una extensión de 40000km, un 85% de la energía total liberada por los terremotos anualmente en el mundo corresponde a dicha zona. Un segundo cinturón se extiende desde las islas Azores y llega hasta el Himalaya y el norte de la India y la China. Una tercera zona sísmica activa está formada por las cordilleras submarinas que dividen el Atlántico (Udías y Mézcua 1986).

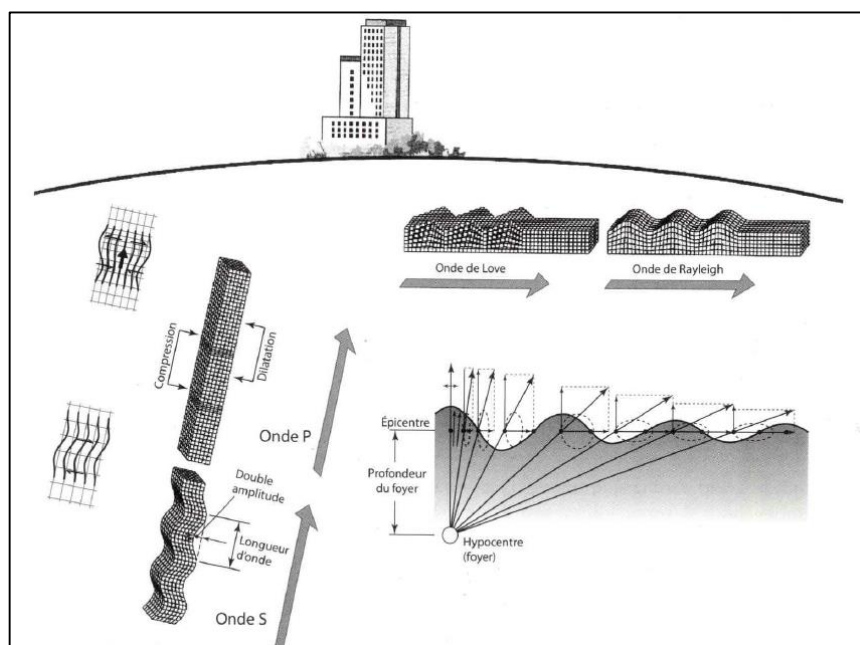


*Figura 2.3.* Distribución de la sismicidad en el mundo. Pueden observarse los principales cinturones sísmicos (Fuente Bozzo y Barbat, 2004: Diseño sismorresistente de edificios) comentario: la imagen 3 claramente muestra que nuestro país se encuentra propenso a la ocurrencia de sismos.

## b. Ondas sísmicas

La energía liberada por el sismo se propaga por medio de varios tipos de ondas sísmicas, como en la figura 2.4. Las ondas de cuerpo que se generan en el punto de ruptura incluyen ondas P (ondas primarias u ondas de dilatación) las cuales manifiestan desplazamientos de las partículas en la misma dirección de la propagación de la onda, una parte se transmite a la atmosfera como ondas sonoras que pueden ser audibles a las personas siendo esta la onda más rápida, y Ondas S (Secundarias u ondas de cortante) que manifiestan desplazamientos de las partículas en la dirección perpendicular a la dirección de propagación (por lo que no puede viajar a través de los líquidos), por tanto no viaja a través de los océanos, sacudiendo el suelo de forma vertical siendo la principal responsable de los daños estructurales.

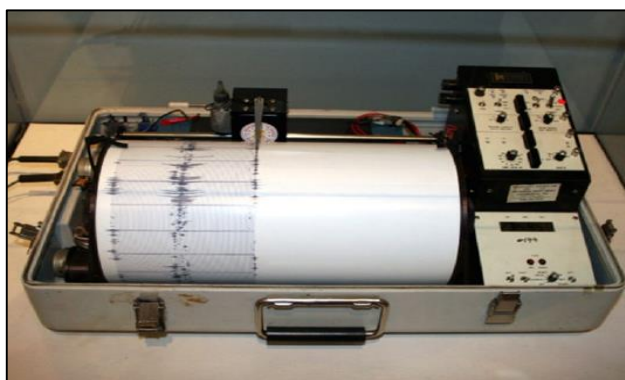
Cuando las ondas llegan a la superficie, se reflejan, pero al mismo tiempo inducen ondas de superficie entre las cuales se encuentran las ondas de Rayleigh y las ondas Love--(Ondas R y L respectivamente). Las ondas Love producen movimientos horizontales transversales a la dirección de propagación similar a las ondas S, por tanto, estas ondas mueven el suelo lateralmente en un plano horizontal y producen sacudidas en los cimientos de las estructuras. Por otra parte, las ondas de Rayleigh producen en un plano vertical un movimiento elíptico. La amplitud de estas ondas decrece marcadamente con la profundidad medida desde la superficie.



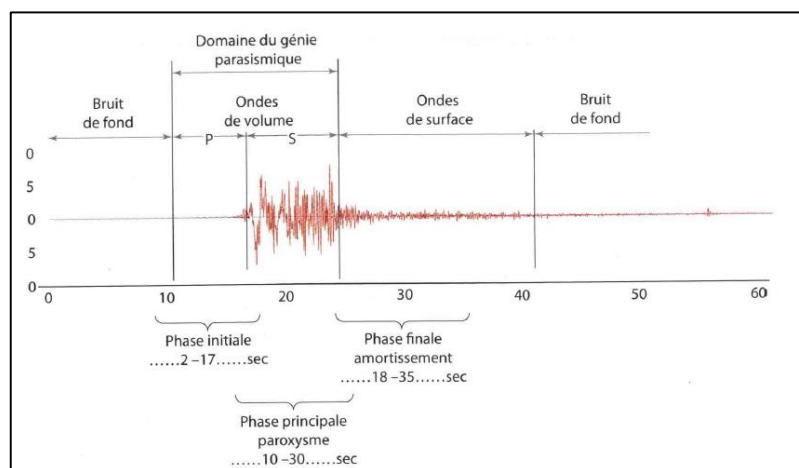
*Figura 2.4.* Las Ondas sísmicas (Fuente Victor Davidovici, 2016: Conception-construction parasismique)) comentario: las ondas además de sufrir una variedad de filtraciones a través del terreno, no pierden su capacidad destructiva.

### c. Sismogramas

Uno de los instrumentos empleados en sismología es el sismógrafo como el de la figura 2.5, el cual es adecuado para registrar sismos que ocurren a distancias apreciables, inclusive a miles de kilómetros. Los sismógrafos, en general, se salen de rango de medición cuando el sismo ocurre cerca de su localización. El registro obtenido por este instrumento se denomina sismoqrama.



*Figura 2.5.* Sismógrafo (Fuente Boroschek, 2015: Dinámica de estructuras apuntes de clase) comentario: actualmente se han desarrollado sismógrafos capaces de captar hasta menores intervalos de pasos como de 0.05.



*Figura 2.6.* Registro del sismo de Bam, 2003 (Fuente Victor Davidovici, 2016: Conception-construction parasismique) comentario: para que un sismo se más nocivo para una estructura, este debe presentar un gran contenido de frecuencias.

En la figura 2.6 puede identificarse la llegada en el tiempo de las ondas P y de las ondas S. Dado que la velocidad de propagación de las dos ondas es diferente,



siendo mayor la de la onda P; utilizando la diferencia en tiempo entre las llegadas de las dos ondas, es posible determinar la distancia a que ocurrió el sismo.

#### d. Magnitud

El concepto de magnitud fue introducido por Charles Richter en 1935 para comparar la energía liberada en el foco por diferentes sismos. La energía total liberada por un terremoto es la suma de la energía transmitida en forma de ondas sísmicas y la disipada mediante otros fenómenos, principalmente en forma de calor.

El valor de la magnitud así definida no tiene límite matemático, pero sí físico, determinado por las características de los materiales de la Tierra, entre ellas la resistencia finita al cortante de las rocas (Canas et al. 1994). La tabla 2.1 clasifica cuantitativamente la magnitud.

Tabla 2.1

*Relación para describir un sismo*

<b>Sismo</b>	<b>Magnitud</b>
Micro	No se sintió
Pequeño	<5
Moderado	5-6.5
Grande	6.5-8
Muy grande	>8

(Fuente Chen & Scawthorn, 2003) comentario: Los sismos tienen una magnitud física, limitada por la capacidad de resistencia finita al cortante, es por ello la imposibilidad de sismos mayores a 9.5 grados en la actualidad.

#### e. Intensidad

La intensidad macrosísmica es un parámetro que describe los daños producidos en edificios y estructuras, así como sus consecuencias sobre el terreno y los efectos sobre las personas, por lo que su utilización en la evaluación de daños está muy extendida. Se observa claramente la diferencia entre magnitud e intensidad ya que, mientras la primera es una característica propia del sismo, la segunda depende del lugar y la forma en que se realiza su evaluación, esto se puede evidenciar en la tabla 2.2.

Tabla 2.2

*Relación aproximada entre la intensidad de Mercalli modificada y la aceleración pico (máxima) del suelo (Peak Ground Acceleration)*

IMM	PGA*(g)
IV	0.01-0.04
V	0.04-0.09
VI	0.09-0.18
VII	0.18-0.34
VIII	0.34-0.65
IX	0.65-1.24
X	>1.24

(Fuente Wald et al., 1999) comentario: entonces la consecuencia trágica de un sismo no solo dependerá de su magnitud sino de las deficiencias estructurales de los edificios.

#### **f. Peligrosidad sísmica**

Se define como Peligrosidad Sísmica a la probabilidad de ocurrencia, dentro de un período específico de tiempo y dentro de una región determinada, movimientos del suelo cuyos parámetros: aceleración, velocidad, desplazamiento, magnitud o intensidad son cuantificados. Para evaluar la peligrosidad, es necesario analizar los fenómenos que ocurren desde la emisión de las ondas sísmicas en el foco (hipocentro) hasta que dichas ondas alcanzan la zona de estudio como en la figura 2.7.

Según Canas et al. (1994), el objetivo del estudio de peligrosidad es evaluar el movimiento del terreno en un lugar determinado como consecuencia de un terremoto.

Entonces cuando se produce un terremoto con determinadas características (profundidad del foco, mecanismo focal, magnitud, etc.), parte de la energía disipada se convierte en ondas sísmicas. Al propagarse por la tierra dichas ondas se reflejan, refractan, atenúan o amplifican y llegan en forma de excitación sísmica X1, al basamento rocoso que se encuentra debajo del emplazamiento de una estructura. Las ondas sufren un nuevo filtrado a través de la función de transferencia A correspondiente a las capas del suelo que se encuentran entre el basamento y la superficie, por lo que se obtiene la señal X2. Debido al fenómeno de interacción suelo-estructura, descrito por una función de transferencia I, la señal sufrirá nuevos cambios hasta obtenerse la señal X3, que será la excitación en la base del edificio.

La respuesta de la estructura  $X_4$  es el resultado de la convolución de la señal  $X_3$  por la función de transferencia  $D$  de la estructura.

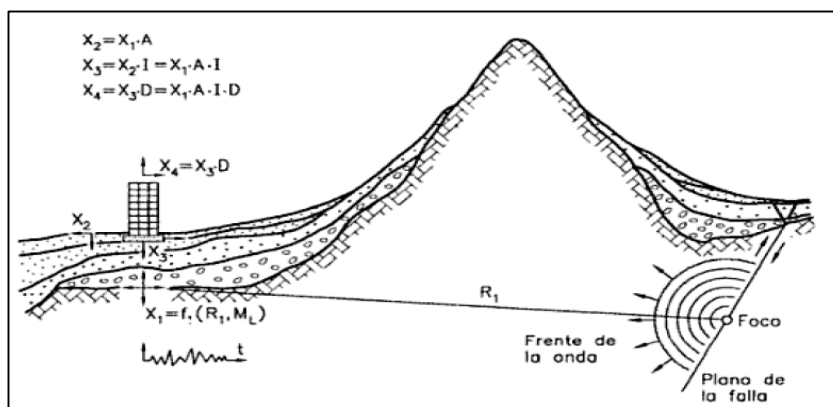


Figura 2.7. Propagación de la energía desde el epicentro hasta la estructura (Fuente Bertero, 1992) comentario: la imagen muestra el efecto de la energía desde la dislocación hasta los efectos lineales de transferencia hasta llegar al emplazamiento de la estructura.

### g. Sismicidad en el Perú

Dentro del Círculo sísmico Circum-Pacífico se encuentra la región sur-occidental del Perú (Arequipa-Tacna) donde está situada la zona de subducción de la placa Nazca y la placa Sudamericana. Ésta es una zona de alta actividad sísmica en donde, de acuerdo a la sismicidad histórica, han ocurrido sismos severos que son mostrados en la tabla 2.3 y figura 2.8.

Tabla 2.3

Cuadro de sismos más notables del Perú

Sismos	Lugar	Año	Magnitud Mw	Información Adicional		
				Muertos	Heridos	Desaparecidos
	Moyobamba	2005	7.5			
	Arequipa	2001	8.4	74	2689	35601
	Arequipa	1999	6.8	1	20	
	Nazca	1996	7.7	17	1500	
	Lima	1993	6.3	8	55	
	Moyobamba	1991	6.5			
	Moyobamba	1991	6.9	53	252	
	Lima	1974	8.1	78	2500	
	Chimbote	1970	7.9	50000	150000	20000
	Lima	1966	8.1	100		
	Quinchés	1946	6.8	1400		
	Nazca	1942	8.2	30		
	Lima	1940	7.9	79	3500	

(Fuente elaboración propia) comentario: el sismo más perjudicial registrado han sido los de 1966 y 1970 por los daños ocasionados.

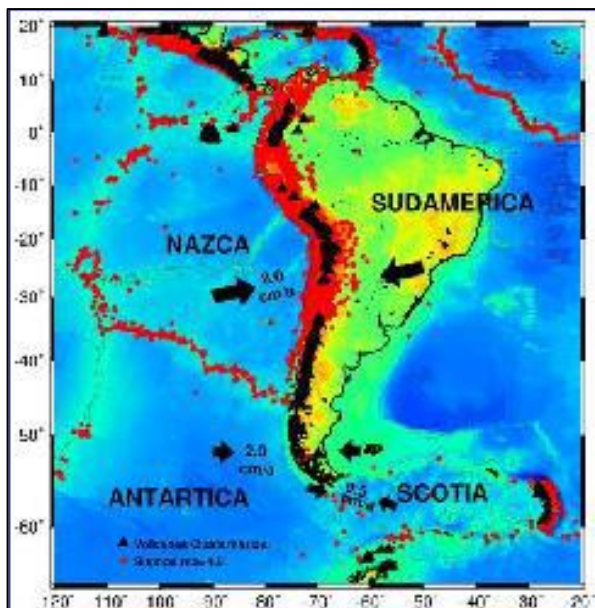


Figura 2.8. Distribución de la sismicidad en Perú (Fuente Hernando Tavera, 2000) comentario: Se puede notar que el Perú es fuente de actividad dentro de la ocurrencia de eventos geofísicos.

### 2.2.3. Diseño sismorresistente tradicional

El desempeño de un edificio, según el enfoque tradicional del diseño sismorresistente, está basado en la capacidad que tiene la propia estructura de disipar la energía introducida por el sismo a través de una combinación de propiedades conocidas como ductilidad, resistencia y rigidez.

Según Kelly (2001), El principal objetivo del diseño sismorresistente es cumplir con la siguiente condición:

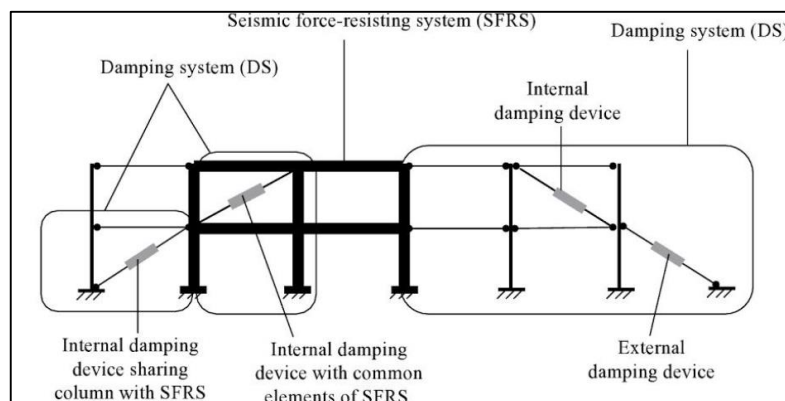
$$\text{CAPACIDAD} > \text{DEMANDA}$$

Es de esperarse que la estructura tenga un comportamiento elástico ante sismos leves y uno inelástico cuando esté sujeto a sismos moderados o raros., es más, las normativas modernas de diseño aceptan, generalmente, que las estructuras alcancen el rango no lineal.

Finalmente, el diseño sismorresistente tradicional, el mismo que se presenta en la norma peruana, tiene como objetivo principal la de mantener las derivas de la estructura por debajo de un límite máximo incrementando la rigidez.

Dentro de las técnicas para incrementar rigidez lateral de las edificaciones está la adición de nuevos muros, de concreto o albañilería, la inclusión de nuevos elementos como diagonales de acero o el enchaquetado de columnas y vigas, todo esto resulta relativamente costoso, es por ello que en las últimas décadas surgen nuevas técnicas para controlar la respuesta de la estructura, las cuales modifican sus

características dinámicas ya sea controlando o disipando parte de la energía entregada por el sismo mediante una variedad de dispositivos, de modo que la estructura se mantenga siempre en el rango elástico de deformaciones. Los dispositivos pueden ubicarse en diversos lugares de la estructura como se indica en la figura 2.9.



*Figura 2.9.* Sistema de disipación (DS) y sistema de resistencia a la fuerza sísmica (SFRS) (Fuente Cheng et al., 2008: Smart structures innovative systems for seismic response control) comentario: tanto la disposición como la efectividad estarán de la mano, por lo que el criterio debe ser preciso y fundamentado para cada proyecto.

Como el amortiguamiento estructural está limitado al amortiguamiento que es inherente o propio de los materiales acero, concreto o una mezcla de ambos, cuando este no es suficiente se hace necesario incorporar dispositivos auxiliares que impongan un amortiguamiento adicional al sistema, que puedan ser evaluados de manera bastante precisa y controlada.

Una de las maneras de lograr una mejora en la respuesta estructural y evitar el efecto destructivo de los sismos, es por medio de las técnicas avanzadas de diseño sismorresistente, estos son dispositivos que se agregan a la estructura los cuales pueden clasificarse:

- Sistemas pasivos.
- Sistemas semiactivos.
- Sistemas activos e híbridos.

Además, pueden categorizarse según el mecanismo de disipación y los requerimientos del sistema. A continuación, solo nos enfocaremos dentro de estos tres grupos de dispositivos en los sistemas pasivos.

## 2.2.4. Técnicas avanzadas de diseño sismorresistente

### a) Sistemas pasivos

El mundo de los sistemas pasivos es muy amplio y está en constante crecimiento, por lo tanto, se mencionarán los sistemas pasivos que se basen en dispositivos mecánicamente simples que responden de forma inercial a la acción sísmica y, a diferencia del resto de sistemas, sean los más económicos e independientes de fuentes de energía para funcionar.

Estos sistemas se clasifican en sistemas de aislamiento sísmico, en disipadores de energía y en osciladores resonantes (ver figura 2.10).

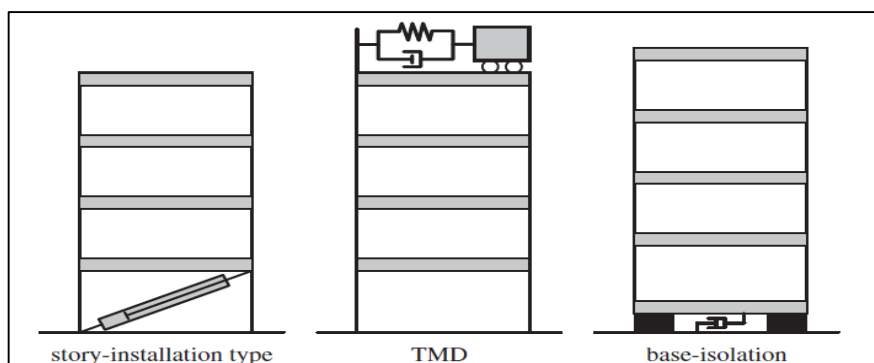


Figura 2.10. Tres tipos de instalaciones principales de sistemas pasivos (Fuente Takewaki, 2009: Building Control with Passive Dampers optimal performance-based design for earthquakes) comentario: actualmente se interacciona en el uso de más de un dispositivo, combinando disipadores y aisladores por ejemplo.

## 2.2.5. Estructuras con disipadores de energía

“Los sistemas de disipación de energía, si bien no evitan el ingreso de energía a la estructura, permiten que la disipación de energía se concentre en dispositivos especialmente diseñados para esos fines, reduciendo sustancialmente la porción de la energía que debe ser disipada por la estructura. Su uso reduce la energía de la respuesta estructural, disminuyendo el daño de componentes estructurales y no estructurales”. (Nitsche, 2011, p. 8)

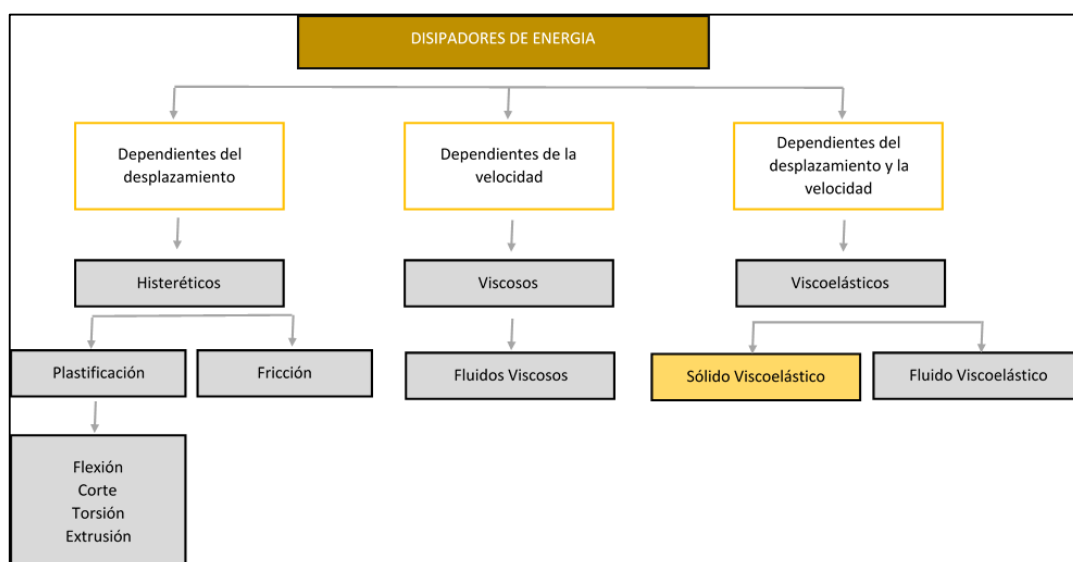
Entonces la disipación de energía se logra mediante la utilización de dispositivos especiales añadidos a una estructura sismorresistente que proporcionan un amortiguamiento añadido, con el fin de reducir la respuesta de la estructura. Como resultado, los esfuerzos inducidos por el sismo en la estructura pueden ser hasta un 50% menores que los correspondientes a la estructura sin disipadores, reduciendo sustancialmente las incursiones inelásticas (daño) de la estructura.

El desarrollo de los disipadores sísmicos es más reciente que el de los aisladores de base y puede atribuirse al trabajo visionario de Housner (1956) quien fundó las bases del diseño sísmico de las estructuras desde un punto de vista de la energía, específicamente la técnica de aplicación de disipadores de energía en edificaciones se inicia en Nueva Zelanda (1972), siendo impulsados por el sismo de Kobe (Japón – 1995) como respuesta a los graves daños causados, y desde entonces se han utilizado una amplia variedad de dispositivos, que en su mayoría utilizan la fluencia de placas de acero para disipar la energía.

Estos se diseñan para formar parte de un sistema sismorresistente dual, formado por una estructura principal flexible aperticada, la cual soporta las acciones gravitatorias y por un sistema resistente a las acciones horizontales, el cual corresponde al proceso disipativo y del cual forman parte los disipadores de energía.

Actualmente existen varias aplicaciones de este sistema: disipadores metálicos, de fricción, visco-elásticos y viscosos. Su aplicación ha sido fuertemente influenciada por la creciente cantidad de áreas densamente pobladas sujetas a sismos de gran magnitud, así como también por el desarrollo económico de varios países, como es el caso de Japón, un país que tuvo un gran crecimiento económico de 1985 a 1994 y se convirtió rápidamente en pionero en la construcción de edificios que incorporan tecnologías avanzadas.

El ASCE 7-10 en su capítulo 18 señala 3 categorías diferentes como en la figura 2.11.



*Figura 2.11.* Clasificación de los disipadores de energía (Fuente ASCE 7-10) comentario: existen aún más clasificaciones y esto dependerá de los autores de libros o artículos científicos que se estudien, es el ASCE el que se tomó como referencia.

Ventajas:

- Reducen el nivel de daño de la estructura y concentran la energía en los dispositivos adicionales, elementos totalmente identificados y fáciles de reemplazar. En el caso de los disipadores fluido - viscosos no necesitarán ser reemplazados.
- Reducen las fuerzas cortantes, aceleraciones y derivas en cada nivel; por lo tanto, reducen los daños en elementos estructurales y no estructurales. En muchos casos las estructuras pueden permanecer elásticas.
- Pueden suplir exigencias estructurales en arquitecturas muy exigentes: permite espacios más grandes y limpios, implementación y uso de nuevos materiales para elementos no estructurales, confort y seguridad a los usuarios.
- Los disipadores de energía no solamente se han utilizado contra sismos, sino también para el control de vibraciones inducidas por el viento.

Sin embargo, uno de los problemas que enfrenta la aplicación de los dispositivos disipadores de energía es la falta de guías y normatividad oficial para el modelado, análisis, diseño y pruebas en el laboratorio en nuestro país.

Actualmente los japoneses y estadounidenses utilizan dos nomenclaturas diferentes de clasificación de acuerdo con el mecanismo de funcionamiento. Los japoneses los clasifican en cuatro categorías y los estadounidenses plantean tres categorías.

Ante estas diferencias, en la ISO 3010 International Standard “Basis for design of structures – Seismic action on structures” se plantea una clasificación que pretende ser internacional, que consiste en tres sistemas de control de respuesta sísmica: control pasivo, control activo e híbrido y control semiactivo, la tabla 2.4 detalla todas estas clasificaciones mencionadas.



Tabla 2.4

*Clasificación de las técnicas de control de respuesta sísmica*

Sistema de Control	Tipo	Tipo	Dispositivo	
Control pasivo	Aislamiento sísmica	Mecanismos deslizantes o de rodillos	Apoyo de rodillos	
			Apoyo de placa deslizante, tipo péndulo, basculante	
			Capa deslizante	
			Otros	
			Elastómero de multicapa	
	Disipación de energía	de	De tipo friccionante	Dispositivo flexible
				Otros
				Acero
	Efecto de masa adicional	de	De tipo viscoelástico De masa de resorte	Plomo
				Otros
De tipo fluido				
Control semiactivo	Control de amortiguamiento	Sistema de amortiguamiento variable	Hidráulico	
			Otros	
	Control de rigidez	Sistema de rigidez variable	Viscoso	
			Otros	
	Otro		De tipo viscoelástico De masa de resorte	Otros
Control activo e híbrido	Efecto masa	Amortiguamiento activo de masa Amortiguamiento híbrido de masa	De tipo hidráulico	
			Otro	
	Control de fuerza	Tendón activo	Otro	
	Otro		Otro	

(Fuente ISO 3010 International Standar “Basis for design of structures- Seismic action on structures”) comentario: nuestro sistema tendría la siguiente ruta: control pasivo - disipación de energía - de tipo viscoelástico.

### a) Disipadores de tipo histeréticos o metálicos

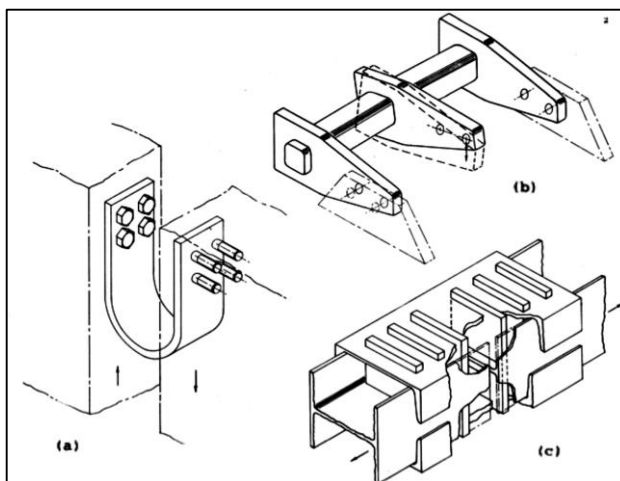
Los disipadores metálicos disipan energía a través del comportamiento histerético de los metales (acero, plomo o aleaciones especiales) cuando se deforman en su intervalo inelástico debido al desplazamiento relativo de pisos que se generan durante las acciones sísmicas, es decir, se basan en la fluencia de los metales a partir de los esfuerzos realizados (corte, flexión, torsión o extrusión), obteniendo así una gran capacidad de amortiguamiento.

Son bastante simples y se pueden fabricar a partir de un solo material, ofreciendo gran variedad en cuanto a tamaño y geometría, lo cual los hace bastante

versátiles en los tipos de estructuras en que pueden usarse, dado que pueden ser instalados en pequeños espacios.

“Bajo sismos moderados (deformaciones pequeñas), un disipador de fluencia de metal actúa como un miembro rigidizador que ayuda a resistir las deformaciones estructurales, mientras que bajo sismos severos (grandes deformaciones), éste actúa como un elemento que absorbe la energía.” (Villaverde, 2009, p. 776)

Las primeras investigaciones presentadas sobre la aplicación y desarrollo de este tipo de disipadores datan de principios de la década de los 70's en Nueva Zelanda. Los investigadores Kelly, Skinner & Heine (1975) presentan los resultados de ensayos de laboratorio de tres tipos de disipadores histeréticos de fluencia por diferentes mecanismos, el primero representa un mecanismo de flexión por rolado de elementos con forma de U, el segundo representa un disipador torsional y el tercero un disipador por flexión pura, estos se ven en la figura 2.12.



*Figura 2.12.* Dispositivos Ensayados por Kelly (1975)  
 (a) Disipador por Rolado de U, (b) Disipador Torsional,  
 (c) Disipador por Flexión Pura (Fuente Soong & Dargush, 1997: *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*) comentario: estos dispositivos se mimetizan muy bien en las estructuras.

Entre estos tipos de disipadores tenemos a los siguientes:

- Dispositivos ADAS (Added Damping and Stiffness).
- Dispositivos TADAS (Triangular Plates Added Damping and Stiffness).
- Dispositivos de tipo Panal HDS (Honeycomb).
- Dispositivos SL (Shear Link).
- Dispositivos de Rolado en Forma de U.

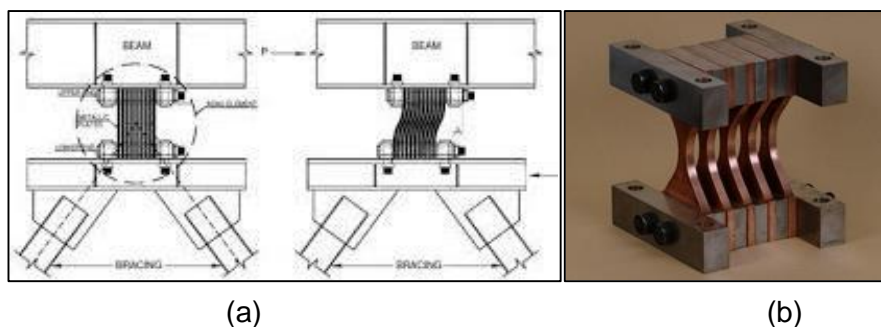


Figura 2.13. (a) Comportamiento del dispositivo histerético (ADAS), (b) Dispositivo histerético tipo ADAS (Fuente (a) Aiken et al., 2009, (b) cámara chilena de la construcción, 2011: Protección sísmica de estructuras) comentario: estos dispositivos son muy versátiles y utilizables en retrofit.

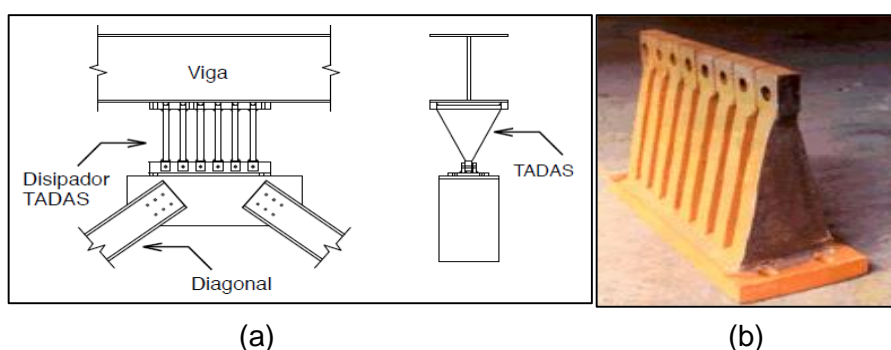


Figura 2.14. (a) Esquema de la aplicación dispositivo histerético tipo (TADAS), (b) Dispositivo histerético tipo TADAS (Fuente (a) cámara chilena de la construcción, 2011: Protección sísmica de estructuras, (b) Tsai et al., 1993) (Tsai et al, 1993)

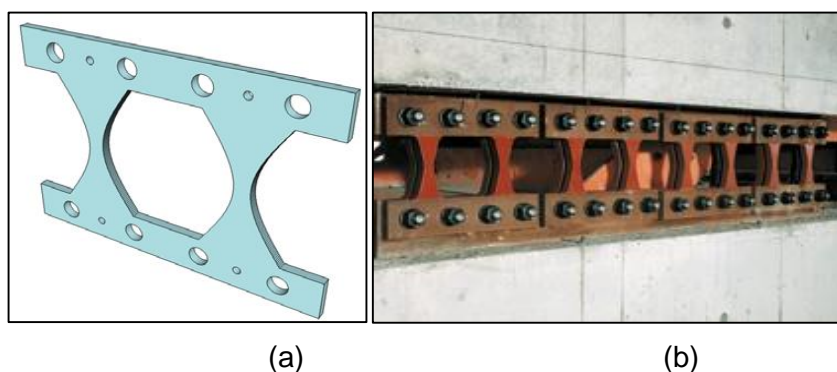


Figura 2.15. Dispositivo histerético tipo panel Honeycomb (HDS) (Fuente (a) Donobhan, 2007, (b) Kajima Corporation: ([http://www.kajima.co.jp/english/tech/seishin\\_menshin\\_e/structural/images/img\\_structural\\_06.jpg](http://www.kajima.co.jp/english/tech/seishin_menshin_e/structural/images/img_structural_06.jpg)) comentario: es uno de los primeros dispositivos histeréticos o fluencia de metales ensayados en laboratorio.

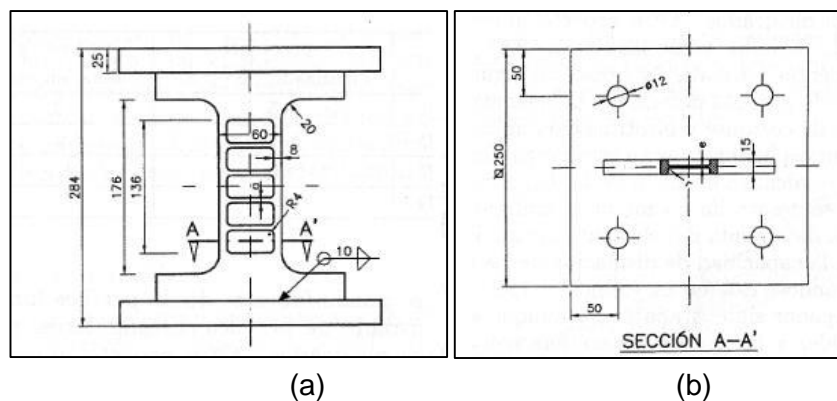


Figura 2.16. Dispositivo histerético tipo SL Shear Link (a) vista frontal, (b) vista en planta (Fuente Bozzo y Barbat, 2004: Diseño sismorresistente de edificios) comentario: estos dispositivos vienen siendo investigados y mejorados por el Ing. Luis Bozzo.

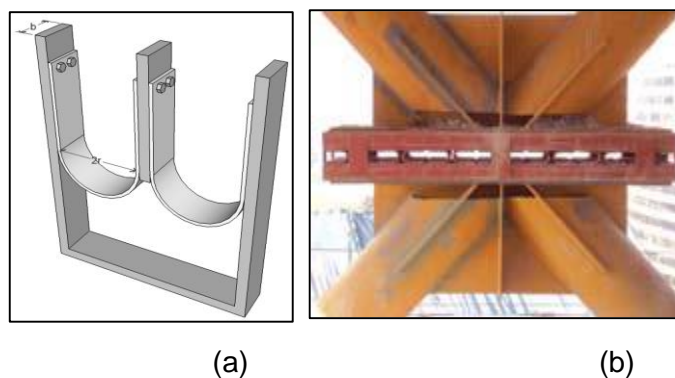


Figura 2.17. (a) Dispositivo histerético por Rolado en U (b) Dispositivo histerético por Rolado U utilizado en la Torre Titanium, Chile (Fuente (a) Donobhan, 2007, (b) Maldonado P., 2009: Artículo central-Contruccion sismorresistente pp.14-21) comentario: actualmente utilizados y mejorados por el Ing. Juan C. De la Llera con aplicación en Chile.

#### Ventajas:

- Son de instalación económica
- No se deterioran en largos períodos de tiempo
- Al ser metálicos se basan en la capacidad del acero, cobre u otros metales, de sostener muchos ciclos del comportamiento de rendimiento histerético.

#### Desventajas:

- La principal desventaja que presenta este dispositivo es que no puede ser ensayado antes de ser colocado ya que al enfocar la disipación de energía

en las deformaciones el dispositivo ingresa a un rango inelástico que va degenerándolo. Por este motivo es un dispositivo que requerirá mantenimiento o incluso reemplazo total tras un sismo.

### b) Disipadores tipo friccionantes

Los disipadores por fricción disipan energía basándose en el rozamiento que ocurre entre dos o más superficies en contacto bajo presión y en su deslizamiento relativo. Los desplazamientos relativos que tienen lugar en una estructura durante un sismo desarrollan a su vez deslizamientos relativos en las placas del disipador, lo que se traduce en disipación de energía en forma de calor principalmente.

Su comportamiento generalmente, no se ve afectado por la amplitud de deformación, frecuencia o número de ciclos aplicados. La curva de histéresis que se genera es casi rectangular con lo cual la energía disipada por ciclo es máxima para un determinado valor de fuerza de deslizamiento, típica del fenómeno de fricción de Coulumb ( $F = \mu N$ ). Para lograr un comportamiento confiable y no degradable, es necesario que la fricción se desarrolle entre elementos de naturaleza diferente.

Los efectos del amortiguamiento friccional en las respuestas de las estructuras fueron investigados por Mayes & Mowbray (1975), a pesar de que Keightley (1977) fue el primero en considerar dispositivos friccionales para aplicaciones de edificios. Subsecuentemente, basado primariamente a una analogía de los frenos de los automóviles, Pall et al. (1980) continuó con el desarrollo de disipadores friccionales pasivos para mejorar la respuesta sísmica de las estructuras.

Entre estos tipos de disipadores tenemos a los siguientes:

- Dispositivo con sistema Pall.
- Dispositivo por fricción uniaxial.
- Slotted Bolted Connection (SBC) (Conexiones Apernadas Ranuradas).

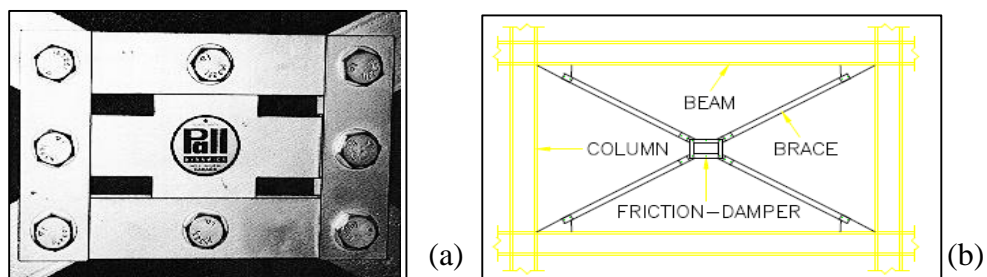


Figura 2.18. (a) Disipador por fricción Pall y Marsh, (b) instalación del dispositivo (Fuente (a) Pall et al. 1993: Passive Energy Dissipation Systems for Structural Design and Retrofit, (b) Bozzo, 2002: Disipadores de energía sísmica para viviendas económicas) comentario: muy utilizados en San Francisco (USA) y uno de los más ensayados en la University of Berkeley.

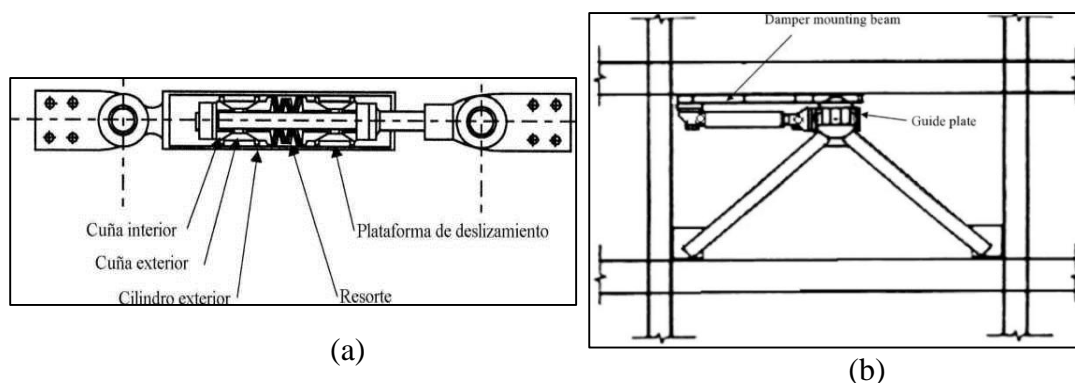


Figura 2.19. (a) Disipador por fricción uniaxial manufacturado por Sumitomo Metal Industrie, (b) detalles de instalación (Fuente(a) Aiken et al., 1992: Comparative study of four passive energy dissipation systems, (b) Cheng et al., 2008: Smart structures innovative systems for seismic response control) comentario: utilizado masivamente en Tokio, lugar de origen, presentan una fluencia entre las placas de contacto.

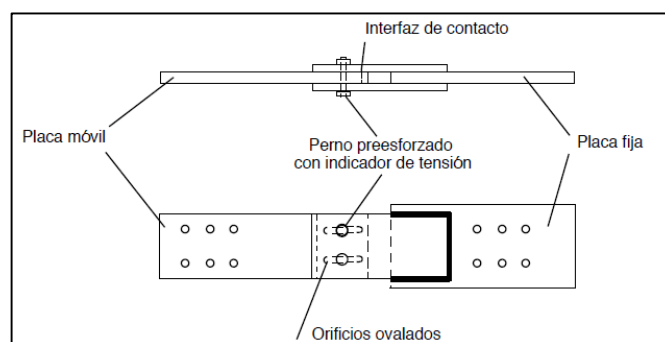


Figura 2.20. Conexión tipo SBC (Slotted Bolted Connection) (Fuente cámara chilena de la construcción, 2011: Protección sísmica de estructuras) comentario: estos tipos de dispositivos se basan en la capacidad de fluencia de los pernos, hasta llevarlos a la falla.

#### Ventajas:

- Alto desempeño estructural con bajo costo, en casos de reforzamiento con reducciones hasta del 40% frente a los otros sistemas tradicionales y hasta más de 200% con relación a los disipadores hidráulicos y visco elásticos.
- Proveen varios ciclos histeréticos “dúctiles” y amplios de disipación protegiendo la estructura, muros y demás elementos no estructurales contra daños importantes.
- Se requieren relativamente pocos amortiguadores de fricción AF.
- No requieren mantenimiento mientras operen dentro de las condiciones de diseño.

- Rápida instalación, pudiendo llegar a tan solo el 10% del tiempo que requieren los sistemas tradicionales.
- Son lo suficientemente angostos para mimetizarse en particiones internas o fachadas.
- Los esfuerzos que se generan en los disipadores friccionantes y metálicos antes mencionados, dependen del desplazamiento al que sean sometidos según ASCE 7-10.

Desventajas:

- El mayor inconveniente que presentan estos dispositivos disipadores es que el coeficiente de fricción, durante el desplazamiento, depende de la velocidad, de la presión normal y de las condiciones de las superficies en contacto.
- Consecuentemente al acápite anterior, resulta difícil garantizar un coeficiente de fricción independiente del tiempo y de las condiciones de los disipadores. Sin embargo, se ha observado que la variación del coeficiente de fricción durante el desplazamiento no afecta significativamente a la respuesta estructural si la estructura permanece en rango lineal, mientras que esta influencia puede ser significativa si esta entra en rango no lineal.
- No cambian demasiado los periodos naturales de vibración (aproximadamente entre 10 y 20%).

### **c) Disipadores de tipo fluido viscoso**

Un disipador de fluido viscoso es un dispositivo que disipa energía aplicando una fuerza resistente a un desplazamiento finito, es decir este tipo de dispositivos disipan energía forzando a un fluido altamente viscoso a pasar a través de orificios con diámetros, longitudes, e inclinación especialmente determinados para controlar el paso del fluido, esto genera fuerzas que se oponen al movimiento del elemento, de magnitud proporcional a la velocidad.

El esfuerzo depende de la velocidad con la que se genera la deformación del disipador durante los ciclos de carga y la energía disipada depende de la viscosidad del fluido

El disipador de fluido viscoso es similar a los amortiguadores de los automóviles, con la diferencia que los utilizados en las estructuras son capaces de resistir fuerzas inducidas por sismos, y están fabricados de acero inoxidable y otros materiales extremadamente duraderos para proporcionar una vida de al menos 40 años.

Inicialmente su aplicación se limitaba a la industria militar y aeronáutica. Sin embargo, se extendió a la industria de la construcción, dándose su desarrollo por primera vez en la Universidad de Buffalo a principios de los años 90's por Constantinou & Symans, los cuales aplicaron por primera vez los dispositivos en un edificio de tres niveles localizado en Sacramento, California en 1995.

Los requerimientos de los materiales son: deben ser resistentes a la corrosión, resistencia al despostillamiento, libre de esfuerzos de ruptura y alta resistencia al impacto. Esto es especialmente cierto para el cilindro del disipador, el cual debe resistir esfuerzos triaxiales.

Entre estos tipos de disipadores tenemos a los siguientes:

- Disipador de Aceite de Alto Rendimiento (HiDAM).
- Disipador tipo GERB o Cilíndrico de Fluido.
- Disipador de fluido viscoso de Taylor (TFVD).
- Disipador muro viscoso WVD (Wall Viscous Damper).

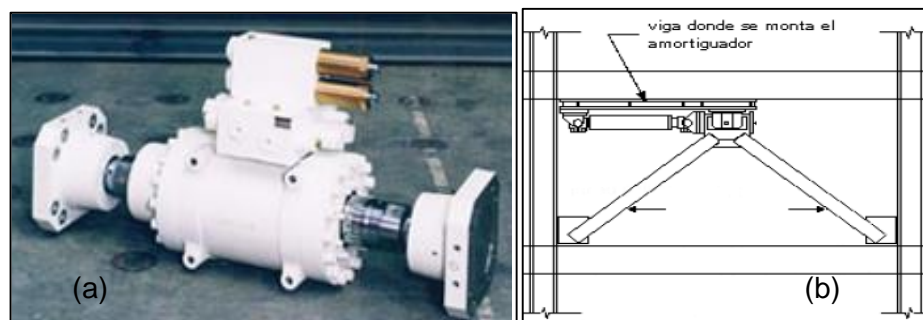


Figura 2.21. (a) Disipador Fluido-viscoso HiDAM, (b) Montaje del Disipador HiDAM (Fuente (a) Kajima Corporation: página web vigente 2018 ([http://www.kajima.co.jp/english/tech/seishin\\_menshin\\_e/structural/images/img\\_structural\\_05.jpg](http://www.kajima.co.jp/english/tech/seishin_menshin_e/structural/images/img_structural_05.jpg)) (b) Aguiar, 2008: Aisladores de base elastoméricos y fps comentario: este dispositivo se ha utilizado mayormente en puentes en Nueva Zelanda.



(a)



(b)



Figura 2.22. (a) Disipador de tipo Fluido-viscoso Taylor, (b) Contravientos con Disipador de fluido viscoso Taylor (Fuente Taylor Devices, CVD representaciones) comentario: utilizado y difundido en el mercado local, de coste accesible en comparación a los aisladores de base.

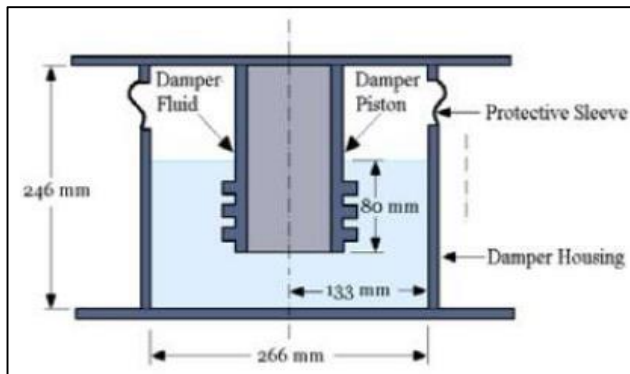


Figura 2.23. Disipador tipo GERB o cilíndrico de fluido (Fuente Makris y Constantinou, 1991: Passive Energy Dissipation Systems for Structural Design and Retrofit) comentario: utilizado para disipación vertical, es decir la componente z del sismo.

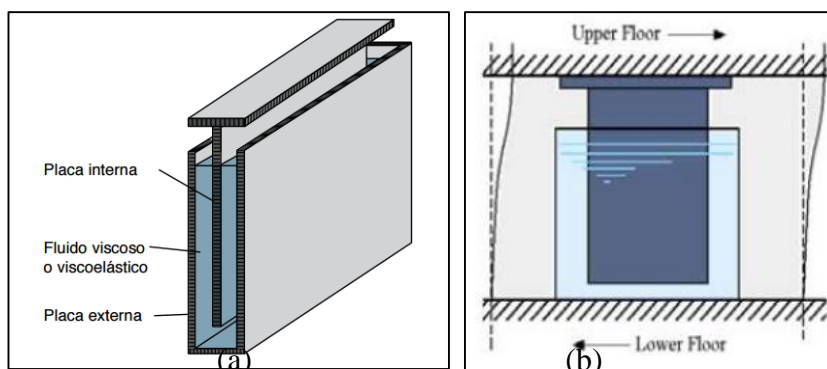


Figura 2.24. (a) Disipador muro viscoso, (b) Comportamiento del WVD (Fuente (a) cámara chilena de la construcción, 2011: Protección sísmica de estructuras, (b) Makris y Constantinou, 1991: Passive Energy Dissipation Systems for Structural Design and Retrofit) comentario: presentan una gran capacidad disipativa justamente por las dimensiones que presenta, aunque desfavorable puesto que es invasivo.

Los disipadores de esta categoría se activan a partir de las velocidades relativas de los extremos del dispositivo, inducido por los movimientos de la estructura durante un sismo. Estos sistemas, típicamente añaden amortiguamiento a las estructuras, sin afectar su rigidez lateral.

Ventajas:

- Son ideales para proteger edificios altos y torres contra los efectos de los fuertes vientos.
- Su instalación no solo se limita a edificios, también pueden ser utilizados en puentes y carreteras sobre nivel, para controlar fuerzas sísmicas y de fortísimas velocidades de vientos.

Desventajas:

- Para la protección frente a terremotos son eficientes solo si la construcción no es muy alta.
- Los disipadores de tipo Fluido Viscosos son dependientes de la velocidad según ASCE 7-10.

#### **d) Disipadores de tipo visco-elásticos**

Los disipadores visco-elásticos, o llamados también disipadores de goma, son los que están conformados por chapas o perfiles metálicos unidos por pads elastoméricos el cual se encuentra compuesto por un material visco-elástico (polímeros, copolímeros, sustancias vidriosas, etc.) que disipan energía cuando se someten a deformaciones por corte inducidas por desplazamientos relativos de las placas.

Estos dispositivos son capaces de iniciar su acción al menor desplazamiento y/o velocidad, no precisan de una fuerza umbral para disipar energía mediante el amortiguamiento estructural, cambian ligeramente los períodos de vibración, con lo cual resulta posible linealizar su comportamiento estructural y permiten una modelación más sencilla. Los materiales visco-elásticos son materiales cuyas características mecánicas dependen de la temperatura que se genere durante la disipación de energía, de la amplitud de tensión y deformación consecuente y de la frecuencia de vibración.

Como se mencionó estos materiales tienen una rigidez elástica que hace que el esfuerzo al que trabajan sea dependiente del desplazamiento al que son sometidos; pero también tienen características viscosas que hacen que dicho esfuerzo también dependa de la velocidad de variación de las deformaciones. El amortiguamiento depende de la viscosidad del material, estos dispositivos se basan en fluidos que pueden usarse según sea su comportamiento como: fluidos visco-elásticos, y sólidos visco-elásticos, este último se estudiará con detalle para el desarrollo de la presente tesis.

Ya desde hace más de treinta años se han venido utilizando para reducir la respuesta de edificios altos ante la acción del viento, y de forma más reciente se ha

estudiado su utilización con fines sismorresistentes, siendo su primera aplicación en el World Trade Center-NY en 1969.

Entre estos tipos de disipadores tenemos los siguientes:

- Dispositivo Visco-elástico 3M.
- Dispositivo SAVE (Shimizu Asphaltic Visco-Elastic Damper).

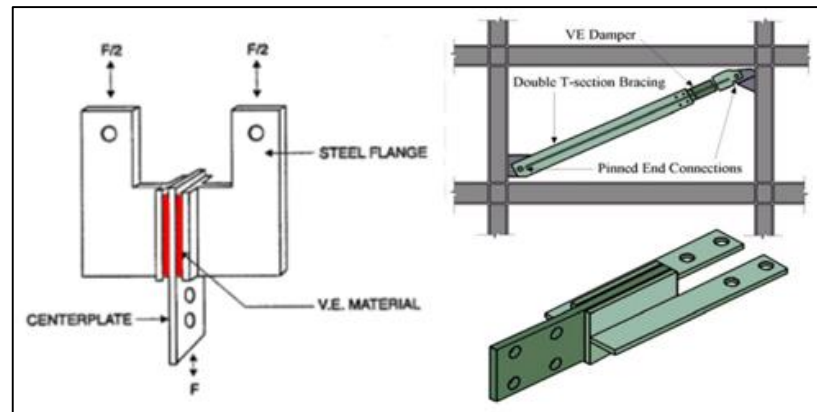


Figura 2.25. (a) Disipador de tipo visco-elástico 3M. (Fuente Repositorio PUCP) comentario: Este dispositivo viene siendo material de investigación en Ecuador por el Ing. Aguiar Falconi en la ESPE.

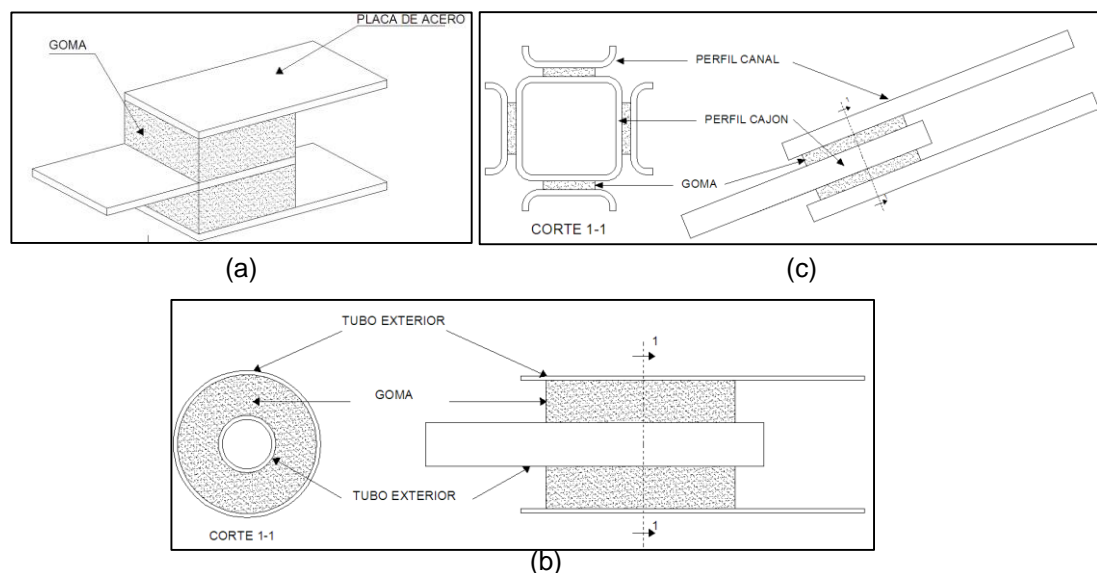


Figura 2.26. (a) Disipador VE tipo sándwich, (b) Disipador VE cilíndrico, (c) Disipador VE tipo cajón-perfil (Fuente Rubén Boroscheck et al., 1997: Desarrollo y ensayo de disipadores de energía por deformación de material viscoso) comentario: los dispositivos tipo "a" son utilizados en Perú, tipo "b" en Chile, y tipo "c" en Ecuador.

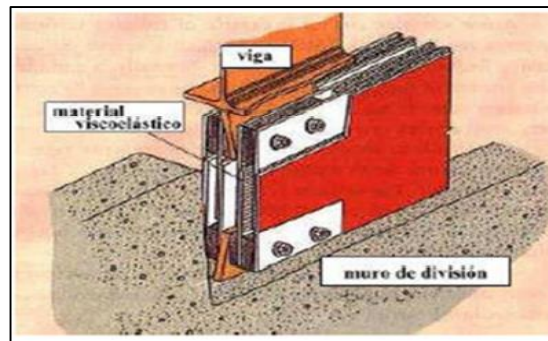


Figura 2.27. Esquema del disipador SAVE (Fuente Avilés, 2001) comentario: este dispositivo no es muy difundido, y aún se encuentra en investigación.

#### Ventajas:

- No precisan de una fuerza umbral para disipar energía es decir comienzan a trabajar al menor desplazamiento.
- No cambian significativamente los periodos de vibración, con lo cual resulta posible linealizar el comportamiento estructural y realizar una modelación más sencilla.
- Son económicos y de fácil fabricación y mantenimiento en relación con los otros tipos de disipadores.

#### Desventajas:

- Los materiales visco-elásticos, en general, son sensibles a los cambios de temperatura, frecuencia y deformación, resultando necesario minimizar la influencia de estas variables en sus rangos de servicio en estructuras sismorresistentes para que su comportamiento resulte predecible.
- Para conseguir un aumento del amortiguamiento estructural a valores que reduzcan significativamente la respuesta estructural ante un sismo severo es necesaria una gran cantidad de dispositivos.
- Estos tipos de disipadores son dependientes del desplazamiento y de la Velocidad según ASCE 7-10.

#### 2.2.6. Proveedores

Entre los proveedores del material visco-elástico se encuentra la compañía TIFO que brinda diferentes productos usando materiales visco-elásticos para la mitigación sísmica.

Otro proveedor del material visco-elástico para fines de disipación sísmica es la empresa Akton. Esta compañía actualmente diseña y manufactura productos y componentes para una gran variedad de sectores como médicos, militares, deportes y construcción. Presentan productos de alta calidad que se venden en más de 65 países.

Además, también se encuentra la compañía 3M la cual ofrece diversos productos entre los cuales podemos encontrar el material visco-elástico como en la figura 2.28. La empresa brinda amplia información del producto y recomendaciones de instalación y servicio.



*Figura 2.28.* Rollos de material visco-elástico (Fuente 3M) comentario: el espesor del material y demás condiciones geométricas dependerán del fabricante, también es de uso comercial.

### **2.2.7. Disposición de los sistemas de disipación pasivos**

Existe una variedad de configuraciones para la colocación de disipadores de energía. Sin embargo, las disposiciones más comunes para los DVE son las de Chevron y Diagonal, y es esta última la que explicaremos. No obstante, se muestra a continuación la figura 2.29, donde se aprecian algunas disposiciones de estos dispositivos según los requerimientos y sollicitaciones arquitectónicas.

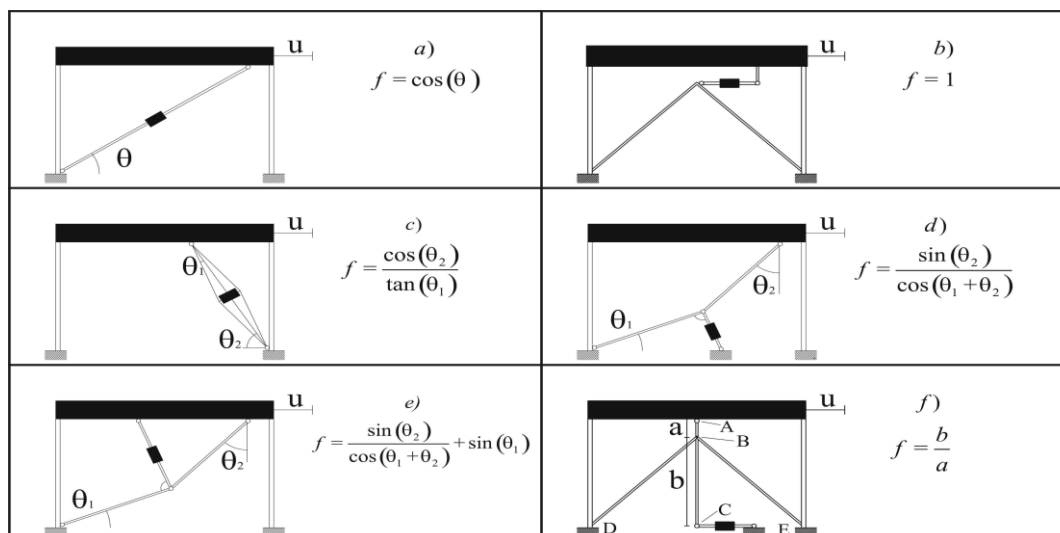


Figura 2.29. Diferentes configuraciones que se pueden emplear con los disipadores; a) diagonal; b) chevron; c) scissor-jack; d) abrazadera inferior; e) abrazadera superior. (Fuente M. Di Paola, G. Navarra, 2008: Passive control of linear structures equipped with nonlinear viscous dampers and amplification mechanisms) comentario: la figura solo muestra alguna de las formas típicas de colocación, se pueden encontrar muchas más disposiciones según el nivel de complejidad de la edificación.

### a) Configuración Diagonal

La configuración diagonal concéntrica como en la figura 2.30, es la más económica, debido a que sólo requiere de perfiles metálicos que pueden ser tubulares, ya que permiten agilizar la obtención de las propiedades respetando la normativa ASTM A36, para la instalación de los disipadores. Sin embargo, esta disposición 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  $f = \cos(\theta)$ .

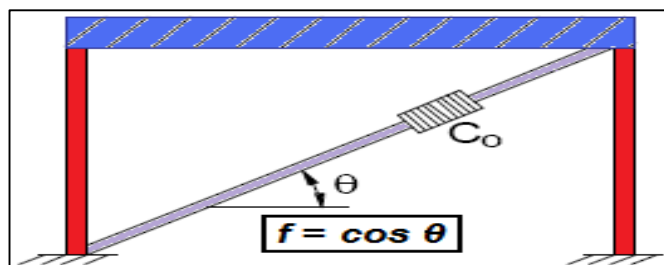
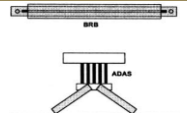
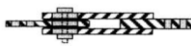


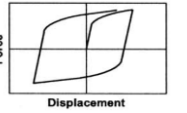
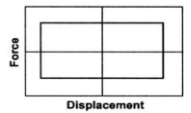
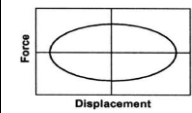
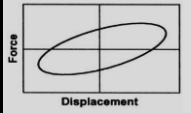
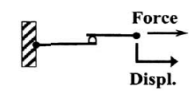
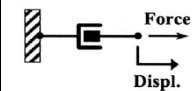
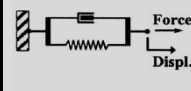


Figura 2.30. Configuración Diagonal (Fuente Symans et al., 2002: Seismic Protective Systems: Passive Energy Dissipation) comentario: este modelo es el más económico, aunque en más efectivo en Perú seguiría siendo la disposición chevron.

A continuación, la tabla 2.5 muestra un resumen de los disipadores ya explicados en el presente capítulo.

Tabla 2.5

*Tipos de disipadores Pasivos de Energía*

TIPOS DE DISIPADORES PASIVOS DE ENERGIA				
	METÁLICOS	FRICCIONANTES	DE FLUIDOS VISCOSOS	VISCO-ELÁSTICOS
Modelo básico				
Comportamiento histerético idealizado				
Modelo mecánico idealizado				
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Insensibles a la temperatura ambiente.</li> <li>• Confiables a largo plazo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Energía disipada por ciclo es elevada</li> <li>• Insensibles a la temperatura ambiente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se activan a desplazamientos pequeños.</li> <li>• Propiedades independientes generalmente de la frecuencia y temperatura ambiente.</li> <li>• Mínima fuerza de restauración necesaria.</li> <li>• Modelamiento del disipador es simplificado, si se considera amortiguamiento lineal.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se activan a desplazamientos pequeños.</li> <li>• Proporciona fuerzas de restauración.</li> <li>• Comportamiento lineal, que lleva a un modelamiento simplificado del disipador.</li> </ul>
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Daños en los dispositivos luego de un sismo. Pueden necesitar reemplazo.</li> <li>• Comportamiento no lineal, requiere análisis no lineal.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coeficiente de fricción puede cambiar en el tiempo.</li> <li>• Comportamiento no lineal, requiere análisis no lineal.</li> <li>• Deformaciones permanentes si no se proporciona mecanismos de fuerza de restauración.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Posibles fugas de líquido viscoso.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidad de deformación limitada.</li> <li>• Propiedades dependientes de la frecuencia y temperatura ambiente.</li> <li>• Posible desprendimiento del material VE (problema de confiabilidad).</li> </ul>

(Fuente Symans et al., 2008) comentario: el cuadro trata de resumir de forma didáctica los tipos de disipadores ya vistos en páginas anteriores, además nos da una idea general del modelo matemático empleado en cada uno de ellos.

## 2.2.8. Dinámica estructural

### a) Sistemas de 1 grado de libertad amortiguados

En los países con alto riesgo sísmico, como el Perú, el ingeniero civil debe dominar los conceptos de la dinámica estructural, debido a la inminente amenaza a la que sus edificaciones podrían ser sometidas frente a movimientos bruscos e impredecibles, producto de la aceleración del terreno durante un evento sísmico. Es, por lo tanto, el comportamiento dinámico de suma importancia para el diseñador, de tal forma que le permite comprender y predecir con cierto nivel de exactitud la

respuesta de la edificación frente de las diversas solicitaciones externas existentes de interés.

Para el estudio de la dinámica de estructuras, se idealiza un pórtico de un piso que se desplaza sólo en su dirección horizontal que recibe el nombre de Sistema de 1 Grado de Libertad (GDL). La particularidad de estos sistemas es que idealmente concentran la mayor parte de su masa a nivel del piso mientras que se apoyan en elementos que le aportan prácticamente toda la rigidez, pero su masa es despreciable. A su vez, los Sistemas de 1GDL se pueden clasificar de 2 maneras: los no amortiguados y los amortiguados.

Para comenzar nos enfocaremos en los Sistemas 1GDL amortiguados, por el hecho de que las edificaciones sometidas a excitaciones externas no vibran indefinidamente debido a la presencia de ciertas fuerzas internas, que paulatinamente disminuyen la amplitud de las oscilaciones hasta un punto en que la estructura regresa a su posición de equilibrio. Tal propiedad se conoce como amortiguamiento (viscoso y friccional) y de ello se hablará más adelante.

Hay que tener en cuenta que la presente tesis utilizará la notación newtoniana en las ecuaciones diferenciales por ser más conveniente tipográficamente.

### b) Comportamiento dinámico de las estructuras

“El número de desplazamientos independientes requeridos para definir las posiciones desplazadas de todas las masas con relación a su posición original es llamado el número de grados (GDL) de libertad para análisis dinámico.” (Chopra, 2014, p. 7)

Teniendo claro esta premisa, continuamos que para estudiar las propiedades y el comportamiento dinámico de las estructuras se puede recurrir a la siguiente idealización.

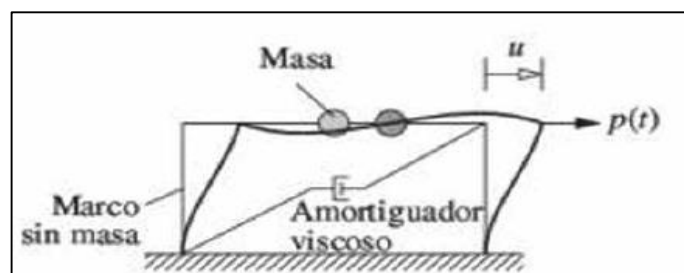


Figura 2.31. Componentes de un Sistemas de 1 Grado de Libertad Amortiguado (Fuente Chopra, 2014: Dinámica estructural) comentario: sistema clásico de despiece de elementos que intervienen en el comportamiento dinámico.

Basándose en lo dicho anteriormente y aplicando la segunda Ley de Newton ( $\sum F = ma$ ).



## a.1) Vibración Libre Amortiguada

Fuerza excitadora  $p(t) = 0$ 

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0 \quad (2.1)$$

$$f_I + f_D + f_S = 0$$

## a.2) Vibración Forzada Amortiguada

Fuerza excitadora  $p(t) = 0$ 

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad (2.2)$$

$$f_I + f_D + f_S = p(t)$$

Independientemente del tipo de vibración, se puede observar que, en ambos casos, dentro de la formulación de sus ecuaciones, se generan 3 tipos de fuerzas que, sumadas, se oponen al movimiento y que tienen una relación de dependencia directa con ciertas propiedades intrínsecas de la estructura, como la masa ( $m$ ), la rigidez ( $k$ ) y el amortiguamiento ( $c$ ). Dichas fuerzas se describen a continuación en la figura 2.32.

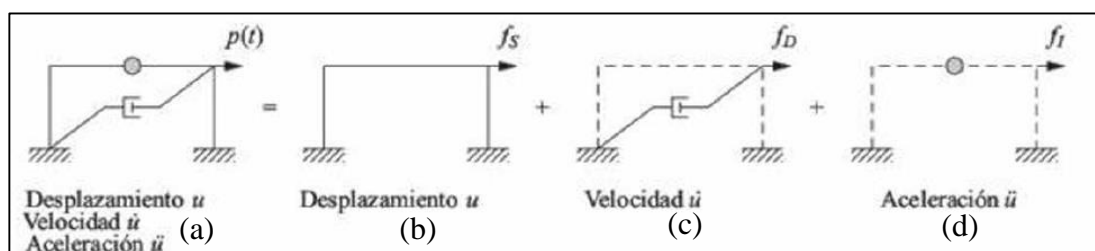


Figura 2.32. (a) Sistema; (b) componente de rigidez; (c) componente de amortiguamiento; (d) componente de masa (Fuente Chopra, 2014: Dinámica estructural)

**c) FI (Fuerza de Inercia)**

La fuerza de inercia basa su teoría en la mecánica Newtoniana, específicamente en la segunda Ley de Newton.

$$f_I = m\ddot{u} \quad (2.3)$$

**d) FD (Fuerza de Amortiguamiento)**

El proceso por el cual la vibración disminuye en amplitud se llama amortiguamiento. Estos son debidos a incremento de temperatura y por fricción interna cuando un sólido es deformado. El coeficiente de amortiguamiento "c" es seleccionado de una forma aproximada al que tendría una estructura real obedeciendo a un rango de 5% según normativas.

$$f_D = c\dot{u} \quad (2.4)$$

**e) FS (Fuerza Elástica)**

Se considerará la ley de Hooke para este caso, donde relación fuerza-desplazamiento será lineal para pequeñas deformaciones, pero se volverá no-lineal para mayores deformaciones.

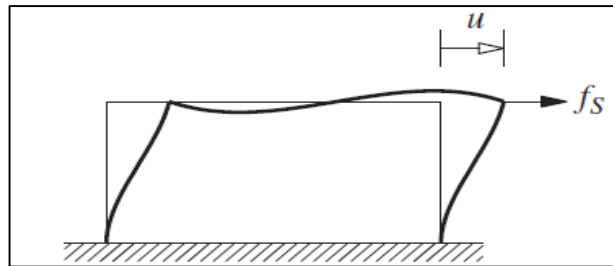


Figura 2.33. Pórtico sometido a una fuerza estática lateral ( $f_s$ ) a lo largo de GDL  $u$  (Fuente Chopra, 2014: Dinámica estructural) comentario: este componente es también llamado fuerza restitutiva.

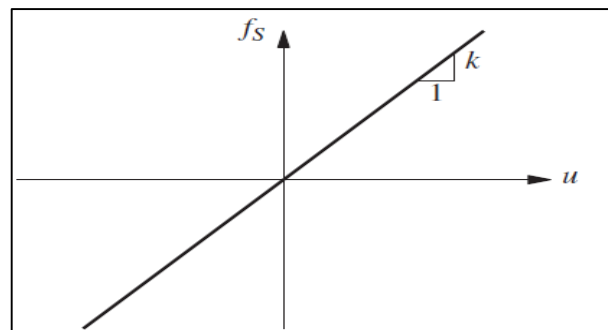


Figura 2.34. Relación lineal entre el desplazamiento  $u$  y la fuerza  $f_s$  (Fuente Chopra, 2014: Dinámica estructural) comentario: relación lineal de la rigidez respecto de la fuerza externa.

Para el caso de los sistemas lineales, la relación entre la fuerza elástica y el desplazamiento  $u$ , se puede expresar de la siguiente forma:

$$f_s = ku \quad (2.5)$$

Donde la constante de proporcionalidad es  $k$  definida como la rigidez lateral del sistema, la cual tiene unidades de Fuerza/longitud.

#### f) Sistemas de 1 grado de libertad amortiguados en vibración libre

De acuerdo con Chopra (2014), se puede decir que una estructura se encuentra en vibración libre, cuando es perturbada desde su posición de equilibrio estático y luego se le permite vibrar sin ninguna fuerza dinámica excitadora.

Existen 2 formas en que se puede perturbar la posición de equilibrio estático de una estructura para hacerla vibrar de manera libre:

1. Asignándole un desplazamiento inicial y soltándola.

## 2. Por medio de un impulso.

Sistemas de 1 GDL Amortiguados en vibración libre:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0 \quad (2.6)$$

Se trata de una ecuación diferencial ordinaria, de segundo orden, lineal y homogénea, donde la incógnita es el desplazamiento ( $u$ ).

Previo a la resolución de la ecuación, se procede a dividir para la masa a ambos lados, con lo cual se obtiene la siguiente expresión:

$$\ddot{u} + 2\xi\omega_n\dot{u} + \omega_n^2u = 0 \quad (2.7)$$

Donde:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \xi = \frac{c}{2m\omega_n} = \frac{c}{c_{cr}}$$

Al reescribir la ecuación (2.6) y obtener (2.7), se observan nuevos términos que son de suma importancia dentro de la dinámica estructural, como por ejemplo,  $\omega_n$  se conoce como la frecuencia natural de vibración de la estructura o del sistema que se esté analizando, la cual está en función de la rigidez y la masa de la estructura.

Dada la frecuencia natural de la estructura, se puede hallar el periodo natural de vibración ( $T_n$ ), el cual se define como el tiempo que le toma al sistema para completar un ciclo de vibración libre y se obtiene mediante la siguiente relación:

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad (2.8)$$

A partir del periodo natural se puede definir a la frecuencia cíclica natural ( $f_n$ ) de vibración con la siguiente expresión:

$$f_n = \frac{1}{T_n} \quad (2.9)$$

Las propiedades naturales  $\omega_n$ ,  $T_n$  y  $f_n$  dependen solo de la masa y la rigidez de la estructura.

Regresando a la ecuación (2.7), aún existen dos términos de importancia por mencionar, el primero que se conoce como la razón de amortiguamiento o fracción de amortiguamiento crítico ( $\xi$ ), que es adimensional, y el segundo es el coeficiente de amortiguamiento crítico ( $c_{cr}$ ).

Según Chopra (2014):

- Si,  $c < c_{cr}$  o  $\xi < 1$ , A estos sistemas se los denomina como sub-amortiguados.
- Si,  $c = c_{cr}$  o  $\xi = 1$ . A estos sistemas se los denomina como críticamente amortiguados.
- Si,  $c > c_{cr}$  o  $\xi > 1$ . A estos sistemas se los denomina como sobre-amortiguados.

En la figura siguiente se muestra de forma gráfica lo explicado anteriormente, respecto a los diferentes casos de movimiento.

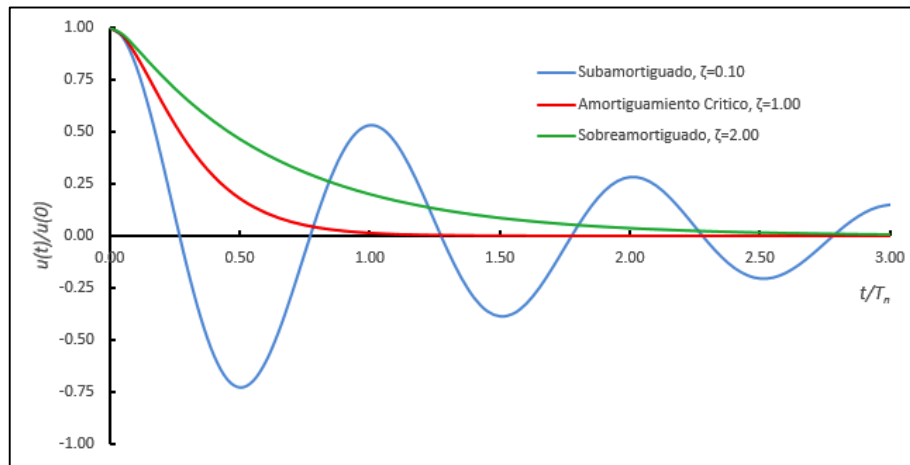


Figura 2.35. Vibración Libre Sistemas 1GDL Sub-amortiguados, Críticamente amortiguado y Sobre-amortiguados (Fuente Chopra, 2014: Dinámica estructural) comentario: las edificaciones se encuentran siempre en el caso de subamortiguamiento.

Antes de proceder con la solución de la ecuación (2.7), es necesario mencionar que este trabajo hará énfasis sólo en las estructuras o sistemas sub-amortiguados, debido a que las estructuras de interés, caen dentro de esa clasificación. Como acotación a lo antes dicho, de acuerdo con Villarreal & Oviedo (2009), el amortiguamiento viscoso inherente equivalente al 2-5% del amortiguamiento crítico que ha tenido gran aceptación dentro de la práctica para el análisis de la respuesta lineal de edificios típicos, inclusive el programa ETABS maneja un 5% (por defecto) de amortiguamiento al momento de evaluar el espectro de la NTE E030.

La solución de la ecuación, sujeta a condiciones iniciales o de borde, diferentes de cero,  $u_0$  y  $\dot{u}_0$ , permite obtener el desplazamiento ( $u$ ) en función del tiempo ( $t$ ) de un Sistema de 1 GDL Amortiguado en Vibración Libre, mediante la siguiente expresión:

$$u(t) = e^{-\xi\omega_n t} \left[ u(0) \cos \omega_D t + \frac{\dot{u}(0) + \xi\omega_n u(0)}{\omega_D} \sin \omega_D t \right] \quad (2.10)$$

Donde:

$$\omega_D = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (2.11)$$

El término  $\omega_D$  se denomina frecuencia de vibración amortiguada, el cual está en función de la frecuencia de vibración natural ( $\omega_n$ ) y la fracción de amortiguamiento crítico ( $\xi$ ). De la misma forma en que el periodo natural de vibración fue definido, ocurre con el periodo de vibración amortiguado:

$$T_D = \frac{2\pi}{\omega_D} \quad (2.12)$$

Así mismo, existe una forma en que uno puede relacionar el periodo de vibración amortiguado ( $T_D$ ) con el periodo natural de vibración ( $T_n$ ) y la razón de amortiguamiento del sistema ( $\xi$ ). Tal relación se expresa de la siguiente manera:

$$T_D = \frac{T_n}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad (2.13)$$

Analizando la ecuación (2.10), se puede decir que, evaluando para diferentes tiempos ( $t$ ), la amplitud de los desplazamientos irá decreciendo conforme va completándose cada ciclo de movimiento y que el decremento de esa amplitud es exponencial con el tiempo, como se muestra en la figura a continuación.

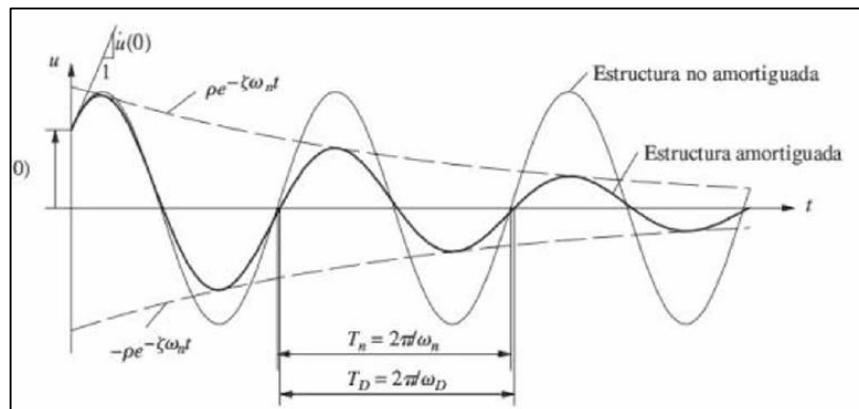


Figura 2.36. Decremento exponencial de la amplitud del desplazamiento debido al amortiguamiento. Consecuencias del amortiguamiento (Fuente Chopra, 2014: Dinámica estructural) comentario: esta disminución no es total, por lo que se complementa con un amortiguamiento friccional intrínseco e interno de la estructura.

### 2.2.9. Energía disipada por amortiguamiento viscoso

La ecuación diferencial de un sistema de un grado de libertad linealmente elástico con amortiguamiento viscoso lineal sometido a una fuerza armónica  $p(t)$  es:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) = p_0 \sin \omega t \quad (2.14)$$

Donde  $m$ ,  $c$  y  $k$  son respectivamente la masa, el coeficiente de amortiguamiento viscoso y la rigidez lateral del sistema;  $p_0$  es la amplitud de la fuerza y  $\omega$  es la frecuencia de excitación.

La componente estable de la respuesta de este sistema es

$$u(t) = u_0 \sin(\omega t - \phi) \quad (2.15)$$

Donde  $u_0$  es la amplitud del desplazamiento y  $\phi$  es el ángulo de fase.

Considerando esta componente estable, la energía disipada por el amortiguamiento en un ciclo de vibración armónica es

$$E_D = \int f_D du = \int_0^{2\pi/\omega} (c\dot{u})\dot{u} dt = \int_0^{2\pi/\omega} c\dot{u}^2 dt$$

$$= c \int_0^{2\pi/\omega} [\omega u_0 \cos(\omega t - \phi)]^2 dt = \pi c \omega u_0^2 \quad (2.16)$$

La interpretación gráfica de la energía disipada por un amortiguador viscoso lineal es

$$f_D = c\dot{u} = c\omega u_0 \cos(\omega t - \phi) = c\omega \sqrt{u_0^2 - u_0^2 \sin^2(\omega t - \phi)}$$

$$= c\omega \sqrt{u_0^2 - u^2(t)} = \left(\frac{u}{u_0}\right)^2 + \left(\frac{f_D}{c\omega u_0}\right)^2 = 1 \quad (2.17)$$

que es la ecuación de la elipse. Esta curva se denomina lazo histerético y el área limitada por el lazo es la misma que la energía disipada por el amortiguador.

La fuerza total resistente del sistema es

$$f_S + f_D = ku + c\omega \sqrt{u_0^2 - u^2(t)} \quad (2.18)$$

La gráfica de  $f_S + f_D$  versus  $u$  es la elipse rotada debido al término  $ku$  en la ecuación (2.18). La fuerza resistente total es la que puede ser medida en un experimento, la figura 2.37 muestra una típica curva histerética.

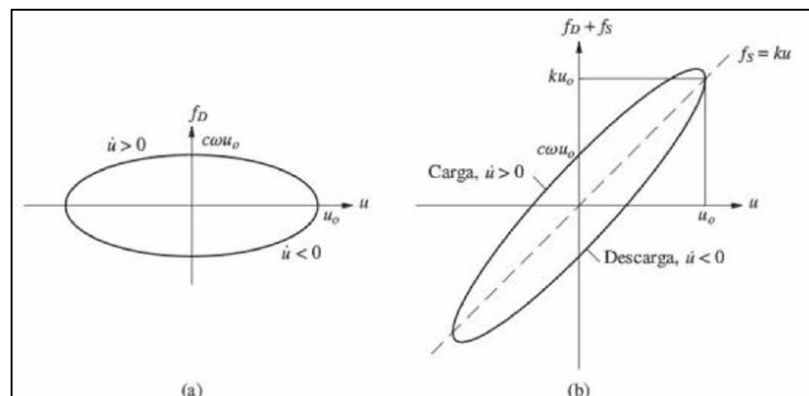


Figura 2.37. Lazos de histéresis para (a) un amortiguador viscoso, (b) un resorte y un amortiguador viscoso en paralelo (Fuente Chopra, 2007: Dinámica de estructuras) comentario: la pendiente positiva será proporcionada por la rigidez del sistema brazo-disipador.

$$E_S = \int f_S du = \int_0^{2\pi/\omega} (ku)\dot{u} dt$$

$$\int_0^{2\pi/\omega} k[u_0 \sin(\omega t - \phi)][\omega u_0 \cos(\omega t - \phi)] dt = 0 \quad (2.19)$$

Por lo tanto, en la Figura 2.38.b. el área encerrada por la elipse rotada sigue siendo la energía disipada por el amortiguador.

Por definición, el amortiguamiento de un sistema de un grado de libertad es la fracción del amortiguamiento crítico

$$\xi = \frac{c}{c_{cr}} = \frac{c}{2m\omega_n} \quad (2.20)$$

donde  $\omega_n$  es la frecuencia natural del sistema,

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.21)$$

Reemplazando las ecuaciones (2.21) y (2.22) en (2.16), la energía disipada por el amortiguador puede expresarse como

$$E_D = \pi c \omega u_0^2 = 2\pi \xi \frac{\omega}{\omega_n} k u_0^2 \quad (2.22)$$

Puesto que la energía de deformación elástica del sistema es

$$E_{S0} = \frac{k u_0^2}{2} \quad (2.23)$$

Finalmente, la energía disipada puede expresarse como

$$E_D = 4\pi \xi \frac{\omega}{\omega_n} E_{S0} \quad (2.24)$$

Una forma común de definir el amortiguamiento viscoso equivalente resulta de igualar la energía disipada en un ciclo de vibración de la estructura real con la energía disipada de un sistema viscoso equivalente. Por ejemplo, es posible determinar la relación fuerza-desplazamiento de una estructura real en estudio en un experimento bajo cargas cíclicas y con desplazamiento máximo  $u_0$ . En la Figura 2.38.b se muestra una forma hipotética de dicha relación. La energía disipada en la estructura en estudio es el área  $E_D$  encerrada por el lazo histerético de forma arbitraria.

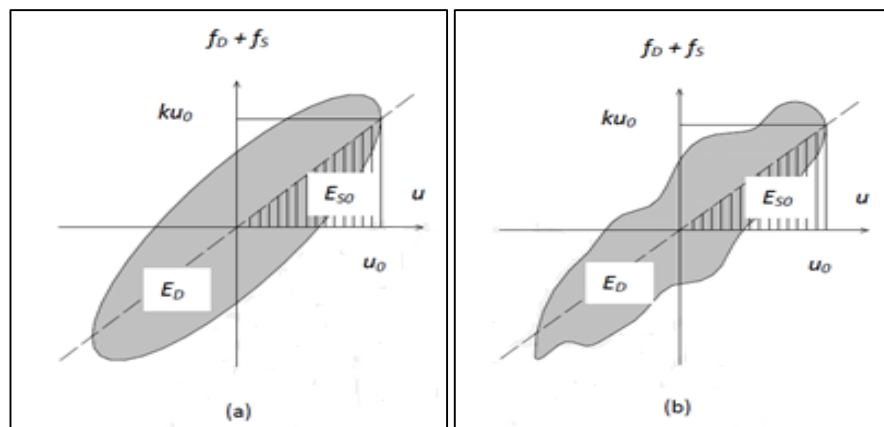


Figura 2.38. a) Energía disipada en un amortiguador viscoso lineal y energía de deformación elástica; b) Energía disipada en un ciclo de vibración en un experimento (Fuente Chopra, 2007: Dinámica de estructuras) comentario: esta curva o lazo de histeresis no es cíclico, ante carga y descarga, por lo que las propiedades de la estructura varían ante este fenómeno.

Al igualar la energía disipada de la estructura en estudio (ver figura 2.38.b) con la energía disipada de un sistema con amortiguamiento viscoso lineal (Ecuación 2.25), se obtiene el amortiguamiento equivalente del sistema:

$$E_D = 4\pi\xi_{eq} \frac{\omega}{\omega_n} E_{So} \rightarrow \xi_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{\omega}{\omega_n} \frac{E_D}{E_{So}} \quad (2.25)$$

Si el experimento tiende a la curva fuerza-deformación de la Figura 2.39.b, entonces  $\omega = \omega_n$  y la ecuación (2.25) se simplifica

$$\xi_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_{So}} \quad (2.26)$$

Está ampliamente aceptado que este procedimiento puede extenderse para modelar el amortiguamiento en sistemas con varios grados de libertad. Para cada modo de vibración natural del sistema se determina un amortiguamiento viscoso equivalente de tal manera que la energía disipada por amortiguamiento viscoso equivale a la energía real disipada en el sistema.

### 2.2.10. Amortiguamiento y curvas de histéresis

Como ya se vio, la energía disipada guarda relación estrecha con las curvas de histéresis arrojadas según el dispositivo empleado, por lo que a continuación en la figura 2.39 se mostrarán las respuestas histéricas típicas para cada disipador.

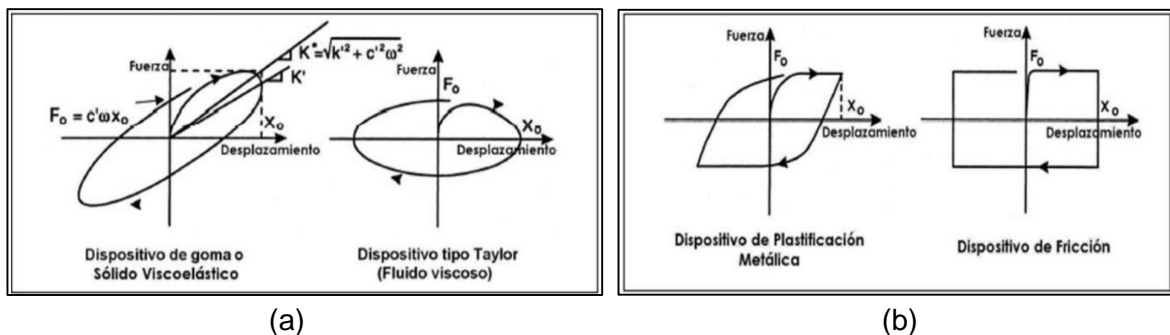


Figura 2.39. (a) Respuesta Histerética típica de disipadores viscoelásticos y de fluido viscoso; (b) Respuesta Histerética típica de dispositivos disipadores por plastificación metálica y de fricción (Fuente Constantinou, Soong y Dargush, 1998: Passive Energy Dissipation Systems for Structural Design and Retrofit) comentario: la forma de la curva definirá el correcto comportamiento del disipador, suele haber un cruce de comportamientos en DFV como DVE en algunas tesis.

Acotando que, aunque a mayores ciclos de carga mayor es la energía disipada, existe como efecto colateral la disminución de rigidez del sistema (sistema no lineal), debido al daño producido por las deformaciones excesivas.

### 2.2.11. Sistemas de varios grados de libertad

#### a) Frecuencias y modos de vibración naturales



La vibración libre de los sistemas lineales de VGDL, está regida por la ecuación (2.27) con  $p(t)=0$ , que en los sistemas sin amortiguamiento es:

$$M\ddot{u} + K_E u = 0 \quad (2.27)$$

La ecuación 2.27 representa N ecuaciones diferenciales homogéneas que se acoplan a través de la matriz de masa, la matriz de rigidez o ambas matrices.

Obteniendo las soluciones no triviales:

$$\det[K_E - \lambda M] = 0 \quad (2.28)$$

Al expandir el determinante se obtiene un polinomio de orden N en  $\lambda = \omega_n^2$ . La ecuación (2.28) se conoce como ecuación característica o ecuación de frecuencia. Esta ecuación tiene N raíces reales y positivas para  $\omega_n^2$  porque M y  $K_E$ , las matrices de masa y rigidez estructurales, son simétricas y positivas definidas, además en la ingeniería estructural suelen analizarse sistemas con matriz  $K_E$  y M en diagonal o banda, para el caso que analizaremos  $K_E$  será predominantemente diagonal y M diagonal.

La N raíces,  $\omega_n^2$  de la ecuación (2.28) determinan las N frecuencias naturales de vibración  $\omega_n = (1, 2, \dots, N)$ , dispuestas por convención en secuencia de menor a mayor ( $\omega_1 < \omega_2 < \dots < \omega_N$ ). Estas raíces de la ecuación característica se conocen también como valores propios, valores característicos o valores normales. En correspondencia a las N frecuencias de vibración natural  $\omega_n$  de un sistema de VGDL, existen N vectores independientes  $\phi_n$ , que son conocidos como los modos naturales de vibración. Estos vectores también se denominan vectores propios.

Matrices modal y espectral

$$\Phi = [\phi_{jn}] = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \dots & \phi_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{N1} & \dots & \phi_{NN} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

La matriz  $\Phi$  se llama matriz de modal para el problema de valor característico.

Los valores característicos N  $\omega_n^2$  pueden ensamblarse en una matriz diagonal  $\Omega^2$ , que se conoce como matriz espectral del problema de valor característico.

$$\Omega^2 = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \omega_N^2 \end{bmatrix}$$

Cada valor característico satisface la ecuación:

$$k\phi_n = m\phi_n\omega_n^2 \quad \text{o} \quad k\phi_n = m\phi_n\Omega^2 \quad (2.30)$$

Es importante tener en cuenta que los valores característicos y vectores característicos son también denominados autovalores y autovectores, o en su acepción al inglés eigenvalues o eigenvectors.

## b) Ortogonalidad de modos

Utilizaremos ahora una propiedad muy importante de los modos normales que nos permitirá simplificar cálculos de obtención de los modos de vibrar.

$$\phi_n^T k \phi_r = 0 \quad \phi_n^T m \phi_r = 0 \quad (2.31)$$

La ortogonalidad de los modos naturales implica que las siguientes matrices cuadradas son diagonales:

$$K \equiv \Phi^T k \Phi \quad M \equiv \Phi^T m \Phi \quad (2.32)$$

Donde los elementos de la diagonal son:

$$K_n = \phi_n^T k \phi_n \quad (33) \quad \text{y} \quad M_n = \phi_n^T m \phi_n \quad (2.34)$$

Como m y k son matrices positivas definidas, los elementos diagonales K y M son positivos y se relacionan mediante:

$$K_n = \omega_n^2 M_n \quad (2.35)$$

En los análisis teóricos y los programas de computación es común normalizar los modos de manera que  $M_n$  tenga valores unitarios. En este caso.

$$M_n = \phi_n^T m \phi_n = 1 \quad \Phi^T m \Phi = I \quad (2.36)$$

Donde I es la matriz identidad, con valores unitarios en su diagonal.

### 2.2.12. Amortiguamiento en estructuras

Ahora veremos cómo surge el planteamiento de nuestra matriz de amortiguamiento. No es práctico determinar los coeficientes de la matriz de amortiguamiento directamente a partir de las dimensiones estructurales, los tamaños de los elementos estructurales y las propiedades de amortiguamiento de los materiales estructurales utilizados. Por lo tanto, se definirán los tipos de amortiguamientos presentes en una estructura y posteriormente la naturaleza del amortiguamiento (clásico y no clásico).

#### a) Origen de las fuerzas de amortiguamiento

Las fuerzas de amortiguamiento están producidas en las estructuras por diversas causas, entre las que pueden citarse las siguientes (Timoshenko & Young; Barbat & Miguel Canet 1994):

1. Rozamiento entre superficies de deslizamiento, las cuales pueden estar secas o lubricadas; la fuerza de amortiguamiento, de acuerdo con la hipótesis de Coulumb, es proporcional a la fuerza normal a la superficie de contacto. La mencionada fuerza normal se considera constante e independiente e los desplazamientos y velocidades.
2. Amortiguamiento debido a la fricción interna del propio material de la estructura, debido principalmente a su imperfecta elasticidad, En este caso, el amortiguamiento es proporcional a la fuerza de recuperación y se le denomina amortiguamiento estructural.

3. Amortiguamiento debido a las vibraciones de la estructura situada en un medio exterior (en general gases o líquidos).

A menudo se usa en el cálculo dinámico de estructuras un amortiguamiento viscoso, basado en el modelo de Kelvin-Voigt y que es proporcional a la velocidad, denominado también amortiguamiento viscoso equivalente y se supone que produce la misma disipación de energía que el amortiguamiento real de la estructura. (Timoshenko et al. 1974)

#### b) Matriz de amortiguamiento clásico

El amortiguamiento clásico es una idealización apropiada si los mecanismos de amortiguamiento que se distribuyen en toda la estructura son los mismos.

#### c) Amortiguamiento proporcional de Rayleigh

Consideramos un amortiguamiento proporcional a la masa y otro proporcional a la rigidez, esto se ilustra en la figura 2.40.

$$c = a_0 m \quad (37.1) \quad \text{y} \quad c = a_1 k \quad (2.37)$$

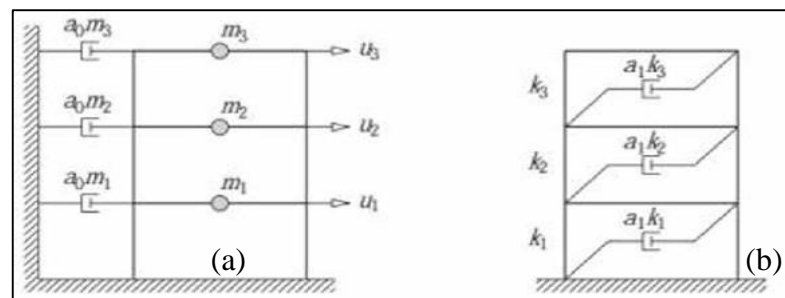


Figura 2.40. (a) Amortiguamiento proporcional a la masa; (b) Amortiguamiento proporcional a la rigidez (Fuente Chopra, 2014: Dinámica estructural) comentario: por separado ninguna de las dos formas se aproximaría a la realidad, ergo la superposición de ambas dará sin embargo una buena aproximación.

Por sí solos, ninguno de los dos modelos es apropiado para su aplicación práctica, es por eso que el amortiguamiento de Rayleigh resulta de la superposición de ambos casos como en la figura 2.41.

$$c = a_0 m + a_1 k \quad (2.38)$$

Donde:

$$a_0 = \xi \frac{2\omega_i \omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad a_1 = \xi \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \quad (2.39)$$

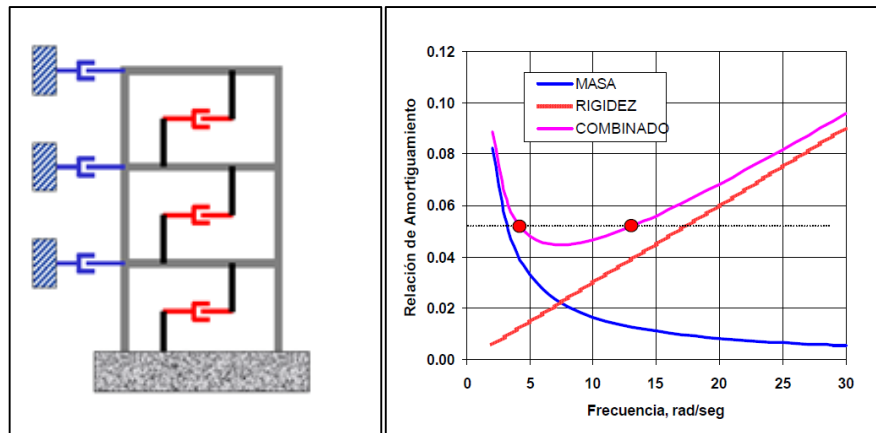


Figura 2.41. Amortiguamiento proporcional de Rayleigh (Fuente Toledo, 2017: Diplomado CING CIVIL) comentario: como se mencionó, la superposición de ambos efectos aproxima su comportamiento en la realidad, aunque aún sigue en investigación.

#### d) Amortiguamiento proporcional de Penzien – Wilson

$$[A] = [\Phi]^T [C_I] [\Phi] = \begin{bmatrix} 2\xi_1\omega_1 M_1 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 2\xi_n\omega_n M_n \end{bmatrix} = [\alpha] \quad (2.40)$$

Donde  $M_1 = \dots = M_n = 1$  si la matriz modal  $[\Phi]$  ha sido normalizada. Luego, se puede calcular  $[C]$  como:

$$[C_I] = [\Phi]^T [A] [\Phi]^{-1} \quad (2.41)$$

Haciendo uso de las propiedades ortogonales de los modos normales, podemos deducir una expresión más conveniente para calcular esa matriz de amortiguación del sistema como en la figura 2.42.

$$[C_I] = [M] \left( \sum_{n=1}^N \frac{2\xi_n\omega_n}{M_n} \{\phi\}_n \{\phi\}_n^T \right) [M] \quad (2.42)$$

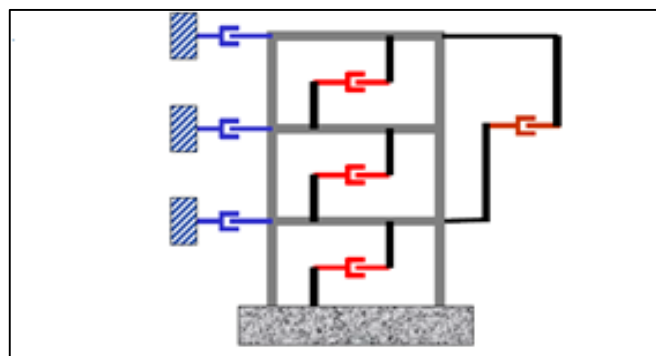


Figura 2.42. Amortiguamiento de Penzien y Wilson o superposición modal (Fuente Toledo, 2017: Diplomado CING CIVIL) comentario: este amortiguamiento acopla a las ecuaciones dinámicas, por tanto, es más complejo.

### e) Matriz de amortiguamiento no clásico

“El análisis modal clásico tampoco es aplicable al análisis de sistemas no lineales, aun cuando el amortiguamiento tenga una forma clásica”. (Chopra, 2014)

Por lo tanto en estructuras con dispositivos especiales para la disipación de energía o en sistemas con aislamiento en la base tal vez no sea bueno asumir un amortiguamiento clásico y probablemente se obtenga un amortiguamiento ligeramente no clásico. La matriz de amortiguamiento no clásico para el sistema se construye evaluando la primera matriz  $C_I$  de amortiguamiento clásico para la estructura por sí sola (sin los dispositivos especiales), a partir de las fracciones de amortiguamiento adecuadas para la estructura y utilizando los metodos descritos anteriormente. Después, las contribuciones de amortiguamiento de los dispositivos  $C_A$  inducen a un acoplamiento de la ecuación dinámica, para tal caso se pueden emplear los siguientes métodos como: integración explícita usando el solucionador de Newmark con iteración (Newton-Raphson), análisis no lineal rápido con empleo de vectores Ritz y el método modal de energía de deformación MES (Strain Energy Method), luego se ensamblan en una sola matriz  $C_T$  a fin de obtener la matriz de amortiguamiento para el sistema completo. A continuación se explicará de formas mas detallada lo expuesto en el parrafo anterior.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C_I]\{\dot{u}\} + [C_A]\{\dot{u}\} + \{F_S\} = \{P(t)\} \quad (2.43)$$

$[M]$ : Matriz de masa de la estructura.

$[C_I]$  : Matriz de amortiguamiento inherente de la estructura.

$[C_A]$  : Matriz de amortiguamiento adicional debido a la incorporacion de disipadores de energía.

$\{F_S\}$  : Fuerza restauradora (lineal o no lineal).

$\{P(t)\}$  : Vector de fuerzas actuantes que dependen del tiempo.

Adicionalmente a esta ecuación para casos de disipadores viscoelásticos se implementará una rigidez proporcionada por la interacción del brazo metalico con el DVE en serie. Para sistemas lineales  $\{F_S\} = [K_E]\{u\}$  y para reducir el esfuerzo de resolver el sistema de ecuaciones acoplados, se realiza la transformación de la ecuación 2.43 a coordendas modales.

$$\{u\} = [\Phi]\{q\} \quad (2.44)$$

$[\Phi]$  : Matriz que contiene los modos de vibración de la estructura.

Los modos de vibración de la estructura se obtienen de resolver la ecuación 2.28.

$$\Omega^2 = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \omega_N^2 \end{bmatrix}$$

Sustituyendo 2.44 en 2.43 y pre multiplicando por  $[\Phi]^T$ , se tiene:

$$[\Phi]^T [M][\Phi]\{\ddot{q}\} + [\Phi]^T [C_I][\Phi]\{\dot{q}\} + [\Phi]^T [C_A][\Phi]\{\dot{q}\} + [\Phi]^T [K_E][\Phi]\{q\} = [\Phi]^T \{P_{(t)}\}$$

$$[M^*]\{\ddot{q}\} + [C_I^*]\{\dot{q}\} + [C_A^*]\{\dot{q}\} + [K^*]\{q\} = \{P_{(t)}^*\} \quad (2.45)$$

$[M^*] = [\Phi]^T [M][\Phi]$ : Matriz de masa generalizada.

$[C_I^*] = [\Phi]^T [C_I][\Phi]$ : Matriz de amortiguamiento generalizado.

$[K^*] = [\Phi]^T [K_E][\Phi]$ : Matriz de rigidez generalizada.

$\{P_{(t)}^*\} = [\Phi]^T \{P_{(t)}\}$ : Vector de fuerza generalizada.

Si se tuviera un amortiguamiento no clásico, el término  $[\Phi]^T [C_A][\Phi]$  podría no desacoplarse y sería conveniente para resolver el sistema de ecuaciones, pasar este término al lado derecho de la expresión.

$$[M^*]\{\ddot{q}\} + [C_I^*]\{\dot{q}\} + [K^*]\{q\} = \{P_{(t)}^*\} - [C_A^*]\{\dot{q}\} \quad (2.46)$$

Los términos a la izquierda se encuentran desacoplados y los términos a la derecha se encuentran acoplados.

$[C_A^*] = [\Phi]^T [C_A][\Phi]$ : Matriz de amortiguamiento adicional.

En la figura 2.43 se han desarrollado cada una de las expresiones matriciales a para un marco o pórtico de 3 grados de libertad con amortiguamiento viscoso equivalente.

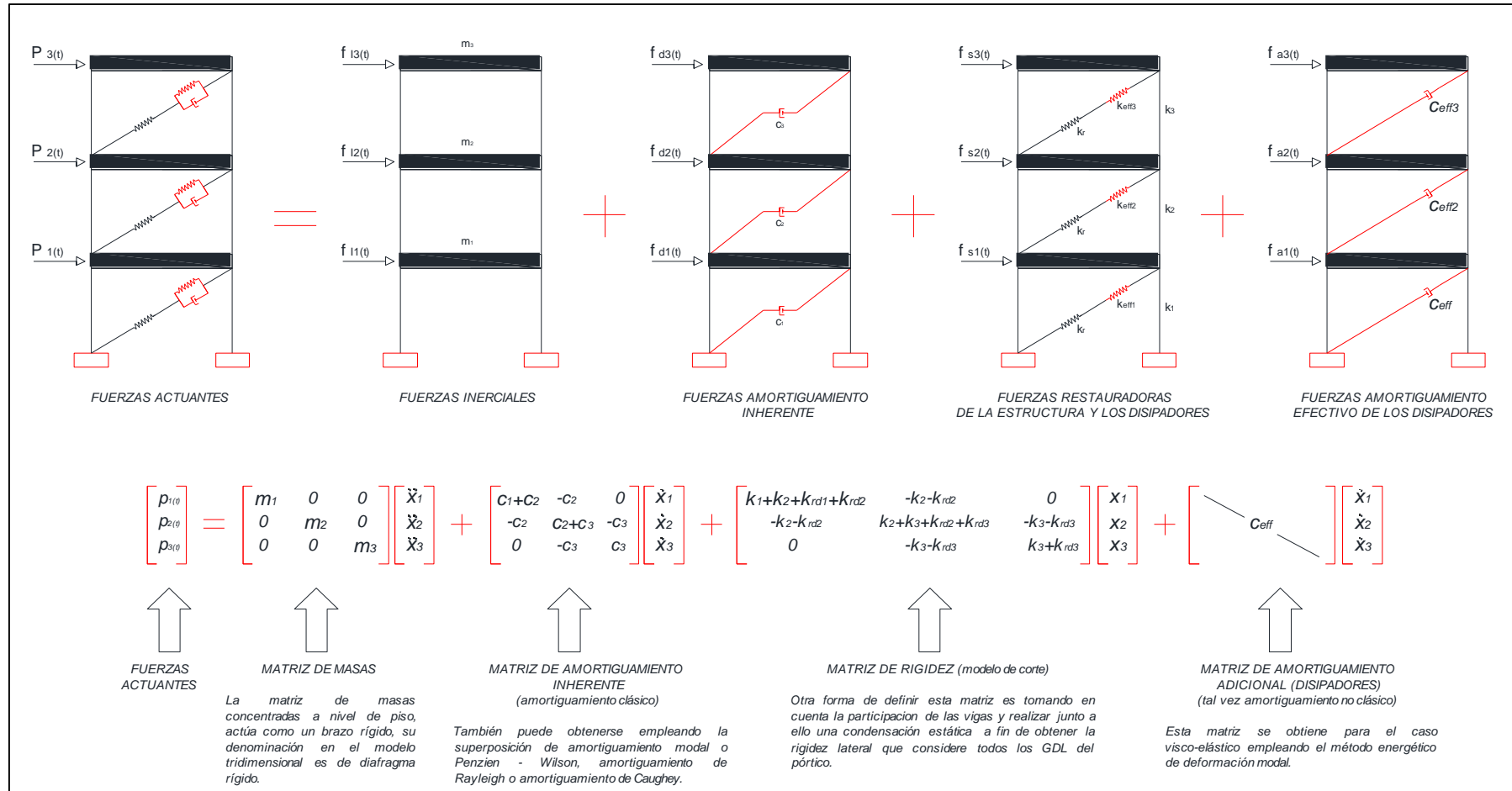
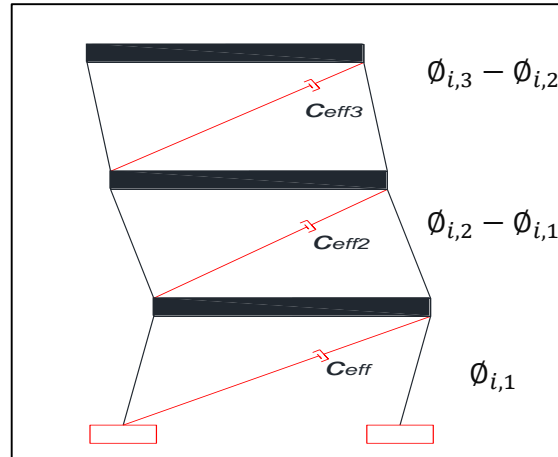


Figura 2.43. Desarrollo matricial de un pórtico con disipadores visco-elásticos de tres GDL (Fuente, elaboración propia) comentario: se trata de presentar de forma didáctica la descomposición del sistema matricial de un pórtico con implementación de disipadores de energía visco-elásticos.

### f) Matriz de amortiguamiento para el caso plano

Para definir la matriz  $[C_A]$ , se decide reemplazar los disipadores visco-elásticos por amortiguadores lineales equivalentes y emplear el (MSE), si es de amortiguamiento cercanamente proporcional. La figura 2.44 es una forma modal.



**Modo i**  $\omega_i, \phi_i$

Figura 2.44. Deformación modal de amortiguadores para el modo i (Fuente: elaboración propia) comentario: a manera didáctica la figura nos muestra la forma de vibrar y descomposición modal que se puede presentar.

$$\xi_i^* = \frac{\sum_{k=1}^N C_k (\phi_{i,k} - \phi_{i,k-1})^2}{2\omega_i \{\phi_i\}^T [M] \{\phi_i\}} \quad (2.47)$$

Luego:

$$[C_A] = [M] \left( \sum_{i=1}^n \frac{2\xi_i^* \omega_i}{\{\phi_i\}^T [M] \{\phi_i\}} \right) \{\phi_i\}^T \{\phi_i\} [M]$$

$C_k$  : Es el amortiguamiento viscoso equivalente del disipador metálico del piso

$\xi_i^*$  : Coeficiente de amortiguamiento de la estructura con amortiguadores para todos los n modos empleados.

Finalmente, el sistema de ecuaciones (ecuación 2.46), se puede resolver mediante los algoritmos de Newmark o mediante las ecuaciones de espacio-estado, las cuales se verán en la parte de cálculo para el cual se utilizó el programa Mathcad 14.

A continuación, se presenta la figura 2.45 que nos asegura que el MSE se acerca al caso de amortiguamiento modal clásico, la relación de amortiguamiento vs frecuencia no difiere significativamente del amortiguamiento proporcional.



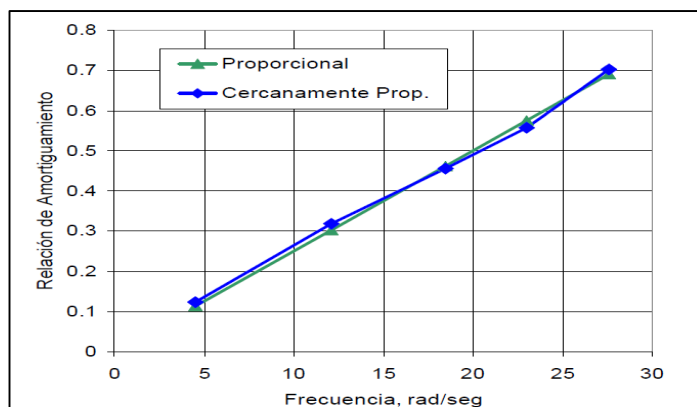


Figura 2.45. Relaciones de amortiguamiento modal a partir del MSE para la distribución de amortiguamiento cercanamente proporcional (Fuente: Toledo, 2017: Diplomado CING CIVIL) comentario: la figura nos muestra una confiabilidad al ser los resultados con este método muy cercano a los exactos desarrollados por el computador.

### 2.2.13. Modelo de marco tipo corte

Para la reducción en la complejidad del cálculo manual se utilizará este modelo de “edificio cortante” o “modelo tipo corte” (ver figura 2.46), denominado así por el comportamiento similar que muestra frente a fuerzas que solo originan desplazamiento en un eje (por lo general el eje horizontal).

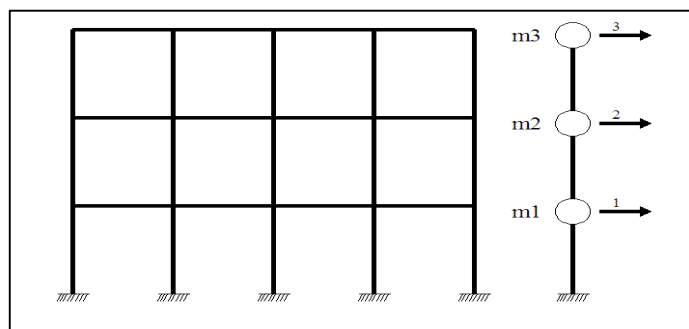


Figura 2.46. Modelo de masas concentradas de un pórtico plano (Fuente Costa Castro, 2007: Tesis Maestría “Análisis de estructuras con disipadores de energía visco-elásticos usando espectros y acelerogramas”) comentario: este modelo presenta más rigidez que uno unido mediante un elemento frame horizontal flexible.

Los pórticos planos de la estructura se idealizan mediante diafragmas rígidos en los pisos, la masa que se concentra a nivel de las losas, que se consideran infinitamente rígidas en su plano  $EI=\infty$  y las columnas sólo aportan rigidez  $EA=\infty$ ,

pero no masa, de esta forma el sistema queda definido por un grado de libertad por planta, asociado a la traslación horizontal respecto a la cimentación del edificio, la cual se considerará como perfectamente empotrada.

Es menester indicar que existe otro modelo de estructura, denominado modelo de acoplamiento lejano, el cual se deja al lector investigue puesto que en la presente tesis todos los elementos se encuentran desacoplados y no es necesario su utilización.

Con lo expuesto anteriormente, ya no será necesario utilizar el método de condensación estática para la determinación de la matriz de rigidez lateral, sino más bien, utilizar el siguiente modelo de matriz de rigidez de ancho de banda determinado, que es el adecuado para el tipo de análisis que se está ejecutando.

$$K := \begin{pmatrix} K_1 + K_2 & -K_2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -K_2 & K_2 + K_3 & -K_3 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -K_3 & K_3 + K_4 & -K_4 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & -K_4 & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & K_{n-1} + K_n & -K_n \\ 0 & \dots & 0 & 0 & -K_n & K_n \end{pmatrix}$$

$$M := \begin{pmatrix} M_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & M_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & M_n \end{pmatrix}$$

Obteniendo así una matriz de rigidez predominantemente diagonal y una matriz de masas diagonal, también podría utilizarse una matriz de masa en banda arrojando otra forma de análisis, pero este no es el caso, estas matrices son de n GDL.

Como acápite a esta parte recalamos que toda estructura posee un coeficiente de amortiguamiento, el cual es prácticamente despreciable, pero es tomado en cuenta en el NTE-E030 de forma implícita al espectro de respuestas ( $\xi=5\%$ ), pero si esta estructura es reforzada por un sistema de disipación de energía, tendrá un coeficiente de amortiguamiento que será considerable y se regirá a procedimientos de la normativa ASCE 7-10 según indicaciones de la E030.

#### 2.2.14. Comportamiento dinámico de un disipador visco-elástico

Los disipadores de tipo sólido visco-elásticos consisten generalmente en sólidos elastoméricos o sustancias vidriosas que disipan energía cuando están sujetas a deformación por corte. Por su naturaleza los sólidos visco-elásticos exhiben tanto elasticidad como viscosidad, es decir dependen del desplazamiento y de la

velocidad. Ensayos experimentales por ejemplo realizados por Bergman y Hanson (1993) han demostrado que, bajo ciertas condiciones, el comportamiento de estos disipadores puede ser modelados utilizando valga la redundancia el modelo de Kelvin-Voigt, la figura 2.47 ilustra este hecho.

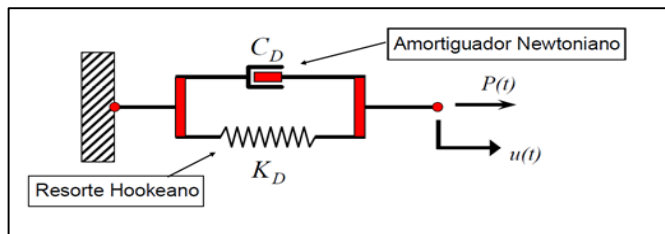


Figura 2.47. Modelo de Kelvin-Voigt (Fuente I. Romero, 2016: Mecánica de sólidos) comentario: existen otros modelos más sofisticados pero este modelo se ajusta bastante bien para los fines de la presente investigación.

$$P(t) = K_d u(t) + C_d \dot{u}(t) \quad (2.48)$$

Donde:

$P(t)$  = Fuerza en el amortiguador.

$K_d$  = Rigidez del disipador.

$C_d$  = Coeficiente de amortiguamiento del disipador.

$u(t)$  = Deformación axial.

$\dot{u}(t)$  = Velocidad axial.

Ahora asumiendo la diagonal de acero que contendría al disipador, nuestro modelo matemático quedaría expresado como la figura 2.48.

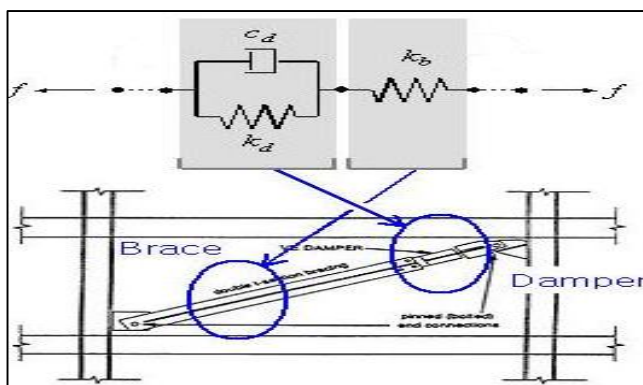


Figura 2.48. Modelo de la diagonal con disipador ensamblada (Fuente: manual MIDAS) comentario: un modelo matemático idealizado para estos tipos de conexión como la sumatoria de los valores inversos, sistema en serie.

### a) Visco-elasticidad

Como se explicó anteriormente el modelo de Kelvin-Voigt está conformado en paralelo por un resorte o muelle y un apagador o amortiguador, donde el muelle representa la parte elástica y el amortiguador la parte viscosa.

La incorporación de estos efectos complica las leyes constitutivas del material, pero permiten modelar con más precisión los materiales reales, por lo tanto, la visco-elasticidad supone una elaboración de la respuesta elástica que incorpora los efectos de dependencia de la velocidad de deformación e historia. Estos efectos son imprescindibles para poder modelar sólidos que poseen fluencia y relajación, dos comportamientos fundamentales en los polímeros, los suelos e incluso el hormigón.

La forma más sencilla de abordar la visco-elasticidad es mediante modelos reológicos. Este tipo de idealización extiende el concepto del resorte y permite aproximarse de manera sencilla e intuitiva al comportamiento visco-elástico tensorial.

Antes de comenzar el estudio de la respuesta visco-elástica es necesario mencionar el papel fundamental que juega la temperatura como modulador de la respuesta, especialmente en los polímeros. Estos materiales tienen una temperatura, la llamada temperatura de transición vítrea, por debajo de la cual se comportan de manera frágil y no muestran ninguno de los comportamientos característicos de los materiales visco-elásticos.

Por encima de esta temperatura, la respuesta reológica aparece y además es muy sensible al valor de la temperatura.

Como se mencionó, la fluencia y la relajación, son fundamentales en el comportamiento de los sólidos, y no pueden modelarse con leyes constitutivas elásticas, recordemos la ecuación 2.48.

$$P(t) = K_d u(t) + C_d \dot{u}(t)$$

Esta ecuación explica tres fenómenos de largo plazo: fluencia, relajación y recuperación.

### b) Comportamiento de un material visco-elástico sujeto a una fuerza sinusoidal

Cuando un material visco-elástico se encuentra bajo una fuerza sinusoidal con frecuencia  $\omega$ , el esfuerzo de cortante  $\tau(t)$  y la deformación por cortante  $\gamma(t)$  oscilan a la misma frecuencia  $\omega$  pero generalmente desfasados a un ángulo  $\delta$ , siguiendo la forma:

$$\tau(t) = \tau_0 \sin(\omega t + \delta) \qquad \gamma(t) = \gamma_0 \sin \omega t \qquad (2.49)$$

Tal como se observa en la Figura 2.49, donde  $\tau_0$  y  $\gamma_0$  son el máximo esfuerzo de cortante y la máxima deformación por cortante respectivamente; y  $\delta$  es el ángulo de desfase.

La curva de esfuerzo y desplazamiento no coinciden siendo de cierta manera asincrónicas y que solo una parte de la energía almacenada por desplazamiento es recuperada una vez que se remueve la fuerza sinusoidal, mientras la energía que queda es disipada en forma de calor.

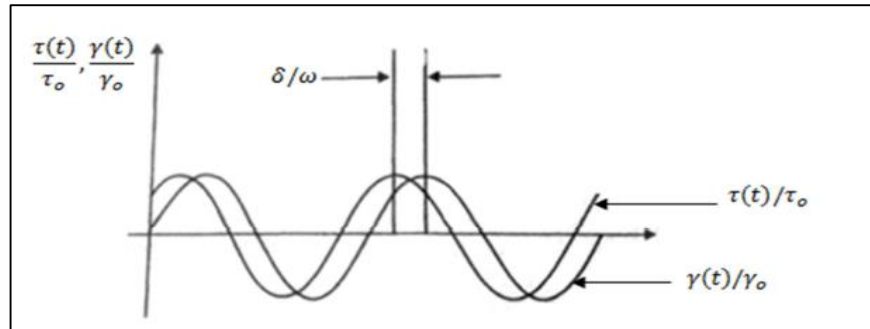


Figura 2.49. Esfuerzo y deformación debido a una carga sinusoidal (Fuente Soong, Dargush, 1997) comentario: por naturaleza siempre se encuentran estos defectos desfasados.

El comportamiento de los materiales visco-elásticos es caracterizado generalmente por el módulo de almacenamiento por cortante  $G'$ , que es una medida de la energía almacenada y recuperada por ciclo; y el módulo de pérdida por corte  $G''$ , que indica una medida de la energía disipada por ciclo.

La razón entre el módulo de pérdida y de almacenamiento por cortante es el factor de pérdida “ $\eta$ ”:

$$\eta = \frac{G''\omega}{G'\omega} = \tan \delta \quad (2.50)$$

Donde:

$$G'(\omega) = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \cos \delta \quad G''(\omega) = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \sin \delta \quad (2.51)$$

El factor de pérdida  $\eta$  también es usado como indicador de la capacidad de disipación de energía de un material VE.

El esfuerzo de cortante puede ser expresado en función del desplazamiento:

$$\tau(t) = \gamma_0 [G'(\omega) \sin \omega t + G''(\omega) \cos \omega t] \quad (2.52)$$

Después de derivar el segundo miembro de la ecuación 2.52 y reemplazándolo en el primer miembro de la ecuación y a su vez realizar procesos trigonométricos puede ser escrita de la siguiente manera:

$$\tau(t) = G'(\omega)\gamma(t) + \frac{G''(\omega)}{\omega} \dot{\gamma}(t) \quad (2.53)$$

Donde:  $\dot{\gamma} = \gamma_0 \omega \cos \omega t$

En la ecuación (2.53), el primer término es la porción que está en fase con  $G'(\omega)$  representando la rigidez elástica, y el segundo término es la porción fuera de fase con  $\frac{G''(\omega)}{\omega}$  representando la constante de amortiguamiento.

Si se grafica a partir de la ecuación (2.53), el esfuerzo de cortante para la deformación de corte, se obtiene una histéresis elíptica como se muestra en la figura 2.50, cuya área encerrada por la elipse representa la energía disipada por ciclo.

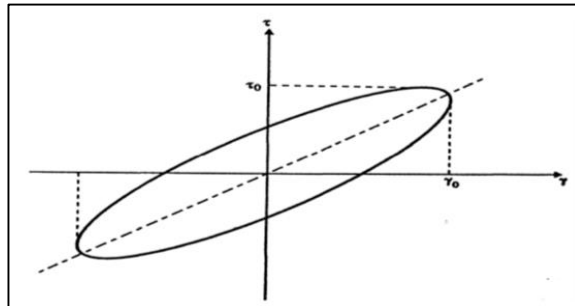


Figura 2.50. Diagrama esfuerzo vs deformación para un material visco-elástico (Fuente Soong, Dargush, 1997; Villaverde, 2008) comentario: como se aprecia, la curva histerética presenta una pendiente definida por la rigidez.

### c) Ecuaciones del disipador visco-elástico

El comportamiento de un disipador visco-elástico puede ser caracterizado por el almacenamiento de rigidez  $k'$  y la pérdida de rigidez  $k''$  que están relacionados con  $G'$  y  $G''$  de la siguiente manera:

$$K' = \frac{G'A}{h} \quad K'' = \frac{G''A}{h} \quad \eta = \frac{K''}{K'} \quad (2.54)$$

Donde:

A = área total de corte.

h = Espesor de la capa de material visco-elástico.

El coeficiente  $k''$  también puede ser relacionado con el coeficiente de amortiguamiento del disipador  $C_d$  de la siguiente manera:

$$C_d = \frac{K''}{\omega} = \frac{G''A}{\omega h} \quad (2.55)$$

El factor de amortiguamiento crítico del disipador visco-elástico está expresado por:

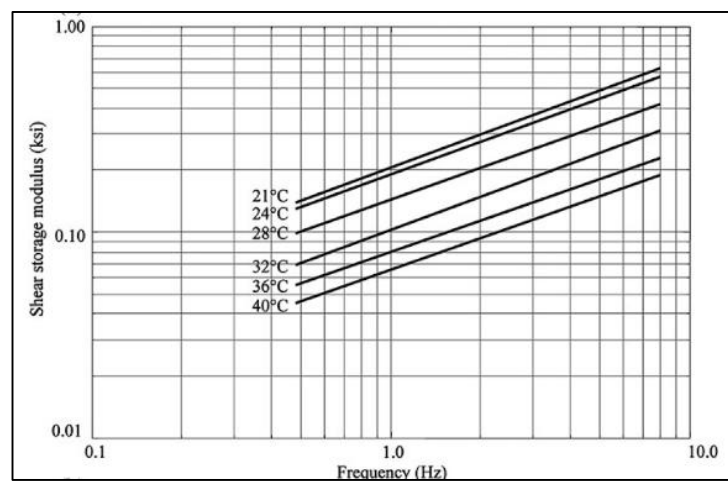
$$\zeta' = \frac{C_d}{2m\omega} = \frac{C_d\omega}{2k'} \quad (2.56)$$

Substituyendo la primera ecuación de (2.43) y (2.44) en (2.45) se obtiene:

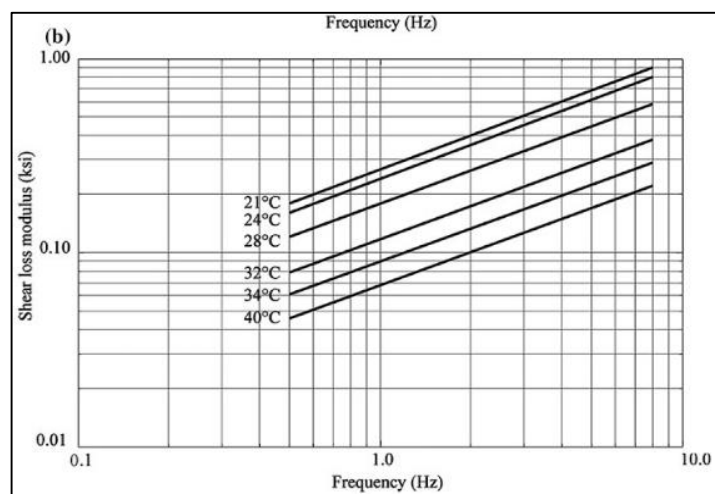
$$\zeta' = \frac{G''}{2G'} = \frac{\eta}{2} \quad (2.57)$$

**d) Características del módulo de almacenamiento por cortante ( $G'$ ) y módulo de pérdida por cortante ( $G''$ )**

Los dos módulos  $G'$  y  $G''$  no solo son función de la frecuencia  $\omega$ , sino también de la temperatura del medio donde se encuentre y del cambio de energía interna del material visco-elástico, y en algunos casos también depende de la deformación por cortante. A partir de varios ensayos en campo y en laboratorio, la rigidez del disipador y la cantidad de energía disipada tienden a disminuir frente a un aumento de la temperatura ambiente. En escala logarítmica, la figura 2.51 y la figura 2.52 muestran que el efecto del cambio de temperatura en las propiedades del disipador ocasiona un desplazamiento de las curvas de  $G'$  y  $G''$  en un rango de frecuencia de 0.5 Hz a 8 Hz.

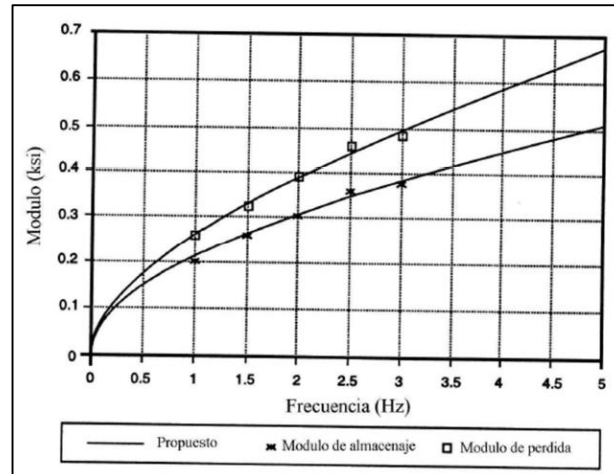


*Figura 2.51.* Variación aproximada del Módulo de almacenamiento de cortante  $G'$  con respecto a la frecuencia y la temperatura ambiente (Fuente Soong y Dargush, 1997; Villaverde, 2009).



*Figura 2.52.* Variación aproximada del Módulo de pérdida de cortante  $G''$  con respecto a la frecuencia y la temperatura ambiente (Fuente Soong y Dargush, 1997; Villaverde, 2009)

La variación de los módulos  $G'$  y  $G''$  con respecto a la frecuencia se comporta linealmente a una temperatura dada; siendo necesaria solo dos ensayos de disipadores a diferente frecuencia para identificar la relación lineal en un gráfico a escala logarítmica como en la figura 2.53.



*Figura 2.53.* Comparación de valores del módulo de almacenamiento y pérdida por cortante calculados a partir de una ecuación con los resultados obtenidos de ensayos (Fuente Soong y Dargush, 1997; Villaverde, 2009) comentario: la temperatura es un factor muy influyente en ambas propiedades dinámicas, y se hace notar en el comportamiento general del disipador.

El aumento de temperatura interna del material visco-elástico ocurre cuando la energía es disipada en forma de calor. Durante un evento sísmico, el aumento de temperatura interna es generalmente menor a  $10^{\circ}\text{C}$  y tiene un efecto despreciable en el comportamiento de los disipadores visco-elásticos.

Como los módulos  $G'$  y  $G''$  dependen de la deformación del material, de la frecuencia de excitación y de la temperatura, Aguiar hace una recomendación importante en un trabajo de visco-elasticidad desarrollado en la ESPE, de considerar el 90% a los dos módulos  $G'$  y  $G''$  por precaución, o aplicar directamente este 90% en el factor de pérdida ( $\eta$ ).

#### e) Interacción de los disipadores en un marco plano de 1gdl

Se debe tomar en cuenta que, si una estructura convencional se comporta linealmente, la adición de disipadores puede causar incrementos en los factores de amortiguamiento de los diferentes modos de vibración de la estructura. Esto puede



causar una redistribución de los factores de amortiguamiento entre los diferentes modos de vibración, ocasionando que algunos modos de vibración, que antes de agregar disipadores a la estructura, contribuían poco a la respuesta total del sistema; ahora, con los disipadores, contribuyan significativamente a la respuesta total.

Pero Villarreal & Dargush (2008) señalaron que en el caso de disipadores visco-elásticos, estos no cambian significativamente los periodos de vibración, puesto que estos valores no dependen del amortiguamiento si no de la rigidez y de la masa, con lo cual resulta posible linealizar el comportamiento estructural, como ya se había mencionado, y realizar una modelación más sencilla.

La siguiente sección describe en detalle cómo desarrollar al análisis de estructuras con amortiguadores añadidos usando las ideas ya presentadas. La discusión primero se limita a una estructura simple para introducir los conceptos básicos de una manera limpia y simple. Luego, se extenderá al caso general de una estructura de múltiples grados de libertad para mostrar cómo estos conceptos básicos puedan ser aplicados a estructuras reales. Algunos ejemplos numéricos están también presentados para ilustrar aún más los conceptos introducidos

**f) Respuesta sísmica de un sistema de 1 grado de libertad amortiguado con disipadores visco-elásticos.**

Villaverde (2009) asume que el sistema de 1GDL está sujeto a una aceleración del terreno  $\ddot{u}_g(t)$ , y que el desplazamiento y velocidad inicial son iguales a cero. Tal como se ve en la figura 2.54, se agrega un disipador en un arriostamiento diagonal al marco estructural, y por diseño se asume que la estructura se mantendrá lineal todo el tiempo.

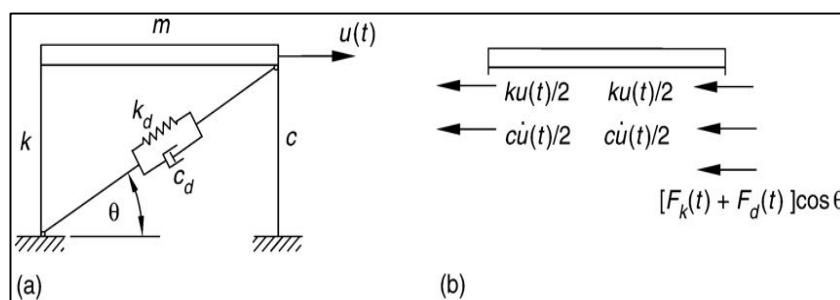


Figura 2.54. (a) Sistema de 1GDL con disipadores visco-elásticos, (b) Diagrama de cuerpo libre. (Fuente Villaverde, 2009) comentario: este esquema general muestra las fuerzas que actúan en un sistema que contiene disipadores en una configuración diagonal.

La ecuación de movimiento con los disipadores para 1GDL agregada es:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) + [F_k(t) + F_d(t)] \cos \theta = -m\ddot{u}_g(t) \quad (2.58)$$

Donde  $F_k(t)$  y  $F_d(t)$  representa la componente de rigidez elástica y de amortiguamiento de la fuerza del disipador, respectivamente; y  $\theta$  es el ángulo de inclinación del arriostramiento donde el disipador es instalado con respecto a la horizontal.

En el caso de disipadores visco-elásticos:

$$F_k(t) = K_d u(t) \cos \theta \quad (2.59)$$

$$F_d(t) = C_d u(t) \cos \theta \quad (2.60)$$

Reemplazando (3.13) y (3.14) en (3.12):

$$m\ddot{u}(t) + \bar{c}\dot{u}(t) + \bar{k}u(t) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (2.61)$$

Donde  $\bar{c}$  y  $\bar{k}$  representan las constantes de amortiguamiento y rigidez del sistema con los disipadores visco-elásticos incluidos, respectivamente; siendo:

$$\bar{c} = c + C_d \cos^2 \theta \quad (2.62)$$

$$\bar{k} = k + K_d \cos^2 \theta \quad (2.63)$$

Donde los términos coseno al cuadrado son obtenidos de la transformación de coordenadas qdl (sistema de coordenadas locales) a QDL (sistema de coordenadas global), el cual está regido a los ejes x e y de análisis.

### 2.2.15. Análisis dinámico modal espectral con disipadores de energía

El análisis modal se especifica para los edificios de varios niveles con diafragmas de pisos rígidos y plantas que tienen dos ejes ortogonales de simetría sometidos a un movimiento horizontal del terreno en dirección de uno de esos ejes.

$$[M]\ddot{u} + [C_I]\dot{u} + [K]u = -[M]1\ddot{u}_g(t) \quad (2.64)$$

Donde:

U = vector de los desplazamientos.

M = matriz diagonal de masa de la estructura.

K = matriz de rigidez lateral de la estructura.

$C_I$  = matriz de amortiguamiento inherente de la estructura.

1 = es la unidad.

Recordemos que una de las formas de determinar las frecuencias angulares y modos de vibración para un sistema dinámico con amortiguamiento inherente, es hacer cero el término de la derecha de la ecuación anterior, para la finalidad de la tesis y como se ha estado mencionando se utiliza el programa Mathcad a manera de agilizar estos cálculos laboriosos a medida que incrementan los GDL.

De manera didáctica, se menciona otra forma de obtener los valores y vectores característicos (autovalores y autovectores respectivamente), que consiste en aplicar una metodología más sencilla, la cual fue definida inicialmente por Frazer et al.,

(1946) y adaptada por Foss (1957), y consiste en realizar varias operaciones algebraicas de la ecuación dinámica del movimiento para encontrar una matriz  $[T]$ , de orden  $2N$ , donde  $N$  es el número de grados de libertad:

$$[T] = \begin{bmatrix} [0] & [I] \\ [-[k]^{-1}[m]] & [-[k]^{-1}[c]] \end{bmatrix} \quad (2.65)$$

Donde  $[I]$  es la matriz de identidad y  $[0]$  es una matriz de ceros, de orden  $N$ . Una vez definida la matriz  $[T]$  es posible obtener, mediante algún método convencional de cálculo, el vector  $\{\omega_j^*\}$  con  $2N$  valores característicos, el cual es igual al recíproco del vector  $\{\omega_j\}$  de valores característicos del sistema (Foss, 1957), y tendrá la siguiente forma (Argyris y Mlejnek, 1991):

$$\{\omega_j\} = \frac{1}{\{\omega_j^*\}} = \{-\xi_j \bar{\omega}_j \pm i \bar{\omega}_{Dj}\} \quad (2.66)$$

Donde  $i = \sqrt{-1}$ ,  $\bar{\omega}_j$ ,  $\bar{\omega}_{Dj}$  y  $\xi_j$ , son la frecuencia circular, la frecuencia amortiguada y la fracción de amortiguamiento crítico, para cada modo  $j$ , respectivamente. Es importante comentar que la solución obtenida corresponde a pares conjugados, donde la parte real siempre es negativa. Para la obtención de la respuesta de cada modo, se debe verificar qué tipo de amortiguamiento se presenta, ya que es posible que se generen modos sobreamortiguados. Este método es útil cuando se tienen sistemas dinámicos con varios grados de libertad.

Cabe recalcar que tanto los valores como los vectores característicos, son cantidades complejas. Esto implica que no existen nudos estacionarios en los modos de vibración debidos al desfase que genera la parte imaginaria de dichos valores, y los valores máximos y mínimos de la respuesta no ocurren en el mismo instante de tiempo (Novak y Hifnawy, 1983).

En el caso de que la matriz de amortiguamiento sí sea proporcional, los modos de vibración amortiguada son reales e idénticos a los modos clásicos de vibración no amortiguada.

### 2.2.16. Sistemas con valores característicos de valor real

A continuación, se presenta la extensión del análisis anterior para determinar la respuesta sísmica de tales modos sobreamortiguados, aunque se espera que estas respuestas modales sean pequeñas, esta extensión se incluye con el fin de completar el estudio, así como comprender el efecto de sobreamortiguamiento en las respuestas que obtengamos.

#### a) Vibración libre

Consideremos un par de valores característicos con valor real  $\lambda_n$  y  $\lambda_n$  de tal forma que  $|\lambda_n| < |\lambda_r|$  y los vectores característicos reales asociados  $\psi_n$  y  $\psi_r$ ,

determinados mediante la resolución del problema de valor característico. Este par de valores característicos se expresa en una forma motivada por los valores característicos de un sistema sobreamortiguado como

$$\lambda_n = -\xi_n \omega_n + \omega_{nD} \quad \lambda_r = -\xi_n \omega_n - \omega_{nD} \quad (2.67)$$

Donde:

$$\omega_{nD} = \omega_n \sqrt{\xi_n^2 - 1} \quad (2.68)$$

y  $\omega_n$  y  $\xi_n$  son cantidades con valores reales y positivos que pueden determinarse a partir de los valores característicos conocidos  $\lambda_n$  y  $\lambda_r$  de la siguiente manera:

$$\omega_n = \sqrt{\lambda_n * \lambda_r} \quad (2.69)$$

Finalmente:

$$\xi_n = -\frac{\lambda_n + \lambda_r}{2\omega_n} = -\frac{\lambda_n + \lambda_r}{2\sqrt{\lambda_n * \lambda_r}} \quad (2.70)$$

$$\omega_{nD} = \frac{\lambda_n - \lambda_r}{2} \quad (2.71)$$

### b) Expansión modal

El desplazamiento  $u$  puede expresarse, como la superposición de las contribuciones modales:

$$u(t) = \sum_{n=1}^N \phi_n q_n(t)$$

La distribución espacial de las fuerzas sísmicas efectivas, está definida por  $s = m1$ . Esta distribución de fuerzas puede expandirse como la sumatoria de las distribuciones de fuerza inercial modal  $s_n$

$$ml = \sum_{n=1}^N s_n = \sum_{n=1}^N \Gamma_n m \phi_n$$

Donde:

$$\Gamma_n = \frac{L_n}{M_n} \quad L_n = \phi_n^T ml \quad M_n = \phi_n^T m \phi_n \quad (2.72)$$

O en el caso que los estén normalizados, el factor de participación modal está dado por:

$$\Gamma_j = \sum_{j=1}^N m_j \phi_{ji} \quad (i= 1, 2, 3, \dots, N) \quad (2.73)$$

### c) Ecuaciones modales

Donde la ecuación de movimiento para un sistema amortiguado puede expresarse de la siguiente manera:

$$\ddot{q}_n + 2\xi_n \omega_n \dot{q}_n + \omega_n^2 q_n = -\Gamma_n \ddot{u}_g(t) \quad (2.74)$$

Además:

$$q_n(t) = \Gamma_n D_n(t) \quad (2.75)$$

#### d) Respuestas modales

La ecuación diferencial que controla la n-ésima coordenada modal es la ecuación 2.76, En particular el desplazamiento lateral del j-ésimo nivel del edificio es:

$$u_{jn}(t) = \Gamma_n \phi_{jn} D_n(t) \quad (2.76)$$

También podemos definir la respuesta de pseudo-aceleración del n-ésimo modo del sistema de 1 GDL a  $\ddot{u}_g(t)$  como:

$$A_n(t) = \omega_n^2 D_n(t) \quad (2.77)$$

Utilizaremos la siguiente fórmula para el cálculo de desplazamientos laterales:

$$u_{jn}(t) = \Gamma_n \phi_{jn} \frac{A_n}{\omega_n^2} \quad (2.78)$$

La contribución  $r_n(t)$  del n-ésimo modo se determina mediante un análisis estático de la estructura sometida a las fuerzas externas  $f_n(t)$ . Si  $r_n^{st}$  indica la respuesta estática modal, entonces:

$$\Gamma_n(t) = \Gamma_n^{st} A_n(t) \quad (2.79)$$

La respuesta estática modal  $\Gamma_n^{st}$  se determina mediante un análisis estático del edificio debido a las fuerzas externas, en la siguiente tabla 2.6 se muestran las respuestas estáticas modales para seis cantidades de respuesta; el cortante,  $V_j$  en el i-ésimo entrepiso, el momento de volteo  $M_j$  en el i-ésimo nivel, el cortante  $V_b$  basal, el momento de volteo  $M_b$  en la base, los desplazamientos del nivel  $u_j$  y las distorsiones de entrepiso  $\Delta_j$ .

Tabla 2.6  
Respuestas estáticas modales

Respuesta, $r$	Respuesta estática modal, $r_n^{st}$
$V_j$	$V_{jn}^{st} = \sum_{j-i}^N S_{jn}$
$M_j$	$M_{jn}^{st} = \sum_{j-i}^N (h_j - h_i) S_{jn}$
$V_b$	$V_{bn}^{st} = \sum_{j=1}^N S_{jn} = \Gamma_n L_n^h \equiv M_n^*$
$M_b$	$M_{bn}^{st} = \sum_{j=1}^N h_j S_{jn} = \Gamma_n L_n^{\theta} \equiv h_n^* M_n^*$
$u_j$	$u_{jn}^{st} = (\Gamma_n / \omega_n^2) \phi_{jn}$
$\Delta_j$	$\Delta_{jn}^{st} = (\Gamma_n / \omega_n^2) (\phi_{jn} - \phi_{j-1,n})$

(Fuente Chopra, 2014: Dinámica de estructuras)  
comentario: se presenta la tabla resumen de acciones que se pueden realizar a partir de un análisis modal.

Donde:

$$L_n^\theta = \sum_{j=1}^N h_j m_j \phi_{jn}$$

### e) Respuesta total

La combinación de las contribuciones de respuesta de todos los modos proporciona la respuesta al sismo del edificio de varios niveles:

$$\Gamma(t) = \sum_{n=1}^N \Gamma_n(t) = \sum_{n=1}^N \Gamma_n^{st} A_n(t)$$

Esta última es la ecuación 2.80.

### f) Respuestas modales máximas

EL valor máximo  $r_{no}$  de la combinación del n-ésimo modo  $r_n(t)$  a la respuesta  $r(t)$  puede obtenerse a partir del espectro de respuesta al sismo o espectro de diseño, esto se hace evidente al recordar que el valor máximo de  $A_n(t)$  está disponible a partir del espectro de pseudo-aceleración como su ordenada  $A(T_n, \xi_n)$  indicada como  $A_n$  por razones de brevedad. Por lo tanto,

$$\Gamma_{no} = \Gamma_n^{st} A_n \quad (2.81)$$

### g) Reglas de combinación modal

Un límite superior para la respuesta máxima puede obtenerse sumando los valores absolutos de las contribuciones modales máximas:

$$\Gamma_0 = \left( \sum_{n=1}^N r_{no}^2 \right)^{1/2}$$

Este valor límite superior suele ser muy conservador por lo tanto esta regla de combinación modal de la suma absoluta no es popular en las aplicaciones de diseño estructural.

De manera sintetizada, un esquema que contiene los pasos para realizar el análisis dinámico modal espectral estaría dado por (ver figura 2.55).

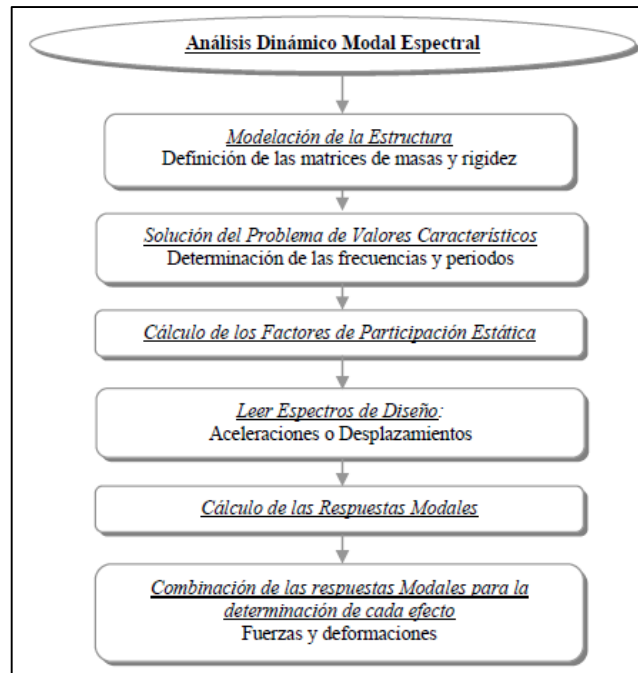


Figura 2.55. Esquema de análisis dinámico moda espectral (Fuente Scaletti Farina & Piqué del Pozo, 1991: Análisis sísmico de edificios) comentario: el procedimiento a realizar es iterativo y obedece al de la figura mostrada.

### 2.2.17. Análisis dinámico modal espectral con disipadores de energía

Usualmente el amortiguamiento proporcionado por los disipadores de energía suele ser no clásico, es decir, que no es proporcional a la rigidez y/o a la masa de la estructura. A continuación, se muestra el esquema de análisis que se ha utilizado (ver figura 2.56).

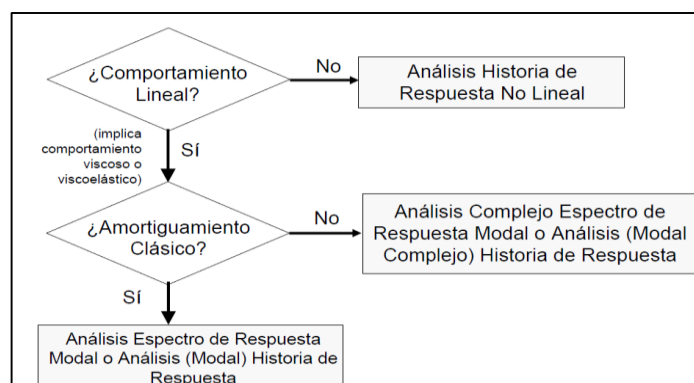


Figura 2.56. Esquema de análisis sísmico de estructuras con sistemas de disipación pasiva de energía. Fuente: (FEMA 451) comentario: la presente investigación se ceñirá a estos lineamientos propuestos por el FEMA 451.

La dificultad con esta metodología es la transformación del comportamiento visco-elástico de los disipadores a un modelo lineal equivalente, pero eso ya no es inconveniente puesto que se ha detallado el método correcto para la resolución de la ecuación dinámica sometida a una fuerza externa.

### 2.2.18. Balance energético

En términos de energía, el efecto de un sismo en una estructura con disipadores puede ser descrito con la siguiente ecuación (Uang & Bertero, 1988):

$$E_I = E_K + E_S + E_H + E_{DI} + E_{DA} \quad (2.82)$$

Donde:

$E_I$  = energía absoluta que ingresa al sistema estructural debida a la aceleración del suelo.

$E_K$  = energía cinética absoluta.

$E_S$  = energía de deformación elástica que puede ser almacenada en el sistema.

$E_H$  = energía histerética no recuperable debida a deformaciones inelásticas.

$E_{DI}$  = energía disipada por amortiguamiento estructural propio o inherente.

$E_{DA}$  = energía disipada por dispositivos disipadores de energía debido al amortiguamiento añadido.

El lado izquierdo de la ecuación (2.82) representa la demanda de energía por parte del sismo y es el trabajo realizado por la fuerza cortante basal debido a los desplazamientos del suelo. El lado derecho de la ecuación (2.82) representa la energía que el sistema estructural es capaz de absorber o disipar.

En el diseño sismorresistente convencional se espera que gran parte de la energía sísmica sea disipada a través de deformaciones inelásticas de la estructura, lo cual significa daño estructural. Al añadir un sistema de disipación de energía a una edificación, los dispositivos reducirán la demanda de disipación de energía sobre los elementos estructurales, protegiendo de esa forma a la estructura principal.

### 2.2.19. Análisis sísmico

#### a) Aspectos generales

El análisis sísmico es esencial para poder diseñar una estructura en el Perú. Se deberá seguir los lineamientos proporcionados por el reglamento nacional de edificaciones específicamente la norma E030 y cumplir con los requerimientos establecidos.

La filosofía sismo-resistente del reglamento nacional de edificaciones E-030 establece:

- a) Evitar pérdida de vidas



- b) Asegurar la continuidad de los servicios básicos
- c) Minimizar los daños a la propiedad

La norma E-030 reconoce que sería muy costoso dar protección total frente a los sismos por tanto establece los siguientes principios que deben ser cumplidos:

- a) “La estructura no debe colapsar ni causar daños graves a las personas debido a movimientos sísmicos severos que puedan ocurrir en el sitio”
- b) La estructura debería soportar movimientos del suelo calificados como moderados para el lugar del proyecto, pudiendo experimentar daños reparables dentro de límites aceptables.
- c) Para las edificaciones esenciales, definidas en la tabla N°5 del NTE E-030 se tendrán consideraciones especiales orientadas a lograr que permanezcan en condiciones operativas luego de un sismo severo.”

## 2.2.20. Parámetros sísmicos

### a) Espectro de Diseño E-030

Habiéndose definido el concepto de espectro, para obtenerlo necesitamos conocer los parámetros de la pseudoaceleración espectral, dado por la NTE E030.

#### a.1) Factor de zona “Z”

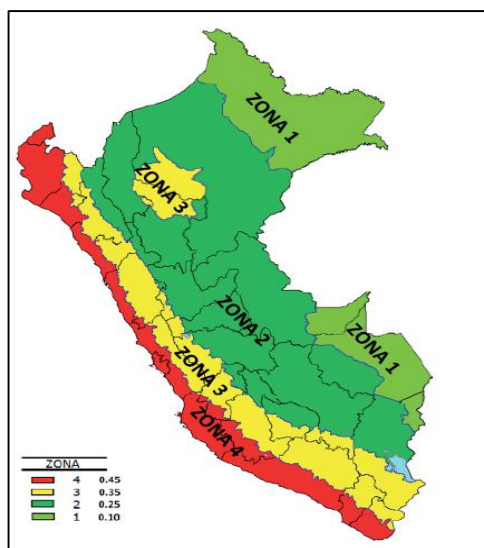


Figura 2.57. Ilustración Cap.2-43: Mapa y valores de “Z” (Fuente: RNE E-030) comentario: mapa de zonificación Z.

#### a.2) Factor de uso “U”

Corresponde al uso que tendrá la edificación según su categoría (tabla 2.7)

Tabla 2.7

Valores de "U" para cada categoría de edificación

Tabla N°5		
CATEGORIA DE LAS EDIFICACIONES Y FACTOR "U"		
CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN	FACTOR U
A	A1: Establecimientos de salud del Sector Salud (públicos y privados) del segundo y tercer nivel, según lo normado por el Ministerio de Salud	Ver nota 1
	A2: Edificaciones esenciales cuya función no debería interrumpirse inmediatamente después de que ocurra un sismo severo tales como: - Establecimientos de salud no comprendidos en la categoría A1 - Puertos, aeropuertos, locales municipales, centrales de comunicaciones. Estaciones de comberos, cuarteles de las fuerzas armadas y policías. - Instalaciones de generación y transformación de electricidad, reservorios y plantas de tratamiento de agua Todas aquellas edificaciones que puedan servir de refugio después de un desastre, tales como insituciones educativas, institutos superiores tecnológicos y universidades. Se incluyen edificaciones cuyo colapso puede representar un riesgo adicional, tales como grandes hornos, fábricas y depósitos de materiales inflamables o tóxicos. Edificios que almacenen archivos e información esencial del Estado.	1.5

(Fuente: RNE E-030) comentario: los modelos presentados utilizaran un factor de uso de 1.5, a fin de categorizarla en el nivel más alto.

### a.3) Condiciones geotécnicas "S"

Tabla 2.8

Valores de "S" para cada tipo de suelo y valor de "Z"

ZONA/SUELO	FACTOR DE SUELO "S"			
	So	S1	S2	S3
Z4	0.80	1.00	1.05	1.10
Z3	0.80	1.00	1.15	1.20
Z2	0.80	1.00	1.20	1.40
Z1	0.80	1.00	1.60	2.00

(Fuente: RNE E-030) comentario: estos parámetros variaran para ver la efectividad de los disipadores, para un S0, S1, S2 y S3.

Dónde: So=Roca dura, S1=Roca o suelos muy rígidos, S2=Suelos intermedios, S3=Suelos blandos, S4=Condiciones excepcionales.

### a.4) Factor "C"

Corresponde a la amplificación sísmica que tendremos. Este valor varía con el periodo de la edificación, pero en ningún caso será mayor que 2.5

$$T < T_p \quad C = 2,5$$

$$T_p < T < T_L \quad C = 2,5 \cdot \left(\frac{T_p}{T}\right)$$

$$T > T_L \quad C = 2,5 \cdot \left(\frac{T_p \cdot T_L}{T^2}\right)$$

Dónde:  $T_p$ =periodo que define la plataforma del factor "C",  $T_L$ = Periodo que define el inicio de la zona del factor "C" con desplazamiento constante,  $T$ =Periodo de la estructura (ver tabla 2.9).

Tabla 2.9

Periodos "TP" y "TL" para cada perfil de suelo

	PERÍODOS "TP" Y "TL"			
	Perfil del suelo			
	So	S1	S2	S3
Tp(s)	0.3	0.4	0.6	1
TL(s)	3	2.5	2	1.6

(Fuente RNE E-030) comentario: estos parámetros variarán para ver la efectividad de los disipadores, para un S0, S1, S2 y S3.

### a.5) Coeficiente básico de reducción " $R_0$ "

Este coeficiente obedece a tipo de sistema estructural sismo resistente empleado (ver tabla 2.10).

Tabla 2.10

Factores de reducción "R" según el tipo de estructura

Tabla N°7	
SISTEMAS ESTRUCTURALES	
Sistema Estructural	Coefficiente Básico de Reducción $R_0$
<b>Acero:</b>	
Pórticos Especiales Resistentes a Momentos (SMF)	8
Pórticos Intermedios Resistentes a Momentos (IMF)	7
Pórticos Ordinarios Resistentes a Momentos (OMF)	6
Pórticos Especiales Concéntricamente Arriostrados (SCBF)	8
Pórticos Ordinarios Concéntricamente Arriostrados (OCBF)	6
Pórticos Excéntricamente Arriostrados (EBF)	8
<b>Concreto Armado:</b>	
Pórticos	8
Dual	7
De muros estructurales	6
Muros de ductilidad limitada	4
<b>Albañilería Armada o Confinada</b>	3
<b>Madera (Por esfuerzos admisibles)</b>	7

(Fuente RNE E-030) comentario: para los pórticos evaluados se escogerá un  $R=8$

Para la presente tesis, no se consideran irregularidades en planta ni en elevación.

Tabla 2.11

*Derivas según el tipo de material*

<b>LÍMITES PARA LA DISTORSIÓN DEL ENTREPISO</b>	
Material Predominante	( $\Delta/h_i$ )
Concreto Armado	0.007
Acero	0.01
Albañilería	0.005
Madera	0.01
Edificios de concreto armado con muros de ductilidad limitada	0.005

(Fuente: RNE E-030) comentario: para los pórticos se utilizará 0.01.

Nuestro pórtico presenta un material predominante que es el Acero, al cual le correspondería una deriva de entrepiso de 0.01 presentada en la tabla 2.11.

#### **b) Procedimientos de análisis**

Las estructuras, cuando están sujetas a fuerzas externas o desplazamientos en la base, en realidad actúan dinámicamente, es decir, desarrollan acciones opuestas al movimiento impuesto por tales cargas o desplazamientos. Si éstos son aplicados muy lentamente, las fuerzas de inercia son bastante pequeñas (al ser las aceleraciones muy bajas) y por lo tanto se puede justificar un análisis de tipo estático. Por otro lado, las estructuras son un continuo y tienen un infinito número de grados de libertad.

Se han tratado anteriormente las formas de concentrar la evaluación en puntos (nudos o pisos) que son suficientes para determinar el comportamiento de la estructura y calcular sus fuerzas internas. La masa del sistema estructural es concentrada en los nudos o a nivel de los centros de masa de cada piso, según el modelo utilizado. Asimismo, si los análisis se realizan considerando que el material estructural tendrá un comportamiento elástico y lineal, las propiedades de rigidez de la estructura pueden aproximarse con un alto grado de confiabilidad, con ayuda de información experimental. Lo mismo puede asumirse para las propiedades de amortiguamiento.

Adicionalmente se define un amortiguamiento efectivo total cuyas componentes son el amortiguamiento inherente de la estructura y el amortiguamiento aportado por los disipadores. Luego, la pseudoaceleración es reducida por una

función (B), que se verá más adelante, del amortiguamiento total efectivo y se emplea para calcular las respuestas máximas del sistema estructural.

### **2.2.21. Normativas y requerimientos**

#### **a) Evolución de la normativa**

En 1992 el SEAOC de California USA estableció la primera guía con recomendaciones para el diseño de estructuras con sistemas de disipación de energía. Antes de esa publicación no se tenía ningún reglamento que regulase el uso de los disipadores.

Luego, sería el comité de sismología del SEAOC que aplicaría estos principios para publicar el apéndice “H” del “libro azul” de 1999 para dispositivos pasivos de disipación de energía. Paralelamente, el “Federal Management Agency” (FEMA) desarrollo guías de diseño para nuevas estructuras y rehabilitación de estructuras existentes con sistemas de disipación de energía y publicó los FEMAS 222A, FEMA 302, FEMA 273/274 y el FEMA 356.

Mientras tanto, investigadores en el tema trabajaban para desarrollar métodos eficientes para el diseño con disipadores y simplificar el cálculo aplicable a algunos casos al cual llamaban “método simplificado”. El FEMA 368/369 adopta este método y lo incorpora en un apéndice del capítulo 13. Luego, el FEMA 450 convierte el apéndice en el capítulo 15.

El ASCE 7-10 adopta el capítulo 15 del FEMA 450 y crea el capítulo 18 llamado “diseño sísmico de estructuras con sistemas de disipación”. El capítulo 18 del ASCE 7-10 no presenta modificaciones respecto al capítulo 18 del ASCE 7-05. El ASCE establece cuatro métodos de diseño para estructuras con disipadores:

Además, el ASCE 7-05 no indica que los métodos del espectro de respuesta y de la fuerza lateral equivalente, dado que son desarrollados del método simplificado, son aplicables a estructuras con comportamiento lineal. Para estructuras con comportamiento no lineal debe aplicarse los métodos “Push over” o “FNA” (Fast Nonlinear Analysis).

### **2.2.22. Especificaciones del ASCE 7-10**

La norma ASCE 7-10 incorporó los procedimientos de diseño de las normas FEMA y presentó cuatro procedimientos de diseño para estructuras con disipadores:

1. Análisis de Respuesta Espectral.
2. Análisis de Fuerza Lateral-Equivalente.
3. Análisis No-lineal Estático o Análisis Push over.
4. Análisis de Respuesta No-lineal Tiempo-Historia (FNA).

La elección de un tipo determinado de análisis responde a las siguientes consideraciones:

Categoría de diseño sísmico a partir de la ubicación de la estructura.

1. Sistema Sismo-resistente seleccionado.
2. Sistema de Disipación de Energía seleccionado.
3. Configuración estructural.

Los procedimientos no lineales pueden aplicarse al diseño de todo tipo de estructuras con disipadores. La aplicación de los procedimientos de respuesta espectral y de fuerza lateral equivalente, que fueron desarrollados en base al método simplificado, tiene limitaciones que están señaladas en la norma ASCE 7-10.

El análisis que se realizará en la estructura con disipadores es, el análisis de respuesta espectral empleando el espectro de la norma peruana sismorresistente E.030 y para fines ilustrativos (lazos histeréticos y balance de energético) se usará también el método de Análisis de Respuesta No-lineal Tiempo-Historia.

#### **2.2.23. Método de superposición modal**

Es el método más común y efectivo de los procedimientos para el análisis sísmico de sistemas estructurales lineales. Este método, luego de evaluar un conjunto de vectores ortogonales, reduce el gran conjunto de ecuaciones generales de movimiento a un pequeño número de ecuaciones diferenciales desacopladas de segundo orden. La solución numérica de estas ecuaciones implica una gran reducción del tiempo de cómputo.

Con este método se obtiene la respuesta completa, en su variación en el tiempo, de los desplazamientos de los nudos y fuerzas en los elementos debidos a un movimiento determinado en la base.

Se ha demostrado que los movimientos sísmicos excitan a la estructura principalmente en sus frecuencias más bajas. Por lo general, las aceleraciones del terreno son registradas, en los acelerogramas digitales, con intervalos a razón de 100 o 200 puntos por segundo. De manera que la información de las acciones sísmicas no contiene frecuencias por encima de los 50 ciclos por segundo. En consecuencia, si no se consideran las frecuencias altas y las correspondientes formas de modo en la respuesta, no se introducirán errores.

#### **2.2.24. Amortiguamiento no clásico en el ETABS**

La idealización de amortiguamiento clásico es apropiada si los mecanismos de amortiguamiento son similares en toda la estructura. Sin embargo, en una edificación con disipadores de energía habrán determinados grados de libertad del sistema

estructural con mayores niveles de amortiguamiento y, por consiguiente, sería difícil justificar la asunción de amortiguamiento clásico.

El manual de referencia de ETABS indica que en un análisis de respuesta espectral o de tiempo-historia lineal el programa convierte el amortiguamiento de los elementos Link en amortiguamiento modal mediante el procedimiento de amortiguamiento proporcional, es decir, se ignoran los términos acoplados de la matriz  $\Phi T C \Phi$  (los términos fuera de la diagonal). A continuación, estos valores de amortiguamiento modal son agregados al amortiguamiento modal inherente de la estructura especificada al inicio. De esta forma se obtienen los valores de amortiguamiento modal total los cuales estarían tomando en cuenta todos los mecanismos de disipación de energía presentes en la estructura.

Sin embargo, los términos acoplados de la matriz de amortiguamiento de los elementos Link pueden ser significativos. Un análisis lineal con disipadores lineales en un modelo en ETABS puede subestimar o sobreestimar la cantidad de amortiguamiento real presente en la estructura con los dispositivos. Tal análisis lineal sólo puede considerarse como una aproximación de la solución.

La solución exacta de un sistema estructural con amortiguadores visco-elásticos lineales (una estructura con amortiguamiento no clásico) implica el cálculo de eigenvectores y eigenvalores con números conjugados complejos y un gran esfuerzo computacional. "Debido a que la naturaleza básica de la disipación de energía no está claramente definida en las estructuras reales y el amortiguamiento viscoso es usualmente empleado para aproximar el comportamiento no lineal, este aumento en esfuerzo computacional no se justifica dado que no se está resolviendo el problema real".

### **2.2.25. Análisis de respuesta espectral**

El análisis modal espectral (o método de la respuesta espectral) es un método ventajoso para estimar los desplazamientos y fuerzas en los elementos de un sistema estructural. El método implica el cálculo solamente de los valores máximos de los desplazamientos - y las aceleraciones - en cada modo usando un espectro de diseño, el mismo que representa el promedio o la envolvente de espectros de respuesta para diversos sismos, con algunas consideraciones adicionales expuestas en los códigos de diseño. Luego se combinan estos valores máximos, por ejemplo, mediante un promedio ponderado entre la media y la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de tales valores máximos (SRSS); otro método es el de la combinación cuadrática completa (método CQC), que considera además una correlación entre los valores

modales máximos. De este modo, se obtienen los valores más probables de desplazamientos y fuerzas.

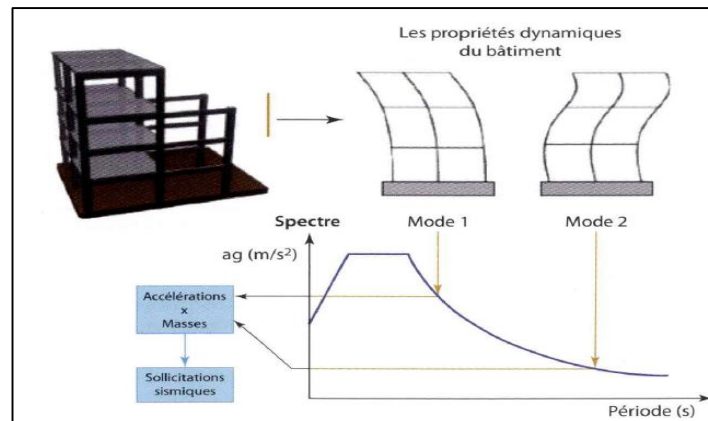


Figura 2.58. Principio de análisis modal (Fuente Conception –construction parasismique) comentario: esquema de análisis modal didáctico.

#### a) Reducción de la respuesta, coeficiente “B”

Según el ASCE 7-10, la respuesta de la estructura ante una solicitud sísmica puede ser reducida debido al incremento del amortiguamiento proporcionado por los disipadores. Esta reducción de la fuerza cortante basal se expresa mediante:

$$V_{min} = \frac{V}{B_{v+1}} \quad (2.83)$$

Donde V es la fuerza cortante basal obtenida sin la aplicación de disipadores y  $B_V$  es el factor de reducción de respuesta en función del amortiguamiento equivalente:

$$V_{min} = 0.75V \quad (2.84)$$

#### b) Modificación del espectro de respuestas

Si en el modelo estructural del ETABS se colocan elementos Link con propiedades de amortiguamiento lineal, el amortiguamiento real efectivo de algunos modos será mayor que el amortiguamiento estructural inherente debido al amortiguamiento viscoso adicional especificado en el elemento Link.

En el caso de un análisis de respuesta espectral, toda función espectral corresponde a un valor determinado de amortiguamiento (para el espectro de la Norma E.030 se estimó un amortiguamiento estructural de 5%). Luego, para los modos que tienen un amortiguamiento efectivo mayor debido a la adición de amortiguamiento viscoso, la respuesta espectral debe ser reducida por un factor de ajuste, el cual fue determinado por Newmark & Hall en la monografía *Earthquake*



*Spectra and Design*, que recomendamos encarecidamente revisarla puesto que resulta bastante interesante.

Como se mencionó, se define el factor de reducción  $B$  con la siguiente expresión NEHRP (Programa Nacional para la Reducción de Peligro Sísmico).

$$B = \frac{2.31 - 0.41 \cdot \ln(5)}{2.31 - 0.41 \cdot \ln(\beta_{efectivo})} \quad (2.85)$$

Por consiguiente, para obtener la respuesta espectral correspondiente al nivel efectivo de amortiguamiento, la respuesta obtenida del espectro original debe ser dividida por el factor de reducción para un modo en particular.

En el año 2000, el Programa Nacional para la Reducción de Peligro Sísmico (NEHRP) hizo una investigación propia, con la cual se obtuvieron valores similares, lo cual corroboraba los estudios antes realizados.

Finalmente, el FEMA 451 y ASCE 7-10 en su capítulo 18 determina un “B” para cada porcentaje de amortiguamiento que presente la estructura, la tabla 2.12 ilustra este hecho.

Tabla 2.12

*Coeficiente de amortiguamiento,  $B_{v+1}$ ,  $B_{1D}$ ,  $B_R$ ,  $B_{1M}$ ,  $B_{mD}$ ,  $B_{mM}$ ,  
(Donde el periodo de la estructura  $\geq T_0$ )*

Effective Damping, $\beta$ (percentage of critical)	$B_{v+1}, B_{1D}, B_R, B_{1M}, B_{mD}, B_{mM}$ (donde el periodo de la estructura es $\geq T_0$ )
$\leq 2$	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.8
40	2.1
50	2.4
60	2.7
70	3.0
80	3.3
90	3.6
$\geq 100$	4.0

(Fuente ASCE 7-10, 2010) comentario: existen otros factores de la tabla FEMA 451 pero estos son una actualización del FEMA.

Entonces este factor B se interpreta como una reducción del espectro de pseudoaceleraciones, de desplazamientos y de fuerza cortante para ambas tablas mostradas. La figura 2.59, extraída del FEMA 368 y 369, ilustra este hecho.

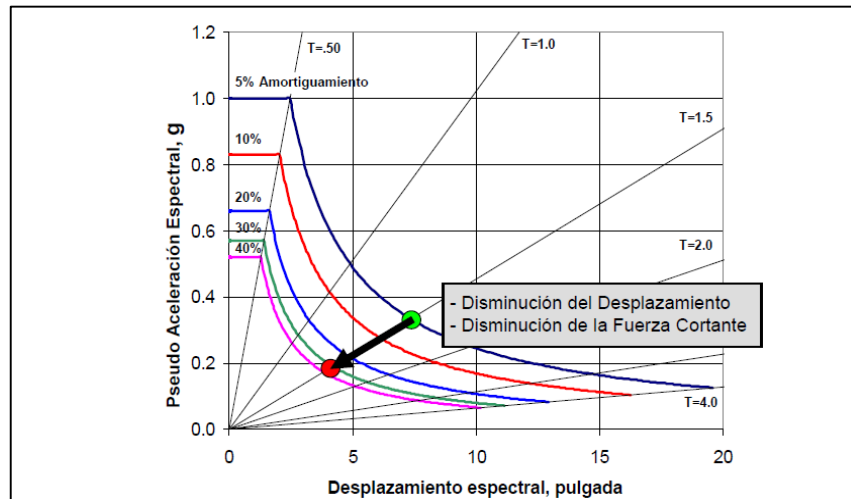


Figura 2.59. Efecto de amortiguamiento añadido (amortiguamiento viscoso) (Fuente FEMA 368 y 369) comentario: posible comportamiento de la estructura mostrando el efecto al incrementar amortiguamiento.

Es crucial recordar que no solo se incrementa el amortiguamiento si no la rigidez debido a las propiedades de visco-elasticidad, dichas consideraciones se pueden apreciar más comprensiblemente en la figura 2.60.

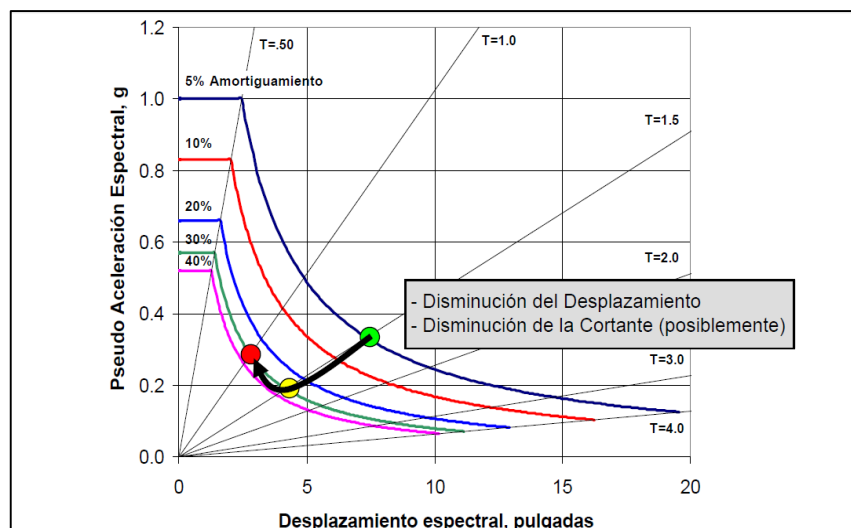


Figura 2.60. Efecto de amortiguamiento y rigidez añadidos (Fuente FEMA 368 y 369) comentario: posible comportamiento de la estructura, mostrando las ventajas al aumentar amortiguamiento y rigidez al sistema.

### c) Amortiguamiento objetivo

El amortiguamiento efectivo de una estructura ( $\beta_{efectivo}$ ) es el amortiguamiento inherente ( $\beta_0$ ), asumido en no más de 5%, más el amortiguamiento asociado al efecto de los disipadores sobre la estructura ( $\beta_{vm}$ ).

$$\beta_{efectivo} = \beta_0 + \beta_{vm} \quad (2.86)$$

También es posible obtener el factor de reducción de la respuesta sísmica (B) dividiendo la deriva máxima obtenida a partir de los registros sísmicos ( $\Delta_{max}$ ) entre la deriva de diseño ( $\Delta_{objetivo}$ ), mediante la siguiente fórmula:

$$B = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_{objetivo}}$$

Donde:  $\beta_{efectivo}$  es el amortiguamiento objetivo que debe desarrollar la estructura con la adición de los disipadores de energía. La participación que tendrán los disipadores en el amortiguamiento ( $\beta_{vm}$ ) puede obtenerse descontando el amortiguamiento inherente de la estructura, 5% para edificios de concreto armado, del valor  $\beta_{efectivo}$ .

$$\beta_{vm} = \beta_{efectivo} - 5\% \quad (2.87)$$

Según los fabricantes, se recomienda que los disipadores de energía sean diseñados teniendo en consideración para el cálculo un amortiguamiento viscoso ( $\beta_{vm}$ ) de entre 20 hasta un 40%, pero la normativa ASCE 7-10 limita a un amortiguamiento efectivo del 35% como máximo.

## 2.2.26. Definición de los objetivos de diseño

### a) Deriva objetivo

En el documento Multi-Hazard Loss Estimation Methodology HAZUS, elaborado por el FEMA Mitigation Division del gobierno estadounidense, se ha establecido una relación entre los estados de daño de la estructura y las derivas características correspondientes a diversos sistemas estructurales, estos datos son presentados de forma cuantitativa para cada estado de daño, los cuales se muestran a continuación en la tabla 2.13 según el FEMA.

En la parte final del capítulo 5 del documento HAZUS se encuentran las tablas que relacionan el estado de daño o nivel de desempeño según VISON 2000 y su deriva característica dependiendo del tipo de edificación (ver tabla 2.14).

Tabla 2.13

Clasificación según tipo de Estructura

No.	Label	Description	Height			
			Range		Typical	
			Name	Stories	Stories	Feet
1	W1	Wood, Light Frame ( $\leq 5,000$ sq.ft.)		1-2	1	14
2	W2	Wood, Commercial and Industrial ( $> 5,000$ sq.ft.)		All	2	24
3	S1L	Steel Moment Frame	Low-Rise	1-3	2	24
4	S1M		Mid-Rise	4-7	5	60
5	S1H		High-Rise	8+	13	156
6	S2L	Steel Braced Frame	Low-Rise	1-3	2	24
7	S2M		Mid-Rise	4-7	5	60
8	S2H		High-Rise	8+	13	156
9	S3	Steel Light Frame		All	1	15
10	S4L	Steel Frame with Cast-in-Place Concrete Shear Walls	Low-Rise	1-3	2	24
11	S4M		Mid-Rise	4-7	5	60
12	S4H		High-Rise	8+	13	156
13	S5L	Steel Frame with Unreinforced Masonry Infill Walls	Low-Rise	1-3	2	24
14	S5M		Mid-Rise	4-7	5	60
15	S5H		High-Rise	8+	13	156
16	C1L	Concrete Moment Frame	Low-Rise	1-3	2	20
17	C1M		Mid-Rise	4-7	5	50
18	C1H		High-Rise	8+	13	120
19	C2L	Concrete Shear Walls	Low-Rise	1-3	2	20
20	C2M		Mid-Rise	4-7	5	50
21	C2H		High-Rise	8+	12	120
22	C3L	Concrete Frame with Unreinforced Masonry Infill Walls	Low-Rise	1-3	2	20
23	C3M		Mid-Rise	4-7	5	50
24	C3H		High-Rise	8+	12	120
25	PC1	Precast Concrete Tilt-Up Walls		All	1	15
26	PC2L	Precast Concrete Frames with Concrete Shear Walls	Low-Rise	1-3	2	20
27	PC2M		Mid-Rise	4-7	5	50
28	PC2H		High-Rise	8+	12	120
29	R1ML	Reinforced Masonry Bearing Walls with Wood or Metal Deck Diaphragms	Low-Rise	1-3	2	20
30	R1MM		Mid-Rise	4+	5	50
			High-Rise			
31	RM2L	Reinforced Masonry Bearing Walls with Precast Concrete Diaphragms	Low-Rise	1-3	2	20
32	RM2M		Mid-Rise	4-7	5	50
33	RM2H		High-Rise	8+	12	120
34	URML	Unreinforced Masonry Bearing Walls	Low-Rise	1-2	1	15
35	URMM		Mid-Rise	3+	3	35
36	MH	Mobile Homes		All	1	10

(Fuente "Multihazard Loss Estimation Methodology-HAZUS") comentario: los pórticos son clasificados en dos categorías, de baja y mediana altura, de pórtico de acero a momento concéntricos.

Tabla 2.14

Relación Estado de daño-Deriva según tipo de estructura

Type	Building Properties		Interstory Drift at			
	Heigh (inches)		Threshold of Damage State			
	Roof	Modal	Slight	Moderate	Extensive	Complete
W1	168	126	0.0040	0.0099	0.0306	0.0750
W2	288	216	0.0040	0.0099	0.0306	0.0750
S1L	288	216	0.0060	0.0104	0.0235	0.0600
S1M	720	540	0.0040	0.0069	0.0157	0.0400
S1H	1872	1123	0.0030	0.0052	0.0118	0.0300
S2L	288	216	0.0050	0.0087	0.0233	0.0600
<b>S2M</b>	720	540	0.0033	<b>0.0058</b>	0.0156	0.0400
S2H	1872	1123	0.0025	0.0043	0.0117	0.0300
S3	180	135	0.0040	0.0070	0.0187	0.0525
S4L	288	216	0.0040	0.0069	0.0187	0.0525
S4M	720	540	0.0027	0.0046	0.0125	0.3500
S4H	1872	1123	0.0020	0.0035	0.0093	0.2620
S5L						
S5M						
S5H						
C1L	240	180	0.0050	0.0087	0.0233	0.0600
C1M	600	450	0.0033	0.0058	0.0156	0.0400
C1H	1440	864	0.0025	0.0043	0.0117	0.0300
C2L	240	180	0.0040	0.0084	0.0232	0.0600
C2M	600	450	0.0027	0.0056	0.0154	0.0400
C2H	1440	864	0.0020	0.0042	0.0116	0.0300
C3L						
C3M						
C3H						
PC1	1440	135	0.0040	0.0070	0.0187	0.5250
PC2L	240	180	0.0040	0.0069	0.0187	0.5250
PC2M	600	450	0.0027	0.0046	0.0125	0.0350
PC2H	1440	864	0.0020	0.0035	0.0094	0.0263
RM1L	240	180	0.0040	0.0069	0.0187	0.0525
RM1M	600	450	0.0027	0.0046	0.0125	0.0350
RM2L	240	180	0.0040	0.0069	0.0187	0.0525
RM2M	600	450	0.0027	0.0046	0.0125	0.0350
RM2H	1440	864	0.0020	0.0035	0.0094	0.0263
URML						
URMM						
MH	120	120	0.0040	0.0080	0.0240	0.0700

(Fuente "Multihazard Loss Estimation Methodology-HAZUS") comentario: esta norma nos exige tener derivas S2M (stell braced frame, mid-rise) por debajo de 0.0058 como se encuentra resaltado de azul.

#### b) Niveles de amenaza sísmica.

La propuesta del Comité VISION 2000 (SEAOC, 1995) establece cuatro niveles de amenaza sísmica en función de su probabilidad de ocurrencia en un período de

50 años de exposición, o en función del período medio de retorno, los cuales se muestran en la tabla 2.15:

Tabla 2.15

*Niveles de amenaza sísmica según la propuesta del SEAOC*

Sismo Diseño	Probabilidad de excedencia en 50 años de exposición	Periodo de retorno
Sismos frecuentes	69%	43 años
Sismos ocasionales	50%	72 años
Sismos raros	10%	475 años
Sismos muy raros	5%	970 años

(Fuente SEAOC, 1995) comentario: para la presente tesis se escogerá un sismo de diseño con periodo de retorno de 475 años.

### c) Niveles de desempeño.

La propuesta del SEAOC define cinco niveles de desempeño en base a tres aspectos fundamentales:

1. Daño sufrido por el sistema estructural y por las componentes no estructurales.
2. Amenaza de la seguridad de los ocupantes a raíz de los daños.
3. Funcionalidad de la edificación luego del sismo.

La tabla 2.16 resume las principales características de los cinco niveles de desempeño propuestos y los relaciona con el daño general de la estructura.

Tabla 2.16

*Niveles de desempeño según la propuesta del SEAOC*

Nivel de Desempeño	Descripción de los daños	Estado de daño	Límite de desplazamiento del sistema
<b>Totalmente Operacional</b>	Daño estructural y no estructural despreciable o nulo. Todas las instalaciones y servicios operan normalmente luego del sismo.	Despreciable	$\Delta y$
<b>Operacional</b>	Daños ligeros en elementos estructurales y en componentes no estructurales. Las instalaciones y servicios están operativos o podrían estar parcialmente interrumpidos, pero de fácil recuperación.	Leve	$\Delta y + 0.30\Delta p$
<b>Resguardo de Vida</b>	Daño estructural y no estructural moderado. La estructura aún conserva un margen de seguridad contra el colapso. El edificio podría repararse aunque no siempre sea económicamente aconsejable	Moderado	$\Delta y + 0.60\Delta p$
<b>Cerca al Colapso</b>	Daño estructural severo. Falla de elementos no estructurales. La seguridad de los ocupantes se encuentra comprometida, las réplicas podrían ocasionar el colapso	Extenso	$\Delta y + 0.80\Delta p$
<b>Colapso</b>	Colapso estructural. No es posible reparar la edificación.	Completo	$\Delta y + 1.00\Delta p$

(Fuente SEAOC) comentario: según los modelos que tenemos y objetivos de la investigación se ubicará un nivel de desempeño cónsono a la estructura a evaluar.

Una manera para calificar el nivel de desempeño se realiza mediante la sectorización de la curva de capacidad (ver figura 2.61). En primer lugar, debe simplificarse la curva de capacidad, empleando un modelo bilineal, con el objetivo de determinar el punto de fluencia efectiva ( $\Delta_y$ ). A partir de este punto, queda definido el inicio del comportamiento inelástico, el cual se divide en cuatro sectores dependiendo del porcentaje de desplazamiento inelástico disponible ( $\Delta P$ ).

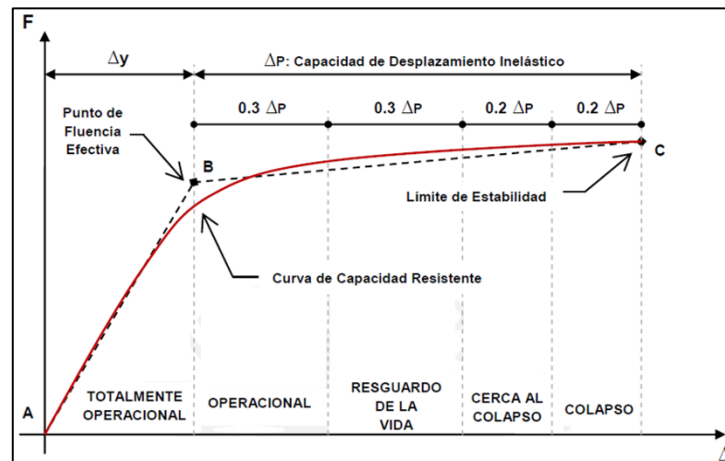


Figura 2.61. Curva de capacidad sectorizada de una estructura y niveles de desempeño (Fuente SEAOC VISION 2000 comitee) comentario: esta imagen muestra la capacidad que pudiera presentar una estructura, evidentemente esto dependerá del comportamiento de cada elemento estructural.

#### d) Importancia de la edificación

De acuerdo al grado de importancia de la edificación, durante y después de un sismo, la propuesta del Comité VISION 2000 clasifica a las edificaciones en tres grandes grupos:

**Edificaciones Esenciales.** Aquellas cuya función no debería interrumpirse luego de ocurrido el sismo. En este grupo tenemos: hospitales, cuarteles de bomberos, policía, etc.

**Edificaciones de Seguridad Crítica.** Aquellas que contienen materiales peligrosos dañinos para la población. Aquí se encuentran: plantas industriales y centrales nucleares.

**Edificaciones Comunes.** En este grupo se encuentran todas las edificaciones que no hayan sido incluidas anteriormente: edificios de viviendas, oficinas, hoteles, entre otras.

#### e) Objetivos múltiples de desempeño

La propuesta establecida por el Comité VISION 2000, señala lo siguiente:

“Los objetivos del desempeño Sismorresistente se definen por la combinación entre los niveles de desempeño deseados y los niveles de amenaza sísmica esperada de acuerdo a la importancia de la edificación.” (SEAOC, 1995)

Estos objetivos se relacionan entre sí mediante la denominada matriz de desempeño, la cual establece los requerimientos mínimos sobre el desempeño sísmico antes los diferentes niveles de amenaza (ver tabla 2.17).

Tabla 2.17

*Matriz de Desempeño*

		Nivel de Desempeño de la Edificación			
		Totalmente Operacional	Operacional	Resguardo de la vida	Cerca al colapso
Nivel de Demanda Sísmica	Sismos frecuentes (43 años)	X			
	Sismos ocasionales (72 años)	XX	X		
	Sismos raros (475) años	XXX	XX	X	
	Sismos muy raros (970 años)	XXX	XXX	XX	X

(Fuente SEAOC, 1995) comentario: lo recomendable es mantener; las edificaciones comunes “x”, las edificaciones esenciales “xx”, y las edificaciones de seguridad crítica en “xxx”.

La visión del diseño sísmico de estructuras consiste en verificar el comportamiento de las edificaciones para cada uno de los sismos descritos líneas arriba; verificaciones que se realizarán sobre las derivas máximas permitidas y en base al daño local y global de la estructura.

Estudios de peligro asociados a los cuatro sismos de diseño en la costa oeste de América del Sur en términos de aceleración pico en la base rocosa y probabilidad de excedencia en 50 años de exposición, concluyen que la aceleración tendría valores cercanos a los mostrados en la tabla 2.18.

Tabla 2.18

*Desempeño esperado para edificios comunes en la costa peruana.*

Sismo de Diseño	Aceleración (g)	Comportamiento estructural
Sismos frecuentes	0.20	Perfectamente Elástico
Sismos ocasionales	0.25	Prácticamente Elástico
Sismos raros	0.40	Importantes incursiones elásticas con pérdida de resistencia y rigidez. La estructura es reparable.



Sismos muy raros	0.50	Severas incursiones inelásticas, pérdida casi total de rigidez y resistencia. No resulta práctico reparar la estructura.
------------------	------	--

(Fuente RNE 2016) comentario: La aceleración en este caso es referencial, puesto que nosotros escalaremos a 0.45g según NTE E030.

Actualmente, el Diseño Orientado al Desempeño nos permite desarrollar estrategias para lograr edificios con buen comportamiento en múltiples escenarios de peligro.

#### f) Deriva y daño estructural

La experiencia sísmica aunada durante los últimos años ha demostrado que mientras mayores son los desplazamientos inelásticos en una estructura, mayor es el daño y la probabilidad de colapso.

El manual del HAZUS presenta curvas de fragilidad (ver figura 2.62) que describen la probabilidad de exceder diferentes estados de daño, dado un determinado parámetro de demanda que puede ser en términos de aceleración pico del suelo (PGA) o de la deformación permanente del suelo (PGD).

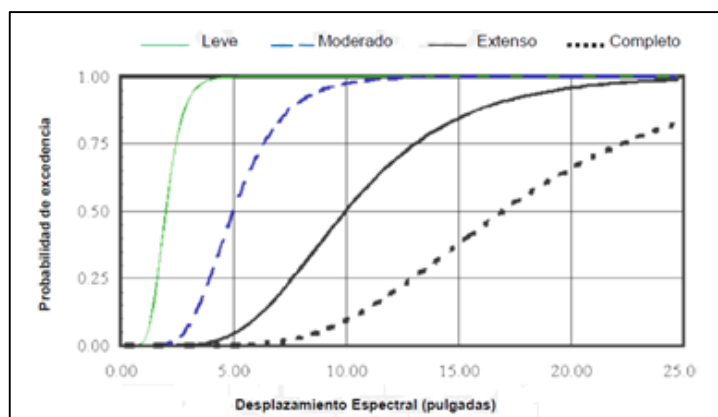


Figura 2.62. Curvas de fragilidad para 4 niveles de daños (Fuente “Multihazard Loss Estimation Methodology-HAZUS”) comentario: estas curvas son muy ambiciosas y difíciles de alcanzar, pero realizar una aproximación es lo ideal para cualquier estructura.

Vemos que la probabilidad de alcanzar o exceder un determinado desplazamiento espectral dependerá del nivel de daño que se quiera tener. Así, para un nivel de daño leve, la probabilidad de alcanzar o exceder un desplazamiento espectral será mucho mayor a la probabilidad de exceder ese mismo desplazamiento para un nivel de daño completo.

### 2.2.27. Metodología de diseño de los disipadores visco-elásticos

En este capítulo se presentará una metodología de diseño para edificaciones usando disipadores visco-elásticos en disposición diagonal. Los requisitos mínimos a considerar en base a las recomendaciones del ASCE Capítulo 18 sección 18.2.4.1 son los siguientes:

- Estructura regular.
- Dos dispositivos como mínimo en cada dirección de análisis.
- Dispositivos en todos los niveles.
- En la etapa de diseño se trabajará con un espectro reducido, el cual representará los efectos del incremento de amortiguación.

Recomendaciones para la modelación

- El material que constituyen los elementos que componen la estructura es homogéneo e isotrópico; es decir, que se comporta con las mismas propiedades en todas sus direcciones y que es elástico línea.
- La unión entre elementos es tal, que se considera que existe una zona rígida en ese punto.
- La base puede ser modelada como perfectamente empotrada, la unión entre columnas y la cimentación es infinitamente rígida, lo que permite no tomar en cuenta la interacción suelo-estructura.
- El amortiguamiento inherente de la estructura debe ser basado en el tipo de material que se emplee, la configuración y el comportamiento de la estructura y de los elementos no estructurales. A menos de que se pueda probar un amortiguamiento mayor, este se tomara como no más del 5 por ciento del amortiguamiento crítico para todos los modos de vibración.

#### a) Colocación de los dispositivos

La ubicación y número de amortiguadores colocados a lo largo y alto de la estructura influyen significativamente en su efectividad. El concepto fundamental es ubicar los disipadores necesariamente en los entresijos que presentan mayor velocidad y desplazamiento relativo, dado que de ese modo se estarían optimizando los recursos.

Una cantidad mayor de disipadores ubicados sin criterio pueden dar los mismos resultados que un número menor de disipadores ubicados estratégicamente, el ASCE 7-10 exige lo siguiente:

- Un mínimo 2 dispositivos por dirección de análisis en cada piso y en arreglo, tal que no genere torsión.

La arquitectura establecida, así como el uso destinado de la edificación, son factores importantes al momento de decidir la ubicación final de los disipadores.

Cuando los amortiguadores están alejados del centro de masa, nos brindan la ventaja de trabajar en la zona de máximas velocidades aportando además una mayor rigidez torsional. Otra ventaja de esta ubicación es la simetría y regularidad, factores que permiten un mejor control de los efectos de la torsión.

### b) Distribución horizontal del sistema disipativo

Normalmente, los disipadores se colocan cuando la estructura principal porticada ya soporta la mayor parte de la carga vertical, de forma que el sistema disipativo se limita a resistir las acciones horizontales. Tal como vemos en la figura 2.63., el sistema dual no estándar (con disipadores), con el objeto de analizar su comportamiento y dimensionamiento, se divide en dos subsistemas:

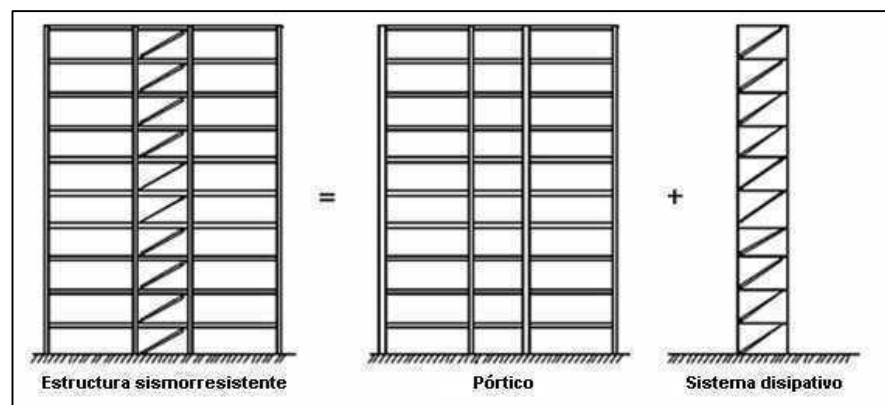


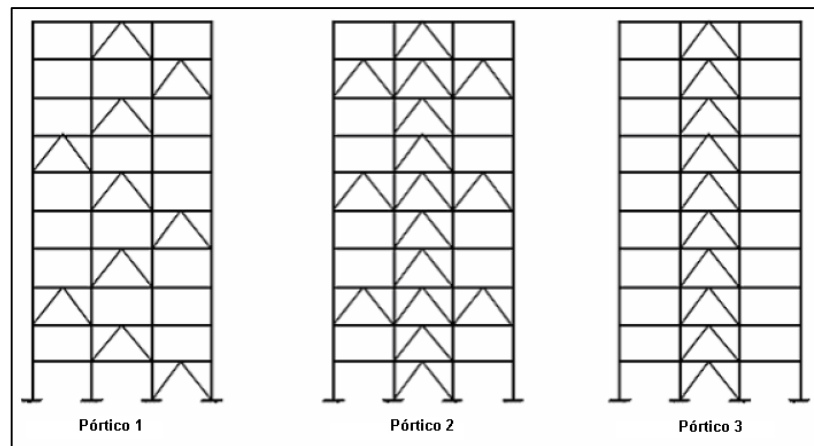
Figura 2.63. Subsistemas estructurales de una estructura sismorresistente con disipadores de energía (Fuente Cahís et al., 2001) comentario: el resultado será la superposición de ambos sistemas por individual.

Uno, constituido por la estructura aporticada convencional (subsistema flexible) y otro, consistente en el sistema disipativo (subsistema rígido). Establecer que los dispositivos no están condicionados por las acciones verticales es una hipótesis adoptada con frecuencia, y que se cumple, en mayor o menor grado, en función de la configuración adoptada por el conjunto del sistema disipativo.

### c) Distribución vertical del sistema disipativo

Otro aspecto a considerar dentro de las disposiciones constructivas, es la distribución vertical del sistema disipativo como en la figura 2.64. Si bien es cierto que los arriostramientos resultan eficientes para reducir los desplazamientos laterales, en comportamiento elástico aumentan notablemente el corte basal. La introducción de mecanismos disipativos en el sistema de respuesta horizontal

permite controlar de forma efectiva los desplazamientos de entre pisos con valores aceptables de corte basal.



*Figura 2.64.* Distribución vertical del sistema disipativo (Fuente Bozzo y Barbat, 2004: Diseño sismorresistente de edificios) comentario: Bozzo recomienda utilizar los dispositivos donde la estructura presente más deriva de entrepiso.

#### **d) Disposición diagonal**

Esta disposición se caracteriza por orientar el dispositivo en el ángulo diagonal del pórtico donde se ubicará. Por tanto, solamente la componente horizontal participa en la absorción de fuerzas horizontales.

Por otro lado, se suele necesitar un menor número de dispositivos que se utilizarían con otra disposición para el mismo nivel de desempeño objetivo. El amortiguamiento que brinde depende del ángulo de inclinación del brazo metálico que va sostener al disipador.

Debido a que el disipador es anexado a la estructura en un nudo rígido (unión viga columna) no se requiere de ningún refuerzo adicional en ningún elemento del pórtico, siendo así la disposición más económica, pues solo requiere de brazos metálicos para la instalación de los disipadores.

Además, gracias a que no genera sobreesfuerzos en la estructura, este tipo de arreglo puede ser diseñado e instalado tanto para nuevas estructuras como para las ya existentes que requieran de reforzamiento, siendo así muy efectivo para fines de rehabilitación.

#### **e) Propiedades de los disipadores**

##### **e.1) Coeficiente de Amortiguamiento (C)**

Que debe definirse a partir de las necesidades estructurales y la cantidad de amortiguamiento que se desee, y se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$C_d = \frac{AG''(\omega)}{\left(\frac{2\pi}{T_1}\right)h}$$

Donde:

A = área del disipador visco-elástico.

$C_d$  = coeficiente de amortiguamiento viscoso equivalente.

$G''(\omega)$  = módulo de pérdida de corte del material.

$T_1$  = periodo del primer modo de vibración.

El espesor del material "h" fluctúa ente 1-3cm y puede determinarse de la siguiente fórmula:

$$h = \frac{\text{deformación del disipador}}{\text{deformación permitida \%}}$$

### e.2) Rigidez equivalente

Según consideraciones especiales del fabricante como recomendaciones propuestas en el archivo SAP2000 / ETABS modeling (Documento de Taylor Devices), estos sugieren considerar la rigidez del brazo metálico al mismo tiempo que la rigidez de los disipadores, los cuales por encontrarse conectados a brazos metálicos en disposición de serie deberán sumarse su inversos, para obtener la rigidez efectiva proporcionada por este sistema. Por lo tanto, necesitamos saber estas dos rigideces, la rigidez del disipador y la rigidez axial de este brazo metálico que se aprecia a continuación.

$$K_b = \frac{E * A}{L}$$

Donde:

$K_b$  = Rigidez axial del brazo metálico.

E = Coeficiente de Elasticidad del material.

A = Área de la sección del brazo metálico.

L = Longitud del brazo metálico.

Donde la longitud L del brazo será la diferencia entre la longitud diagonal del marco y la longitud mínima del disipador que es de 0.79m.

Y la rigidez del disipador que viene dada por la siguiente expresión (Soong & Dargush):

$$K_d = \frac{2\xi K_e}{(\eta - 2\xi)\alpha}$$

Donde:

$K_d$  = rigidez del disipador visco-elástico.

$K_e$  = rigidez de la estructura sin disipadores.

$\xi$  = radio de amortiguamiento adicionado.

$\alpha$  = factor de acoplamiento con la estructura.

$\eta$  = factor de pérdida.

De los textos compilados se pudo obtener los siguientes parámetros para el empleo de disipadores visco-elásticos.

- Es muy común emplear perfiles del tipo HSS o PIPE por razones de estética y por las facilidades que se obtiene en la instalación.
- Los especialistas de MIYAMOTO INTERNATIONAL recomiendan iniciar con el proceso de iteración planteando un valor de 2000 kips/in, esta recomendación no se tomará en cuenta.

Así mismo, es importante que el perfil metálico seleccionado tenga suficiente momento de inercia (I) y área(A) para que este tenga suficiente resistencia contra el pandeo en la dirección de compresión. La figura 2.65 muestra las coordenadas globales del brazo metálico.

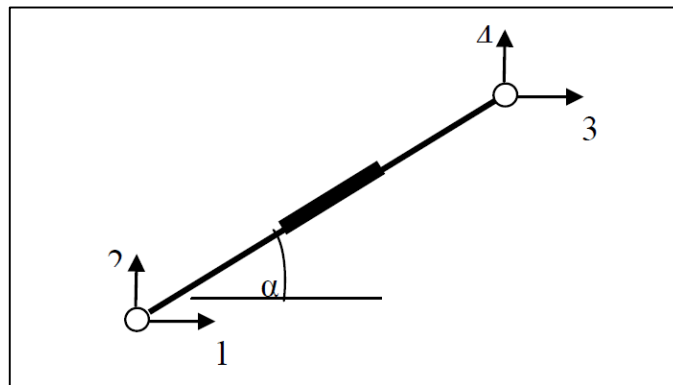


Figura 2.65. Coordenadas globales para el sistema brazo-disipador (Fuente Costa Castro, 2007: Tesis de Maestría “Análisis sísmico de estructuras con disipadores de energía visco-elásticos usando espectros y acelerogramas”) comentario: deben transformarse de coordenadas locales a globales, los elementos tipo link de la estructura.

$$\bar{K} = Ke' * \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha & -\text{Sen } \alpha * \text{Cos } \alpha & -\text{Cos}^2 \alpha & \text{Sen } \alpha * \text{Cos } \alpha \\ -\text{Sen } \alpha * \text{Cos } \alpha & \text{Sen}^2 \alpha & \text{Sen } \alpha * \text{Cos } \alpha & -\text{Sen}^2 \alpha \\ -\text{Cos}^2 \alpha & \text{Sen } \alpha * \text{Cos } \alpha & \text{Cos}^2 \alpha & -\text{Sen } \alpha * \text{Cos } \alpha \\ \text{Sen } \alpha * \text{Cos } \alpha & -\text{Sen}^2 \alpha & -\text{Sen } \alpha * \text{Cos } \alpha & \text{Sen}^2 \alpha \end{bmatrix}$$

De donde el único componente que participa en el eje de desplazamientos horizontales es el término  $\cos^2 \alpha$  para propósitos de la presente tesis, evidentemente un análisis pseudotridimensional implicaría el uso de toda la matriz.

### 2.2.28. Resumen de metodología general

Cuando se determina que es necesario intervenir un edificio para reducir su vulnerabilidad y se decide emplear disipadores, el siguiente procedimiento puede servir para ordenar el proceso de diseño.

- 1) Desarrollar el análisis sísmico de la edificación empleando la norma sismorresistente vigente con el objetivo de conocer si la edificación tiene la resistencia y rigidez exigidos.
- 2) Precisar los niveles de desempeño que se espera lograr frente a múltiples escenarios sísmicos (tipo de suelo, uso, etc.).
- 3) Establecer la deriva máxima que se pretende aceptar para cada nivel de desempeño (deriva objetivo,  $\Delta_{obj}$ ).
- 4) Luego, es necesario elegir el procedimiento de análisis y lograr una representación de las sollicitaciones sísmicas mediante señales de aceleración o espectros.
- 5) Desarrollar el análisis del edificio sin disipadores y obtener su máxima deriva ( $\Delta_{m\acute{a}x}$ ) para cada sismo de diseño.
- 6) Determinar los factores de reducción de deriva (B) que se deben lograr con los dispositivos para mantener la deriva por debajo de las derivas objetivo. Los factores de reducción se calculan como el cociente entre la deriva máxima obtenida de la estructura sin reforzar y la deriva objetivo.

$$B = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_{objetivo}}$$

- 7) Determinar el amortiguamiento efectivo necesario ( $\beta_{efectivo}$ ).
- 8) Definir una configuración de dispositivos y estimar un primer valor de amortiguamiento.
- 9) Diseñar el sistema de disipación, (ubicación y propiedades de los dispositivos), hasta lograr los objetivos de desempeño.
- 10) Verificar el nivel de amortiguamiento propuesto al sistema.
- 11) Verificación del comportamiento histerético del dispositivo en base a cargas cíclicas dadas por el análisis tiempo-historia no lineal (FNA).

### 2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

Se mencionará a continuación algunas definiciones relevantes para el mejor entendimiento del presente trabajo de investigación.

- a) Histéresis: Comportamiento inherente de un material para absorber energía, esta puede ser monitoreada y se representa de diferentes formas según el comportamiento mecánico del elemento a investigar.
- b) Acelerograma: Es un tipo de histograma que tiene en sus abscisas el tiempo y en las ordenadas aceleraciones del suelo, debido a un sismo, este puede ser registrados en tres componentes, horizontal (x e y) y vertical (z).
- c) Grado de libertad: se denomina grado de libertad a la capacidad que tenga un sistema de poder moverse libremente sin restricciones en cualquiera de sus 3 ejes tridimensionales o alrededor de cada uno de ellos.
- d) Ductilidad: Es la capacidad de un material, para poder deformarse sin llegar a un punto de colapso.
- e) Periodo: Es la capacidad que tiene una estructura para oscilar, cuya unidad de medida es en segundos.
- f) Amortiguamiento: Capacidad de todo material de disipar energía ya sea por fricción, viscosidad entre otros mecanismos, hasta que cesa su movimiento después de haber sufrido un desplazamiento inicial.
- g) Análisis modal espectral: es un método ventajoso para estimar los desplazamientos y fuerzas en los elementos de un sistema estructural.
- h) Sismos: Son vibraciones de la corteza terrestre ocasionados por distintos fenómenos, como la actividad volcánica, la caída de techos de cavernas subterráneas, explosiones y movimiento de las placas tectónicas.
- i) Peligrosidad Sísmica: Se la define a la probabilidad de ocurrencia, dentro de un período específico de tiempo y dentro de una región determinada, movimientos del suelo cuyos parámetros: aceleración, velocidad, desplazamiento, magnitud o intensidad son cuantificados.
- j) Disipadores visco-elásticos: Son los que están conformados por chapas o perfiles metálicos unidos por pads elastoméricos el cual se encuentra compuesto por un material visco-elástico (polímeros, copolímeros, sustancias vidriosas, etc.) que disipan energía cuando se someten a deformaciones por corte inducidas por desplazamientos relativos de las placas.



## CAPITULO III:

### 3. MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

##### a) Tipo de investigación

Por la finalidad, es una investigación exploratoria que ahonda en un desarrollo numérico, el cual se valida con un análisis sísmico comparativo al usar el ETABS.

##### b) Diseño de investigación

La presente investigación cae dentro de la categoría de diseño documental, puesto que la obtención teórica se realiza a partir de documentos y textos.

#### 3.2. POBLACIÓN Y/O MUESTRA DE ESTUDIO

Modelos de 2,3 y 4 GDL (Grados de Libertad) en suelos de tipo S0, S1, S2 y S3. Siendo un total de 24 modelos numéricos.

#### 3.3. OPERACIONALIZACION DE VARIABLES

##### a) Variable 1

Marcos planos tipo corte de varios grados de libertad convencionales.

##### b) Variable 2

Marcos planos tipo corte de varios grados de libertad con disipadores visco-elásticos.

Tabla 3.1

*Operacionalización de variables*

Variable	Indicador de la variable	Definición operacional	Tamaño muestral	Medición	Unidad de medida
Marcos planos tipo corte de varios grados de libertad convencionales	Distorsión	Relación entre desplazamiento de entrepiso y altura del piso	12 modelos numéricos	0.01	%
	Desplazamiento	Cantidad desplazada de una coordenada después de un evento sísmico	12 modelos numéricos	0.75*R	cm
	Energía	Capacidad para realizar un trabajo, esta debe ser balanceada por las diferentes propiedades dinámicas del modelo	12 modelos numéricos	5	%

Marcos planos tipo corte de varios grados de libertad con disipadores visco-elásticos	Distorsión	Relación entre desplazamiento de entrepiso y altura del piso	24 modelos numéricos	0.058	
	Desplazamiento	Cantidad desplazada de una coordenada después de un evento sísmico	24 modelos numéricos	R	
	Energía	Capacidad para realizar un trabajo, esta debe ser balanceada por las diferentes propiedades dinámicas del modelo	24 modelos numéricos	20-40	%
	Histéresis	relación P-Δ que mide el cambio de rigideces ante ciclos de cargas y descargas estocásticas	24 modelos numéricos	5	P-Δ

(Fuente Elaboración propia) comentario: las presentadas son las variables dependientes, con cargo a verificarlas una vez ejecutado el análisis.

### 3.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS

Tabla 3.2  
Ejemplo de tabla para comparación de resultados

Grados de Libertad	Tipo de Suelo	Casos	Frecuencia Angular $\omega_1$ (rad/s)		Periodo Natural T1(seg)		Amortiguamiento Modal $\xi_1$ (%)			Desplazamiento (m)		Deriva de Entrepiso			
			Calculo Manual	Calculo ETABS	Calculo Manual	Calculo ETABS	Amort. Objetivo (%) Según Newmark y Hall, Amort. Efectivo ( $\xi_{eff}$ )	Amortiguamiento Real(%)	Analisis Modal Espectral (ETABS)	Analisis Dinamico Tiempo-Historia No Lineal (ETABS)	Calculo Manual	Analisis Modal Espectral (ETABS)	Calculo Manual	Analisis Modal Espectral (ETABS)	Analisis Dinamico Tiempo-Historia No Lineal (ETABS)
		Sin disipador													
		Con disipador													

Esta es la tabla que se usará para comparar los resultados obtenidos del cálculo manual y el cálculo automatizado por el ETABS.

### 3.5. PROCESAMIENTO Y ANALISIS DE DATOS

La forma en que se procesará la información será la siguiente:

- Recopilación de información bibliográfica.
- Creación de modelos matemáticos manuales para aplicación de disipadores de energía.
- Revisión y supervisión por parte de ingenieros estructurales especializados en el área de aplicación de la investigación.
- Determinación de parámetros sísmicos y obtención de resultados de estructuras con y sin disipadores visco-elásticos.

## CAPITULO IV

### 4. RESULTADOS

A continuación, se mostrarán a detalle los cálculos para la resolución de marcos a cortante de varios grados de libertad con disipadores visco-elásticos escogidos según la importancia de análisis con la ayuda del programa matemático de diseño asistido por computadora MATHCAD (Mathematic Computer Aided Design) y corroborando resultados con el software ETABS (Extended 3D Analysis of building System).

Empezaremos con la obtención de las propiedades intrínsecas de la estructura como las frecuencias, periodos y amortiguamiento inherente para posteriormente con estos resultados obtener factores de participaciones modales, desplazamientos, distorsiones y la necesidad de implementar, si el caso lo amerita, amortiguamiento adicional mediante disipadores de energía visco-elásticos.

Cabe resaltar que por fines académicos solo se mostrará la obtención de resultados paso por paso para un primer caso (caso típico) de un marco de 2gdl, este se verificará con los resultados del ETABS y una vez validado se mostrarán solo resultados del programa con el fin de no hacer más densa la presente investigación, puesto que el procedimiento numérico es casi el mismo para todos los casos.

#### 4.1. MARCOS PLANOS DE 2 GRADOS DE LIBERTAD

##### 4.1.1. Cálculo manual en suelo tipo s0

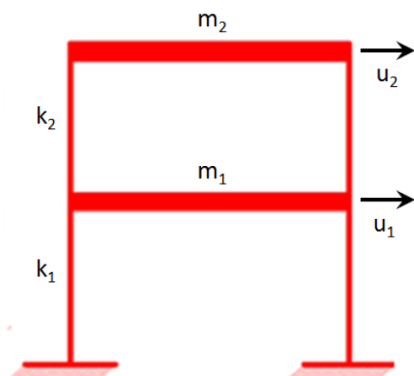


Figura 4.1. Pórtico de 2gdl  
(Fuente Elaboración propia)

Masa por nivel

$$m_1 = 29.59 * 8 \frac{kg*s^2}{cm} \quad m_2 = 14.29 * 8 \frac{kg*s^2}{cm}$$

Rigidez por nivel

$$k_1 = 4112.2 \frac{kg}{cm} \quad k_2 = 8213.2 \frac{kg}{cm}$$

##### 1. Matriz de Masa

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 23.672 & 0 \\ 0 & 11.432 \end{bmatrix}$$

## 2. Matriz de Rigidez

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 24650 & -16426 \\ -16426 & 16426 \end{bmatrix}$$

## 3. Cálculo de Autovalores

$$|K - \omega^2 * M| = \begin{bmatrix} -23.672 * \omega^2 + 24650 & -16426 \\ -16426 & -11.432 * \omega^2 - 16426 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} -47.5078 \\ 47.5078 \\ -14.8718 \\ 14.8718 \end{bmatrix}$$

## 4. Frecuencias y Períodos

$$\omega_1 = 14.87 \text{ rad/seg} \quad \text{Frecuencia del modo 1}$$

$$T_1 = \frac{2 * \pi}{\omega_1} = 0.423 \text{ seg} \quad \text{Periodo del modo 1}$$

$$\omega_2 = 47.51 \text{ rad/seg} \quad \text{Frecuencia del modo 2}$$

$$T_2 = \frac{2 * \pi}{\omega_2} = 0.132 \text{ seg} \quad \text{Periodo del modo 2}$$

## 5. Cálculo de Autovectores

Análisis del modo 1

Teniendo todos los valores usamos la función del mathcad

$$\omega_1 = K - \omega^2 * M \text{ reemplazar, } \omega = \omega_1 \rightarrow \begin{pmatrix} 19414.43 & -16426 \\ -16426 & 13897.57 \end{pmatrix}$$

Normalizando respecto del primer nivel, tendremos:

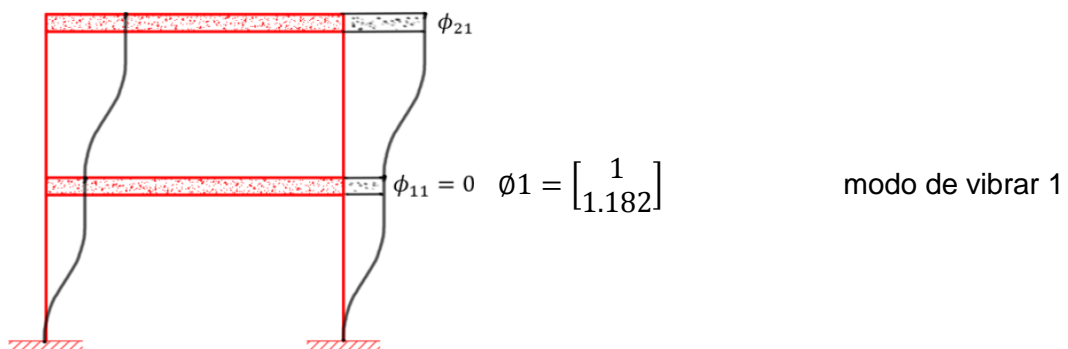


Figura 4.2. Modos de vibrar 1 de 2gdl  
(Fuente Elaboración propia)

## Análisis del modo 2

$$\omega_2 = K - \omega^2 * M \text{ reemplazar, } \omega = \omega_2 \rightarrow \begin{pmatrix} -28777.41 & -16426 \\ -16426 & -9375.88 \end{pmatrix}$$

Normalizando respecto del primer nivel, tendremos:

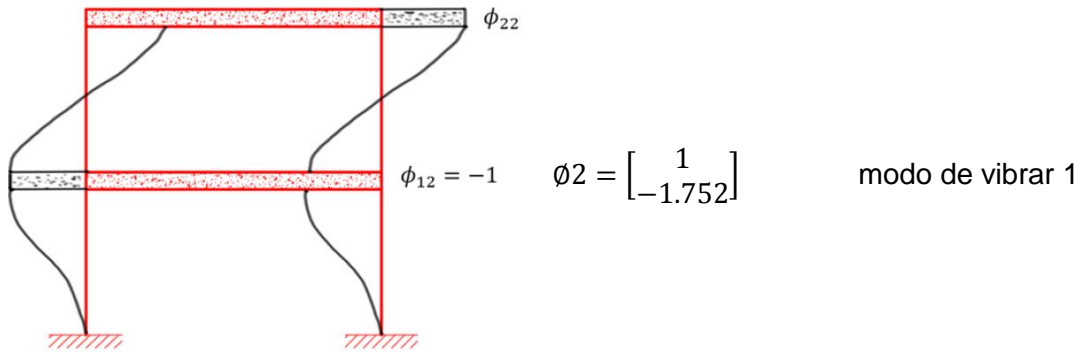


Figura 4.3. Modos de vibrar 2 de 2gdl

(Fuente Elaboración propia)

## 6. Normalización de modos

Modo 1

$$\phi_{11} = \frac{\phi_{11}}{\sqrt{m_1 * \phi_{11}^2 + m_2 * \phi_{21}^2}} = 0.1588$$

$$\phi_{12} = \frac{\phi_{12}}{\sqrt{m_1 * \phi_{11}^2 + m_2 * \phi_{21}^2}} = 0.1305$$

Modo 2

$$\phi_{21} = \frac{\phi_{21}}{\sqrt{m_1 * \phi_{21}^2 + m_2 * \phi_{22}^2}} = 0.1877$$

$$\phi_{22} = \frac{\phi_{22}}{\sqrt{m_1 * \phi_{21}^2 + m_2 * \phi_{22}^2}} = -0.2285$$

## 7. Ortogonalidad de los modos

$$\phi = \begin{bmatrix} 0.1588 & 0.1305 \\ 0.1877 & -0.2285 \end{bmatrix}$$

$$\phi^T * M * \phi = I$$

$$\phi^T * M * \phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### 8. Matriz de amortiguamiento

Se considerará una matriz de amortiguamiento clásico y proporcional a la masa y la rigidez (amortiguamiento de Rayleigh) de 5%.

$$A = \begin{bmatrix} 2 * \xi_1 * \omega_1 * M & 0 \\ 0 & 2 * \xi_1 * \omega_2 * M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.487 & 0 \\ 0 & 4.751 \end{bmatrix}$$

$$C = \varphi^T * A * \varphi = \begin{bmatrix} 66.328 & -26.332 \\ -26.332 & 39.281 \end{bmatrix}$$

### 9. Frecuencias y períodos amortiguados

$$K + p^2 * M + p * C \rightarrow \begin{pmatrix} 23.672 * p^2 + 66.33p + 24650 & -26.33p - 16426 \\ -26.33p - 16426 & 11.432 * p^2 + 39.28p + 16426 \end{pmatrix}$$

Resolviendo esta nueva ecuación característica tendremos:

$$|K + p^2 * M + p * C| \text{ resolver } , p \rightarrow \begin{bmatrix} -0.744 + 14.853i \\ -0.744 - 14.853i \\ -2.375 - 47.448i \\ -2.375 + 47.448i \end{bmatrix}$$

Ahora determinamos los periodos amortiguados

$$T_{D1} = \frac{2 * \pi}{\omega_{D1}} = 0.423 \text{ seg} \quad \text{periodo amortiguado 1}$$

$$T_{D2} = \frac{2 * \pi}{\omega_{D2}} = 0.132 \text{ seg} \quad \text{periodo amortiguado 2}$$

### 10. Amortiguamiento modal

$$\xi_1 = \frac{Re(p_1)}{|p_1|} = 0.05 \quad \text{amortiguamiento del modo 1}$$

$$\xi_2 = \frac{Re(p_2)}{|p_2|} = 0.05 \quad \text{amortiguamiento del modo 2}$$

### 11. Cálculo de Autovectores con amortiguamiento

Análogo el cálculo de autovectores sin amortiguar, se reemplazarán los valores de cada frecuencia en la ecuación característica, obteniéndose lo siguiente:

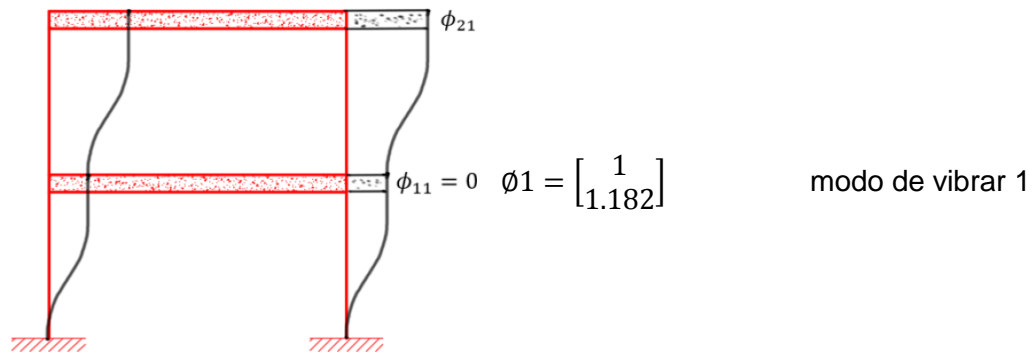


Figura 4.4. Modos de vibrar 1 de 2gdl con amort. (Fuente Elaboración propia)

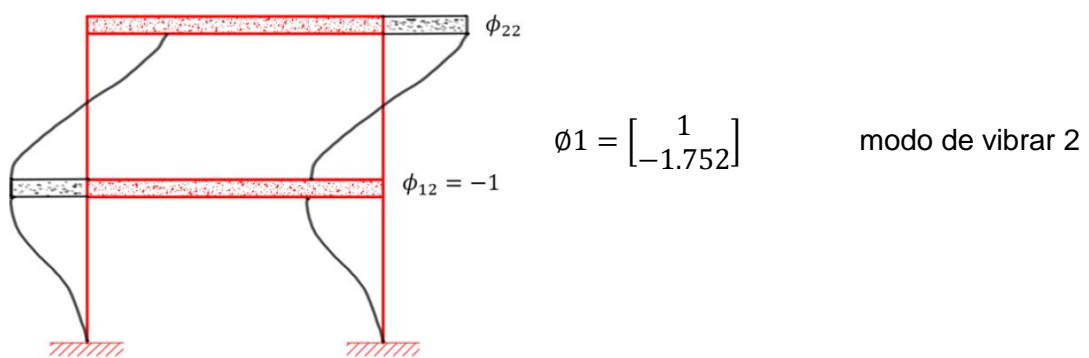


Figura 4.5. Modos de vibrar 1 de 2gdl con amort. (Fuente Elaboración propia)

12. Factor de Participación Modal

$r_1 = -(m_1 * \phi_{11} * +m_2 * \phi_{21}) = -5.906$  FPM del modo 1

$r_2 = -(m_1 * \phi_{12} * +m_2 * \phi_{22}) = -0.475$  FPM del modo 2

13. Análisis Modal Espectral

Parámetros Sísmicos	
Z	0.45
U	1.50
S	0.80
Tl	2.50
Rxx = Ryy	8.00
Tp	0.40

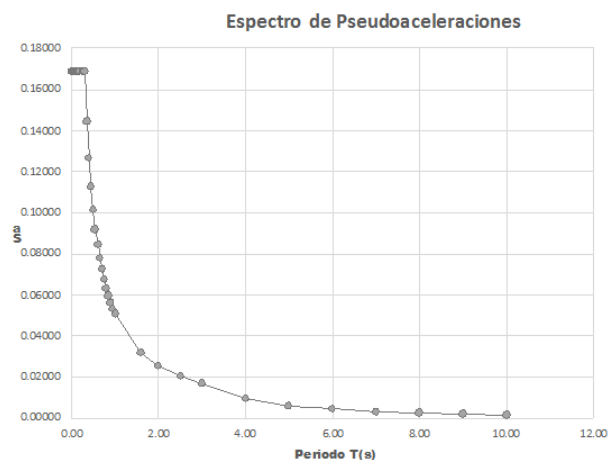


Figura 4.6. Parámetros sísmicos y espectro de respuesta para S0 (Fuente Elaboración propia)

## 14. Cálculo de Pseudoaceleraciones

$$Sa_1 = \frac{ZUC_1 S}{R} * g = 1.175$$

$$Sa_2 = \frac{ZUC_2 S}{R} * g = 1.655$$

## 15. Cálculo de desplazamientos laterales

Modo 1

$$u_{11} = r_1 * \phi_{11} * \frac{Sa_1}{\omega_1^2} = -0.005$$

Modo 2

$$u_{21} = r_1 * \phi_{21} * \frac{Sa_1}{\omega_1^2} = -0.0059$$

$$u_{12} = r_2 * \phi_{12} * \frac{Sa_2}{\omega_2^2} = -0.00005$$

$$u_{22} = r_2 * \phi_{22} * \frac{Sa_2}{\omega_2^2} = -0.00008$$

Combinación CQC para desplazamientos (Calculo completo en Mathcad, CD)

$$U_{CQC1} := 0.75 R_d \sqrt{\sum_{n=0}^1 cqc1_{n,0} + \sum_{n=0}^1 cqc1_{n,1}} = 0.0 \quad U_{CQC2} := 0.75 R_d \sqrt{\sum_{n=0}^1 cqc2_{n,0} + \sum_{n=0}^1 cqc2_{n,1}} = 0.035$$

## 16. Derivas de entrepiso

Modo 1

$$\Delta_{11} := \Gamma_1 \cdot (\Phi_{11} - 0) \cdot \frac{Sa_1}{\omega_1^2 \cdot h_1} = -0.001$$

Modo 2

$$\Delta_{21} := \Gamma_1 \cdot (\Phi_{21} - \Phi_{11}) \cdot \frac{Sa_1}{\omega_1^2 \cdot (h_2 - h_1)} = -0.0003$$

$$\Delta_{12} := \Gamma_2 \cdot (\Phi_{12} - 0) \cdot \frac{Sa_2}{\omega_2^2 \cdot h_1} = -0.00001$$

$$\Delta_{22} := \Gamma_2 \cdot (\Phi_{22} - \Phi_{12}) \cdot \frac{Sa_2}{\omega_2^2 \cdot (h_2 - h_1)} = 0.00004$$

Combinación CQC para derivas (Calculo completo en Mathcad, CD)

$$\Delta_{CQC1} := 0.75 R_d \sqrt{\sum_{n=0}^1 cqc1_{n,0} + \sum_{n=0}^1 cqc1_{n,1}} = 0.0059 \quad \Delta_{CQC2} := 0.75 R_d \sqrt{\sum_{n=0}^1 cqc2_{n,0} + \sum_{n=0}^1 cqc2_{n,1}} = 0.00183$$

La máxima deriva no debe exceder el parámetro establecido por la NTE E030 de 0.01 para marcos de acero, obteniéndose para este caso un valor de 0.0059, valor muy por debajo de lo tolerado por el código.



#### 4.1.2. Cálculo mediante ETABS en suelo tipo s0

##### 1. Marco de 2 grados de libertad sin amortiguamiento

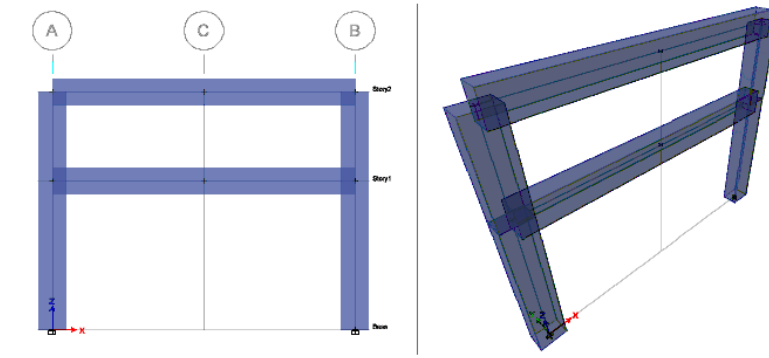


Tabla 4.1

Resultados obtenidos del ETABS v. 16

Case	Mode	Period	Frecuency	Circular Frecuency	Story	Ux Max	Drift Max
Modal	1	0.422	2.368	14.8779	Story 2	0.035459	0.001837
Modal	2	0.132	7.564	47.5261	Story 1	0.029998	0.006

(Fuente: Elaboración propia) comentario: para poder tener una prueba fehaciente de estos resultados, se adjunta archivo. xmcd en el CD presentado como parte del trabajo de investigación.

Comparando los resultados manuales con los obtenidos por el software queda demostrada la consistencia teórica de los cálculos manuales.

##### 2. Amortiguamiento objetivo

Primero calculamos si el sistema necesita amortiguamiento externo

a) Evocando al capítulo anterior, se dan a conocer los siguientes parámetros:

Importancia: Edificación esencial.

Sismo de diseño: 475 años de periodo de retorno.

Nivel de desempeño: Resguardo de vida.

Estado de daño: Moderado.

Deriva y amortiguamiento objetivo: S2M

Deriva Objetivo: 0.58%

Por lo tanto, obtenemos:

$$B := \frac{\Delta_{SRSS1}}{D_{objetivo}} = 1.031$$

##### 3. Amortiguamiento viscoso requerido:

$$\beta_{eff} := B = \frac{2.31 - 0.41 \cdot \ln(5)}{2.31 - 0.41 \cdot \ln(\beta_{eff})} \text{ resolver } , \beta_{eff} \rightarrow 5.65096215162101137$$

$$\beta_H := \beta_{\text{eff}} - 5 = 0.651$$

El pórtico no requiere ningún tipo de sistema de disipación de energía, ya que el amortiguamiento viscoso(añadido) es de 0.651%. y con esto basta para llegar a la deriva objetivo que es 0.0058 por tal motivo se recomienda otro tipo de sistema de reforzamiento.

En la tabla 4.13 se muestran las propiedades dinámicas para los demás pórticos o marcos comparando la parte manual con la obtenida con el ETABS v16. Habiendo afianzado y comprobado la validez del cálculo manual, más adelante se mostrarán los resultados arrojados por el software en tablas, con la finalidad de no hacer más denso el presente trabajo, esto para marcos de 3 gdl y 4 gdl en el suelo S0.

#### 4.1.3. Cálculo mediante ETABS en suelo tipo s1

##### 1. Marco de 2gdl sin amortiguamiento

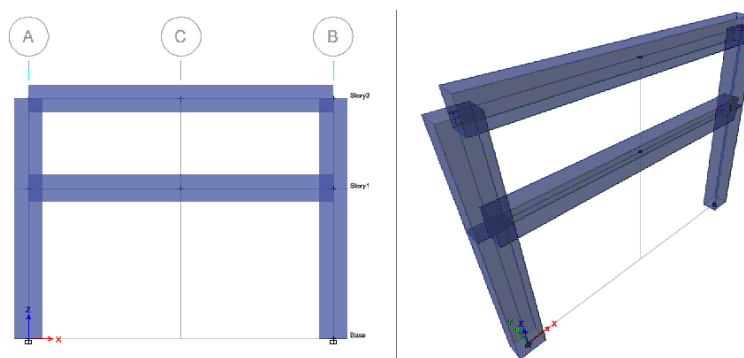


Tabla 4.2

Resultados obtenidos del ETABS v. 16

Case	Mode	Period	Frecuency	Circular Frecuency	Story	Ux Max	Drift Max
Modal	1	0.422	2.368	14.8779	Story 2	0.059079	0.003048
Modal	2	0.132	7.564	47.5261	Story 1	0.049982	0.009996

(Fuente: Elaboración propia) comentario: para poder tener una prueba fehaciente de estos resultados, se adjunta archivo. xmcd en el CD presentado como parte del trabajo de investigación.

##### 2. Análisis tiempo-historia sin disipadores

En la presente investigación se utilizaron tres acelerogramas sísmicos correspondientes a los años 1966 y 1974 en sus dos componentes X e Y, la tabla 4.3 ilustra este hecho.

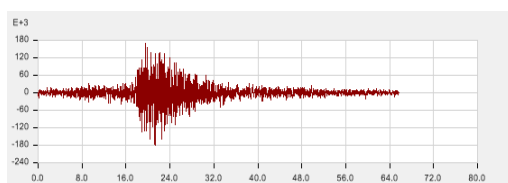
Tabla 4.3

*Características de los sismos*

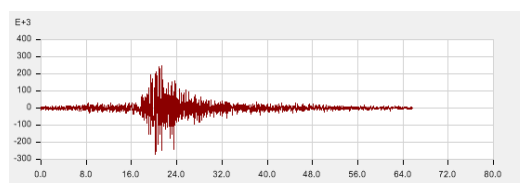
Fecha	Componentes	Duración (seg)	Valores Máximos		
			Aceleración (cm/s <sup>2</sup> )	Velocidad (cm/s)	Desplazamiento (cm)
17-oct-66	N82W	66.00	-180.60	13.20	7.30
	N08E	66.00	-269.30	-21.60	-16.60
05-ene-74	L COMP	33.00	-139.60	3.23	1.30
	T COMP	33.00	-156.20	4.40	1.10
03-oct-74	N82W	98.00	-192.50	14.50	6.40
	N08E	98.00	179.00	10.30	-5.30

(Fuente: IGP) comentario: datos proporcionados por Ing. Lazares.

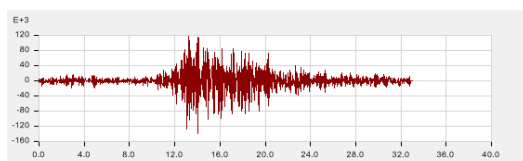
La siguiente figura muestra los 3 pares de registros sísmicos utilizados en la investigación.



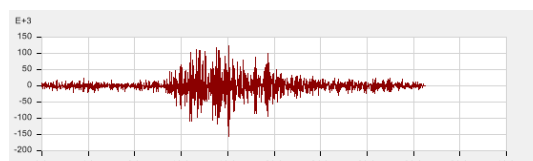
Acelerograma c6610n82



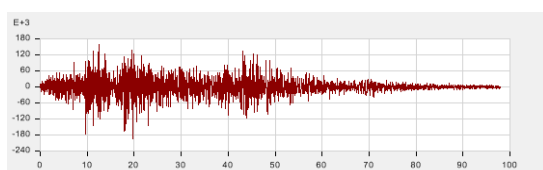
Acelerograma c6610n08



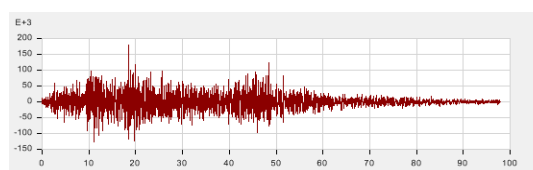
Acelerograma c7401lz



Acelerograma c7401tz



Acelerograma c7410n82



Acelerograma c7410n08

*Figura 4.7.* Acelerogramas para suelos tipo S1 (Fuente Elaboración propia) comentario: el escalamiento debe elaborarse con acelerogramas ocurridos en lugares con el mismo tipo de suelo a la estructura a evaluar.

### 3. Escalamiento de acelerogramas

Registro Sísmico – Lima 17/10/1966

Se consideró el registro sísmico completo de Lima del 17 de octubre de 1966 amplificado con la máxima aceleración del suelo peruano  $Z=0.45g$  (N.T.E E-030),  $U=1.50$  y cuya magnitud asciende aproximadamente a la de un sismo severo.

El factor de escala que se utilizó en los modelos para amplificar el registro sísmico de Lima del 17 de octubre 1966 es el siguiente:

**Norma: Diseño Sismorresistente E.030**

Aceleración máxima en el suelo =  $0.45 \times 1.50 \times 981$  = 662.175 cm/s<sup>2</sup>  
peruano

**Sismo-Lima 1966**

Aceleración máxima del sismo  
Este-Oeste = 180.6 = 180.6 cm/s<sup>2</sup>  
Norte-Sur = 269.3 = 269.3 cm/s<sup>2</sup>  
Entonces:

Factor de escala

(Unidad= 0.001)

Este-Oeste =  $(662.175/180.6) \times 0.001$  = 0.00366653 cm/s<sup>2</sup>  
**3.6665E-05 m/s<sup>2</sup>**  
Norte-Sur =  $(662.175/269.3) \times 0.001$  = 0.00245887 cm/s<sup>2</sup>  
**2.4589E-05 m/s<sup>2</sup>**

**Registro Sísmico – Lima 05/01/1974**

El factor de escala que se utilizó en los modelos para amplificar el registro sísmico de Lima del 05 de enero 1974 es el siguiente:

**Norma: Diseño Sismorresistente E.030**

Aceleración máxima en el suelo =  $0.45 \times 1.50 \times 981$  = 662.175 cm/s<sup>2</sup>  
peruano

**Sismo-Lima Enero 1974**

Aceleración máxima del sismo  
Este-Oeste = 139.6 = 139.6 cm/s<sup>2</sup>  
Norte-Sur = 156.2 = 156.2 cm/s<sup>2</sup>  
Entonces:

Factor de escala

(Unidad= 0.001)

Este-Oeste =  $(662.175/139.6) \times 0.001$  = 0.00474337 cm/s<sup>2</sup>  
**4.7434E-05 m/s<sup>2</sup>**  
Norte-Sur =  $(662.175/156.2) \times 0.001$  = 0.00423928 cm/s<sup>2</sup>  
**4.2393E-05 m/s<sup>2</sup>**

**Registro Sísmico – Lima 03/10/1974**

El factor de escala que se utilizó en los modelos para amplificar el registro sísmico de Lima del 03 de octubre 1974 es el siguiente:

**Norma: Diseño Sismorresistente E.030**

Aceleración máxima en el suelo peruano =  $0.45 \times 1.50 \times 981$  = 662.175 cm/s<sup>2</sup>

**Sismo-Lima Octubre 1974**

Aceleración máxima del sismo

Este-Oeste = 192.5 = 192.5 cm/s<sup>2</sup>

Norte-Sur = 179 = 179 cm/s<sup>2</sup>

Entonces:

Factor de escala

(Unidad= 0.001)

Este-Oeste =  $(662.175/192.5) \times 0.001$  = 0.00343987 cm/s<sup>2</sup>

**3.4399E-05 m/s<sup>2</sup>**

Norte-Sur =  $(662.175/179) \times 0.001$  = 0.0036993 cm/s<sup>2</sup>

**3.6993E-05 m/s<sup>2</sup>**

Tabla 4.4

*Respuesta del edificio sin disipadores*

	Sismo 66		Sismo 74		Sismo 74	
	17 de Octubre 1966		05 de Enero 1974		10 de Octubre 1974	
	N82W	N08E	L COMP	T COMP	N82W	N08E
Nivel 2	2.274	3.082	1.354	0.867	3.41	3.039
Nivel 1	7.692	10.161	3.875	2.703	10.971	9.478

(Fuente: Elaboración propia) comentario: se pueden apreciar la respuesta de la estructura ante los acelerogramas escalados mostrados anteriormente.

La deriva inelástica máxima en la dirección X (tabla 4.4) se presenta para el sismo de 10 de octubre 1974 con un valor de 10.971 %.

#### 4. Amortiguamiento objetivo

$$\beta_{\text{eff}} := B = \frac{2.31 - 0.41 \cdot \ln(5)}{2.31 - 0.41 \cdot \ln(\beta_{\text{eff}})} \text{ resolver } , \beta_{\text{eff}} \rightarrow 26.9246199349462246$$

$$\beta_H := \beta_{\text{eff}} - 5 = 21.925$$

La estructura necesita un amortiguamiento adicional de 21.925%, por lo que se procede al cálculo de los disipadores visco-elásticos y se realizarán los cálculos manuales para este caso (caso típico), luego se validarán los resultados con el programa ETABS v.16, para posterior nuevamente una vez validados, mostrar solo resultados del software con la finalidad de no hacer más densa la presente investigación.

- Verificación del marco plano de 2gdl en suelo tipo S1 con DVE.

## 5. Cálculo Manual de las respuestas

### 5.1 Cálculo preliminar de rigidez

Se inicia la iteración considerando un perfil metálico estándar PIPE 10 STD.

Dimensiones PIPE 10 STD				
D ext. (in)	D int. (in)	espesor (in)	Area (in <sup>2</sup> )	Inercia (in <sup>4</sup> )
10.8	10	0.349	13.6	262

Rigidez axial del brazo metálico

$$K_{b.m.} := \frac{EA}{L}$$

Propiedades mecánicas

$$E_{\text{acero}} := 20.4 \cdot 10^6$$

$$A_{\text{acero}} := 13.6 \cdot 0.254^2 = 0.00877$$

Donde: L es la longitud del brazo metálico, considerando una longitud mínima de 31 in.

$$L_{1\text{er piso}} := 10.3'$$

$$L_{\text{tipico}} := 9.65'$$

$$K_{1\text{er piso}} := \frac{E_{\text{acero}} \cdot A_{\text{acero}}}{L_{1\text{er piso}}} \cdot \cos\left(26.5651 \frac{\pi}{180}\right)^2 = 13781.95$$

$$K_{\text{tipico}} := \frac{E_{\text{acero}} \cdot A_{\text{acero}}}{L_{\text{tipico}}} \cdot \cos\left(16.6992 \frac{\pi}{180}\right)^2 = 17016.996$$

Ke (1er piso)	822.4	tn/m	
Ke (2do piso)	1642.6	tn/m	
$\beta$	0.22		
G'(w)	0.38	ksi	267.73 tn/m <sup>2</sup>
G''(w)	0.51	ksi	359.32 tn/m <sup>2</sup>
n	1.3421		
T	0.4225	seg	

PISO	Ke(tn/m)	( $\alpha$ di)	Kd (Tn/m)	h(m)	A(m <sup>2</sup> )	Cd(T.s/m)
PISO 1	822.4	1	401.124	0.016	0.024	36.200
PISO2	1642.6	1	801.175	0.014	0.042	72.304

Figura 4.8. Consideraciones para los disipadores (Fuente elaboración propia)

A partir de las primeras iteraciones, procedemos a ajustar la rigidez del brazo

$$K_{1\text{er piso}} = 13781.947$$

$$K_{\text{tipico}} = 17016.996$$

Y una vez afinado los modelos, se obtiene finalmente la primera alternativa viable considerando el siguiente coeficiente de amortiguamiento:

$$C_{d,1} := 36.20$$

$$C_{d,2} := 72.30$$

## 6. Matriz de rigidez del disipador

$$K_{bd1} := \frac{K_{1\text{er piso}} \cdot 401.124}{K_{1\text{er piso}} + 401.124} = 389.779$$

$$K_{bd2} := \frac{K_{\text{tipico}} \cdot 801.175}{K_{\text{tipico}} + 801.175} = 765.151$$

$$K_{BD} := \begin{pmatrix} K_{bd1} + K_{bd2} & -K_{bd2} \\ -K_{bd2} & K_{bd2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1154.93 & -765.151 \\ -765.151 & 765.151 \end{pmatrix}$$

Finalmente, la matriz de rigidez total de la estructura con disipadores y brazo.

$$K_{TOTAL} := K_{BD} + \frac{K}{10} = \begin{pmatrix} 3619.93 & -2407.751 \\ -2407.751 & 2407.751 \end{pmatrix}$$

## 7. Periodos y frecuencias

$$\omega := \sqrt{\text{genvals} \left( K_{TOTAL}, \frac{M}{10} \right)} = \begin{pmatrix} 18.052 \\ 57.528 \end{pmatrix}$$

## 8. Modos de vibrar

Ahora calcularemos los modos con un metacomando propio del MATHCAD.

$$\text{genvecs} \left( K_{TOTAL}, \frac{M}{10} \right) = \begin{pmatrix} 0.845 & -0.571 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$$

## 9. Modos normalizados

$$\psi_1 := \frac{\text{genvecs} \left( K_{TOTAL}, \frac{M}{10} \right)^{\langle 0 \rangle}}{\sqrt{\text{genvecs} \left( K_{TOTAL}, \frac{M}{10} \right)^{\langle 0 \rangle T} \cdot M \cdot \text{genvecs} \left( K_{TOTAL}, \frac{M}{10} \right)^{\langle 0 \rangle}}} = \begin{pmatrix} 0.159 \\ 0.188 \end{pmatrix}$$

$$\psi_2 := \frac{\text{genvecs} \left( K_{TOTAL}, \frac{M}{10} \right)^{\langle 1 \rangle}}{\sqrt{\text{genvecs} \left( K_{TOTAL}, \frac{M}{10} \right)^{\langle 1 \rangle T} \cdot M \cdot \text{genvecs} \left( K_{TOTAL}, \frac{M}{10} \right)^{\langle 1 \rangle}}} = \begin{pmatrix} -0.131 \\ 0.228 \end{pmatrix}$$

## 10. Matriz de amortiguamiento del disipador

Como se explicó en los capítulos anteriores se utilizará el método energético de deformación modal (MSE).

Cálculo de los coeficientes de amortiguamiento para cada modo

$$\xi_1 := \frac{C_{d.1}(\psi_{10})^2 + C_{d.2}[(\psi_{11}) - (\psi_{10})]^2}{2 \cdot \omega_0} = 0.027$$

$$\xi_2 := \frac{C_{d.1}(\psi_{20})^2 + C_{d.2}[(\psi_{21}) - (\psi_{20})]^2}{2 \cdot \omega_1} = 0.086$$

Luego:

$$C_{d1} := \frac{2 \cdot \xi_1 \cdot \omega_0}{1} \cdot (M \cdot \psi_1 \cdot \psi_1^T \cdot M) = \begin{pmatrix} 13.751 & 7.856 \\ 7.856 & 4.489 \end{pmatrix}$$

$$C_{d2} := \frac{2 \cdot \xi_2 \cdot \omega_1}{1} \cdot (M \cdot \psi_2 \cdot \psi_2^T \cdot M) = \begin{pmatrix} 94.85 & -80.174 \\ -80.174 & 67.769 \end{pmatrix}$$

$$C_D := C_{d1} + C_{d2} = \begin{pmatrix} 108.601 & -72.317 \\ -72.317 & 72.257 \end{pmatrix}$$

## 11. Periodos y frecuencias amortiguados

Al tener en cuenta que el programa ETABS calcula los eigenvalores, sin considerar el coeficiente de amortiguamiento dentro de las ecuaciones de movimiento, debido a que dicho amortiguamiento añadido al sistema se verá reflejado en el análisis de Respuesta Espectral, el cálculo de los nuevos periodos y frecuencias se verán alterados por el adiconamiento de la rigidez proporcionado por el disipador y el brazo metálico, por lo tanto:

$$[K - \Omega^2 M] \Phi = 0$$

$$\omega := \sqrt{\text{genvals} \left( K_{\text{TOTAL}} \frac{M}{10} \right)} = \begin{pmatrix} 18.052 \\ 57.528 \end{pmatrix}$$

$$T_{BD} := \frac{2\pi}{\omega} = \begin{pmatrix} 0.348 \\ 0.109 \end{pmatrix}$$

$$T_{bd1} := T_{BD0} = 0.348 \quad T_{bd2} := T_{BD1} = 0.109$$



## 12. Análisis Modal Espectral con disipadores

Utilizando el amortiguamiento obtenido, se emplean los factores de reducción propuestos por el ASCE 7-10 Cap. 18 para reducir el espectro de diseño de manera que esté acorde con el amortiguamiento añadido a la estructura. Para un valor promedio obtenido del 27% le corresponden factores de reducción espectral  $B = 1.75$

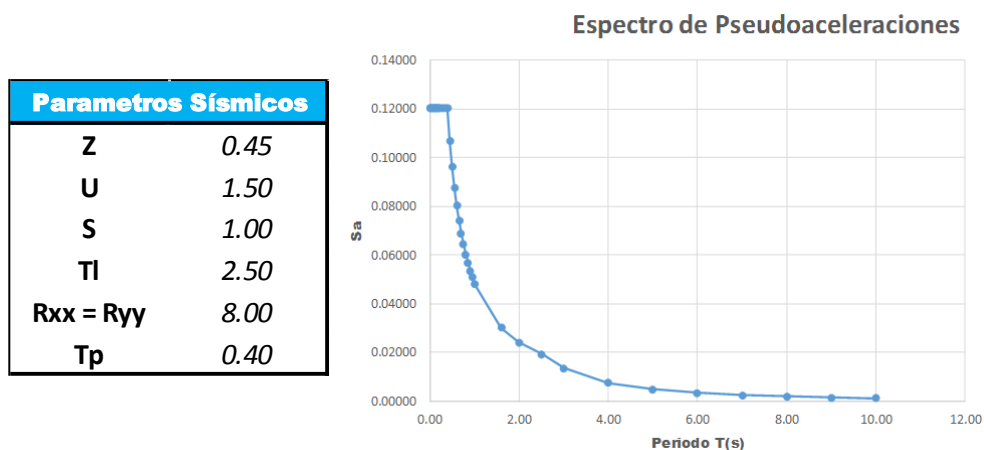


Figura 4.9. Parámetros sísmicos y Espectro de respuesta reducido (Fuente elaboración propia) comentario: el espectro de respuesta se reduce por un B determinado según el amortiguamiento que proporcionaría el disipador.

## 13. Pseudoaceleraciones

$$T_{bd1} = 0.3481$$

$$Sa_1 := \frac{Z \cdot U \cdot C_1 \cdot S}{R_d \cdot FR} \cdot g = 1.182$$

$$T_{bd2} = 0.1092$$

$$Sa_2 := \frac{Z \cdot U \cdot C_2 \cdot S}{R_d \cdot FR} \cdot g = 1.182$$

## 14. Cálculo de desplazamientos laterales

$$u_{11} := \Gamma_1 \cdot \psi_{10} \cdot \frac{Sa_1}{(\omega_0)^2} = -0.0034$$

$$u_{21} := \Gamma_1 \cdot \psi_{11} \cdot \frac{Sa_1}{(\omega_0)^2} = -0.00402$$

$$u_{12} := \Gamma_2 \cdot \psi_{20} \cdot \frac{Sa_2}{(\omega_1)^2} = 0.00002$$

$$u_{22} := \Gamma_2 \cdot \psi_{21} \cdot \frac{Sa_2}{(\omega_1)^2} = -0.00004$$

Combinación CQC para desplazamientos (Calculo completo en Mathcad, CD)

$$U_{CQC1} := 0.75 R_d \sqrt{\sum_{n=0}^1 cqc1_{n,0} + \sum_{n=0}^1 cqc1_{n,1}} = 0.02 \quad U_{CQC2} := 0.75 R_d \sqrt{\sum_{n=0}^1 cqc2_{n,0} + \sum_{n=0}^1 cqc2_{n,1}} = 0.024$$

## 15. Cálculo de derivas de entresiso

$$\Delta_{11} := \Gamma_1 \cdot (\psi_{10} - 0) \cdot \frac{Sa_1}{(\omega_0)^2 \cdot h_1} = -0.00068 \quad \Delta_{21} := \Gamma_1 \cdot (\psi_{11} - \psi_{10}) \cdot \frac{Sa_1}{(\omega_0)^2 \cdot (h_2 - h_1)} = -0.00021$$

$$\Delta_{12} := \Gamma_2 \cdot (\psi_{20} - 0) \cdot \frac{Sa_2}{(\omega_1)^2 \cdot h_1} = 0 \quad \Delta_{22} := \Gamma_2 \cdot (\psi_{21} - \psi_{20}) \cdot \frac{Sa_2}{(\omega_1)^2 \cdot (h_2 - h_1)} = -0.00002$$

Combinación CQC para derivas (Calculo completo en Mathcad, CD)

$$\Delta_{CQC1} := 0.75 R_d \sqrt{\sum_{n=0}^1 cqc1_{n,0} + \sum_{n=0}^1 cqc1_{n,1}} = 0.00408$$

$$\Delta_{CQC2} := 0.75 R_d \sqrt{\sum_{n=0}^1 cqc2_{n,0} + \sum_{n=0}^1 cqc2_{n,1}} = 0.00125$$

El máximo desplazamiento relativo calculado no debe exceder, en este caso para pórtico de acero de media altura, de 0.0058 lo cual cumple con las normas de diseño.

## 16. Verificación del nivel de amortiguamiento

$$\xi_{11} := -\frac{\operatorname{Re}(\rho_{1d})}{|\rho_{1d}|} = 0.32$$

$$\xi_{22} := -\frac{\operatorname{Re}(\rho_{2d})}{|\rho_{2d}|} = 0.913$$

$$\Xi_{11} := \xi_{11} \cdot 100 = 31.965 \%$$

$$\Xi_{22} := \xi_{22} \cdot 100 = 91.348$$

## 4.1.4. Cálculo mediante ETABS en suelo tipo s1 con disipadores

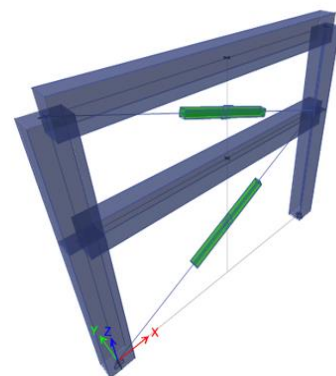
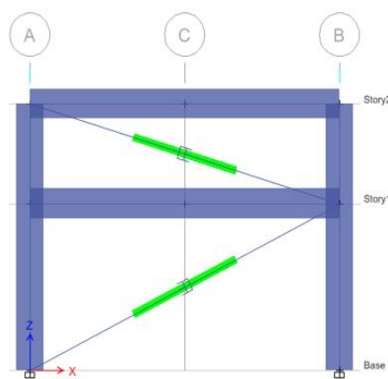


Tabla 4.5

*Respuesta del edificio con disipadores*

Case	Mode	Period	Frecuency	Circular Frecuency	Story	Ux Max	Drift Max	Damping
Modal	1	0.348	2.874	18.0588	Story 2	0.022743	0.001178	0.32
Modal	2	0.109	9.159	57.5486	Story 1	0.019222	0.003844	0.9146

(Fuente: Elaboración propia) comentario: se pueden apreciar la respuesta de la estructura ante los acelerogramas escalados mostrados anteriormente.

Se muestran que las razones de amortiguamiento no son constantes para cada modo como en el caso de un sistema sin disipadores donde el amortiguamiento es 5% para todos los modos, aquí no sucede esto debido a que al añadirse dispositivos de energía los coeficientes de amortiguamiento de los dispositivos cambian la ecuación de movimiento, alterando los resultados de las razones de amortiguamiento.

## 1. Análisis tiempo-historia con disipadores

Tabla 4.6

*Derivas máximas del análisis tiempo-historia (‰) en la dirección x.*

	Sismo 66 17 de Octubre 1966		Sismo 74 05 de Enero 1974		Sismo 74 10 de Octubre 1974	
	N82W	N08E	L COMP	T COMP	N82W	N08E
Nivel 2	1.54	1.895	0.869	0.815	1.854	2.008
Nivel 1	4.634	6.167	2.394	2.254	5.947	6.62

(Fuente: elaboración propia) comentario: se pueden apreciar la respuesta de la estructura ante los acelerogramas escalados mostrados anteriormente.

Las derivas inelásticas máximas en la dirección X se presentan para el sismo de 10 de octubre 1974 con un valor de 6.62 ‰, al no cumplir con la deriva objetivo el cual debe ser menor a 5.80 ‰ entonces se procederá a rigidizar el pódico.

## 2. Rigidez preliminar

$$K_{1erPiso} := 13305.6 \frac{kg}{cm} \qquad K_{2doPiso} := 16426 \frac{kg}{cm}$$

Tabla 4.7

*Respuesta de la estructura*

	Sismo 66 17 de Octubre 1966		Sismo 74 05 de Enero 1974		Sismo 74 10 de Octubre 1974	
	N82W	N08E	L COMP	T COMP	N82W	N08E
Nivel 2	2.193	1.856	1.419	1.595	2.268	2.48
Nivel 1	5.193	3.822	2.554	3.035	5.197	5.594

(Fuente: elaboración propia) comentario: se pueden apreciar la respuesta de la estructura ante los acelerogramas escalados mostrados anteriormente.

La deriva inelástica máxima en la dirección X se presentan para el sismo de 10 de octubre 1974 con un valor de 5.59 ‰, por lo tanto, cumple con lo exigido.

### 3. Nivel de amortiguamiento

Función pulso:

Sometemos a la estructura a una prueba de vibración libre con el fin de verificar que el amortiguamiento viscoso resultante sea el amortiguamiento que se estableció como objetivo.

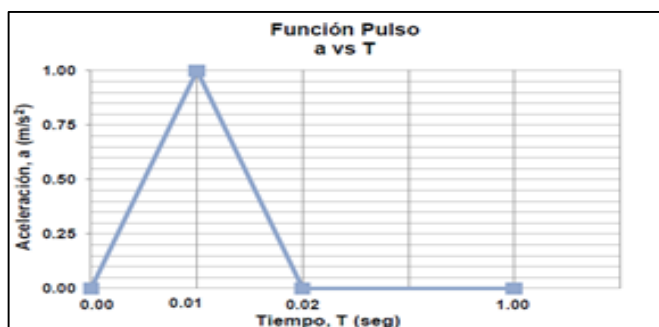


Figura 4.10. Función pulso (Fuente: elaboración propia)

Ahora se procederá a mostrar exclusivamente resultados de los demás pórticos, se calcula el decremento logarítmico  $\delta$  para obtener el amortiguamiento efectivo.

Expresando los desplazamientos obtenidos para la función pulso en relación al tiempo  $t_i$  y  $t_i + nT$  y relacionándolos con la ecuación de decremento logarítmico podemos obtener el porcentaje de amortiguamiento:

$$\delta = \ln \left( \frac{x(t_i)}{x(t_i + nT)} \right) = \frac{2n\pi\varepsilon}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}}$$

En la figura 4.11 se muestra la curva tiempo vs desplazamiento en el último nivel.

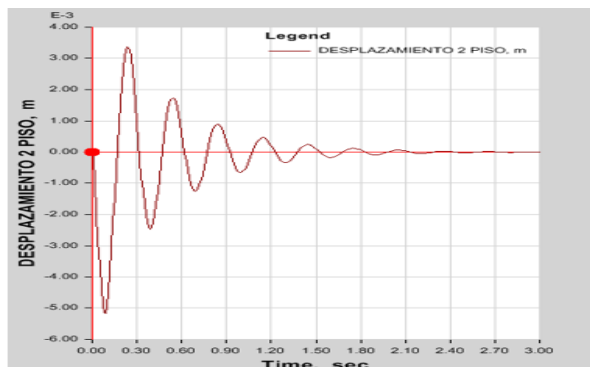


Figura 4.11. Curva tiempo vs desplazamiento para amortiguadores no lineal con  $\alpha = 1.00$  (Fuente: elaboración propia)

De la gráfica anterior se obtienen los valores  $x(t_i)$  y  $x(t_i + nt)$  para un número de ciclos “n” de 3; con estos valores y la fórmula mostrada se obtuvo un valor de amortiguamiento efectivo de:

$$d_1 := 0.00517 \cdot \pi \quad d_2 := 0.00017 \cdot \pi \quad n := 5$$

$$\xi_{\text{eff}} := \ln\left(\frac{d_1}{d_2}\right) = \frac{2 \cdot n \cdot \pi \cdot \xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \text{ resolver } \xi \rightarrow 0.107537941375254918$$

$$\xi_{\text{eff}} := \xi_{\text{eff}} \cdot 100 = 10.754 \quad \%$$

Finalmente, considerando 5% de amortiguamiento inherente se obtuvo:

$$\xi_{\text{visc}} := \xi_{\text{eff}} - 5 = 5.754$$

Al realizar el análisis no lineal del disipador visco-elástico se obtuvo como resultado este nivel de amortiguamiento.

#### 4. Balance de energía

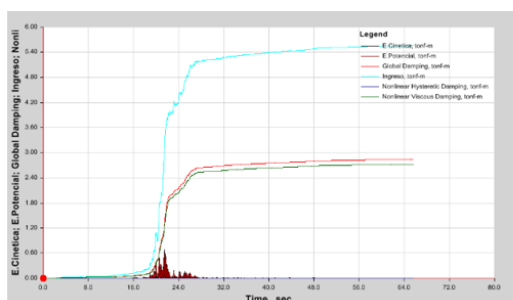
El porcentaje de disipación de energía del sistema de amortiguamiento se estima mediante la siguiente relación:

$$\% \text{disipacion de energia} = \frac{E. \text{ del sistema de amortiguamiento}}{E. \text{ del sismo}}$$

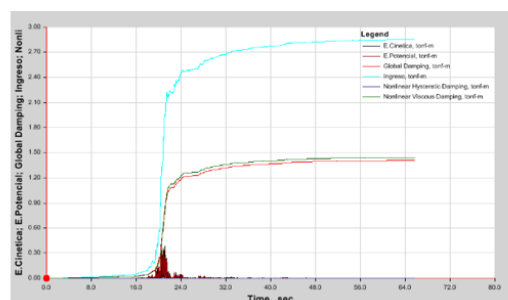
Los valores a extraer de las deben ser representativos siguiendo la tendencia de las curvas para un determinado tiempo t.

A continuación, se presentan los gráficos de energía para cada uno de los registros sísmicos; así como, los porcentajes de disipación respectivos. La energía de entrada viene representada por el color celeste, y las energías de amortiguamiento inherente a la estructura y la de los dispositivos adicionales mediante los colores rojo y verde respectivamente.

$$\text{Porcentaje de disipación: } \frac{2.7069}{5.5307} \cdot 100 = 48.943 \quad \% \quad \text{Porcentaje de disipación: } \frac{1.4419}{2.8476} \cdot 100 = 50.636 \quad \%$$

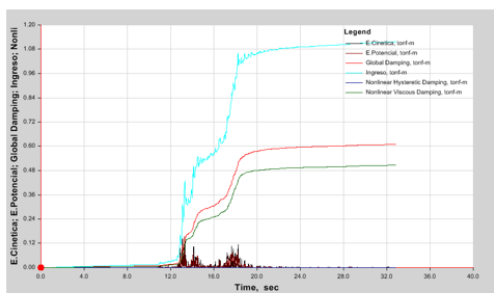


Acelerograma c6610n82

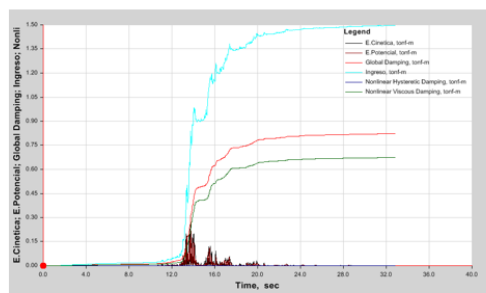


Acelerograma c6610n088

Porcentaje de disipación:  $\frac{0.5034}{1.1107} \cdot 100 = 45.323 \%$     Porcentaje de disipación:  $\frac{0.6716}{1.4918} \cdot 100 = 45.019 \%$

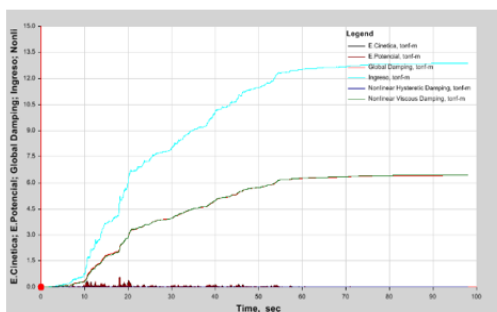


Acelerograma c7401lz

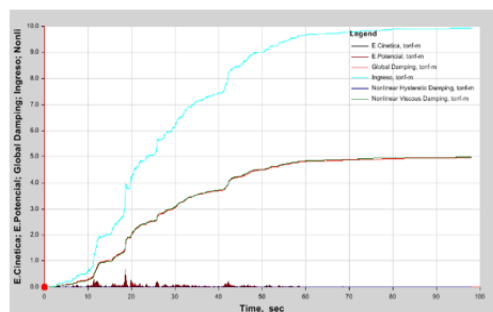


Acelerograma c7401tz

Porcentaje de disipación:  $\frac{6.3446}{12.6803} \cdot 100 = 50.035 \%$     Porcentaje de disipación:  $\frac{4.8444}{9.6679} \cdot 100 = 50.108 \%$



Acelerograma c7410n82



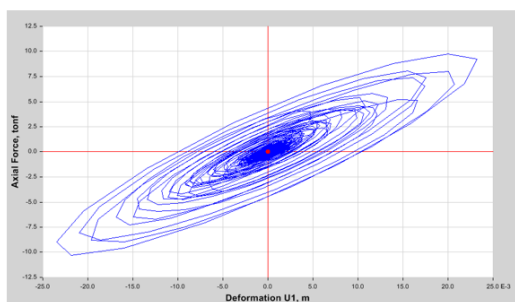
Acelerograma c7410n08

Figura 4.12. Balances energéticos en suelo tipo s1 (Fuente: elaboración propia)

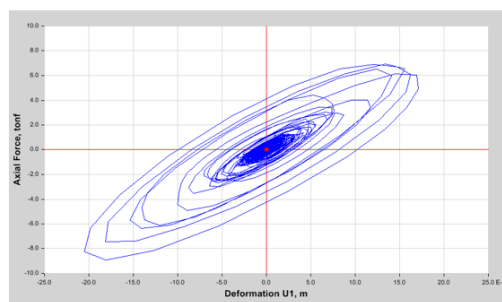
### 5. Comportamiento histerético

A continuación, se muestra la curva de histéresis del amortiguador con el objetivo de mostrar su tendencia elíptica. Así también, mediante el área de la curva, se puede observar la importante disipación de energía que proporcionan los disipadores visco-elásticos.

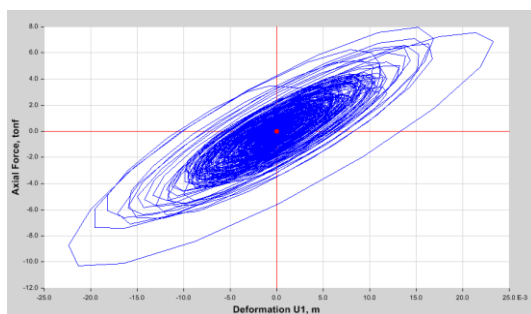
Los gráficos mostrados pertenecen al disipador ubicado en el primero nivel del pórtico para cada registro sísmico.



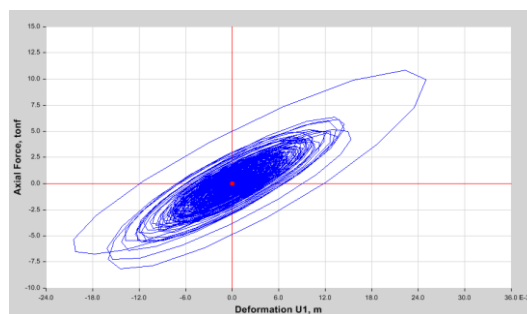
Acelerograma c6610n82



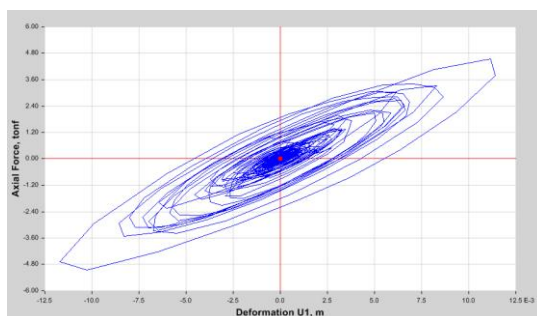
Acelerograma c6610n088



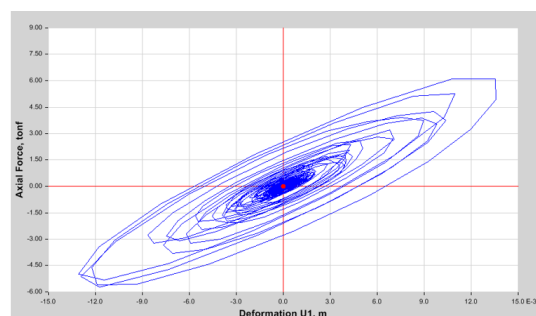
Acelerograma c7401lz



Acelerograma c7401tz



Acelerograma c7410n82



Acelerograma c7410n08

Figura 4.13. Curvas histeréticas de acelerogramas en suelo tipo s1 (Fuente: elaboración propia)

#### 4.1.5. Cálculo mediante ETABS para un suelo tipo s2

##### 1. Marco de 2gdl sin amortiguamiento

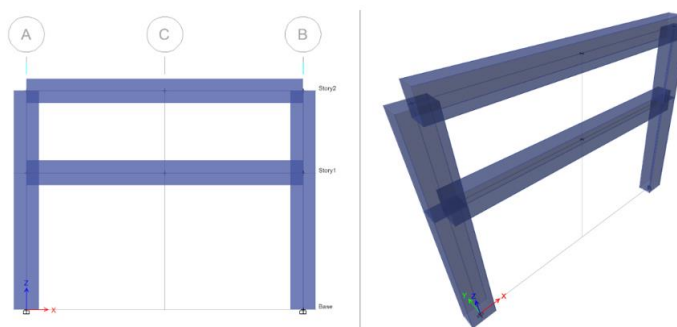


Tabla 4.8

Respuesta del edificio sin disipadores

Case	Mode	Period	Frecuency	Circular Frecuency	Story	Ux Max	Drift Max
Modal	1	0.422	2.368	14.8779	Story 2	0.065281	0.003366
Modal	2	0.132	7.564	47.5261	Story 1	0.055229	0.011046

(Fuente: Elaboración propia) comentario: se pueden apreciar la respuesta de la estructura ante los acelerogramas escalados mostrados anteriormente.

## 2. Análisis tiempo-historia

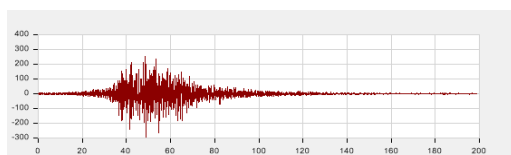
Tabla 4.9

*Las características de los sismos*

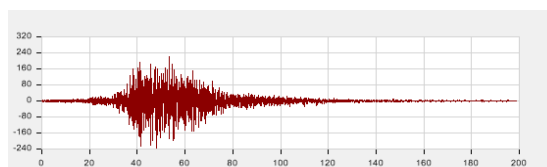
Fecha	Componentes	Duración (seg)	Aceleración (cm/s <sup>2</sup> )
07-jul-01	N82W	66.00	-123.21
	N08E	66.00	-120.52
15-ago-07	N82W	33.00	-272.20
	N08E	33.00	334.10
23-jun-01	N82W	98.00	-295.22
	N08E	98.00	220.04

(Fuente: IGP) comentario: acelerogramas a utilizar

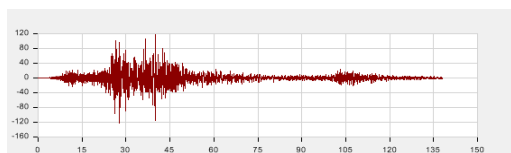
La siguiente figura muestra los 3 pares de registros sísmicos utilizados en la investigación.



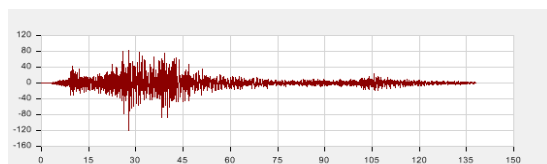
**Acelerograma OCOÑA 2001 E-O**



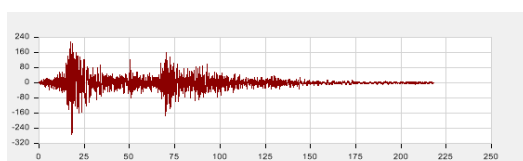
**Acelerograma OCOÑA 2001 N-S**



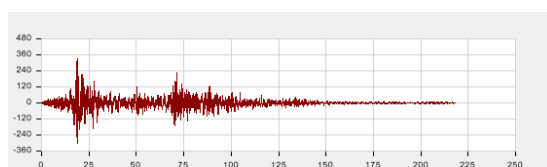
**Acelerograma AQP 2001 E-O**



**Acelerograma AQP 2001 N-S**



**Acelerograma ICA 2007 E-O**



**Acelerograma ICA 2007 N-S**

Figura 4.14. Acelerogramas usados para este tipo de suelo S2. (fuente: IGP)

## 3. Escalamiento de acelerogramas

### Registro Sísmico – Ocoña 23/06/2001

Se consideró el registro sísmico completo de Lima del 23 de junio de 2001 amplificado con la máxima aceleración del suelo peruano  $Z=0.45g$  (N.T.E E-030),  $U=1.50$  y  $S=1.05$  cuya magnitud asciende aproximadamente a la de un sismo severo.



El factor de escala que se utilizó en los modelos para amplificar el registro sísmico de Ocoña del 23 de junio 2001 es el siguiente:

**Norma: Diseño Sismorresistente E.030**

Aceleración máxima en el suelo =  $0.45 \times 1.50 \times 1.05 \times 981$  = 695.28375 cm/s<sup>2</sup>  
peruano

**Sismo-Ocoña 2001**

Aceleración máxima del sismo  
Este-Oeste = -295.22 = -295.22 cm/s<sup>2</sup>  
Norte-Sur = 220.04 = 220.04 cm/s<sup>2</sup>  
Entonces:

Factor de escala

Este-Oeste =  $(695.28/295.22)$  = -2.3551377 cm/s<sup>2</sup>  
**-0.0235514 m/s<sup>2</sup>**  
Norte-Sur =  $(695.28/220.04)$  = 3.15980617 cm/s<sup>2</sup>  
**0.03159806 m/s<sup>2</sup>**

**Registro Sísmico – Arequipa 07/07/2001**

El factor de escala que se utilizó en los modelos para amplificar el registro sísmico de Arequipa del 07 de julio 2001 es el siguiente:

**Norma: Diseño Sismorresistente E.030**

Aceleración máxima en el suelo =  $0.45 \times 1.50 \times 1.05 \times 981$  = 695.28375 cm/s<sup>2</sup>  
peruano

**Sismo-Arequipa 2001**

Aceleración máxima del sismo  
Este-Oeste = -123.21 = -123.21 cm/s<sup>2</sup>  
Norte-Sur = -120.52 = -120.52 cm/s<sup>2</sup>  
Entonces:

Factor de escala

Este-Oeste =  $(695.28/123.21)$  = -5.6430789 cm/s<sup>2</sup>  
**-0.0564308 m/s<sup>2</sup>**  
Norte-Sur =  $(695.28/120.52)$  = -5.7690321 cm/s<sup>2</sup>  
**-0.0576903 m/s<sup>2</sup>**

**Registro Sísmico – Ica 15/08/2007**

El factor de escala que se utilizó en los modelos para amplificar el registro sísmico de Ica del 15 de agosto 2007 es el siguiente:

**Norma: Diseño Sismorresistente E.030**

Aceleración máxima en el suelo =  $0.45 \times 1.50 \times 1.05 \times 981$  = 695.28375 cm/s<sup>2</sup>  
peruano

**Sismo-Ica 2007**

Aceleración máxima del sismo

Este-Oeste = -272.2 = -272.2 cm/s<sup>2</sup>

Norte-Sur = 334.1 = 334.1 cm/s<sup>2</sup>

Entonces:

Factor de escala

Este-Oeste =  $(695.28/272.2)$  = -2.5543121 cm/s<sup>2</sup>

Norte-Sur =  $(695.28/334.1)$  = **-0.0255431 m/s<sup>2</sup>**

Norte-Sur =  $(695.28/334.1)$  = 2.0810648 cm/s<sup>2</sup>

**0.02081065 m/s<sup>2</sup>**

Tabla 4.10

*Derivas máximas del análisis tiempo-historia (%) en la dirección x.*

	Sismo 01 23 de junio de 2001		Sismo 01 07 de julio de 2001		Sismo 07 15 de agosto de 2007	
	N82W	N08E	L COMP	T COMP	N82W	N08E
Nivel 2	3.646	5.42	4.582	3.032	4.735	4.454
Nivel 1	12.171	17.915	15.79	9.769	15.232	18.258

(Fuente: Elaboración propia) comentario: acelerogramas utilizados para escalamiento del tipo de suelo S2

Las derivas inelásticas máximas en la dirección X se presentan para el sismo de 15 de agosto del 2007 con un valor de 18.258 %.

#### 4. Amortiguamiento objetivo

$$\beta_{\text{eff}} := B = \frac{2.31 - 0.41 \ln(5)}{2.31 - 0.41 \ln(\beta_{\text{eff}})} \text{ resolver } \beta_{\text{eff}} \rightarrow 33.8904474788633838$$

$$\beta_H := \beta_{\text{eff}} - 5 = 28.89$$

#### 4.1.6. Cálculo mediante ETABS en suelo tipo s2 con disipadores

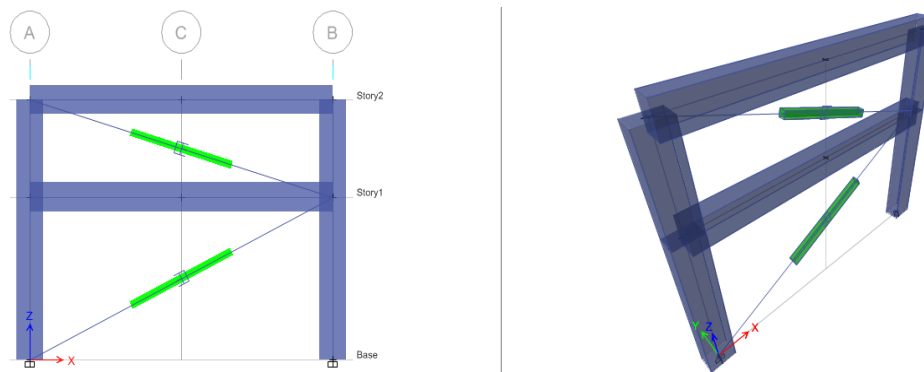


Tabla 4.11

*Respuesta del edificio con disipadores*

Case	Mode	Period	Frecuency	Circular Frecuency	Story	Ux Max	Drift Max	Damping
Modal	1	0.325	3.704	19.3149	Story 2	0.019386	0.001009	0.4201
Modal	2	0.102	9777	61.4287	Story 1	0.016372	0.003274	1

(Fuente: Elaboración propia) comentario: se pueden apreciar la respuesta de la estructura ante los acelerogramas escalados mostrados anteriormente.

## 1. Análisis tiempo-historia, primera iteración

Para mostrar estos resultados, se recurre a la tabla 34.

Tabla 4.12

*Derivas máximas del análisis tiempo-historia (‰) en la dirección x. iteración 1*

	Sismo 01 23 de junio de 2001		Sismo 01 07 de julio de 2001		Sismo 07 15 de agosto de 2007	
	N82W	N08E	L COMP	T COMP	N82W	N08E
Nivel 2	1.355	1.767	1.91	1.408	1.852	1.585
Nivel 1	4.395	5.862	6.47	4.422	6.556	5.445

(Fuente: Elaboración propia) comentario: se pueden apreciar la respuesta de la estructura ante los acelerogramas escalados mostrados anteriormente.

Las derivas inelásticas máximas en la dirección X se presentan para el sismo de 15 de agosto 2007 con un valor de 6.556 ‰, al no cumplir con la deriva máxima, se procederá a rigidizar el marco, rigidizar el sistema inicial.

## 2. Análisis tiempo-historia, segunda iteración

Asumiendo las siguientes rigideces para el primero y segundo nivel.

$$K_{1erPiso} := 13305.t \frac{kg}{cm} \qquad K_{2doPiso} := 1642t \frac{kg}{cm}$$

Tabla 4.13

*Derivas máximas del análisis tiempo-historia (‰) en la dirección x. iteración 2*

	Sismo 01 23 de junio de 2001		Sismo 01 07 de julio de 2001		Sismo 07 15 de agosto de 2007	
	N82W	N08E	L COMP	T COMP	N82W	N08E
Nivel 2	1.197	1.749	2.559	1.749	2.154	1.758
Nivel 1	2.674	3.923	5.698	3.838	5.072	4.165

(Fuente: Elaboración propia) comentario: se pueden apreciar la respuesta de la estructura ha reducido debido al incremento de rigidez del sistema.

La deriva inelástica máxima en la dirección X se presentan para el sismo de 07 de julio 2001 con un valor de 5.698 ‰, con lo que está dentro de lo permisible.

3. Nivel de amortiguamiento

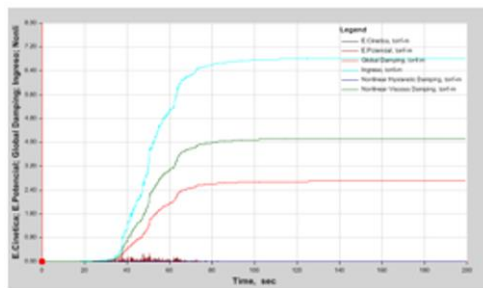
Al igual que el caso anterior, se usará una función pulso, y de esto se obtendrá el siguiente nivel de amortiguamiento:

$$\xi_{\text{eff}} := \ln\left(\frac{d_1}{d_2}\right) = \frac{2 \cdot n \cdot \pi \cdot \xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \text{ resolver } , \xi \rightarrow 0.123130626561918531$$

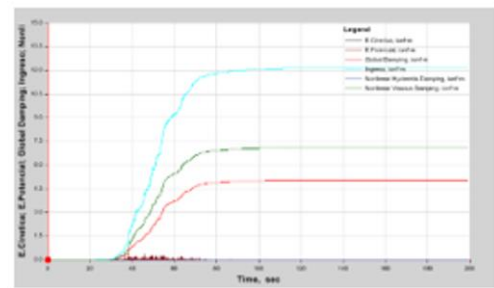
$$\xi_{\text{eff}} := \xi_{\text{eff}} \cdot 100 = 12.313 \quad \%$$

4. Balance energético

Porcentaje de disipación:  $\frac{4.1216}{6.813} \cdot 100 = 60.496 \quad \%$     Porcentaje de disipación:  $\frac{7.1176}{12.1562} \cdot 100 = 58.551$

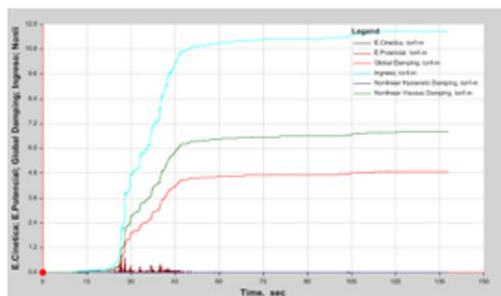


Acelerograma OCOÑA 2001 E-O

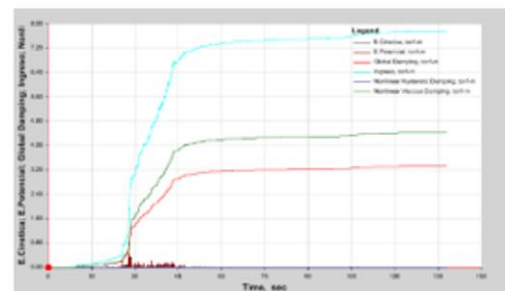


Acelerograma OCOÑA 2001 N-S

Porcentaje de disipación:  $\frac{6.6726}{11.4674} \cdot 100 = 58.188 \quad \%$     Porcentaje de disipación:  $\frac{4.3435}{7.6095} \cdot 100 =$

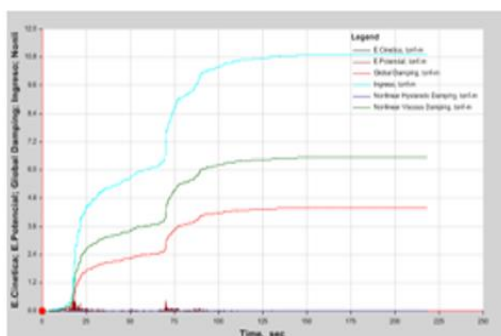


Acelerograma AQP 2001 O-E

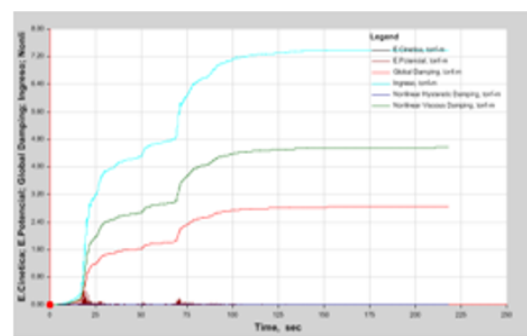


Acelerograma AQP 2001 N-S

Porcentaje de disipación: 61.626 %    Porcentaje de disipación:  $\frac{4.5471}{7.3788} \cdot 100 = 61.624$



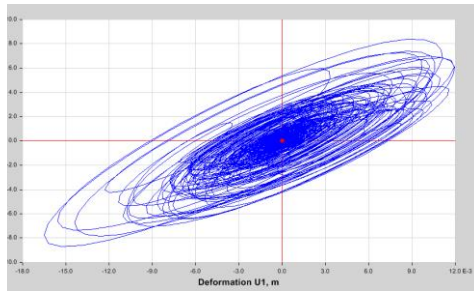
Acelerograma ICA 2007 E-O



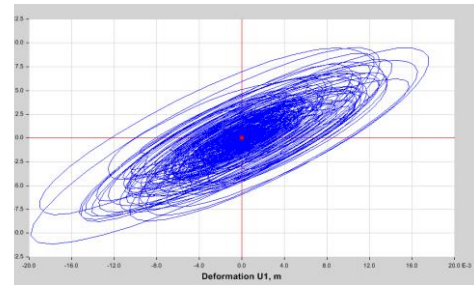
Acelerograma ICA 2007 N-S

Figura 4.15. Balance energético del marco a diferentes solicitaciones sísmicas (Fuente: elaboración propia).

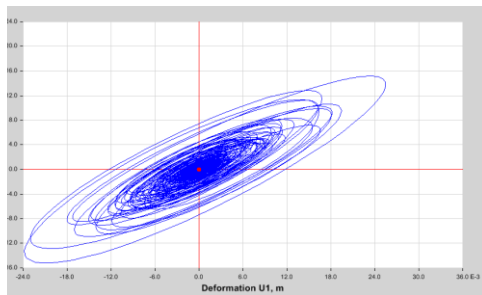
## 5. Comportamiento histerético



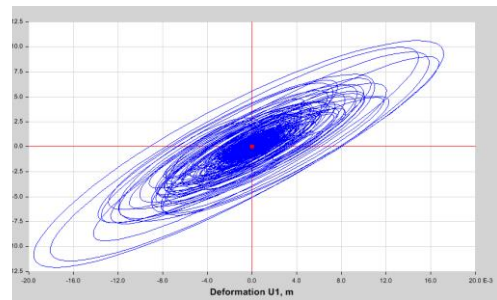
Acelerograma OCOÑA 2001 E-O



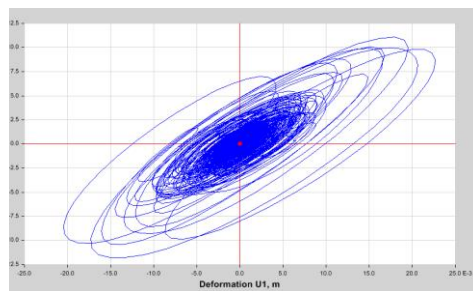
Acelerograma OCOÑA 2001 N-S



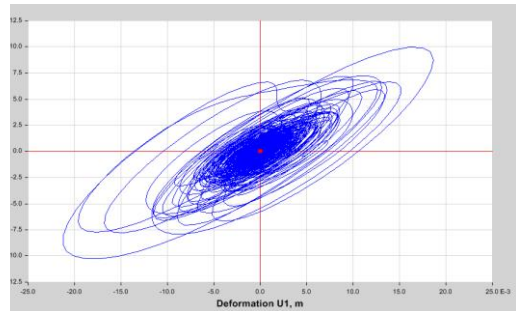
Acelerograma AQP 2001 E-O



Acelerograma AQP 2001 N-S



Acelerograma ICA 2007 E-O



Acelerograma ICA 2007 N-S

Figura 4.16. Curvas histeréticas del marco a diferentes sollicitaciones sísmicas (Fuente: elaboración propia).

#### 4.1.7. Cálculo mediante ETABS para un suelo tipo s3

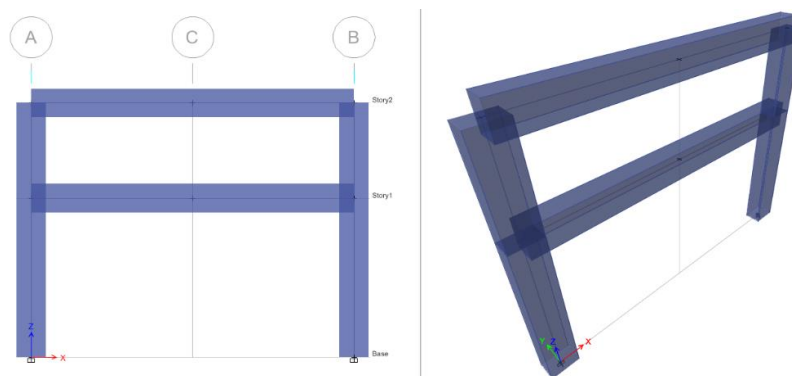


Tabla 4.14

*Respuesta del edificio sin disipadores*

Case	Mode	Period	Frecuency	Circular Frecuency	Story	Ux Max	Drift Max
Modal	1	0.422	2.368	14.8779	Story 2	0.068376	0.003526
Modal	2	0.132	7.564	47.5261	Story 1	0.057847	0.011569

(Fuente: Elaboración propia) comentario: se pueden apreciar la respuesta de la estructura ante los acelerogramas escalados mostrados anteriormente.

##### 1. Amortiguamiento objetivo

$$\beta_{\text{eff}} := B = \frac{2.31 - 0.41 \ln(5)}{2.31 - 0.41 \ln(\beta_{\text{eff}})} \text{ resolver } , \beta_{\text{eff}} \rightarrow 37.3035438928648030$$

$$\beta_H := \beta_{\text{eff}} - 5 = 32.304$$

En el edificio a cortante de 3gdl que más adelante se verá, se evidenció que para un amortiguamiento mayor al 35% la verificación de amortiguamiento modal mediante el programa ETABS tiende a amortiguarse críticamente, por lo que el método escogido funciona bien para parámetros bajo este umbral permitido, consecuentemente con esto no se efectuará la verificación de pórtico a cortante con DVE para 2 GDL y los subsecuentes 3 y 4 GDL.

En la tabla 35 se muestran los resultados a manera de resumen, con los valores calculados manualmente y los arrojados por el software.

Tabla 4.15

Tabla resumen, comparación de resultados para marcos de 2 grados de libertad

Grados de Libertad	Tipo de Suelo	Casos	Frecuencia Angular $\omega_1$ (rad/s)		Periodo Natural T1(seg)		Amortiguamiento Modal $\xi_1(\%)$			Desplazamiento (m)		Deriva de Entrepiso				
			Calculo Manual	Calculo ETABS	Calculo Manual	Calculo ETABS	Amort. Objetivo (%) Según Newmark y Hall, Amort. Efectivo ( $\xi_{eff.}$ )	Amortiguamiento Real(%)		Calculo Manual	Analisis Modal Espectral (ETABS)	Calculo Manual	Analisis Modal Espectral (ETABS)	Calculo Manual	Analisis Modal Espectral (ETABS)	Analisis Dinamico Tiempo-Historia No Lineal (ETABS)
								Calculo Manual	Analisis Modal Espectral (ETABS)							
02	S0 (Roca Dura)	Sin Disipadores	14.872	14.878	0.423	0.422	N.R.	5.00	5.00	N.R.	0.0354	0.0355	0.006	0.006	N.R.	
		Con Disipadores Viscoelasticos	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	
	S1 (Suelos Muy Rigidos)	Sin Disipadores	14.872	14.878	0.423	0.422	N.R.	5.00	5.00	N.R.	0.0589	0.0591	0.010	0.010	0.009	
		Con Disipadores Viscoelasticos	18.052	18.059	0.348	0.348	26.92	31.96	32.00	10.75	0.0242	0.0227	0.004	0.004	0.0056	
	S2 (Suelos Intermedios)	Sin Disipadores	14.872	14.878	0.423	0.422	N.R.	5.00	5.00	5.00	0.0653	0.0653	0.011	0.011	0.0183	
		Con Disipadores Viscoelasticos	19.308	19.315	0.325	0.325	33.89	42.01	42.01	12.31	0.0205	0.0194	0.003	0.003	0.0057	
	S3 (Suelos Blandos)	Sin Disipadores	14.872	14.878	0.423	0.422	N.R.	5.00	5.00	N.C.	0.0685	0.0684	0.012	0.012	N.C.	
		Con Disipadores Viscoelasticos	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	

(Fuente: elaboración propia) comentario: En el Presente cuadro se ven los resultados correspondientes a frecuencias, periodos, amortiguamientos, desplazamientos, derivas de entrepiso, y los tipos de suelos. A medida que se va variando el tipo de suelo, los niveles de amortiguamiento requerido van aumentando, así mismo hay casos en el que dicho sistema no requiere el uso de Disipadores viscoelástico, ya que el amortiguamiento requerido no es mucho. Adicionalmente se tienen los resultados de los cálculos manuales con el cálculo del uso del software ETABS.

N.R. = No Requiere / N.C. = No Cumple

## 4.2. MARCOS PLANOS DE 3 GRADOS DE LIBERTAD

### 4.2.1. Cálculo mediante ETABS en suelo tipo S0

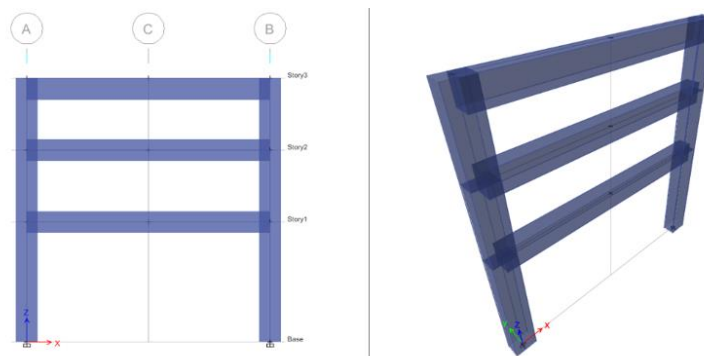


Tabla 4.16

Resultados obtenidos del ETABS v.16

Case	Mode	Period	Frecuency	Circular Frecuency	Story	Ux Max	Drift Max
Modal	1	0.512	1.951	12.2613	Story 3	0.046109	0.001676
Modal	2	0.182	5.493	34.5116	Story 2	0.041258	0.003094
Modal	3	0.099	10.085	63.3652	Story 1	0.032153	0.006431

(Fuente: Elaboración propia) comentario: para poder tener una prueba fehaciente de estos resultados, se adjunta archivo. xmcd en el CD presentado como parte del trabajo de investigación.

#### 1. Amortiguamiento viscoso requerido

$$\beta_{\text{eff}} := B = \frac{2.31 - 0.41 \cdot \ln(5)}{2.31 - 0.41 \cdot \ln(\beta_{\text{eff}})} \text{ resolver } , \beta_{\text{eff}} \rightarrow 7.38249790276709!$$

$$\beta_H := \beta_{\text{eff}} - 5 = 2.382$$

El pórtico no requiere ningún tipo de sistema de disipación de energía, ya que el amortiguamiento viscoso(añadido) es de 2.382% y con esto basta para llegar a la deriva objetivo que es 0.0058 por tal motivo se recomienda otro tipo de sistema de reforzamiento.

### 4.2.2. Cálculo mediante ETABS en suelo tipo s1

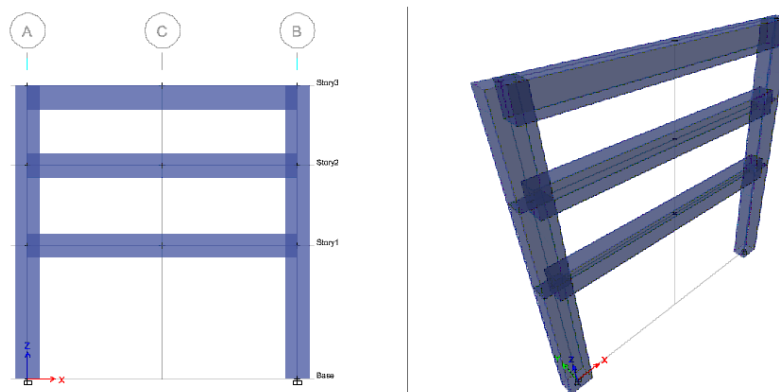




Tabla 4.17

Resultados obtenidos del ETABS v.16

Case	Mode	Period	Frecuency	Circular Frecuency	Ux Max	Drift Max
Modal	1	0.512	1.951	12.2613	0.076802	0.002742
Modal	2	0.182	5.493	34.5116	0.068742	0.005119
Modal	3	0.099	10.085	63.3652	0.053552	0.01071

(Fuente: Elaboración propia) comentario: para poder tener una prueba fehaciente de estos resultados, se adjunta archivo. xmcd en el CD presentado como parte del trabajo de investigación.

### 1. Análisis tiempo-historia

Las características de estos sismos se mostraron en la tabla del marco de 2gdl para suelo s1. La tabla 27 solo muestra los resultados obtenidos.

Tabla 4.18

Derivas máximas del análisis tiempo-historia (‰) en la dirección x

	Sismo 66 17 de Octubre 1966		Sismo 74 05 de Enero 1974		Sismo 74 10 de Octubre 1974	
	N82W	N08E	L COMP	T COMP	N82W	N08E
Nivel 3	2.966	2.825	1.136	0.984	3.341	2.332
Nivel 1	5.242	5.277	1.928	1.546	6.128	4.33
Nivel 1	9.967	10.6	3.813	3.408	12.375	9.244

(Fuente: elaboración propia) comentario: se pueden apreciar la respuesta de la estructura ante los acelerogramas escalados mostrados anteriormente.

Las derivas inelásticas máximas en la dirección X se presentan para el sismo de 10 de octubre 1974 con un valor de 12.375 ‰.

### 2. Amortiguamiento objetivo

$$\beta_{\text{eff}} := B = \frac{2.31 - 0.41 \ln(5)}{2.31 - 0.41 \ln(\beta_{\text{eff}})} \text{ resolver } , \beta_{\text{eff}} \rightarrow 31.5480691308699320$$

$$\beta_H := \beta_{\text{eff}} - 5 = 26.548$$

Necesita amortiguamiento adicional, de 26.55%.

#### 4.2.3. Cálculo mediante ETABS en suelo tipo s1 con disipadores

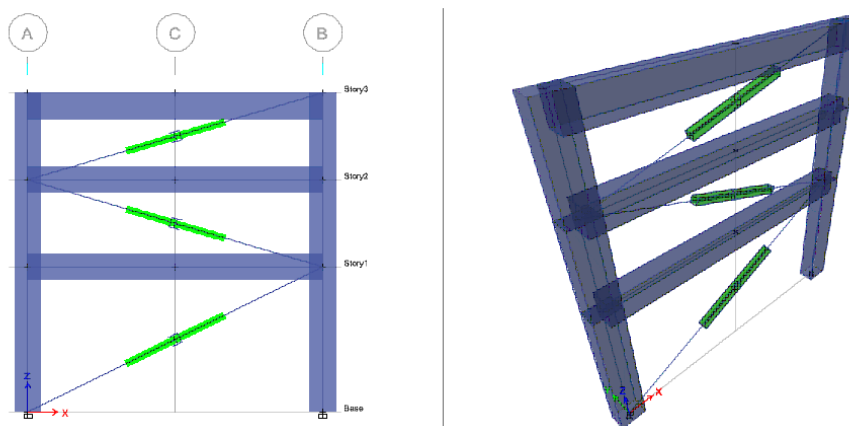


Tabla 4.19

Resultados obtenidos del ETABS v.16

Case	Mode	Period	Frecuency	Circular Frecuency	Story	Ux Max	Drift Max	Damping
Modal	1	0.401	2.492	15.6593	Story 3	0.030047	0.001072	0.3965
Modal	2	0.143	6.994	43.9462	Story 2	0.026872	0.00201	1
Modal	3	0.078	12.834	80.6357	Story 1	0.020883	0.004177	1

(Fuente: Elaboración propia) comentario: para poder tener una prueba fehaciente de estos resultados, se adjunta archivo. xmcd en el CD presentado como parte del trabajo de investigación.

Se puede observar para el primer modo un amortiguamiento igual a 0.3965 y los demás entran en zona de amortiguamiento crítico.

##### 1. Análisis tiempo-historia

Tabla 4.20

Derivas máximas del análisis tiempo-historia (‰) en la dirección x

	Sismo 66 17 de Octubre 1966		Sismo 74 05 de Enero 1974		Sismo 74 10 de Octubre 1974	
	N82W	N08E	L COMP	T COMP	N82W	N08E
Nivel 3	1.165	1.51	0.891	0.62	1.572	1.418
Nivel 1	2.248	2.88	1.366	1.033	2.886	2.745
Nivel 1	5.208	6.461	2.411	2.101	6.073	6.275

(Fuente: IGP) comentario: se pueden apreciar la respuesta de la estructura ante los acelerogramas escalados mostrados anteriormente.

Las derivas inelásticas máximas en la dirección X se presentan para el sismo de 17 de octubre 1966 con un valor de 6.461 ‰, y al no cumplir con la deriva objetivo el cual debe ser menor a 5.80 ‰ entonces se procederá a rigidizar el pórtico.

## 2. Rigidizando con amortiguadores

Asumiendo las siguientes rigideces:

$$K_{1erPiso} := 13305.6$$

$$K_{2doPiso} := 16426$$

Tabla 4.21

### Características de los sismos

	Sismo 66 17 de Octubre 1966		Sismo 74 05 de Enero 1974		Sismo 74 10 de Octubre 1974	
	N82W	N08E	L COMP	T COMP	N82W	N08E
Nivel 3	1.805	2.205	1.247	0.851	1.755	2.131
Nivel 1	3.104	3.921	1.889	1.497	3.314	3.923
Nivel 1	3.739	5.186	1.893	1.943	4.857	5.731

(Fuente: IGP) comentario: se pueden apreciar la respuesta de la estructura ante los acelerogramas escalados mostrados anteriormente.

La deriva inelástica máxima en la dirección X se presentan para el sismo de 10 de octubre 1974 con un valor de 5.731 ‰.

## 3. Nivel de amortiguamiento

Análogo a la comprobación del pórtico de 2gdl se obtendrán los siguientes resultados.

$$\xi_{\text{eff}} := \ln\left(\frac{d_1}{d_2}\right) = \frac{2 \cdot n \cdot \pi \cdot \xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \text{ resolver } , \xi \rightarrow 0.124363371692610095$$

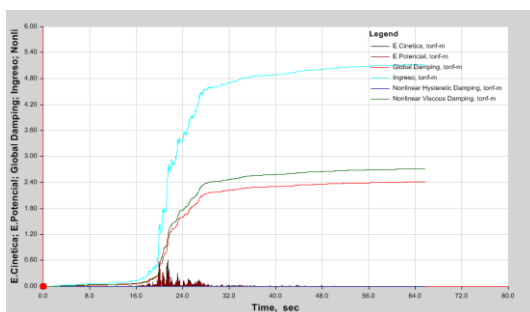
$$\xi_{\text{eff}} := \xi_{\text{eff}} \cdot 100 = 12.436 \quad \%$$

## 4. Balance de energía

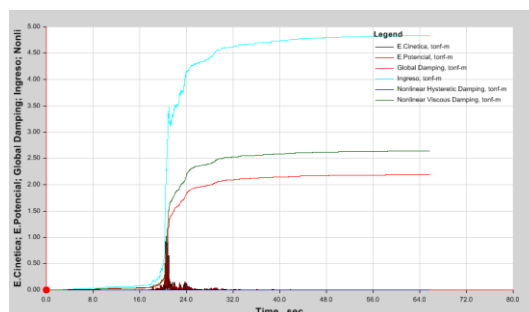
La energía de entrada viene representada por el color celeste, y las energías de amortiguamiento inherente a la estructura y la de los dispositivos adicionales mediante los colores rojo y verde respectivamente.

Porcentaje de disipación:  $\frac{2.691}{5.085} \cdot 100 = 52.92 \%$

Porcentaje de disipación:  $\frac{2.6324}{4.8169} \cdot 100 = 54.649 \%$



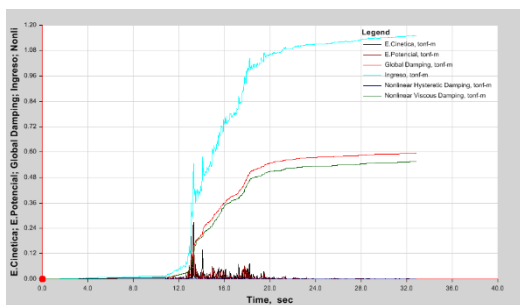
**Acelerograma c6610n82**



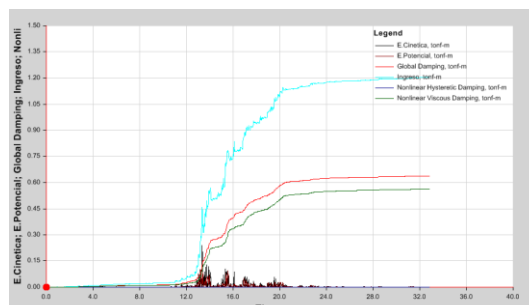
**Acelerograma c6610n08**

Porcentaje de disipación:  $\frac{0.5494}{1.1406} \cdot 100 = 48.168 \%$

Porcentaje de disipación:  $\frac{0.5594}{1.1945} \cdot 100 = 46.831 \%$



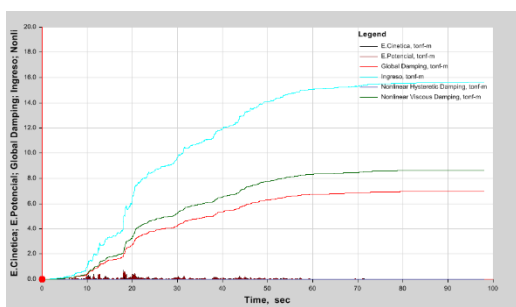
**Acelerograma c7401lz**



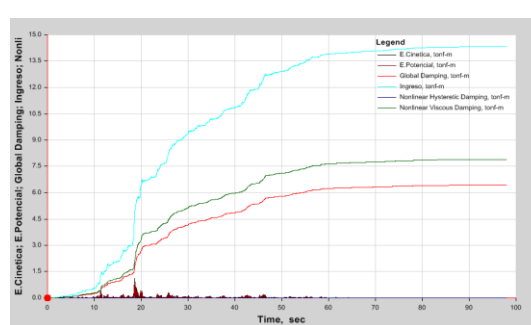
**Acelerograma c7401tz**

Porcentaje de disipación:  $\frac{8.6151}{15.5637} \cdot 100 = 55.354 \%$

Porcentaje de disipación:  $\frac{7.8557}{14.2619} \cdot 100 = 55.082 \%$



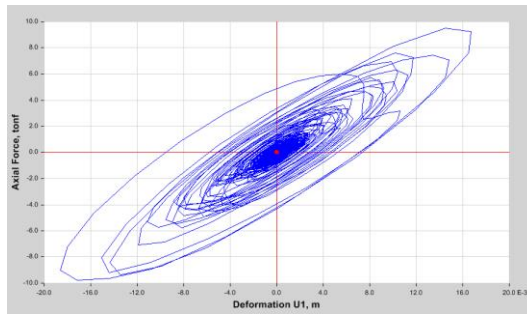
**Acelerograma c7410n82**



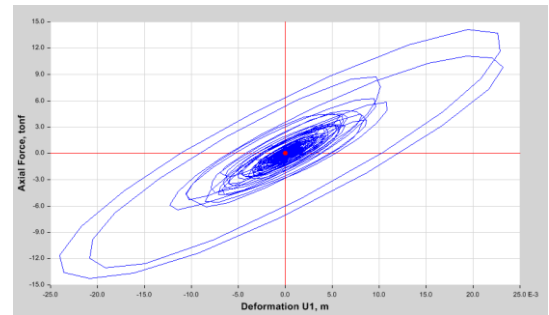
**Acelerograma c7410n08**

Figura 4.17. Balances de energía del marco de 3gdl sometido a diferentes acelerogramas (Fuente: elaboración propia)

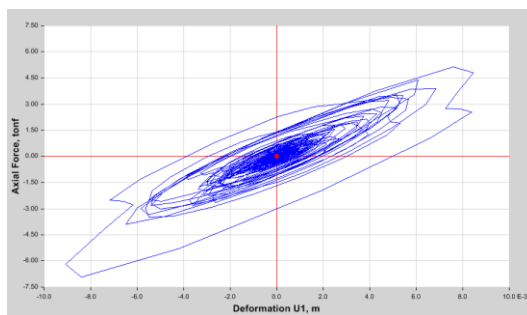
## 5. Comportamiento histerético



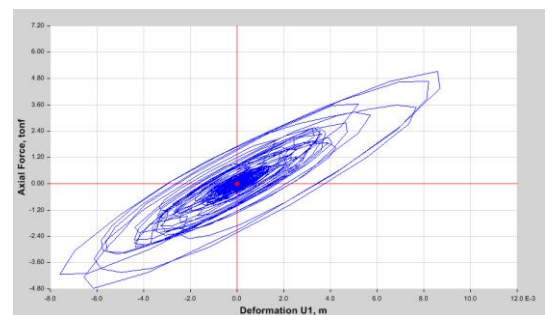
**Acelerograma c6610n82**



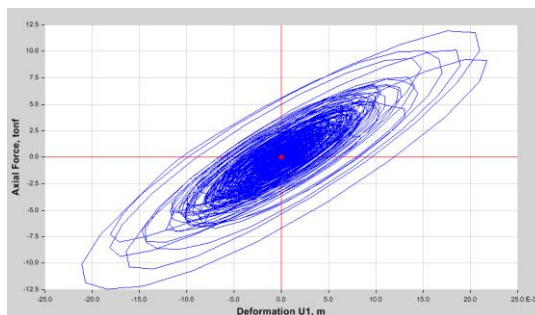
**Acelerograma c6610n08**



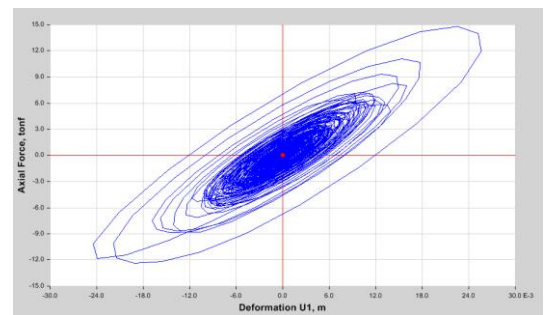
**Acelerograma c7401lz**



**Acelerograma c7401tz**



**Acelerograma c7410n82**



**Acelerograma c7410n08**

*Figura 4.18.* Curvas histeréticas del marco de 3gdl sometido a diferentes acelerogramas (Fuente: elaboración propia)

#### 4.2.4. Cálculo mediante ETABS en suelo tipo s2

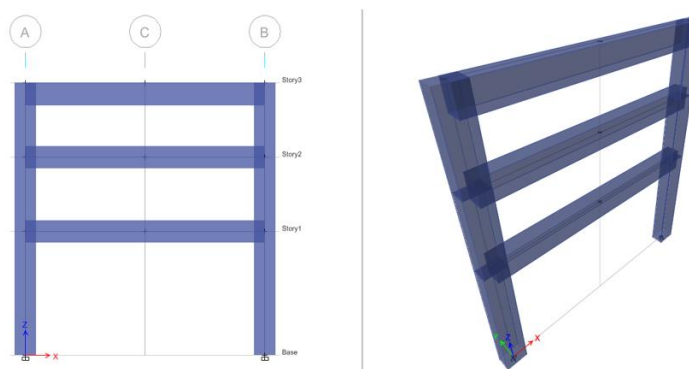


Tabla 4.22

Resultados obtenidos del ETABS v.16

Case	Mode	Period	Frecuency	Circular Frecuency	Story	Ux Max	Drift Max
Modal	1	0.512	1.951	12.2613	Story 3	0.103106	0.003658
Modal	2	0.182	5.493	34.5116	Story 2	0.092298	0.006849
Modal	3	0.099	10.085	63.3652	Story 1	0.071889	0.014378

(Fuente: Elaboración propia) comentario: para poder tener una prueba fehaciente de estos resultados, se adjunta archivo. xmcd en el CD presentado como parte del trabajo de investigación.

#### 1. Análisis tiempo-historia

Tabla 4.23

Derivas máximas del análisis tiempo-historia (%) en la dirección x.

	Sismo 01 23 de junio 2001		Sismo 01 07 de julio 2001		Sismo 07 15 de agosto 2007	
	N82W	N08E	N82W	N08E	N82W	N08E
Nivel 3	3.863	4.643	4.324	3.582	4.161	6.96
Nivel 1	7.111	8.582	8.582	6.759	7.875	13.005
Nivel 1	14.304	17.739	17.7	14.402	16.825	26.824

(Fuente: Elaboración propia) comentario: se pueden apreciar la respuesta de la estructura ante los acelerogramas escalados mostrados anteriormente.

Las derivas inelásticas máximas en la dirección X se presentan para el sismo de 07 de agosto 2007 con un valor de 26.824 %.

#### 2. Amortiguamiento objetivo

$$\beta_{\text{eff}} := B = \frac{2.31 - 0.41 \cdot \ln(5)}{2.31 - 0.41 \cdot \ln(\beta_{\text{eff}})} \text{ resolver } , \beta_{\text{eff}} \rightarrow 55.2813594395272079$$

$$\beta_H := \beta_{\text{eff}} - 5 = 50.281$$

Este amortiguamiento excede del máximo permitido por el ASCE 7-10, pero de todas maneras se mostrarán resultados con un mero fin académico.

#### 4.2.5. Cálculo mediante ETABS en suelo tipo s2 con disipadores

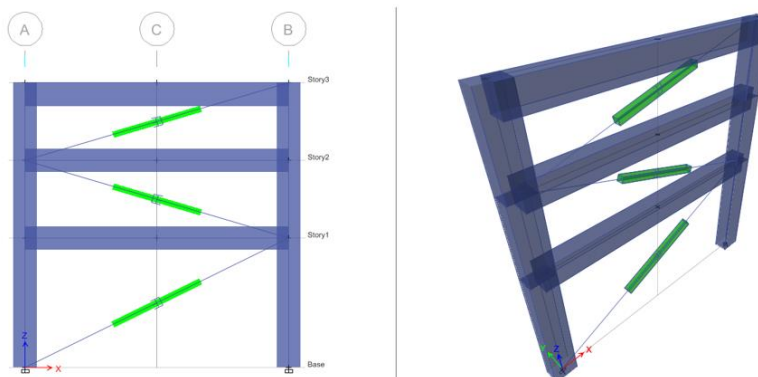


Tabla 4.24

Resultados obtenidos del ETABS v.16

Case	Mode	Period	Frecuency	Circular Frecuency	Story	Ux Max	Drift Max	Damping
Modal	1	0.276	3.624	22.7711	Story 3	0.01507	0.000563	1
Modal	2	0.1	9.997	62.8122	Story 2	0.013405	0.001051	1
Modal	3	0.055	18.267	114.7732	Story 1	0.010275	0.002055	1

(Fuente: Elaboración propia) comentario: para poder tener una prueba fehaciente de estos resultados, se adjunta archivo. xmcd en el CD presentado como parte del trabajo de investigación.

Como se puede apreciar, la necesidad de amortiguamiento es directamente proporcional a la cantidad de grados de libertad, por lo que este incrementa hasta llegar a poseer un amortiguamiento crítico, por lo que no se efectuarán los subsiguientes GDL que corresponderían evaluar.

##### 1. Análisis tiempo-historia

Asumiendo las siguientes rigideces para el primer y segundo nivel.

$$K_{1erPiso} := 13305.6 \frac{\text{kg}}{\text{cm}} \qquad K_{2doPiso} := 1642.6 \frac{\text{kg}}{\text{cm}}$$

Tabla 4.25

Respuestas de la estructura

	Sismo 01 23 de junio 2001		Sismo 01 07 de julio 2001		Sismo 07 15 de agosto 2007	
	N82W	N08E	N82W	N08E	N82W	N08E
Nivel 3	0.657	0.781	1.194	0.999	0.921	0.726
Nivel 1	1.222	1.428	2.239	1.848	1.775	1.375
Nivel 1	2.002	2.628	3.77	2.968	3.258	2.611

(Fuente: Elaboración propia) comentario: se pueden apreciar la respuesta de la estructura ante los acelerogramas escalados mostrados anteriormente.

La deriva inelástica máxima en la dirección X se presentan para el sismo de 07 de julio 2001 con un valor de 3.77 %.

### 2. Amortiguamiento

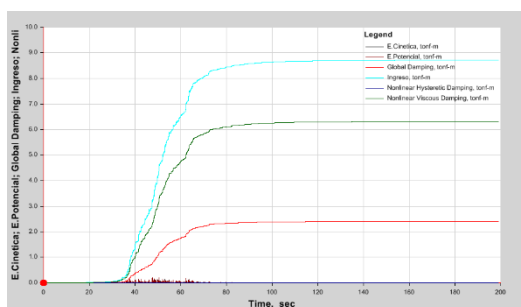
De un gráfico similar al de decremento logarítmico que se vio en el pórtico de 2GDL.

$$\xi_{\text{eff}} := \ln\left(\frac{d_1}{d_2}\right) = \frac{2 \cdot n \cdot \pi \cdot \xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \text{ resolver } , \xi \rightarrow 0.138562228168466403$$

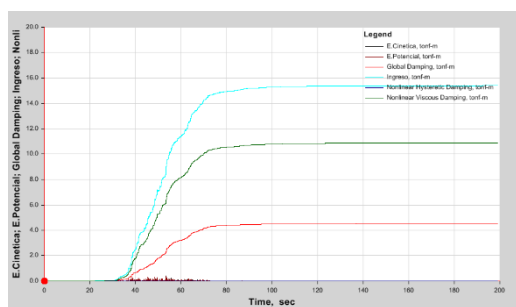
$$\xi_{\text{eff}} := \xi_{\text{eff}} \cdot 100 = 13.856 \quad \%$$

### 3. Balance de energía

Porcentaje de disipación:  $\frac{6.3072}{8.7086} \cdot 100 = 72.425 \%$       Porcentaje de disipación:  $\frac{10.8687}{15.3889} \cdot 100 = 70.627 \%$

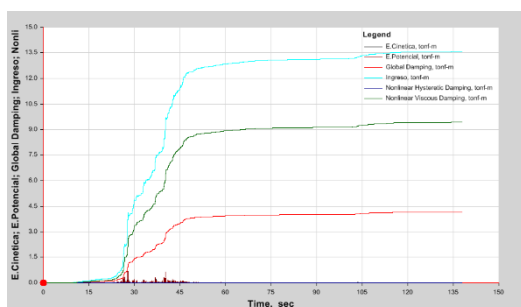


Acelerograma OCOÑA 2001 E-O

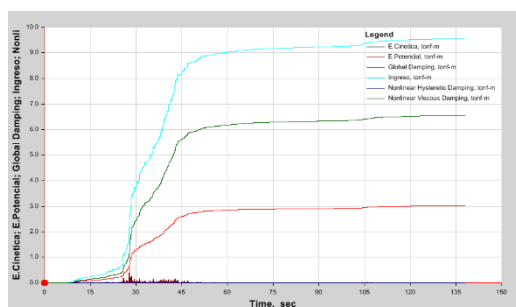


Acelerograma OCOÑA 2001 N-S

Porcentaje de disipación:  $\frac{9.4017}{13.5396} \cdot 100 = 69.439 \%$       Porcentaje de disipación:  $\frac{6.5178}{9.5204} \cdot 100 = 68.461 \%$



Acelerograma AQP 2001 E-O

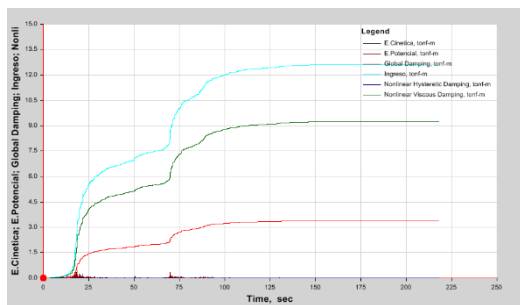


Acelerograma AQP 2001 N-S

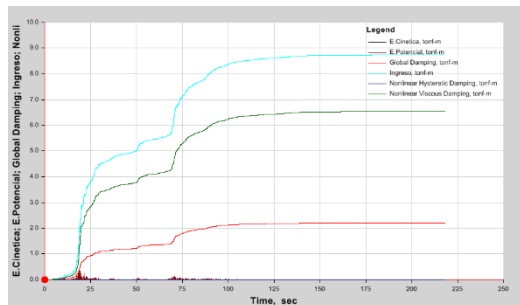


Porcentaje de disipación:  $\frac{9.2402}{12.6156} \cdot 100 = 73.244 \%$

Porcentaje de disipación:  $\frac{6.5314}{8.7294} \cdot 100 = 74.821 \%$



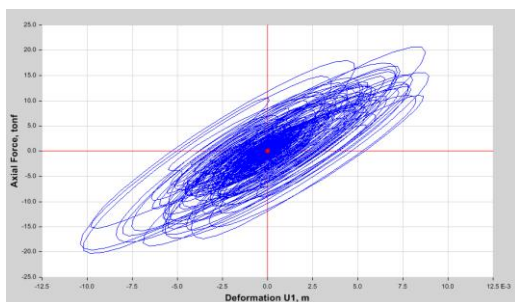
Acelerograma ICA 2007 E-O



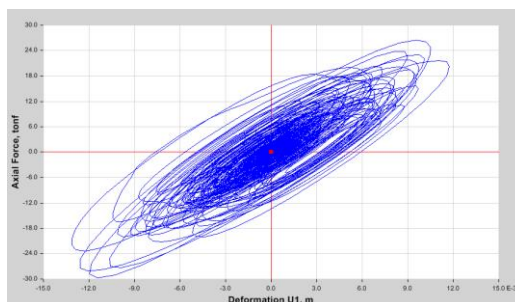
Acelerograma ICA 2007 N-S

Figura 4.19. Balances de energía del marco de 3gdl sometido a diferentes acelerogramas (Fuente: elaboración propia)

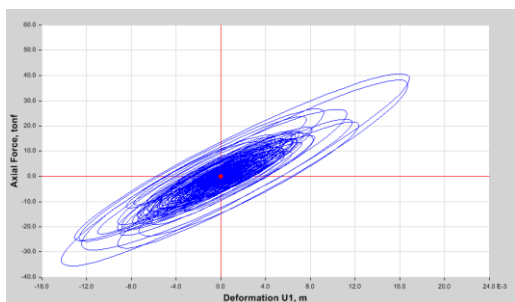
#### 4. Comportamiento histerético



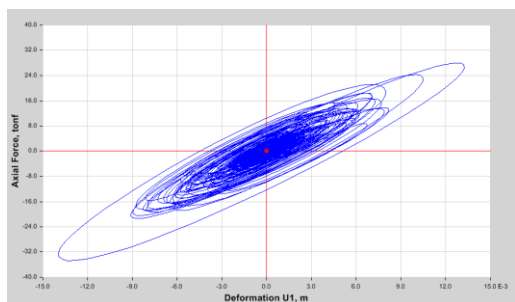
Acelerograma OCOÑA 2001 E-O



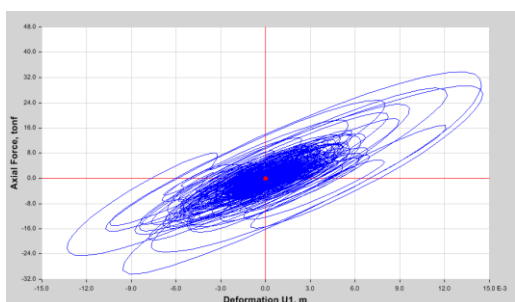
Acelerograma OCOÑA 2001 N-S



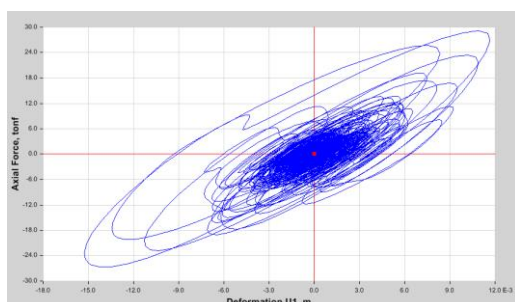
Acelerograma AQP 2001 E-O



Acelerograma AQP 2001 N-S



Acelerograma ICA 2007 E-O



Acelerograma ICA 2007 N-S

*Figura 4.20.* Curvas histeréticas del marco de 3gdl sometido a diferentes acelerogramas (Fuente: elaboración propia)

La necesidad de amortiguamiento es directamente proporcional al incremento de grados de libertad, por lo que resulta obvio deducir que un pórtico de 4gdl necesitará un amortiguamiento mayor al permitido por la norma y por el fabricante, ergo no se hará el análisis para el pórtico de 4 gdl.

En la siguiente página se muestra la tabla 46 con la comparación de resultados obtenidos de forma manual y los obtenidos mediante la utilización del ETABS v.16 de los marcos de 3 grados de libertad vistos.

Tabla 4.26

Tabla resumen, comparación de resultados para marcos de 3 grados de libertad

Grados de Libertad	Tipo de Suelo	Casos	Frecuencia Angular $\omega_1$ (rad/s)		Periodo Natural T1(seg)		Amortiguamiento Modal $\xi_1(\%)$			Desplazamiento (m)		Deriva de Entrepiso			
			Calculo Manual	Calculo ETABS	Calculo Manual	Calculo ETABS	Amort. Objetivo (%) Según Newmark y Hall, Amort. Efectivo ( $\xi_{eff.}$ )	Amortiguamiento Real(%)	Analisis Modal Espectral (ETABS)	Analisis Dinamico Tiempo-Historia No Lineal (ETABS)	Calculo Manual	Analisis Modal Espectral (ETABS)	Calculo Manual	Analisis Modal Espectral (ETABS)	Analisis Dinamico Tiempo-Historia No Lineal (ETABS)
03	S0 (Roca Dura)	Sin Disipadores	12.256	12.261	0.513	0.512	N.R.	5.00	5.00	N.R.	0.0460	0.0461	0.006	0.006	N.R.
		Con Disipadores Viscoelasticos	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.
	S1 (Suelos Muy Rigidos)	Sin Disipadores	12.256	12.261	0.513	0.512	N.R.	5.00	5.00	5.00	0.0767	0.0768	0.011	0.011	0.0124
		Con Disipadores Viscoelasticos	15.654	15.659	0.401	0.401	31.55	38.57	39.65	12.44	0.0323	0.0300	0.004	0.004	0.0057
	S2 (Suelos Intermedios)	Sin Disipadores	12.256	12.261	0.513	0.512	N.R.	5.00	5.00	5.00	0.1032	0.1031	0.014	0.014	0.0268
		Con Disipadores Viscoelasticos	22.768	22.771	0.276	0.276	55.28	100.01	100.00	13.86	0.0118	0.0151	0.002	0.002	0.0038

(Fuente: elaboración propia) comentario: En dicho cuadro se repite lo que se mostró en el cuadro resumen anterior, con la diferencia que ya no se estudiará

el tipo de suelo S3(Suelos Blandos) debido a que para este caso se requiere mucho porcentaje de amortiguamiento por lo que no será necesario para el análisis, ya que no cumple con lo que estipula el ASCE 7-10 Cap. 18, con respecto al nivel máximo de amortiguamiento añadido.

N.R. = No Requiere

N.C. = No Cumple

### 4.3. MARCOS PLANOS DE 4 GRADOS DE LIBERTAD

#### 4.3.1. Cálculo mediante ETABS en suelo tipo s0

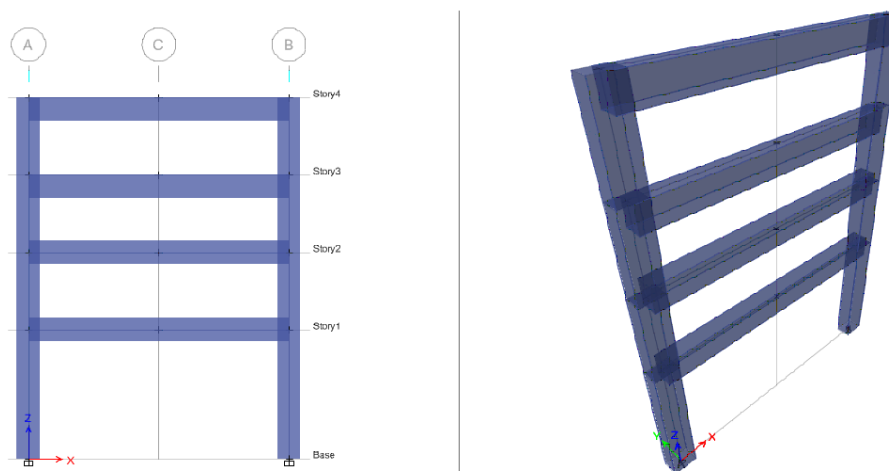


Tabla 4.27

Resultados obtenidos del ETABS v.16

Case	Mode	Period	Frecuency	Circular Frecuency	Story	Ux Max	Drift Max
Modal	1	0.608	1.646	10.3414	Story 4	0.056772	0.001543
Modal	2	0.224	4.472	28.1004	Story 3	0.052471	0.002855
Modal	3	0.124	8.063	50.6593	Story 2	0.044345	0.003868
Modal	4	0.091	10.992	69.0655	Story 1	0.033074	0.006615

(Fuente: Elaboración propia) comentario: para poder tener una prueba fehaciente de estos resultados, se adjunta archivo. xmcd en el CD presentado como parte del trabajo de investigación.

#### 1. Amortiguamiento viscoso requerido

$$\beta_{\text{eff}} := B = \frac{2.31 - 0.41 \cdot \ln(5)}{2.31 - 0.41 \cdot \ln(\beta_{\text{eff}})} \text{ resolver } , \beta_{\text{eff}} \rightarrow 8.20369707919485:$$

$$\beta_H := \beta_{\text{eff}} - 5 = 3.204$$

El pórtico no requiere ningún tipo de sistema de disipación de energía, ya que el amortiguamiento viscoso(añadido) es de 3.204% y con esto basta para llegar a la deriva objetivo, por tal motivo se recomienda otro tipo de sistema de reforzamiento.

### 4.3.2. Cálculo mediante ETABS en suelo tipo s1

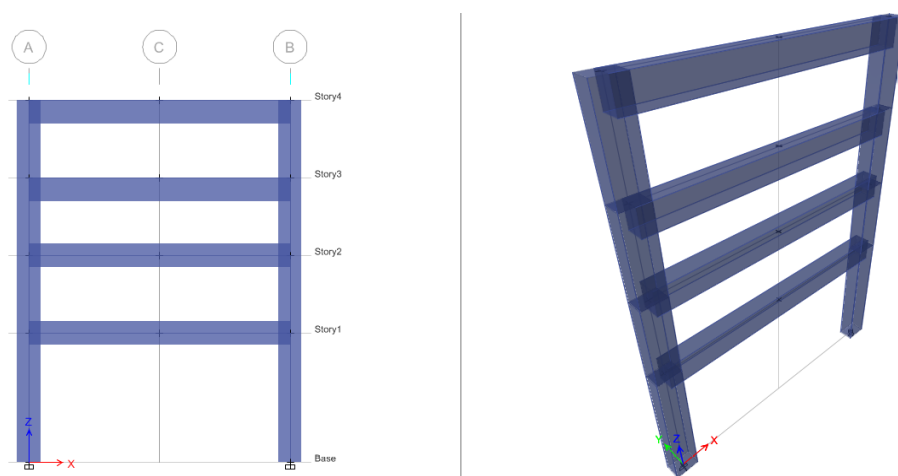


Tabla 4.28

Resultados obtenidos del ETABS v. 16

Case	Mode	Period	Frecuency	Circular Frecuency	Story	Ux Max	Drift Max
Modal	1	0.608	1.646	10.3414	Story 4	0.094504	0.002473
Modal	2	0.224	4.472	28.1004	Story 3	0.087397	0.004649
Modal	3	0.124	8.063	50.6593	Story 2	0.073864	0.006398
Modal	4	0.091	10.992	69.0655	Story 1	0.054982	0.010996

(Fuente: Elaboración propia) comentario: para poder tener una prueba fehaciente de estos resultados, se adjunta archivo .xmcd en el CD presentado como parte del trabajo de investigación.

#### 1. Análisis tiempo-historia

Tabla 4.29

Derivas máximas del análisis tiempo-historia (‰) en la dirección x.

	Sismo 66 17 de octubre 1966		Sismo 74 05 de enero 1974		Sismo 74 10 de octubre 1974	
	N82W	N08E	L COMP	T COMP	N82W	N08E
Nivel 4	2.974	1.948	0.996	1.318	3.592	2.152
Nivel 3	5.581	3.602	1.937	2.169	6.656	3.973
Nivel 1	7.694	4.893	2.624	2.891	8.797	5.409
Nivel 1	12.739	7.846	4.347	4.644	14.343	9.613

(Fuente: Elaboración propia) comentario: se pueden apreciar la respuesta de la estructura ante los acelerogramas escalados mostrados anteriormente.

Las derivas inelásticas máximas en la dirección X se presentan para el sismo de 10 de octubre 1974 con un valor de 14.343 ‰.

## 2. Amortiguamiento objetivo

$$\beta_{\text{eff}} := B = \frac{2.31 - 0.41 \ln(5)}{2.31 - 0.41 \ln(\beta_{\text{eff}})} \text{ resolver } , \beta_{\text{eff}} \rightarrow 33.4979763036983487$$

$$\beta_H := \beta_{\text{eff}} - 5 = 28.498$$

A partir de este punto, los eigenvalores se ven alterados por un número real, puesto que, la teoría indica que deben obtenerse números complejos conjugados, y al no cumplirse esto, queda demostrado que al aplicar la ecuación característica para obtener dichos eigenvalores, no siempre es consistente a sistemas de varios grados de libertad. En este caso se utilizará la ecuación de Espacio-Estado mostrada a continuación:

- *Aplicación de la ecuación espacio-estado en marcos planos de 4gdl en suelo tipo S1.*

## 3. Frecuencias y períodos naturales

Para la determinación de las propiedades dinámicas usaremos la ecuación de Espacio-Estado ya mencionada.

$$H = \begin{bmatrix} -M^{-1}C_A & -M^{-1}K \\ I & 0 \end{bmatrix}$$

$$-\left(\frac{M}{10}\right)^{-1} \cdot C_{\text{Total}} = \begin{pmatrix} -100.023 & 65.552 & 0.212 & 0.096 \\ 135.737 & -272.352 & 135.375 & 0.386 \\ 0.44 & 135.375 & -272.178 & 135.665 \\ 0.198 & 0.386 & 135.665 & -136.899 \end{pmatrix}$$

$$-\left(\frac{M}{10}\right)^{-1} \cdot K_{\text{TOTAL}} = \begin{pmatrix} -1744.6006 & 1158.6241 & 0 & 0 \\ 2399.1384 & -4798.2768 & 2399.1384 & 0 \\ 0 & 2399.1384 & -4798.2768 & 2399.1384 \\ 0 & 0 & 2399.1384 & -2399.1384 \end{pmatrix}$$

$$E_{\text{caract.D}} := \begin{pmatrix} -2.902 & 0.943 & 0.232 & 0.133 & -1041.3146 & 693.9 & 0 & 0 \\ 1.952 & -4.912 & 1.615 & 0.405 & 1436.8439 & -2873.6879 & 1436.8439 & 0 \\ 0.481 & 1.615 & -4.739 & 1.887 & 0 & 1436.8439 & -2873.6879 & 1436.8439 \\ 0.276 & 0.405 & 1.887 & -3.257 & 0 & 0 & 1436.8439 & -1436.8439 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Mediante un metacomando del Mathcad determinamos las frecuencias y periodos naturales del sistema

$$E_{\text{caract.D}} := \text{reverse} \left( \text{sort} \left( \text{eigenvals} \left( E_{\text{caract.D}} \right) \right) \right) = \begin{pmatrix} -0.517 + 10.325i \\ -0.517 - 10.325i \\ -1.405 - 28.058i \\ -1.405 + 28.058i \\ -2.532 - 50.574i \\ -2.532 + 50.574i \\ -3.452 + 68.945i \\ -3.452 - 68.945i \end{pmatrix}$$

$$\omega_{D1} := |\text{Im}(\rho_1)| = 10.325 \quad \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad T_{D1} := \frac{2\pi}{\omega_{D1}} = 0.6086 \quad \text{s}$$

$$\omega_{D2} := |\text{Im}(\rho_2)| = 28.058 \quad \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad T_{D2} := \frac{2\pi}{\omega_{D2}} = 0.224 \quad \text{s}$$

$$\omega_{D3} := |\text{Im}(\rho_3)| = 50.574 \quad \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad T_{D3} := \frac{2\pi}{\omega_{D3}} = 0.124 \quad \text{s}$$

$$\omega_{D4} := |\text{Im}(\rho_4)| = 68.945 \quad \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad T_{D4} := \frac{2\pi}{\omega_{D4}} = 0.091 \quad \text{s}$$

A partir de aquí ya se pueden determinar los demás valores como desplazamientos y derivas, siendo los resultados similares al ETABS

#### 4. Amortiguamiento requerido

$$\beta_{\text{eff}} := B = \frac{2.31 - 0.41 \ln(5)}{2.31 - 0.41 \ln(\beta_{\text{eff}})} \text{ resolver } , \beta_{\text{eff}} \rightarrow 33.4979763036983487$$

$$\beta_H := \beta_{\text{eff}} - 5 = 28.498$$

### 5. Matriz de rigidez total

$$K_{\text{TOTAL}} = \begin{pmatrix} 4129.818 & -2742.695 & 0 & 0 \\ -2742.695 & 5485.39 & -2742.695 & 0 \\ 0 & -2742.695 & 5485.39 & -2742.695 \\ 0 & 0 & -2742.695 & 2742.695 \end{pmatrix}$$

### 6. Matriz de amortiguamiento total

$$C_{\text{Total}} := \frac{C_{\text{estructura}}}{10} + C_D = \begin{pmatrix} 236.774 & -155.174 & -0.503 & -0.227 \\ -155.174 & 311.352 & -154.761 & -0.441 \\ -0.503 & -154.761 & 311.154 & -155.092 \\ -0.227 & -0.441 & -155.092 & 156.503 \end{pmatrix}$$

### 7. Frecuencias y períodos amortiguados

Ahora usaremos la ecuación Espacio-Estado para la determinación de los nuevos periodos y frecuencias.

$$H = \begin{bmatrix} -M^{-1}C_A & -M^{-1}K \\ I & 0 \end{bmatrix}$$

$$E_{\text{caract.D}} := \begin{pmatrix} -100.023 & 65.552 & 0.212 & 0.096 & -1744.6006 & 1158.6241 & 0 & 0 \\ 135.737 & -272.352 & 135.375 & 0.386 & 2399.1384 & -4798.2768 & 2399.1384 & 0 \\ 0.44 & 135.375 & -272.178 & 135.665 & 0 & 2399.1384 & -4798.2768 & 2399.1384 \\ 0.198 & 0.386 & 135.665 & -136.899 & 0 & 0 & 2399.1384 & -2399.1384 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

De aquí se obtiene frecuencias y periodos amortiguados con funciones propias del Mathcad a fin de agilizar los cálculos y no hacer más denso el presente trabajo de investigación.



$$\omega_{d1} := \left| E_{\text{caract.DD}_0} \right| = 12.23 \quad \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$T_{d1} := \frac{2\pi}{\omega_{d1}} = 0.5137 \text{ s}$$

$$\omega_{d2} := \frac{E_{\text{caract.D}_5} - E_{\text{caract.D}_2}}{2} = 11.537 \quad \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$T_{d2} := \frac{2\pi}{\omega_{d2}} = 0.5446 \text{ s}$$

$$\omega_{d3} := \frac{E_{\text{caract.D}_6} - E_{\text{caract.D}_1}}{2} = 102.808 \quad \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$T_{d3} := \frac{2\pi}{\omega_{d3}} = 0.0611 \text{ s}$$

$$\omega_{d4} := \frac{E_{\text{caract.D}_7} - E_{\text{caract.D}_0}}{2} = 206.814 \quad \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$T_{d4} := \frac{2\pi}{\omega_{d4}} = 0.0304 \text{ s}$$

## 8. Verificación de amortiguamiento

$$\xi_{11} := -\frac{\text{Re}(E_{\text{caract.D}_4})}{\left| E_{\text{caract.D}_4} \right|} = 0.41$$

$$\Xi_{11} := \xi_{11} \cdot 100 = 40.96 \quad \%$$

$$\xi_{22} := -\frac{E_{\text{caract.D}_5} + E_{\text{caract.D}_2}}{2 \cdot \sqrt{E_{\text{caract.D}_5} \cdot E_{\text{caract.D}_2}}} = 1.049$$

$$\Xi_{22} := \xi_{22} \cdot 100 = 104.916 \quad \%$$

$$\xi_{33} := -\frac{E_{\text{caract.D}_6} + E_{\text{caract.D}_1}}{2 \cdot \sqrt{E_{\text{caract.D}_6} \cdot E_{\text{caract.D}_1}}} = 1.862$$

$$\Xi_{33} := \xi_{33} \cdot 100 = 186.229 \quad \%$$

$$\xi_{44} := -\frac{E_{\text{caract.D}_7} + E_{\text{caract.D}_0}}{2 \cdot \sqrt{E_{\text{caract.D}_7} \cdot E_{\text{caract.D}_0}}} = 2.525$$

$$\Xi_{44} := \xi_{44} \cdot 100 = 252.497 \quad \%$$

### 4.3.3. Cálculo mediante ETABS en suelo tipo s1 con disipadores

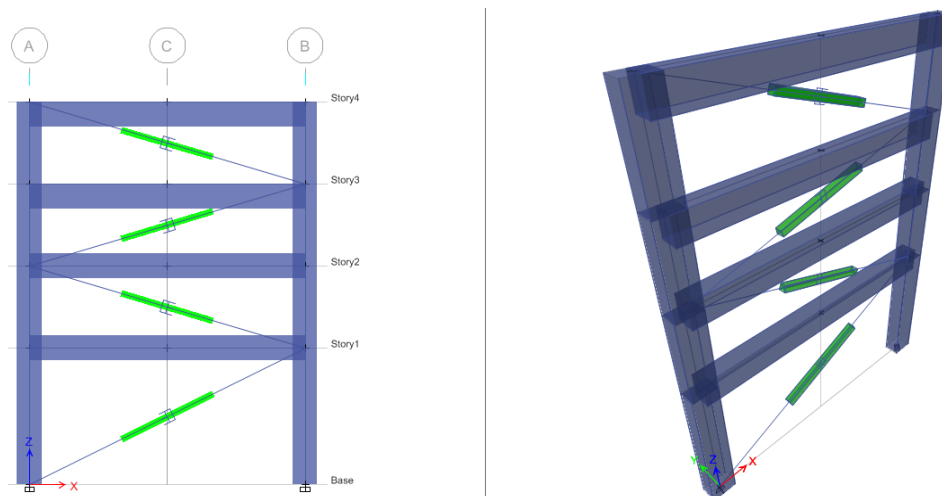


Tabla 4.30

Resultados obtenidos del ETABS v. 16

Case	Mode	Period	Frecuency	Circular Frecuency	Story	Ux Max	Drift Max	Damping
Modal	1	0.469	2.134	13.4096	Story 4	0.036546	0.000945	0.4365
Modal	2	0.173	5.786	36.4656	Story 3	0.033786	0.00179	1
Modal	3	0.096	10.419	65.4656	Story 2	0.028513	0.002482	1
Modal	4	0.07	14.204	89.2445	Story 1	0.02114	0.004228	1

(Fuente: Elaboración propia) comentario: para poder tener una prueba fehaciente de estos resultados, se adjunta archivo. xmcd en el CD presentado como parte del trabajo de investigación.

#### 1. Verificación de amortiguamiento

$$\xi_{\text{eff}} := \ln\left(\frac{d_1}{d_2}\right) = \frac{2 \cdot n \cdot \pi \cdot \xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \text{ resolver } , \xi \rightarrow 0.129288720585463301$$

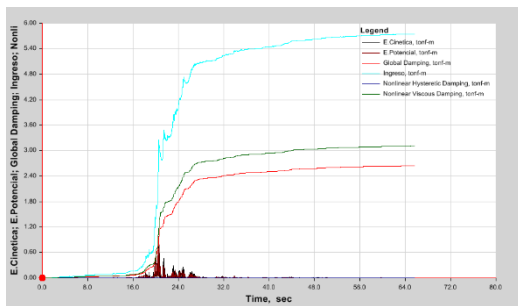
$$\xi_{\text{eff}} := \xi_{\text{eff}} \cdot 100 = 12.929 \quad \%$$

#### 2. Balance de energía

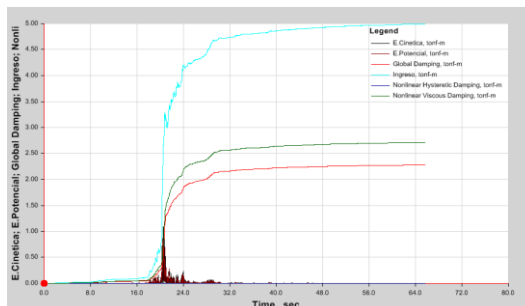
En la siguiente figura se podrá apreciar el balance energético, y por ende la cantidad de energía que el DVE absorbe.

Porcentaje de disipación  $\frac{3.0815}{5.7045} \cdot 100 = 54.019 \%$

Porcentaje de disipación  $\frac{2.6953}{4.9631} \cdot 100 = 54.307 \%$



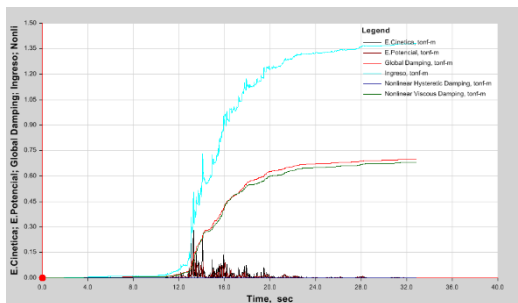
Acelerograma c6610n82



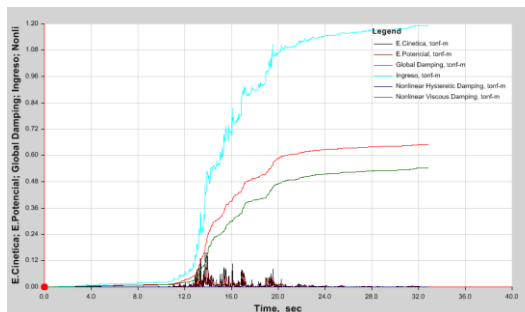
Acelerograma c6610n08

Porcentaje de disipación  $\frac{0.6668}{1.3615} \cdot 100 = 48.975 \%$

Porcentaje de disipación  $\frac{0.5295}{1.1705} \cdot 100 = 45.237 \%$



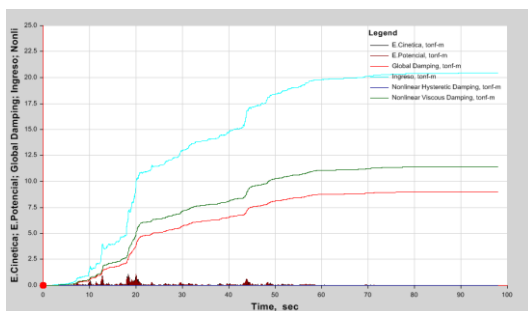
Acelerograma c7401lz



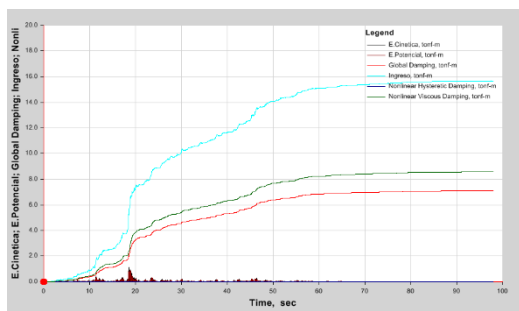
Acelerograma c7401tz

Porcentaje de disipación  $\frac{11.3928}{20.3817} \cdot 100 = 55.897 \%$

Porcentaje de disipación  $\frac{8.5222}{15.5796} \cdot 100 = 54.701 \%$



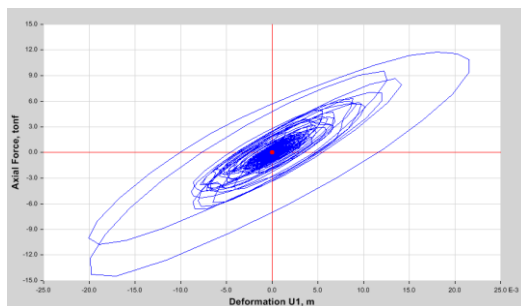
Acelerograma c7410n82



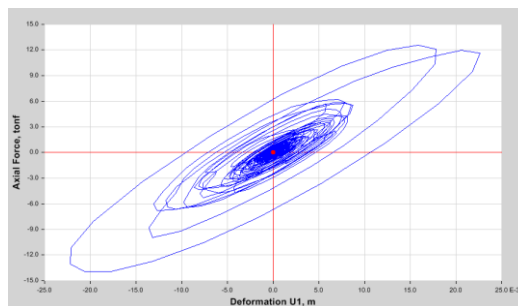
Acelerograma c7410n08

Figura 4.2. Balances de energía del marco de 3gdl sometido a diferentes acelerogramas (Fuente: elaboración propia)

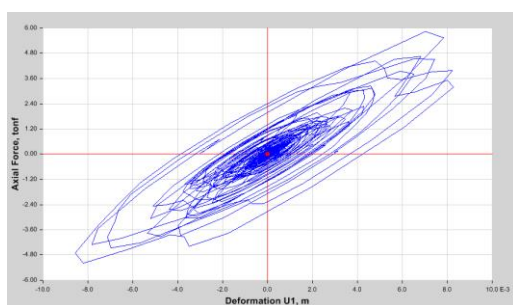
### 3. Comportamiento histerético



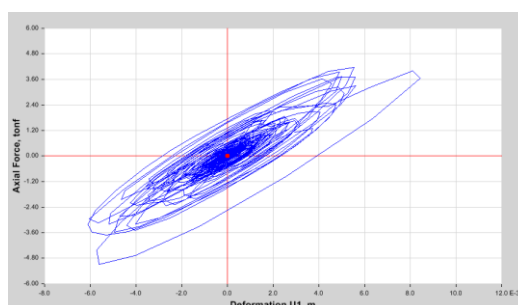
**Acelerograma c6610n82**



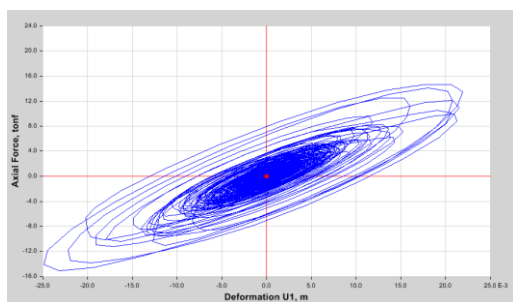
**Acelerograma c6610n08**



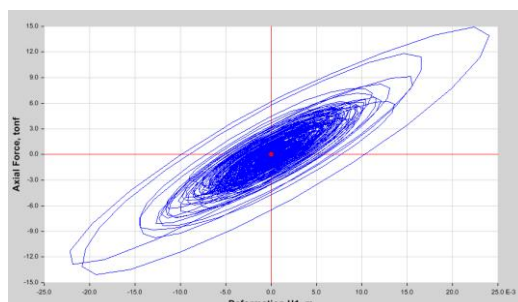
**Acelerograma c7401lz**



**Acelerograma c7401tz**



**Acelerograma c7410n82**



**Acelerograma c7410n08**

*Figura 4.22.* Curvas histeréticas del marco de 3gdl sometido a diferentes acelerogramas (Fuente: elaboración propia)

Tabla 4.31

Tabla resumen, comparación de resultados para marcos de 4 grados de libertad

Grados de Libertad	Tipo de Suelo	Casos	Frecuencia Angular $\omega_1$ (rad/s)		Periodo Natural T1(seg)		Amortiguamiento Modal $\xi_1$ (%)			Desplazamiento (m)		Deriva de Entrepiso				
			Calculo Manual	Calculo ETABS	Calculo Manual	Calculo ETABS	Amort. Objetivo (%) Según Newmark y Hall, Amort. Efectivo ( $\xi_{eff}$ )	Amortiguamiento Real(%)		Calculo Manual	Analisis Modal Espectral (ETABS)	Calculo Manual	Analisis Modal Espectral (ETABS)	Calculo Manual	Analisis Modal Espectral (ETABS)	Analisis Dinamico Tiempo-Historia No Lineal (ETABS)
								Calculo Manual	Analisis Modal Espectral (ETABS)							
04	S0 (Roca Dura)	Sin Disipadores	10.338	10.341	0.608	0.608	N.R.	5.00	5.00	N.R.	0.0567	0.0568	0.007	0.007	N.R.	
		Con Disipadores Viscoelasticos	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	
	S1 (Suelos Muy Rigidos)	Sin Disipadores	10.338	10.341	0.608	0.608	N.R.	5.00	5.00	5.00	0.0945	0.0945	0.011	0.011	0.0127	
		Con Disipadores Viscoelasticos	13.406	13.410	0.469	0.469	33.50	40.96	43.65	12.93	0.0386	0.0365	0.004	0.004	0.0054	
	S2 (Suelos Intermedios)	Sin Disipadores	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	
		Con Disipadores Viscoelasticos	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	

(Fuente: elaboración propia) comentario: Al aumentar la cantidad de pisos (4 GDL) se van requiriendo más cantidad de amortiguamiento, esto se ve reflejado

en esta tabla en la que solo el sistema con el tipo de suelo S1 es en el que se necesita uso de disipadores, con una demanda de amortiguamiento inclusive alta, se realizó de esta forma solo con fines académicos ya que en la realidad no se puede llegar a obtener tal nivel de amortiguamiento en un sistema.

N.R. = No Requiere

N.C. = No Cumple

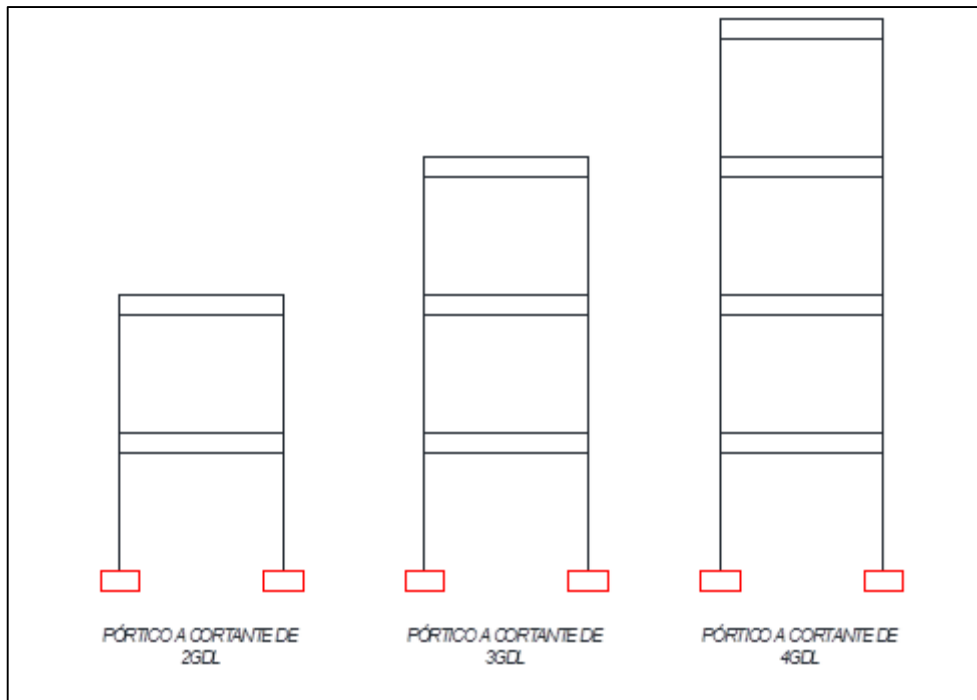


Figura 4.23. Pórticos a cortante sin disipadores utilizados para análisis comparativo (Fuente Elaboración propia)

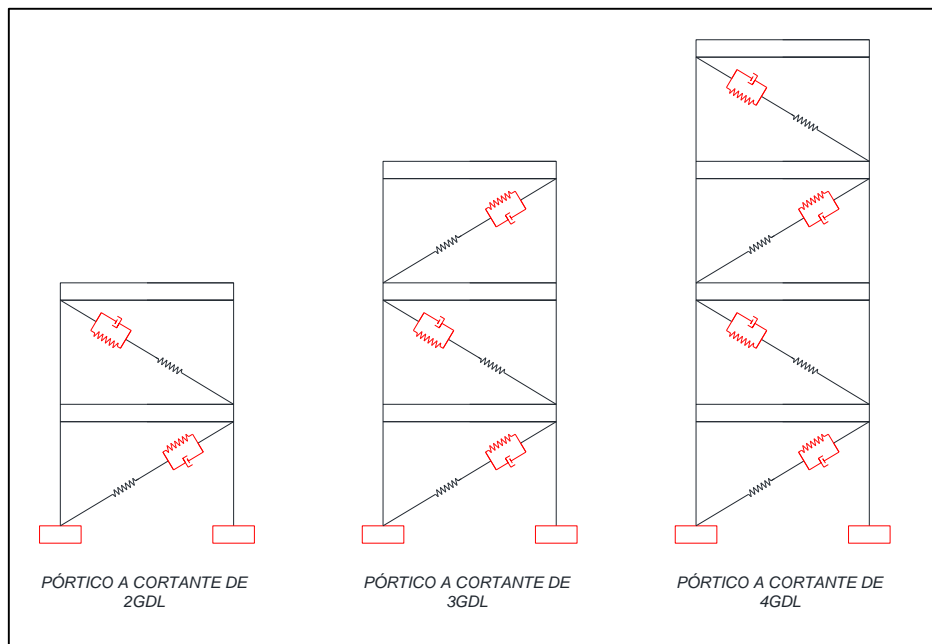


Figura 4.24. Pórticos a cortante con disipadores utilizados para análisis comparativo (Fuente Elaboración propia)

## CAPÍTULO V

### 5. DISCUSIÓN

Los resultados arrojados por el software ETABS v.16 validan plenamente los cálculos manuales y la teoría estudiada a lo largo de la investigación, el enfoque dinámico termina siendo el correcto al obtener resultados coherentes en términos de desplazamientos relativos, derivas y porcentaje de amortiguamiento, en síntesis, las bases teóricas han sido sólidas, correlacionadas y coherentes.

Al momento de verificar el nivel de amortiguamiento presentado por los marcos planos se puede tomar como tema de discusión el porcentaje de cada modelo, ya que mediante un análisis dinámico espectral comparativo entre un cálculo manual y el uso del Software nos arroja valores que difieren entre ellos y esta diferencia se incrementa a medida que se aumentan los grados de libertad. En el caso del análisis Tiempo-Historia No Lineal, los porcentajes de amortiguamiento efectivo obtenido mediante un ensayo de vibración libre arrojan valores completamente diferentes a los del cálculo manual, esto se debe a que el software hace un análisis no lineal del material el cual no es objeto de nuestra investigación.

En lo que concierne a la determinación de porcentaje de disminución de derivas y desplazamientos relativos permisibles en los tipos de suelos S0, S1, S2 y S3 mediante un análisis sísmico comparativo, la aplicación de toda la bibliográfica en temas de investigación como esta, es útil y adaptable. Estos resultados nos indican que el cálculo manual y del software difieren muy poco, pero dentro del límite permisible que indican los códigos NTE E030, ASCE/SEI 7-10 y FEMA 356.

Las curvas histeréticas de un disipador de energía de comportamiento visco-elástico y de un de fluido viscoso, poseen ciertas características, las cuales nos permiten identificarlas de una forma muy precisa, los visco-elásticos poseen lazos en forma de elipse con pendiente positiva mientras que los de Fluido viscoso no tienen ninguna pendiente, esto se puede observar en los resultados. El comportamiento es el adecuado y no se presentan incoherencias, esto es de vital importancia ya que nos permite estar seguros que se tiene la respuesta esperada.

## CONCLUSIONES

- Al realizar un análisis sísmico modal espectral, se pudieron validar nuestros modelos numéricos, destacando que el uso de la ecuación característica para la obtención de autovectores es de 3 grados de libertad, y que a partir de 4 grados de libertad se hace necesaria la ecuación espacio-estado para satisfacer la obtención de autovectores, cabe resaltar que se utilizó también un análisis tiempo-historia no lineal y los resultados se muestran tanto en el capítulo 4 como en los posteriores acápite, por último, los resultados demuestran que para un suelo Tipo S0, no se pudo comparar los resultados de los modelos numéricos, debido a que, al ser un tipo de suelo S0(Roca Dura), la fuerza cortante en la base fue muy baja trayendo como consecuencia que las derivas y desplazamientos excedan poco o nada del límite máximo permitido de 0.0058 según el HAZUS; para un suelo Tipo S1, si se realizó comparaciones entre los modelos matemáticos, que nos indican que el nivel de amortiguamiento viscoso requerido aumenta conforme se van aumentando los grados de libertad, asimismo, al ser un tipo de suelo S1(Suelos Muy Rígidos) la fuerza cortante en la base se va incrementando, trayendo como consecuencia el aumento de las fuerzas internas de los elementos, a su vez esto se ve reflejado también en el incremento de las derivas y desplazamientos, aumentando el nivel de daño del modelo numérico, excediendo el límite máximo permitido según el HAZUS; para un suelo tipo S2, se incrementan las derivas y desplazamientos, como también el nivel de amortiguamiento viscoso requerido; en el modelo matemático de 4 Grados de Libertad, ya resulta inadecuado el uso de disipadores visco-elástico, porque excede el nivel de amortiguamiento requerido establecido por el ASCE 7-10, el cual indica que el amortiguamiento equivalente máximo no debe exceder de 35% y en este modelo alcanza ya el 100%; para un suelo tipo S3, no se realizó una comparación, ya que en los modelos el nivel de amortiguamiento excedían los valores permisibles según el ASCE 7-10., los demás resultados pueden verificarse en las tablas 4.14, 4.25 y 4.30.
- Al verificar el nivel de amortiguamiento se notaron dos cosas muy particulares:
  - Todos los marcos tenían la misma rigidez, masa y amortiguamiento inicial, pero al querer saber cuánto era el porcentaje de amortiguamiento requerido se evidenció que en suelo tipo S0 requería muy poco amortiguamiento, del 0.65% al 3.20% no siendo necesaria la implementación de los disipadores, el suelos tipo S1 requerían del 21.95% al 28.50% necesitando la implementación de



disipadores, el suelos tipo S2 la exigencia de amortiguamiento requerido era de 33.89% a 55.28%, exigiendo mucha capacidad a la que el disipador puede ofrecer (20 al 40%) finalmente en suelos tipo S3 requería 33.30 para un pórtico de 2gdl siendo este valor inviable para la teoría lineal, puesto que la estructura estaría inevitablemente en un sobre amortiguamiento involuntario.

- En cuanto al nivel de amortiguamiento, según los resultados se llega a la conclusión de que el amortiguamiento es directamente proporcional al daño estructural o sísmico, es decir a mayor sollicitación de carga sísmica, mayor es el nivel de amortiguamiento.
- Del análisis sísmico realizado a modelos con y sin disipadores visco-elásticos se pudo comprobar una reducción notoria de derivas y desplazamientos, mostrándose a continuación las tablas que contienen el porcentaje de disminución de derivas y desplazamientos de los modelos más representativos en el tipo de suelo S1, no se muestran los resultados de otros tipos de suelos (S0, S2 y S3) debido por ejemplo, a que en el Tipo de suelo S0, no fue necesaria la adición de disipadores de energía visco-elástico ya que su nivel de amortiguamiento requerido se encontraba entre 0.65% al 3.20%, lo cual era muy bajo, en el caso del suelo S2, los resultados son parecidos con respecto a necesidad de amortiguamiento y mostrar un resumen del S1 basta, en el caso del tipo de suelo S3, no se puede comparar debido a que el aumento de derivas conllevó a un incremento de amortiguamiento requerido para el control de estas derivas, excediendo el 35% permitido según el ASCE 7-10.

Tabla 5.1

*Comparación de desplazamientos y derivas de entrepiso*

Pórtico sin amortiguamiento y con amortiguamiento de 03 Niveles con el tipo de suelos S1				
Sistema de amortiguamiento visco-elástico				
Desplazamiento	Nivel	Sin amortiguamiento	Con amortiguamiento	Porcentaje de reducción (%)
	3	0.0788	0.0300	60.88
	2	0.0687	0.0269	60.91
	1	0.0536	0.0209	61.00
Deriva de Entrepiso	Nivel	Sin amortiguamiento	Con amortiguamiento	Porcentaje de reducción (%)
	3	0.0027	0.0011	60.90
	2	0.0051	0.0020	60.73
	1	0.0107	0.0042	61.00

Fuente: elaboración propia

- Al realizar un análisis no lineal tiempo-historia (FNA), se verificó el correcto comportamiento de la curva histerética, mostrándose como un elipsoide con pendiente positiva propio de un visco-elástico, diferenciándola así de un disipador fluido viscoso.

## RECOMENDACIONES

- A los estudiantes se les recomienda tener en cuenta que mediante los resultados del capítulo anterior se verificó que una misma estructura (marco) no puede tener de ninguna manera el mismo amortiguamiento en diferentes tipos de suelos, por lo que este tiene múltiples variables tanto externas como internas, que particularizan la necesidad de amortiguamiento para cada caso, por lo que se recomienda una correcta investigación antes de usarlos como dispositivos de protección sísmica de manera indiscriminada con el software.
- En la presente tesis no se efectuó una comparación de reducción de cortantes ni momentos basales por ser obvias las disminuciones y además de hacer más denso el trabajo con tantas variables, se deja abierta la presente investigación para futuros aportes, así como la confiabilidad de la teoría utilizada.
- A los estudiantes dedicados a la investigación se recomienda un correcto estudio de la base teórica, citando alguno de ellos: Dinámica Estructural (Anil K. Chopra), Norma Peruana E.030 Diseño Sismorresistente, ASCE 7-10 Minimum Design Loads for Buildings And Other Structures, entre otros, que analizan estos dispositivos pasivos de energía, este material bibliográfico reforzará nuestros conocimientos para poder comprender y entender cómo es que funcionan estos sistemas de protección sísmica para que posteriormente se puedan hacer uso más responsable de ellos en el software que más le parezca conveniente.
- A los estudiantes dedicados a la investigación se les recomienda que al realizar un análisis Tiempo-Historia No Lineal, los registros sísmicos deben reflejar la realidad del proyecto, es decir deben de haber sido tomados en suelos con características similares al suelo donde se emplazará la cimentación de la estructura, haciendo cónsonas las condiciones de borde que se pretende reflejar en el modelo numérico.

## REFERENCAS BIBLIOGRAFICAS

Aguiar, R. (2008). *Análisis sísmico de edificios*. Quito: Centro de investigaciones científicas.

Aiken, I. D., & Kelly, J. M. (1991). *Earthquake simulator testing of energy absorbing systems for multistory structures*. Ancona: International meeting on earthquake protection of buildings.

American Society of Civil Engineers. (2010). *ASCE 7-10: Minimum design Loads for buildings and other structures*. Estados Unidos.

Boroschek, R. (2015). *Dinámica estructural apuntes de clase*. Santiago: Universidad de Chile.

Botero, J. C. (2002). Respuesta de sistemas suelo-estructura con amortiguamiento en la base. *Universidad EAFIT No. 125*, 51-61.

Bozzo, L. M. (6 de Enero de 2013). *CIP tv*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=nma6QDLjcl4>

Bozzo, L. M. (18 de Junio de 2013). *Diario Gestión*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=wroDIbvLd3U>

Bozzo, L. M., & Barbat, A. H. (2004). *Diseño sismorresistente de edificios, técnicas convencionales y avanzadas*. Barcelona: Reverté.

Cahís, X. (2001). *Desarrollo de un nuevo disipador de energía para diseño sismorresistente análisis numérico y validación experimental de su comportamiento*. Cataluña: Universidad Politécnica de Cataluña.

Cano, H., & Zumaeta, E. (2012). *Diseño Estructural de una edificación con disipadores de energía y análisis comparativo sísmico entre el edificio convencional y el edificio con disipadores de energía para un sismo severo*. Tesis de grado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú.

Cheng, F. Y., Jiang, H., & Lou, K. (2008). *Smart structures, Innovative systems for seismic response control*. Florida: Taylor & Francis.

Chopra, A. K. (1995). *Dynamics of structures*. California: Prentice Hall.

Chopra, A. K. (2014). *Dinámica de estructuras*. México: Pearson educación.

Constantinou, M. C., Soong, T. T., & Dargush, G. F. (2004). *Passive energy dissipation systems in structural engineering*. Estados Unidos: Wiley & sons.

Davidovici, V. (2016). *Conception-construction parasismique*. París: Afnor et Groupe Eyrolles.

Federal Emergency Management Agency. (1997). *NEHRP: Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 273)*. Washington D.C.

Federal Emergency Management Agency. (FEMA). *Multihazard Loss Estimation Methodology Hazus*. Washington D.C.: MH 2.0, Earthquake Model.

Fuentes, J. C. (2015). *Análisis sísmico de una edificación con disipadores de fluido viscoso*. Tesis de grado, Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú.

García Reyes, L. E. (1998). *Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico*. Bogotá: Universidad de los Andes.

Gatica, V. A. (2012). *Respuesta sísmica de un edificio de estructura metálica con aisladores. alternativa de diseño*. Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Madrid, España.

Hart, G., & Wong, K. (2000). *Structural dynamics for structural engineers*. New York: John Wiley & sons.

Lama, W. F. (2013). *Análisis y Diseño de estructuras de acero con disipadores viscoelásticos para la ciudad de Guayaquil*. Tesis de grado, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Ecuador.

López, C., Retamales, R., & Kannegiesser, T. (2011). Protección sísmica de estructuras, sistemas de aislación sísmica y disipación de energía. *Cámara chilena de la construcción*, 3-23.

Morales, L., & Contreras, J. (2012). *Protección de una Edificación Existente con Disipadores de Energía*. Tesis de grado, Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú.

Muñoz, A. (1999). *Ingeniería antisísmica*. Lima: Pontificia universidad católica del Perú.

Narkhede, D. I., & Sinha, R. (2012). *Shock vibration and control of structures using fluid viscous dampers*. Lisboa: 15TH World Conference on Earthquake engineering.

Newmark, N., & Hall, W. (1982). *Earthquake spectra and design*. California: UC Berkeley.

Oviedo, J. A., & Duque, M. (2006). Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones. *EIA*, 105-120.

Palacios, J. L. (2009). *Análisis experimental de disipadores viscoelásticos y su relación con la rigidez y el factor de amortiguamiento*. Tesis de maestría, Universidad Técnica de Manabí, Ecuador.

Pall et al. (1993). *Friction-dampers used for seismic control of new an existing buildings in Canada*. Quebec: Montreal.

Paz, M. (1992). *Dinámica estructural*. Barcelona: Reverté.

PRISMA, i. (14 de Noviembre de 2013). *isuu*. Obtenido de [https://issuu.com/plusgstudio/docs/brochure\\_\\_prisma\\_\\_dic2013\\_519194890b18b9](https://issuu.com/plusgstudio/docs/brochure__prisma__dic2013_519194890b18b9)

Real academia española (RAE). (2001). *Diccionario de la lengua española. Vigésimo segunda edición*. Madrid: Mateu Cromo.

REGLAMENTO NACIONAL DE EDIFICACIONES. (2016). *E.030 DISEÑO SISMORRESISTENTE*. Lima, Perú: SENCICO.

Romero, I. (2016). *Mecánica de sólidos*. Madrid: Universidad politécnica de Madrid.

Sánchez, A. G. (2014). *Análisis y evaluación de la aplicación de disipadores histeréticos de fluencia para el mejoramiento del desempeño sísmico de estructuras de hormigón armado en la ciudad de Guayaquil*. Tesis de grado, Unviuersidad Católica de Santiago de Guayaquil, Ecuador.

Singiresu, S. R. (2012). *Vibraciones mecánicas*. Estado de México: Pearson educación.

Soong, T. T., & Dargush, G. F. (1997). *Passive energy dissipation systems in structural engineering*. New York: Wiley & sons.

Symans, M. D. (2002). *Seismic protective systems: passive energy dissipation*. Estados unidos: Renseelaer Poyltechnic insitute.

Symans, M. D. (2008). *Energy dissipation systems for seismic applications: current practice and recent developments*. Estados Unidos: Renseelaer Poyltechnic insitute.

Tavera, H. (2004). *Sismicidad y tectónica de placas*. Lima: Revista: Geonoticias pp. 25-26.

TAYLOR, d. (7 de Septiembre de 2011). *GerpaITV*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=gUO3WQ1Yz2Y>

Tsai et al. (1993). *Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistance construction*. Earthquake Spectra.

Uang, C., & Bertero, V. (1988). *Use of energy as design criterion in earthquake-resistant design*. California: UC Berkeley.

Villarreal, G., & Oviedo, R. (2009). *Edificaciones con disipadores de energía*. Lima: Asamblea nacional de rectores.

## ANEXOS

Tabla 5.2

## Matriz de consistencia

interrogante principal	objetivo general	hipotesis general	Variable 1	Indicadores	Métodos
¿Cómo realizar un análisis sísmico comparativo entre modelos tipo corte de marcos planos de varios grados de libertad en suelos tipo S0, S1, S2 Y S3 con y sin disipadores de energía visco-elásticos?	Realizar un análisis sísmico comparativo entre modelos tipo corte de marcos planos de varios grados de libertad en suelos tipo S0, S1, S2 y S3 con y sin disipadores de energía visco-elásticos.	Para los estudios de comportamiento sísmico se espera obtener resultados que favorezcan a la estructura al minimizar sus daños frente a sollicitaciones sísmicas severas, por lo que los 3 modelos en sus 4 diferentes tipos de suelo deberían demostrar una disminución de respuestas en términos de derivas, desplazamientos y energía.	Marcos planos tipo corte de varios grados de libertad convencionales	Distorsión Desplazamiento Energía	Análisis sísmico lineal modal espectral.
interrogantes secundarias	objetivo específico	hipotesis específica	Variable 2		
a) ¿Cuánto de amortiguamiento puede proporcionar un disipador visco-elástico a una estructura convencional?	a) Verificar el nivel de amortiguamiento presentado por las estructuras a las cuales serán aplicados los disipadores visco-elásticos.	a) Como los modelos numéricos tendrán las mismas propiedades iniciales de rigidez y masa, la necesidad de amortiguamiento no será la misma en todos los casos puesto que esta dependerá tanto del tipo de suelo donde se emplace como de la cantidad de grados de libertad que posea.	Marcos planos tipo corte de varios grados de libertad con disipadores visco-elásticos	Distorsión Desplazamiento Energía Histéresis	Análisis sísmico lineal modal espectral y análisis sísmico tiempo historia no lineal (FNA)
b) ¿En qué porcentaje disminuyen las derivas y desplazamientos una vez implementado disipadores visco-elásticos a los modelos numéricos?	b) Determinar el porcentaje de disminución de derivas y desplazamientos entre los modelos con y sin disipadores visco-elásticos una vez aplicado los códigos NTE E030, ASCE/SEI 7-10 y FEMA 356.	b) Al determinar resultados de respuesta entre modelos con y sin disipadores deberá mostrarse una considerable mejora en la respuesta estructural en términos de derivas, desplazamiento y energía, así como la necesidad de implementar estos dispositivos en uno y otro tipo de suelo.			
c) ¿Cómo se comportan histeréticamente los disipadores visco-elásticos?	c) Diferenciar el funcionamiento entre un disipador de energía de comportamiento visco-elástico con un disipador viscoso, a través de las curvas histeréticas.	c) El disipador visco-elástico debería mostrar unos lazos o curvas histeréticas con pendiente positiva proporcionada por la rigidez del disipador visco-elástico, y no una elipse sin pendiente que evidenciaría puro amortiguamiento, propio de un disipador viscoso.			