



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y  
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**TEMA: “USO DE DISIPADORES DE ENERGÍA PARA  
CONTROLAR TORSIÓN EN PLANTA Y MEJORAR LA  
REDUNDANCIA ESTRUCTURAL, EJEMPLO DE APLICACIÓN  
BLOQUES 4 Y 5 DEL CENTRO DE INVESTIGACIONES DE LA  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE”**

**AUTOR: RAMÍREZ PINO, JENIFFER IRINA**

**DIRECTOR: ING CAIZA, PABLO PH.D**

**SANGOLQUÍ**

**2018**



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA

Y CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“USO DE DISIPADORES DE ENERGÍA PARA CONTROLAR TORSIÓN EN PLANTA Y MEJORAR LA REDUNDANCIA ESTRUCTURAL, EJEMPLO DE APLICACIÓN BLOQUES 4 Y 5 DEL CENTRO DE INVESTIGACIONES DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE”**, realizado por la señorita **RAMÍREZ PINO JENIFFER IRINA**, ha sido realizado en su totalidad y analizado por el software anti – plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a la señorita **RAMÍREZ PINO JENIFFER IRINA** para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, Enero 2018

Ing. Pablo Caiza Sánchez Ph. D

Director de Trabajo de Titulación



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA

Y CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **RAMÍREZ PINO JENIFFER IRINA**, con cédula de identidad N° 171836520-6, declaro que este trabajo de titulación **“USO DE DISIPADORES DE ENERGÍA PARA CONTROLAR TORSIÓN EN PLANTA Y MEJORAR LA REDUNDANCIA ESTRUCTURAL, EJEMPLO DE APLICACIÓN BLOQUES 4 Y 5 DEL CENTRO DE INVESTIGACIONES DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE”**, ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, Enero 2018

Ramírez Pino Jeniffer Irina

C.C: 171836520-6



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA

Y CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Yo, **RAMÍREZ PINO JENIFFER IRINA**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca virtual de la institución el presente trabajo de titulación **“USO DE DISIPADORES DE ENERGÍA PARA CONTROLAR TORSIÓN EN PLANTA Y MEJORAR LA REDUNDANCIA ESTRUCTURAL, EJEMPLO DE APLICACIÓN BLOQUES 4 Y 5 DEL CENTRO DE INVESTIGACIONES DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE”** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, Enero 2018

Ramírez Pino Jeniffer Irina

C.C: 171836520-6

## **DEDICATORIA**

*Este trabajo con el que culmino mi formación, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil se lo dedico a Dios, a mi hermosa madre, Iri Pino, a mi padre, Carlos Ramírez, mis hermanos: Melanie, Estefano y Esteban, a mi enamorado Paulo Andrés y sobre todo este trabajo es en memoria de mis abuelitos Carlos Pino y Ana Eulalia del Pilar Ramírez.*

*Jeniffer Ramírez*

## AGRADECIMIENTO

*A Dios, por darme la vida, la pasión, permitirme vivir siempre agradecida de su creación, por guiarme y bendecirme.*

*A mi madre, por su amor, amistad y cómplice en todos los momentos, por estar junto a mi cada día, por haberme enseñado a obrar bien.*

*A mi padre, por alentarme a ser una mejor profesional y persona.*

*A mis hermanos, por estar a mi lado sacándome sonrisas y hacer de mí un ejemplo que ellos puedan seguir.*

*A mi enamorado, con el que cumplo mis sueños y fijo mis metas, por alentarme a dar lo mejor de mí en cada etapa, por ser mi amigo, por ser mi compañero de vida, mi soporte y mi refugio.*

*A Gabriela, por darme el mejor regalo de mi vida, mis hermanos, por sus consejos y por el cariño.*

*A mi familia, por siempre estar a mi lado y llenarme de amor, consejos y alegría.*

*Al Ph. D. Pablo Caiza, por ser un docente extraordinario, por la paciencia durante este trabajo de titulación, por el tiempo dedicado, por siempre estar abierto a cualquier duda o comentario, por creer en mí y darme palabras de aliento incluso en las peores situaciones, fue y será un honor siempre para mi haber alcanzado este logro bajo su dirección.*

*Al Ing. Estuardo Peñaherrera, por ser un excelente profesor, amigo y guía, por transmitir sus conocimientos y siempre sacar lo mejor de sus estudiantes.*

*A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por permitirme lograr mi aspiración académica y recibirme dentro de sus aulas en las que compartí una linda etapa de mi vida.*

*A mis profesores, especialmente a la Ing. Blanca Chávez, Ing. Alexander Robayo e Ing. Roberto Aguiar Ph. D., por compartir sus conocimientos y experiencias con sus estudiantes.*

*A mis amigos, Carolina, Stephanie, Rommel, Cristian García, Jorgito, Darwin, Julio, Bryan Ontaneda y Bryan Silva por el camino que recorrimos y todo lo que tenemos por delante.*

*A mis amigos del colegio, Cris, Moni, Margarita, Karla, Byron, Daniel, Pablo, Alejandro, Erick y Dennisito por siempre creer en mí y más que amigos ser hermanos.*

*Jeniffer Ramírez*

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>CERTIFICACIÓN</b> .....	<b>ii</b>
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD</b> .....	<b>iii</b>
<b>AUTORIZACIÓN</b> .....	<b>iv</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>v</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>xi</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>xiii</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>xviii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xix</b>
<b>1. CAPÍTULO I: GENERALIDADES</b> .....	<b>1</b>
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. Justificación e Importancia.....	2
1.3. Objetivos .....	4
1.3.1. Objetivo general.....	4
1.3.2. Objetivos específicos .....	4
<b>2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>6</b>
2.1. Desempeño sismorresistente en edificaciones.....	6
2.2. Propiedades del Acero.....	7
2.2.1. Curva Esfuerzo- Deformación .....	7
2.2.2. Relaciones momento- rotación y momento-curvatura .....	9
2.2.3. Rótula plástica.....	11
2.2.4. Comportamiento del acero ante cargas cíclicas .....	11
2.3. Métodos de evaluación de la capacidad estructural .....	13
2.3.1. Procedimientos lineales.....	13

2.3.2.	Procedimientos no lineales.....	16
2.4.	Análisis historia en el tiempo .....	22
2.4.1.	Escalamiento de sismos.....	23
2.4.2.	Criterios que se utilizan para la elección de los registros de diseño ....	24
2.4.3.	Elección y caracterización de los registros .....	25
2.5.	Torsión sísmica.....	27
2.6.	Redundancia estructural .....	28
2.7.	Sistemas de protección sísmica .....	30
2.8.	Sistemas pasivos de protección sísmica .....	34
2.8.1.	Analogía de flujo de agua .....	35
2.8.2.	Tipos de disipadores de energía pasivos .....	38
2.9.	Propiedades de los disipadores histeréticos de fluencia.....	38
2.9.1.	Disipadores tipo ADAS .....	40
2.9.2.	Disipadores tipo TADAS .....	43
2.9.3.	Disipadores tipo Shear Link Bozzo.....	44
2.9.4.	Influencia de disipadores de energía pasivos en el balance de energía	44
<b>3.</b>	<b>CAPÍTULO III: DESARROLLO.....</b>	<b>47</b>
3.1.	Descripción de la estructura .....	47
3.1.1.	Configuración estructural.....	47
3.1.2.	Cargas de la estructura .....	51
3.2.	Análisis modal espectral.....	52
3.2.1.	Parámetros sísmicos .....	53
3.2.2.	Espectro de análisis .....	53
	Espectro elástico Norma Ecuatoriana de la Construcción .....	53
	Cortante basal de diseño.....	54
	Espectro elástico norma ASCE 7-10.....	56



Comparación espectros elásticos entre NEC 15 y ASCE 7-10.....	59
3.3. Análisis tiempo historia.....	62
3.4. Análisis de la estructura sin disipadores.....	66
3.4.1. Derivas de piso.....	67
3.4.2. Desplazamientos máximos.....	67
3.4.3. Periodos de vibración dinámicos y porcentaje de participación modal	68
3.4.4. Análisis de la torsión en planta de la estructura.....	69
3.4.5. Ajuste del cortante basal estático y dinámico.....	70
3.4.6. Respuesta energética sin disipadores.....	71
3.4.7. Redundancia estructural sin disipadores.....	72
3.4.8. Análisis estático no lineal.....	75
3.5. Análisis de la estructura con disipadores Shear Link Bozzo (SLB).....	80
3.5.1. Propiedades de disipadores de energía Shear Link Bozzo.....	81
3.5.2. Derivas de piso de la estructura con disipadores Shear Link Bozzo....	86
3.5.3. Desplazamientos máximos de la estructura con disipadores Shear Link Bozzo	86
3.5.4. Periodos de vibración de la estructura.....	87
3.5.5. Análisis de la torsión en planta de la estructura con disipadores Shear Link Bozzo.....	87
3.5.6. Histéresis de los disipadores Shear Link Bozzo.....	88
3.5.7. Respuesta energética con disipadores Shear Link Bozzo.....	90
3.5.8. Redundancia estructural con disipadores.....	92
3.5.9. Análisis estático no lineal.....	95
3.6. Análisis de la estructura con disipadores TADAS.....	98
3.6.1. Derivas de piso 1B1.....	103
3.6.2. Desplazamientos 1B1-15.....	104
3.6.3. Periodos de Vibración 1B1-15.....	104

3.6.4.	Análisis de la torsión en planta 1B1-15 .....	105
3.6.5.	Histéresis de los disipadores 1B1-15 .....	105
3.6.6.	Respuesta energética con disipadores 1B1-15 .....	106
3.6.7.	Redundancia Estructural .....	107
3.6.8.	Análisis estático no lineal .....	109
<b>4.</b>	<b>CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>114</b>
4.1.	Derivas de piso .....	114
4.2.	Desplazamientos.....	115
4.3.	Periodos de Vibración .....	116
4.4.	Análisis de la torsión en planta.....	116
4.5.	Respuesta Energética.....	117
4.6.	Redundancia Estructural.....	118
4.7.	Análisis estático no lineal.....	119
<b>5.</b>	<b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>120</b>
<b>5.1.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>120</b>
<b>5.2.</b>	<b>Recomendaciones .....</b>	<b>122</b>
	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>124</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Coordenadas de la estructura .....	3
<b>Tabla 2.</b> Secciones elementos estructurales .....	50
<b>Tabla 3.</b> Carga permanente.....	51
<b>Tabla 4.</b> Factores espectro de respuesta de aceleraciones NEC 15.....	55
<b>Tabla 5.</b> Factores espectro ASCE 7-10.....	56
<b>Tabla 6.</b> Periodo de la estructura ASCE 7-10 .....	57
<b>Tabla 7.</b> Aceleraciones espectrales para diseño.....	58
<b>Tabla 8.</b> Factores espectro de respuesta de aceleraciones ASCE 7 10 y NEC 1559	
<b>Tabla 9.</b> Aceleraciones espectrales para diseño.....	62
<b>Tabla 10.</b> Valores de la máxima amplitud para cada componente. ....	63
<b>Tabla 11.</b> Derivas de piso estructura sin disipadores.....	67
<b>Tabla 12.</b> Desplazamientos máximos de la estructura sin disipadores .....	68
<b>Tabla 13.</b> Periodos de vibración de la estructura sin disipadores .....	68
<b>Tabla 14.</b> Coordenadas del centro de masas y centro de rigidez por piso de la estructura .....	69
<b>Tabla 15.</b> Respuesta energética estructura sin disipadores.....	72
<b>Tabla 16.</b> Cargas de columnas estructura sin disipadores .....	72
<b>Tabla 17.</b> Parámetros análisis bilineal .....	77
<b>Tabla 18.</b> Punto de desempeño.....	80
<b>Tabla 19.</b> Propiedades de los disipadores Shear Link Bozzo.....	85
<b>Tabla 20.</b> Derivas de piso de la estructura con disipadores SLB.....	86
<b>Tabla 21.</b> Desplazamientos de piso de la estructura con disipadores SLB .....	86
<b>Tabla 22.</b> Desplazamientos de piso de la estructura con disipadores SLB .....	87
<b>Tabla 23.</b> Centro de masa y rigidez estructura con disipadores.....	88
<b>Tabla 24.</b> Respuesta energética estructura con disipadores .....	91
<b>Tabla 25.</b> Cargas actuantes sobre la columna .....	92
<b>Tabla 26.</b> Parámetros análisis bilineal .....	96
<b>Tabla 27.</b> Punto de desempeño.....	98
<b>Tabla 28.</b> Propiedades disipador TADAS.....	98
<b>Tabla 29.</b> Propiedades disipador SLB 40-5 .....	99
<b>Tabla 30.</b> Propiedades disipador TADAS 1B1 .....	100

<b>Tabla 31. Parámetros elásticos disipador TADAS 1B1 .....</b>	<b>100</b>
<b>Tabla 32. Calculo del coeficiente de amortiguamiento disipador TADAS 1B1 .....</b>	<b>101</b>
<b>Tabla 33. Parámetros disipadores SLB 40-5 y TADAS 1B1 .....</b>	<b>101</b>
<b>Tabla 34. Derivas de la estructura con disipadores TADAS 1B1 .....</b>	<b>104</b>
<b>Tabla 35. Desplazamientos de la estructura con disipadores TADAS 1B1 .....</b>	<b>104</b>
<b>Tabla 36. Periodos de vibración de la estructura con disipadores TADAS 1B1 .....</b>	<b>104</b>
<b>Tabla 37. Calculo de la excentricidad estructural con disipadores TADAS 1B1.. ..</b>	<b>105</b>
<b>Tabla 38. Respuesta energética de la estructura con disipadores TADAS 1B1-15 .....</b>	<b>106</b>
<b>Tabla 39. Carga axial, cortante y momento para las columnas C1 y C2 .....</b>	<b>107</b>
<b>Tabla 40. Parámetros análisis bilineal .....</b>	<b>111</b>
<b>Tabla 41. Punto de desempeño .....</b>	<b>113</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Ubicación geográfica Centro de Investigaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.....	4
<b>Figura 2:</b> Diagrama esfuerzo-deformación del acero .....	7
<b>Figura 3:</b> Energía disipada por unidad de volumen .....	9
<b>Figura 4:</b> Relación momento curvatura .....	9
<b>Figura 5:</b> Modelo del ASCE 41 .....	10
<b>Figura 6:</b> Rótula plástica en función de un modelo bilineal .....	11
<b>Figura 7:</b> Comportamiento del acero bajo cargas cíclicas .....	12
<b>Figura 8:</b> Modelos constitutivos del acero ante cargas cíclicas .....	13
<b>Figura 9:</b> Modelo estructural de un grado de libertad.....	14
<b>Figura 10:</b> Modelo estructural de varios grados de libertad .....	15
<b>Figura 11:</b> Relación cortante basal y desplazamiento.....	17
<b>Figura 12:</b> Curva de capacidad .....	17
<b>Figura 13:</b> Espectro de capacidad .....	18
<b>Figura 14:</b> Espectro de demanda sísmica.....	19
<b>Figura 15:</b> Espectro de capacidad demanda.....	20
<b>Figura 16:</b> Representación bilineal de la curva de capacidad.....	21
<b>Figura 17:</b> Red Nacional de estaciones sísmicas .....	26
<b>Figura 18:</b> Torsión sísmica .....	27
<b>Figura 19:</b> Configuración en planta de: a) Sistema no redundante; b) Estructura redundante .....	29
<b>Figura 20:</b> Respuesta energética del sistema de: a) Sismo leve, ante un estado de control de daño; b) Sismo severo, estado límite del colapso .....	34
<b>Figura 21:</b> Analogía de flujo de agua de un sistema estructural convencional: a) durante el evento sísmico; b) final del evento sísmico.....	36
<b>Figura 22:</b> Relación carga desplazamiento para disipadores metálicos.....	39
<b>Figura 23:</b> Disipadores sobre contravientos Chevrón.....	39
<b>Figura 24:</b> Disipador ADAS .....	40
<b>Figura 25:</b> Diagrama de histéresis de disipador ADAS .....	41
<b>Figura 26:</b> Energía elástica de un ciclo de histéresis .....	42
<b>Figura 27:</b> Disipador TADAS.....	43

<b>Figura 28:</b> Fotografía ensayo disipador SLB .....	44
<b>Figura 29:</b> Analogía de flujo de agua: a) Sistema activado por desplazamiento; b) sistema activado por velocidad .....	45
<b>Figura 30:</b> Bloque 4 y 5 del Centro de Investigaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.....	47
<b>Figura 31:</b> Curva esfuerzo deformación acero A 572 G 50 .....	48
<b>Figura 32:</b> Nivel N+4.94m bloque 4 y 5 del Centro de Investigaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.....	49
<b>Figura 33:</b> Distribución elementos estructurales losa N+4.94m bloque 4 y 5 del Centro de Investigaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.....	49
<b>Figura 34:</b> Geometría disipador SLB 40_5.....	51
<b>Figura 35:</b> Espectro Elástico de aceleraciones.....	54
<b>Figura 36:</b> Espectro de respuesta de aclaraciones elástico e inelástico .....	56
<b>Figura 37:</b> Espectro elástico de diseño ASCE 7-10.....	57
<b>Figura 38:</b> Espectro elástico de diseño .....	59
<b>Figura 39:</b> Espectro elástico de diseño .....	61
<b>Figura 40:</b> Estaciones de la Red Nacional de Acelerógrafos.....	63
<b>Figura 41:</b> Espectro de respuesta de aclaraciones elástico e inelástico .....	64
<b>Figura 42:</b> Espectro de respuesta de aclaraciones elástico e inelástico .....	65
<b>Figura 43:</b> Espectro de respuesta de aclaraciones elástico e inelástico .....	66
<b>Figura 44:</b> Bloque 4 y 5 del Nuevo Centro de Investigaciones Científicas.....	66
<b>Figura 45:</b> Centro de masas y rigidez por planta estructura sin disipadores N+4.04 y N+9.88.....	70
<b>Figura 46:</b> Centro de masas y rigidez estructura sin disipadores planta N+14.82 y N+19.76.....	70
<b>Figura 47:</b> Resultados energéticos de la estructura sin disipadores.....	71
<b>Figura 48:</b> Axial columna C1 sin disipadores registro Pedernales .....	73
<b>Figura 49:</b> Cortante columna C1 sin disipadores registro Pedernales .....	73
<b>Figura 50:</b> Momento columna C1 sin disipadores registro Pedernales .....	74
<b>Figura 51:</b> Axial columna C2 sin disipadores registro Pedernales .....	74
<b>Figura 52:</b> Cortante columna C2 sin disipadores registro Pedernales .....	75

<b>Figura 53:</b> Momento columna C2 sin disipadores registro Pedernales .....	75
<b>Figura 54:</b> Curva de capacidad de la estructura sin disipadores sentido X .....	76
<b>Figura 55:</b> Curva de capacidad de la estructura sin disipadores sentido Y .....	77
<b>Figura 56:</b> Relación entre ductilidad, factor de reducción de ductilidad y sobrerresistencia. ....	77
<b>Figura 57:</b> Punto de desempeño sentido X .....	79
<b>Figura 58:</b> Punto de desempeño sentido Y .....	79
<b>Figura 59:</b> Esquema tridimensional del bloque 4 y 5 del Nuevo Centro de Investigaciones con disipadores Shear Link Bozzo .....	80
<b>Figura 60:</b> Disposición de disipadores pórtico N en bloque 4 y 5 del Nuevo Centro de Investigaciones .....	81
<b>Figura 61:</b> Esquema en planta N+4.94 del bloque 4 y 5 del Nuevo Centro de Investigaciones .....	81
<b>Figura 62:</b> Comportamiento Histerético modelo plástico Wen .....	82
<b>Figura 63:</b> Propiedades de elementos SLB 40-5 tipo Link.....	82
<b>Figura 64:</b> Propiedades de los disipadores en la dirección de análisis .....	83
<b>Figura 65:</b> Propiedades Tiempo Historia en el tiempo no lineal .....	84
<b>Figura 66:</b> Centro de masas y rigidez estructura con disipadores SLB planta N+4.94 y N+9.88.....	88
<b>Figura 67:</b> Centro de masas y rigidez estructura con disipadores SLB planta N+14.82 y N+19.76.....	88
<b>Figura 68:</b> Histéresis SLB 40-5, registro Pedernales elemento K13 .....	89
<b>Figura 69:</b> Histéresis SLB 40-5, registro Quito elemento K4.....	90
<b>Figura 70:</b> Respuesta energética con disipadores SLB 40_5 .....	91
<b>Figura 71:</b> Axial columna C1 con disipadores SLB registro Pedernales.....	92
<b>Figura 72:</b> Cortante columna C1 con disipadores SLB registro Pedernales.....	93
<b>Figura 73:</b> Momento columna C1 con disipadores SLB registro Pedernales.....	93
<b>Figura 74:</b> Axial columna C2 con disipadores SLB registro Pedernales.....	94
<b>Figura 75:</b> Cortante columna C2 con disipadores SLB registro Pedernales.....	94
<b>Figura 76:</b> Momento columna C2 con disipadores SLB registro Pedernales.....	95
<b>Figura 77:</b> Curva de capacidad estructura con disipadores SLB sentido “X” .....	95
<b>Figura 78:</b> Curva de capacidad estructura con disipadores sentido “Y”.....	96

<b>Figura 79:</b> Punto de desempeño sentido X .....	97
<b>Figura 80:</b> Punto de desempeño sentido Y .....	97
<b>Figura 81:</b> Dimensiones disipadores TADAS .....	99
<b>Figura 82:</b> Propiedades de disipadores TADAS 1B1 .....	102
<b>Figura 83:</b> Propiedades no lineales del disipador TADAS 1B1 .....	103
<b>Figura 84:</b> Histéresis TADAS 1B1-15, registro Pedernales elemento K13.....	105
<b>Figura 85:</b> Histéresis TADAS 1B1-15, registro Quito elemento K4.....	106
<b>Figura 86:</b> Axial columna C1 con disipadores TADAS 1B1 registro Pedernales .	107
<b>Figura 87:</b> Cortante columna C1 con disipadores TADAS 1B1 registro Pedernales .....	107
<b>Figura 88:</b> Momento columna C1 con disipadores TADAS 1B1 registro Pedernales .....	108
<b>Figura 89:</b> Axial columna C2 con disipadores TADAS 1B1 registro Pedernales	108
<b>Figura 90:</b> Cortante columna C2 con disipadores TADAS 1B1 registro Pedernales .....	109
<b>Figura 91:</b> Momento columna C2 con disipadores TADAS 1B1 registro Pedernales .....	109
<b>Figura 92:</b> Curva de capacidad estructura con disipadores TADAS sentido “X” ..	110
<b>Figura 93:</b> Curva de capacidad estructura con disipadores TADAS sentido “Y” .	110
<b>Figura 94:</b> Punto de desempeño sentido X .....	112
<b>Figura 95:</b> Punto de desempeño sentido Y .....	112
<b>Figura 96:</b> Comparación de derivas del análisis estructural sin disipadores, con disipadores SLB y TADAS .....	114
<b>Figura 97:</b> Comparación de desplazamientos del análisis estructural sin disipadores, con disipadores SLB y TADAS .....	115
<b>Figura 98:</b> Comparación de periodos fundamental de vibración del análisis estructural sin disipadores, con disipadores SLB y TADAS .....	116
<b>Figura 99:</b> Comparación de excentricidad por planta del análisis estructural sin disipadores, con disipadores SLB y TADAS .....	117
<b>Figura 100:</b> Comparación de respuesta energética del análisis estructural sin disipadores, con disipadores SLB y TADAS .....	118



<b>Figura 101:</b> Comparación de las fuerzas actuantes del análisis estructural sin disipadores, con disipadores SLB y TADAS .....	118
<b>Figura 102:</b> Comparación del desplazamiento en el tope del análisis estructural sin disipadores, con disipadores SLB y TADAS .....	119
<b>Figura 103:</b> Comparación del cortante en la base del análisis estructural sin disipadores, con disipadores SLB y TADAS .....	119

## **RESUMEN**

El diseño estructural se basa en disipar energía mediante la inelasticidad de los elementos estructurales con la finalidad que la estructura no colapse tras un evento sísmico. El uso de sistemas de disipación de energía permite que la mayor parte de daño se concentre en los dispositivos disipadores de energía, de esta manera no se compromete a la estructura y podrán ser reemplazados fácilmente. El estudio de los beneficios y la aplicabilidad de los disipadores de energía hysteréticos se determina mediante el análisis del comportamiento estructural. El análisis lineal estático, modal espectral, tiempo historia y estático no lineal determina la respuesta sísmica de la estructura. Mediante un análisis comparativo de los Bloques 4 y 5 del Nuevo Centro de Investigaciones Científicas de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE sin disipadores e incluyendo disipadores de energía hysteréticos tipo Shear Link Bozzo y TADAS se determina la magnitud de los beneficios de estos dispositivos. Finalmente se verificó los resultados del análisis estructural, especialmente los beneficios que traen el uso de estos disipadores para controlar la torsión en planta y mejorar la redundancia estructural, presentando así una alternativa de diseño con ventajas económicas a corto y a largo plazo.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **DISIPADORES DE ENERGÍA**
- **TADAS**
- **SHEAR LINK BOZZO**
- **TORSIÓN EN PLANTA**
- **REDUNDANCIA ESTRUCTURAL**

## **ABSTRACT**

The structural design relies on the dissipation power through the inelasticity of the structural elements with the purpose that the structure does not collapse after a seismic event. The use of energy dissipation systems allows most of the damage to be concentrated in the energy dissipating devices, in this way they do not become the structure and are easily replaced. The study of the benefits and application of hysteretic dampers determined by structural analysis. Static linear analysis, spectral modal, time-history analysis and non-linear static analysis establish the seismic response of the structure. Through a comparative analysis of Blocks 4 and 5 of the new Research Center of the Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE without dampers and adding hysteretic dampers like Shear Link Bozzo and TADAS we can determine the magnitude of the benefits of these devices. Finally the results of the structural analysis, especially the benefits of using these heat dampers to control the torsion in the plant and improve structural redundancy, as well as a design alternative with short and long term economic advantages

### **KEY WORDS:**

- **DAMPERS**
- **TADAS**
- **SHEAR LINK BOZZO**
- **TORSION**
- **REDUNDANCY**

## CAPÍTULO I: GENERALIDADES

### 1.1. Antecedentes

El presente trabajo de investigación realiza un estudio del comportamiento estructural enfocado al uso de disipadores de energía para la estructura del nuevo Centro de Investigaciones Científicas de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE. Con la presente investigación, se propone realizar el análisis de dos alternativas de disipadores sísmicos: TADAS y SHEAR LINK, sistemas que tienen gran aceptación en el sector de la construcción por la reacción positiva que muestran durante distintos eventos sísmicos.

La mayoría de las estructuras se construyen en base a un diseño por capacidad, filosofía que se fundamenta en que la energía generada por un evento sísmico se disipe por vigas y columnas. Los daños en elementos estructurales generan pérdidas económicas por costos de reparación, bajo esta base se buscan técnicas en el diseño sismorresistente como los mecanismos de aislamiento de base y disipación de energía.

Los disipadores de energía mejoran significativamente el desempeño de la estructura y se usan principalmente con el propósito de amortiguar las vibraciones horizontales que produce la acción sísmica, lo que brinda amortiguamiento a la estructura. En un sismo de gran magnitud se espera que los disipadores trabajen en el rango no lineal y aseguren así el daño de los dispositivos en lugar de vigas y columnas. (Aguiar R. , Bozzo, Mora, Apaestegui, Caiza, & Coyago, 2016).

El estudio y aplicación de las tecnologías de disipación de energía en el diseño sismo resistente, es relativamente nuevo en el Ecuador, lo cual genera un campo abierto a investigaciones en la rama de dinámica estructural. Si bien es cierto, se han realizado investigaciones lideradas por países como Estados Unidos, Japón y Nueva Zelanda, también se han puesto a prueba en el sismo de Northridge (1994) y Kobe (1995). Las experiencias de estas estructuras con sistemas de amortiguamiento sísmico

o disipación de energía, mostraron un comportamiento satisfactorio en cuanto al desempeño de la respuesta sísmica y el control de daño. Algunos investigadores nacionales tratan este tema en documentos científicos y tesis, pero desafortunadamente son muy pocas las edificaciones que han implementado estos sistemas en su construcción, esto se debe a la falta de conocimiento para su aplicación, pues no se considera el costo-beneficio de implementar estos sistemas en construcciones civiles.

## **1.2. Justificación e Importancia**

La República del Ecuador, ubicada en una zona de alto riesgo sísmico; por tanto, el profesional Ingeniero Civil debe garantizar que las estructuras cumplan con la normativa sismorresistente vigente, de manera que sus dimensiones y especificaciones técnicas sean congruentes con la realidad sismográfica de la zona.

En los últimos 30 años, la ingeniería estructural desarrolló sistemas que contribuyen a la protección de edificaciones frente a sismos destructivos y eventos naturales que causen una considerable cantidad de pérdidas económicas y sobretodo vidas humanas. Surge entonces la necesidad y el reto para la ingeniería ecuatoriana, de comenzar a estudiar e implementar sistemas de protección estructural, tanto de aislamiento sísmico como los disipadores de energía.

Los sistemas de protección estructural se implementan gradualmente en últimos 30 años para responder a eventos sísmicos. Los dispositivos de disipación pasiva de energía cumplen la función de absorber una gran parte de la energía sísmica de entrada, de esta manera reducen la demanda de disipación de energía en los elementos estructurales y minimizan sus daños.

Los eventos sísmicos que se presentaron a partir del sismo cuyo epicentro fue en la cercanía de la ciudad de Pedernales en el año 2016 deberían marcar una nueva era en la construcción civil y promover el uso de tecnología apropiada para implementar técnicas que mitiguen la amenaza de los sectores vulnerables sísmicamente. Con el uso de disipadores de energía, se espera mejorar el desempeño sísmico de las edificaciones para aplicar los conceptos de ocupación inmediata especialmente en centros de uso especial los cuales son fundamentales en la recuperación de una ciudad tras un evento catastrófico.

La Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE con la construcción del nuevo Centro de Investigaciones Científicas es una de las instituciones pioneras en implementar el uso de disipadores de energía, por ello es importante generar información útil para las próximas generaciones ligadas con el campo de la construcción. Se pretende entonces establecer parámetros que permitan mejorar la torsión en planta de la estructura y mejorar la redundancia estructural mediante el uso de disipadores de energía; por ello en la presente investigación se realizará el análisis de los bloques 4 y 5 del nuevo Centro de Investigaciones Científicas.

El análisis de esta estructura permitirá generar información importante para en un futuro preparar normativas en cuanto a sistemas de protección estructural, específicamente disipadores de energía.

A la fecha, Agosto 2017, la edificación se encuentra en proceso de construcción, se ubica dentro del campus de la Universidad, en la parroquia Santa Clara cantón Rumiñahui de la provincia de Pichincha.

El Centro de Investigaciones Científicas está compuesto por laboratorios para las áreas de Ciencias de la Tierra y la Construcción, Eléctrica y Electrónica, Nanociencia y Nanotecnología, Ciencias de Energía y Mecánica, Ciencias de la Computación, Ciencias de la Vida y la Agricultura, Seguridad y Defensa. El área que ocupará el centro en la primera fase es de 24.156,21 m<sup>2</sup>. En la Figura 1 se muestra el mapa de ubicación de la construcción del nuevo Centro de Investigaciones Científicas de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE. Las coordenadas geográficas que delimitan el proyecto se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1**  
**Coordenadas de la estructura**

Punto	Coordenadas	
	Latitud	Longitud
1	0°19'8.66"S	78°26'53.01" O
2	0°19'4.31"S	78°26'48.94" O
3	0°19'7.02"S	78°26'48.23" O
4	0°19'9.41"S	78°26'47.19" O



**Figura 1:** Ubicación geográfica Centro de Investigaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE

**Fuente:** (Google Earth, 2017)

### 1.3. Objetivos

#### 1.3.1. Objetivo general

Analizar el uso de disipadores de energía para controlar torsión en planta y mejorar la redundancia estructural utilizando como ejemplo de aplicación los bloques 4 y 5 del nuevo Centro de Investigaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, mediante un modelo estructural realizado en el software de análisis y diseño estructural ETABS 2016, con el propósito de determinar la eficiencia, aplicabilidad y respuesta sísmica de estos sistemas de protección de estructuras frente a eventos sísmicos.

#### 1.3.2. Objetivos específicos

- Fundamentar teóricamente los principios en el análisis del comportamiento sísmico mediante el uso de disipadores de energía que se colocan sobre diagonales tipo Chevrón en una estructura de acero.

- Realizar el modelo estructural con elementos de disipación de energía que permita conocer las diferencias del comportamiento sísmico ante el uso de los disipadores Shear Link Bozzo (SLB) y Triangular plate Added Damping and Stiffness (TADAS).
- Evaluar los resultados que se obtienen mediante un modelo estructural de los Bloques 4 y 5 del nuevo Centro de Investigaciones Científicas que se procesan con un software estructural, y comparar los resultados que se obtienen luego de la utilización de dos distintos tipos de disipadores pasivos de energía en la estructura de acero: disipadores TADAS y tipo SLB.



## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 3.1. Desempeño sismorresistente en edificaciones

Los códigos sísmicos establecen los requerimientos mínimos para establecer un diseño por seguridad de vida, este objetivo se puede satisfacer al proporcionar estructuras con suficiente resistencia para soportar elásticamente la demanda sísmica. Sin embargo, este método resulta en soluciones de diseño con una inversión de alto costo, particularmente en regiones sísmicamente activas.

La filosofía de diseño de la capacidad sísmica se puede resumir en cuatro pasos básicos:

1. Un adecuado sistema estructural se selecciona y calcula para alcanzar el objetivo de diseño y mantener una respuesta inelástica estable y disipar energía a través de deformaciones inelásticas en elementos diseñados por capacidad o dispositivos de control sísmico sin poner en peligro la integridad de la estructura.
2. Los elementos dúctiles se dimensionan para proporcionar la resistencia requerida al sistema y se detallan para acomodar las deformaciones inelásticas cíclicas que se esperan durante la respuesta sísmica. Las fuerzas de diseño se obtienen de una combinación de gravedad específica, viento y efectos sísmicos. Estos elementos también se denominan elementos controlados por la deformación, ya que se detallan específicamente para sostener deformaciones elásticas importantes.
3. Todos los demás elementos que pertenecen a sistemas sometidos a fuerzas sísmicas se dimensionan para permanecer en el rango elástico y mantener la integridad estructural cuando las fuerzas que se desarrollan en el sistema, alcanzan las deformaciones máximas inelásticas en los elementos dúctiles.
4. Las deformaciones globales de la estructura se controlan para asegurar la estabilidad global del sistema, evitando la demanda de deformación excesiva sobre los elementos dúctiles y limitar el daño excesivo de la

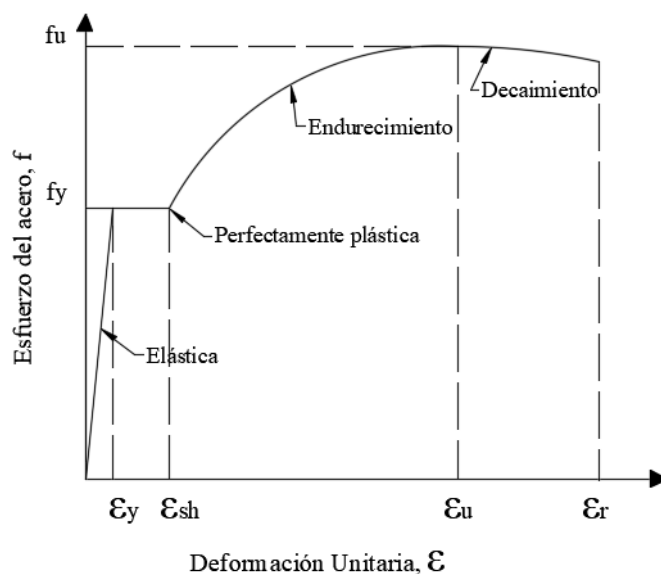
estructura. Las derivas de piso deben ser menores a las admisibles en el código vigente, la Norma Ecuatoriana de la Construcción establece que para estructuras de hormigón armado, metálicas y de madera la deriva máxima es de 0.02.

La Norma Ecuatoriana de la Construcción en el capítulo de Peligro Sísmico establece la filosofía del diseño sismorresistente que permite controlar el nivel de seguridad de vida, sometido al sismo de diseño, evento que tiene una probabilidad del 10% a ser excedido en 50 años en un periodo de retorno de 475 años. (NEC-SE-DS, 2015).

## 3.2. Propiedades del Acero

### 3.2.1. Curva Esfuerzo- Deformación

La curva esfuerzo deformación permite establecer características relevantes del Acero utilizadas en el diseño de elementos estructurales. La curva está diseñada en base al comportamiento del acero bajo cargas estáticas pero estos parámetros son útiles para cargas dinámicas. La curva se obtiene bajo ensayos del acero hasta llegar a la rotura del mismo. Un modelo muy completo que refleja el comportamiento del acero y la deformación es el presentado por Holzer en 1975 (Figura 10).



**Figura 2:** Diagrama esfuerzo-deformación del acero

Dónde:

$\varepsilon$  = deformación unitaria del acero,

$f_y$  = esfuerzo de fluencia del acero,

$f_u$  = máximo esfuerzo del acero,

$\varepsilon_{sh}$  = deformación unitaria previo a la zona de endurecimiento,

$\varepsilon_u$  = deformación unitaria en el máximo esfuerzo del acero,

$\varepsilon_r$  = deformación unitaria en la rótula del acero.

En el diagrama esfuerzo deformación existen cuatro zonas definidas, este gráfico permite definir en términos generales el acero ante una tensión uniaxial. Las regiones de la curva esfuerzo deformación son:

1. Rango elástico: En esta zona el acero se comporta elásticamente, es decir, no habrá deformaciones permanentes, el acero tiene la capacidad de volver a su estado inicial después de deformarse. En este rango existe una relación proporcional entre el esfuerzo,  $\sigma$ , y su deformación unitaria,  $\varepsilon$ , determinan el módulo de elasticidad en esta zona se determina mediante la siguiente ecuación:

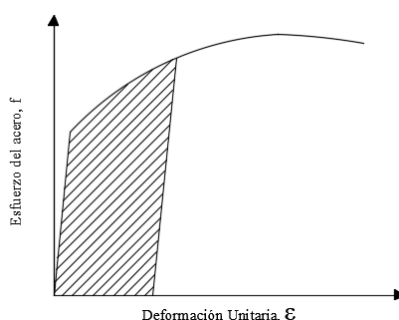
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

2. Zona de fluencia: también se denomina zona perfectamente plástica, donde la deformación unitaria aumenta, mientras que el esfuerzo permanece constante. En esta zona el elemento llega a plastificarse totalmente y el material incursiona en el rango de endurecimiento por deformación.
3. Zona de endurecimiento: el acero muestra un incremento de esfuerzo aplicado en función de un incremento gradual en la deformación. El límite de esta zona es la deformación unitaria última, que aparentemente es la resistencia máxima del acero.
4. Zona de Decaimiento: Es la zona entre la resistencia última y la rotura. En esta zona se presenta un estrangulamiento del material hasta la rotura.

El material se llega a desgastar y poseerá deformaciones permanentes cuando incursione más allá del rango elástico, el material distribuirá sus esfuerzos en una

trayectoria paralela a la pendiente del rango elástico; el área formada por esta pendiente y el eje de las deformaciones, permite determinar la energía disipada por deformaciones plásticas (Figura 3).

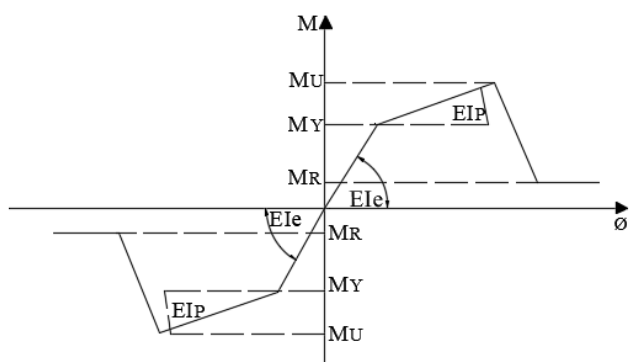
La capacidad de disipación de energía por un material es imprescindible en el diseño sismo resistente, por esta razón se requiere un material que soporte grandes deformaciones en el rango inelástico, es decir un material dúctil.



**Figura 3:** Energía disipada por unidad de volumen

### 3.2.2. Relaciones momento- rotación y momento-curvatura

El análisis no lineal de estructuras parte de los diagramas momento-rotación y momento-curvatura de vigas y columnas del sistema. Estos diagramas nos permiten conocer la ductilidad de la sección y su capacidad dentro del rango no lineal antes de entrar al colapso (Mora & Aguiar, 2015).



**Figura 4:** Relación momento curvatura

Dónde:

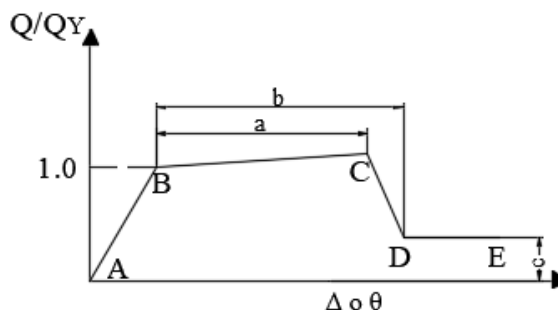
$M_y$  = momento de fluencia,

$E$  =módulo de elasticidad del material,  
 $I_e$  = momento de inercia de la sección gruesa  
 $I_p$ = es la rigidez de post fluencia.

El diagrama que relaciona el momento y la curvatura (Figura 4) presenta tres zonas de trabajo. La primera es la zona elástica donde no se presentan daños estructurales, en esta zona el momento actuante es inferior al momento de fluencia  $M < M_Y$ , La segunda zona denominada de post fluencia el momento actuante estará entre  $M_Y$  y  $M_u$ , el ASCE 41 establece parámetros para usar dentro de esta zona. Finalmente, la zona residual, en la que el momento,  $M_R$ , es constante en función del crecimiento de la curvatura.

El ASCE/SEI 41 - Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings a partir de respaldos teóricos y experimentales propone tablas para calcular estos diagramas y encontrar la rigidez a partir del módulo de elasticidad  $E$  y el momento de inercia de la sección gruesa  $I_e$ , en términos generales estos diagramas se basan en las características, comportamientos y utilización de las secciones.

El diagrama que establece el ASCE-SEI 41 para vigas y columnas se presenta en la Figura 5, los parámetros  $a$ ,  $b$  y  $c$  dependerán de la geometría del elemento estructural. En el eje horizontal se indica el giro o desplazamiento. Para la flexión la relación será de  $M/M_Y$ . El punto B tiene un valor unitario que representara el momento de fluencia  $M_Y$  que se relaciona directamente con la rotación  $\theta_Y$ .

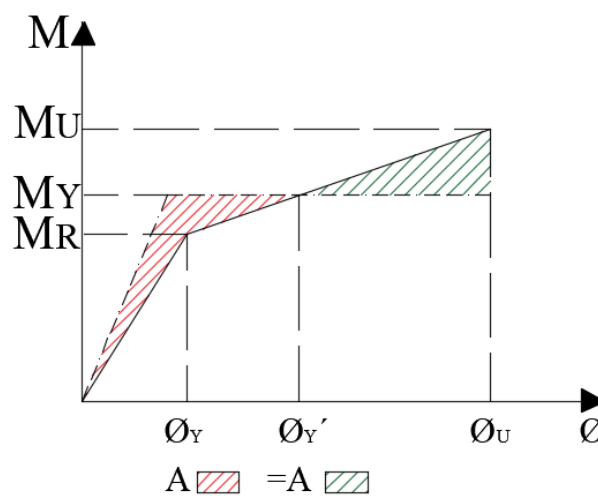


**Figura 5:** Modelo del ASCE 41

### 3.2.3. Rótula plástica

A partir de las zonas elástica, fluencia y residual del diagrama momento curvatura se definen las rótulas plásticas en los elementos. Este punto es aquel en que la sección no puede absorber mayor momento a flexión y empezará a rotar.

La obtención de la rótula plástica es a partir del criterio de áreas iguales, es decir, el diagrama momento curvatura inicial debe ser igual al modelo bilineal.

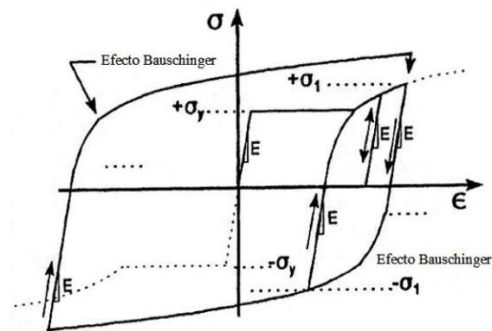


**Figura 6:** Rótula plástica en función de un modelo bilineal

### 3.2.4. Comportamiento del acero ante cargas cíclicas

El acero al ser sometido a ciclos repetitivos de cargas presentará esfuerzos más allá del rango elástico, por ello se presentará un comportamiento determinado por las características presentadas en la curva de esfuerzo -deformación bajo cargas uniaxiales, ante una alteración de esfuerzos del material el comportamiento estará dentro del rango elástico, hasta que alcance el rango inelástico nuevamente.

El efecto Bauschiger, define la pérdida de linealidad en la curva esfuerzo deformación ante cargas cíclicas, El acero llegará a perder características del esfuerzo de fluencia, con la disminución de la capacidad de esfuerzos ante deformaciones.



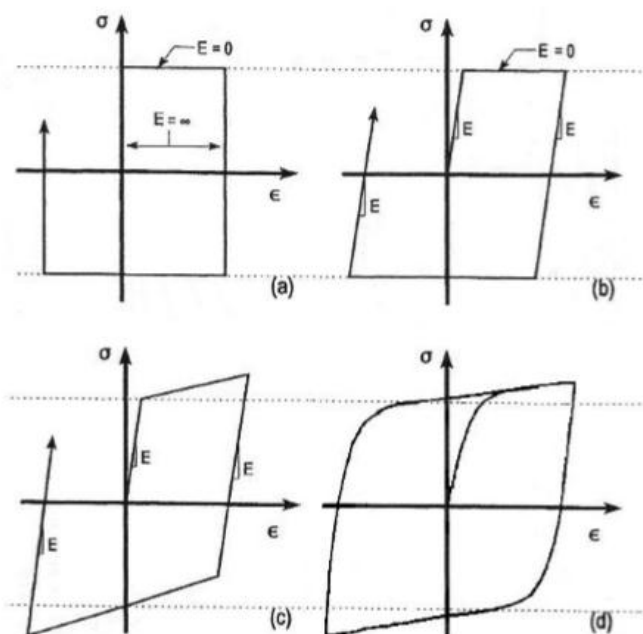
**Figura 7:** Comportamiento del acero bajo cargas cíclicas  
**Fuente:** (Bruneau, Uang, & Whittaker, 1998)

El concepto de disipación de energía, explicado anteriormente, aplica para cargas cíclicas, en este caso la energía disipada por unidad de volumen es el área de cada ciclo de histéresis.

Existen diversos modelos para definir la respuesta del material ante cargas cíclicas. Los modelos más destacados son los siguientes:

- a) Rígido Plástico Perfecto, considera una curva esfuerzo deformación como un modelo bilineal en la que la rama elástica tiene una pendiente definida por los desplazamientos mientras que la rama inelástica posee una pendiente igual a cero.
- b) Elasto Plástico Perfecto, la curva tiene una pendiente dentro del rango elástico, igual a  $E$ , mientras que la pendiente en el rango inelástico es cero.
- c) Modelo Bilineal, es la envolvente de los dos modelos anteriormente mencionados, la curva de histéresis se define por dos pendientes la del rango elástico y la del inelástico, estas pendientes en conjunto con el punto de fluencia caracterizan toda la curva.
- d) Modelo de Ozdemir, este modelo caracteriza las deformaciones unitarias en relación de esfuerzos actuantes en una única ecuación. Esta ecuación depende del módulo de elasticidad,  $E$ ,  $\sigma$  de una característica del material, el factor  $\alpha$  y la pendiente del rango inelástico y el

parámetro  $\eta$  que permite suavizar la curva. La respuesta de este modelo se requiere la integración en el tiempo (Soong & Dargush, 1997).



**Figura 8:** Modelos constitutivos del acero ante cargas cíclicas  
**Fuente:** (Sánchez A. , 2014)

### 3.3. Métodos de evaluación de la capacidad estructural

Las edificaciones por su configuración estructural poseen una determinada capacidad ante cargas sísmicas. La capacidad estructural depende directamente de la resistencia y deformación de los elementos. Existen procedimientos lineales y no lineales, que se pueden aplicar a partir de considerar un modelo dinámico o estático.

#### 3.3.1. Procedimientos lineales

Este análisis relaciona los esfuerzos y la deformación linealmente. Es aconsejable utilizarlos cuando la estructura no posee irregularidades en planta ni en elevación. Los procedimientos lineales se pueden desarrollar en forma estática o dinámica

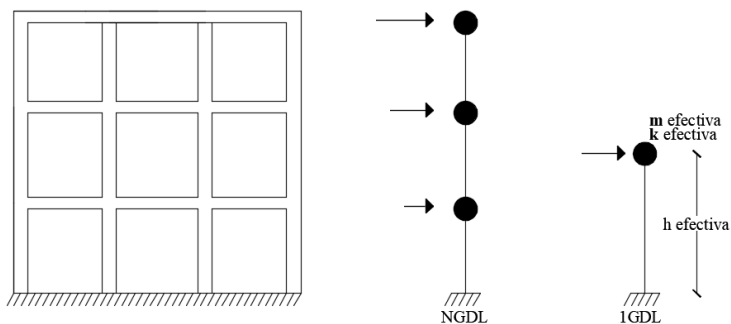


### Análisis estático lineal

Utilizado principalmente para calcular desplazamientos y derivas a partir de la distribución vertical de la fuerza sísmica. Mediante las combinaciones de carga se calculan las fuerzas en los elementos.

Mediante la aplicación de fuerzas laterales estáticas y procedimientos elásticos se logra determinar la relación demanda capacidad de los elementos, considerando la capacidad elástica y el mínimo punto de fluencia, este análisis no considera la redistribución de fuerzas tras la cedencia ni predice los mecanismos de falla.

La estructura se modela como un sistema de un grado de libertad con una rigidez elástica lineal equivalente y la aplicación de una carga lateral equivalente. La primera estimación nos permite determinar el espectro de respuesta, aceleración espectral, la masa y el cortante basal.



**Figura 9:** Modelo estructural de un grado de libertad

### Método de superposición modal

Es el método más común y efectivo para el análisis de la capacidad estructural de sistemas con comportamiento lineal. Este método luego de evaluar un conjunto de vectores ortogonales, minimiza las ecuaciones generales de movimiento a ecuaciones desacopladas de segundo orden (Guevara & Osorio, 2006). Los resultados de la aplicación de este método son los desplazamientos de los nudos, fuerzas en los elementos debido a una aceleración en la base y la respuesta estructural en función del tiempo

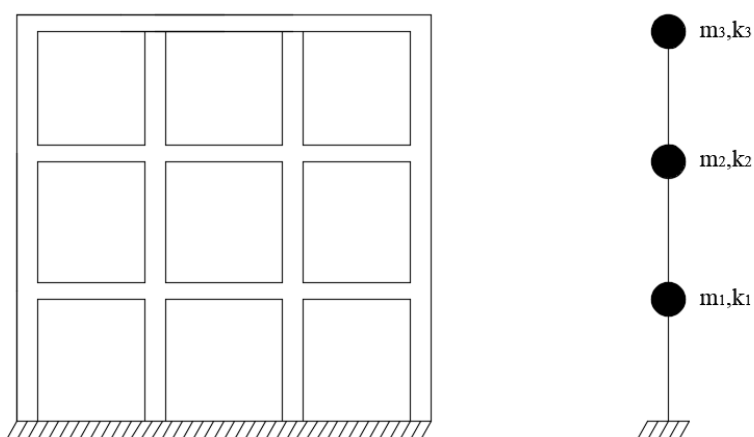
Este análisis ha sido de gran utilidad para calcular la respuesta de estructuras complejas de varios grados de libertad. La respuesta estructural se define como la respuesta máxima de un número de oscilaciones de un modelo de un grado de libertad, cada uno representando un modo específico de vibración de la estructura real.

El procedimiento del análisis modal se basa en la selección del espectro de respuesta, combina la respuesta de los modos de vibrar para asegurar que por lo menos exista el 90% de participación de la estructura en cada dirección de análisis. Este análisis proporciona valores espectrales de aceleración, velocidades, desplazamientos, números de modos de vibrar, fuerzas máximas del elemento, cortantes por piso y reacciones de base para cada modo.

### **Análisis dinámico lineal**

La estructura se modela como un sistema de varios grados de libertad con una matriz de rigidez, masa y amortiguamiento. La acción sísmica se modela con un análisis espectral modal o un análisis tiempo historia.

El análisis espectral modal relaciona la respuesta dinámica en función del espectro de respuesta elástico. Mientras que el análisis tiempo historia es una evaluación paso a paso de la respuesta de la estructura ante los acelerogramas a los que se somete.



**Figura 10:** Modelo estructural de varios grados de libertad

### 3.3.2. Procedimientos no lineales

Estos procedimientos son los más aproximados a la realidad, con este análisis se puede definir los mecanismos de falla y el potencial de un colapso progresivo. Los procedimientos se pueden desarrollar de forma estática o dinámica.

El comportamiento no lineal necesita elementos no lineales, es decir, capaces de tener una curva de esfuerzo deformación no lineal. Esto se logra mediante la inclusión de rotulas plásticas en los diferentes elementos estructurales.

#### Análisis estático no lineal

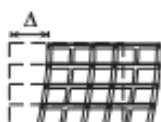
Cuando las estructuras se someten a cargas sísmicas, se originan desplazamientos laterales y deformaciones en los elementos. Para amplitud corta, las deformaciones en los elementos permanecen en el rango elástico y los daños son mínimos; mientras que para respuestas de amplitud larga las deformaciones en los elementos podrían exceder su capacidad elástica y la edificación tendría daños considerables. El análisis no lineal permite obtener una mejor respuesta de la estructura ante movimientos sísmicos.

Numerosos métodos nos permiten evaluar la capacidad de la estructura ante las demandas sísmicas, entre los principales métodos destacan:

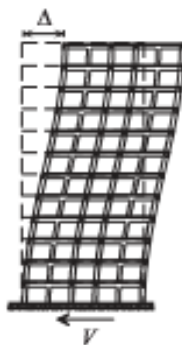
#### a) Análisis de colapso (Pushover)

Esta metodología permite obtener la capacidad de una estructura, consiste en un empuje lateral incremental hasta que alcanza su capacidad máxima. Este procedimiento permite identificar la secuencia de agrietamiento, cedencia y fallo de cada uno de los componentes, estados límites de servicio y el historial de deformaciones y cortantes en la estructura, que corresponde a la curva de capacidad. Este análisis incorpora las características no lineales de esfuerzo de deformación de los elementos.

La curva de capacidad está asociada a la disminución de la rigidez de la estructura, la cedencia de los elementos y en general al daño ante un sismo. A través de la aplicación de cargas monotónicas crecientes a la estructura y siguiendo un análisis no lineal, en el que la rigidez cambia en función de la deformación de la estructura (rótulas plásticas) se obtendrá la relación entre el cortante basal ( $V$ ) y el



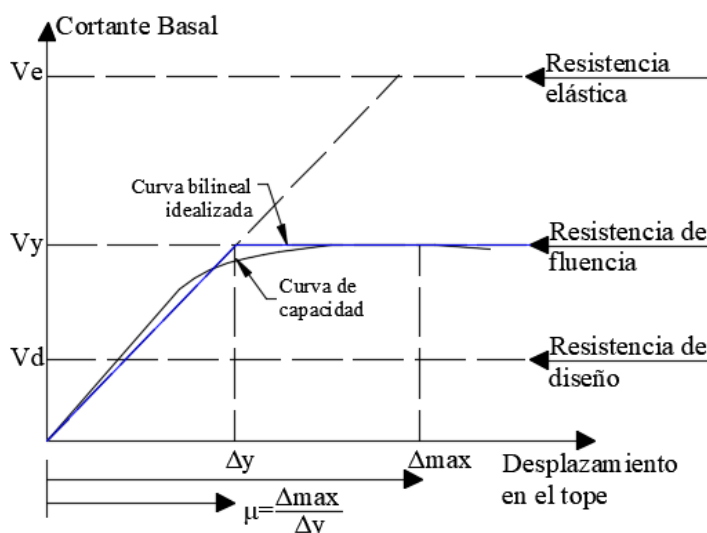
desplazamiento lateral en el tope del edificio ( $\Delta$ ) (Aguilar R. , Dinámica de Estructuras con CEINCI LAB, 2012).



**Figura 11:** Relación cortante basal y desplazamiento  
**Fuente:** (Elnashai & Di Sarno, 2008)

La curva de capacidad proporciona una curva bilineal idealizada, donde se identifica el punto de fluencia ( $V_y$ ,  $\Delta_y$ ). En el modelo idealizado, el cortante de fluencia es constante.

La Figura 12 representa la curva de capacidad estructural. La pendiente en cualquier punto de la curva es la rigidez del sistema, que disminuye en función a la deformación de la edificación. La demanda de ductilidad,  $\mu$ , que relaciona el desplazamiento lateral máximo y el desplazamiento de fluencia.



**Figura 12:** Curva de capacidad  
**b) Método del espectro capacidad-demanda**

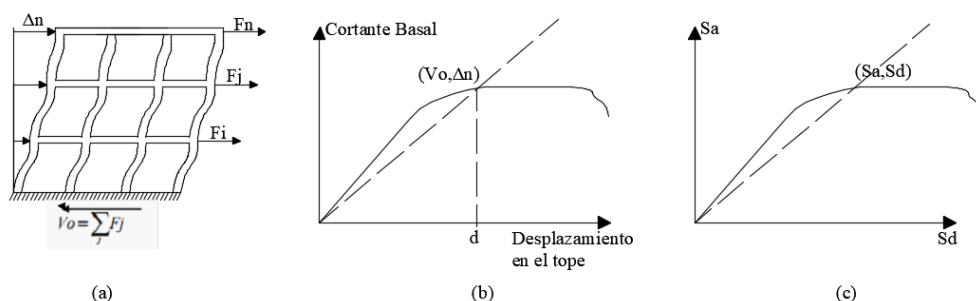
Este método permite definir gráficamente el desempeño sísmico de la estructura a través de la intersección del espectro de capacidad con el espectro de demanda. Mediante un sistema no lineal equivalente se busca representar las características no lineales de la estructura a partir del procedimiento del análisis modal (Guevara & Osorio, 2006).

El método compara el espectro de capacidad estructural con el de demanda sísmica, así se obtendrá el desplazamiento máximo, también llamado punto de desempeño. En el punto de desempeño la demanda y la capacidad son iguales de esta manera se calcula la respuesta máxima del edificio.

### Espectro de capacidad

La curva de capacidad puede ser transformada a un espectro de capacidad ADRS (Acceleration - Displacement Response Spectra) mediante sus propiedades modales. El espectro de capacidad relaciona la aceleración con el desplazamiento, representado por la aceleración espectral,  $S_a$ , en función del desplazamiento espectral,  $S_d$ . Esta conversión define que para cada punto de la curva de capacidad existe un punto en el espectro de capacidad.

El espectro de capacidad se obtiene en función del modelo estructural sometido a un estado de carga incremental (Figura 13.a), tras el análisis de Pushover en la curva de capacidad (Figura 13.b) se obtiene rigidez efectiva relacionada con el desplazamiento  $d$  ( $V_o, \Delta_n$ ). La conversión “ADRS” nos permite obtener el espectro de capacidad para un período efectivo  $T$  (Figura 13.c).



**Figura 13: Espectro de capacidad**  
**Espectro de demanda**

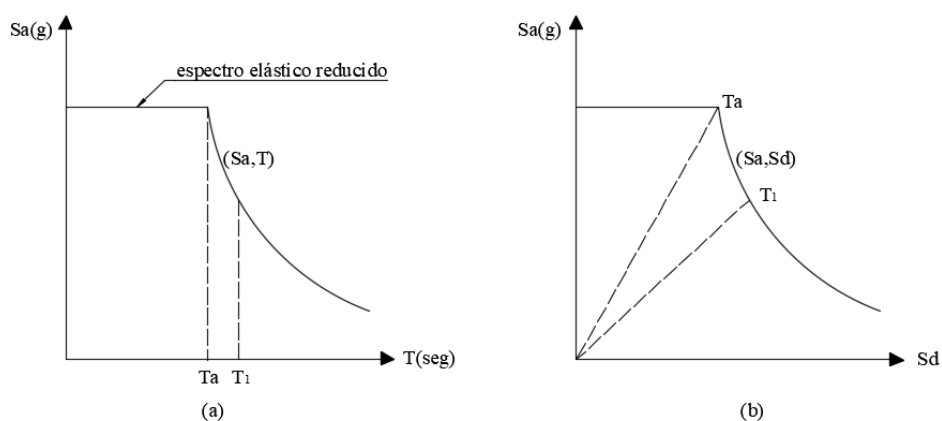
La demanda sísmica se define a partir del espectro de respuesta elástico de aceleración (Figura 14.a), normalmente definido para el 5% de amortiguamiento. El espectro de respuesta elástico debe ser transformado a un espectro de respuesta aceleración-desplazamiento (Figura 14.b). Para obtener el espectro de demanda es necesario convertir cada punto del espectro de respuesta que relaciona la aceleración espectral vs tiempo ( $S_a, T$ ) en un punto del espectro de demanda ( $S_a, S_d$ ), definido por:

$$S_{di} = \frac{T_i^2}{4\pi^2} S_{ai} * g$$

Donde  $g$  = Aceleración de la gravedad

El espectro de demanda representa gráficamente la aceleración máxima de respuesta respecto al desplazamiento máximo, para un periodo y nivel de amortiguamiento dado.

Para altos niveles de deformación se espera alta capacidad de disipar energía, cuando la estructura cuenta con dispositivos de disipación, la demanda sísmica inicial debe ser reducida en proporción al incremento del amortiguamiento efectivo.

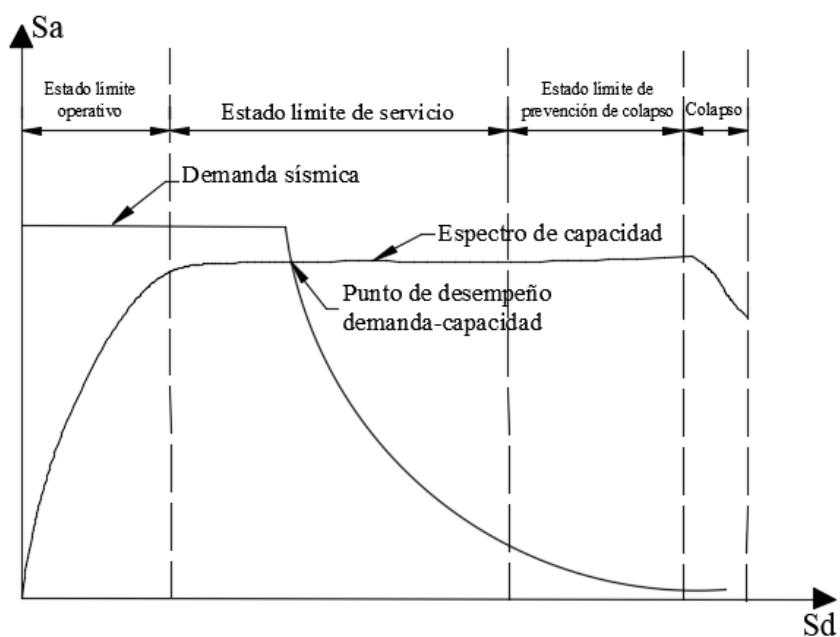


**Figura 14:** Espectro de demanda sísmica

### Estimación de la respuesta sísmica máxima

Al incluir al espectro de capacidad y el espectro de demanda sísmica se puede identificar la intersección de las curvas, definiendo de esta manera el punto de

desempeño (A,d), donde se iguala la demanda y la capacidad. Este punto define la respuesta en función al modo fundamental de vibración en términos de pseudo-aceleración y pseudo-desplazamiento espectral asociado a un desplazamiento máximo. La Figura 15 describe gráficamente el procedimiento para encontrar el punto de desempeño.



**Figura 15:** Espectro de capacidad demanda

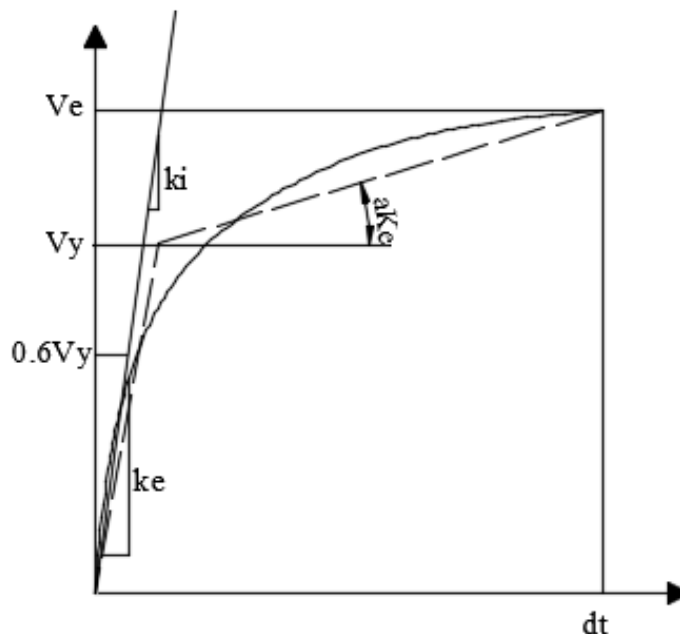
El espectro de capacidad demanda, nos permite determinar la respuesta estructural máxima del sistema y evaluar el desempeño del edificio durante un movimiento sísmico específico

### c) Método del coeficiente del desplazamiento

Este es un procedimiento numérico con el que se estima la demanda de desplazamiento para lo cual se utiliza una representación bilineal de la curva de capacidad con sus coeficientes de corrección. Este método utiliza un procedimiento numérico directo para poder determinar el punto de desempeño. A diferencia del método del espectro de capacidad, este no convierte la curva de capacidad en coordenadas espectrales. Este método se aplica en estructuras regulares, que no presentan efectos de torsión adversos.

La Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles (ASCE 7-10, 2010) establece el siguiente procedimiento para encontrar el punto de desempeño:

1. Representación bilineal de la curva de capacidad (Figura 16)



**Figura 16:** Representación bilineal de la curva de capacidad

Dónde:

$V_y$  = cortante de cedencia de la representación bilineal de la curva de capacidad

La Figura 16 constituye la curva de capacidad sísmica y el modelo bilineal. Al emplear el criterio de iguales áreas, el área interna de la curva con el área externa de la curva de capacidad, este representa uno de los criterios para encontrar el modelo bilineal.

2. Cálculo del periodo fundamental efectivo  $T_e$

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}}$$

Dónde:

$T_i$  = Periodo fundamental elástico



$K_i$ = Rigidez lateral elástica, y

$K_e$ = Rigidez lateral efectiva de la estructura en la dirección considerada.

3. Cálculo del punto de desempeño de la estructura  $D_t$ , utilizando:

$$D_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T e^2}{4\pi^2}$$

Dónde:

$S_a$ = Valor de la aceleración espectral correspondiente al periodo efectivo  $T_e$ .

$C_0$  = Relaciona el desplazamiento espectral con el desplazamiento inelástico máximo probable.

$C_1$  = Relaciona el desplazamiento inelástico máximo esperado con el desplazamiento calculado para la respuesta elástica lineal.

$C_2$  = Representa los efectos de la degradación de la rigidez, la pérdida de resistencia y la deformación de los ciclos histeréticos sobre el desplazamiento máximo.

$C_3$ = representa el incremento en el desplazamiento por efectos de segundo orden.

### **Análisis dinámico no lineal**

El análisis dinámico no lineal representa el mejor método para evaluar la capacidad estructural y el desempeño sísmico, ya que es el más cercano al comportamiento real de las estructuras: sin embargo, la aplicabilidad de este método necesita datos de características de frecuencias, ruptura, etc. La diferencia entre el análisis estático no lineal y el dinámico no lineal radica en la asignación de la carga sísmica, para el último se utilizan acelerogramas.

Se deberán definir las características no lineales de cada elemento, luego se somete a la estructura a movimientos sísmicos representados por acelerogramas.

### **3.4. Análisis historia en el tiempo**

El análisis tiempo-historia es un análisis paso a paso de la respuesta dinámica de una estructura a una carga específica definida por un acelerograma que varía con el tiempo. El análisis puede ser lineal o no lineal. Según la Norma Ecuatoriana de la

Construcción, NEC-15, para un correcto análisis se debe analizar bajo los registros de acelerogramas en las dos componentes horizontales con no menos de tres eventos sísmicos (NEC-SE-DS, 2015). Los acelerogramas deben estar escalados ya que existen muy pocos eventos suficientemente fuertes como el acelerograma utilizado. Además, es importante normarlos para tener eliminar diferencias significativas entre el análisis de la estructura ante diferentes acelerogramas. La ecuación dinámica que rige este análisis es la siguiente:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = r(t)$$

Donde  $k$  = la matriz de rigidez,  $c$  = amortiguamiento de la estructura,  $m$  es la matriz de masas diagonal y  $\ddot{x}$ ,  $\dot{x}$ ,  $x$  son la aceleración, velocidad y desplazamiento de la estructura y  $r$  es la carga aplicada.

La carga  $r(t)$  aplicada en un determinado acelerograma está en función del espacio y tiempo. Puede ser escrita como la suma infinita de vectores de carga espaciales  $p_i$  multiplicada por la función en el tiempo.

$$r(t) = \sum_i f_i(t) p_i$$

#### 3.4.1. Escalamiento de sismos

El ASCE SEI 7-10 indica que para análisis bidimensionales, a componentes del acelerograma deben tener aceleraciones verticales y horizontales seleccionadas de un registro sísmico real, se seleccionarán eventos que tengan magnitudes, distancia de falla y mecanismos de fuente que sean consistentes a los que contemplan el sismo máximo considerado. Los registros se escalan en función del espectro de pseudo-aceleración, estos registros deben estar en un rango de variación de  $0.2 T_n$  -  $1.5 T_n$ , donde  $T_n$  representa al periodo fundamental de la estructura.

1. El procedimiento sugerido por el ASCE SEI 7-10 propone calcular la repuesta espectral  $A(T)$  para un amortiguamiento del 5% y el vector  $A$  de valores espectrales para 300 periodos espaciados en forma logarítmica en un rango de periodos de  $0.2 T_n$  y  $1.5 T_n$ .

2. Se obtiene el espectro de pseudo – aceleración objetivo  $\hat{A}(T)$ , vector de valores espectrales máximos, se define como la media geométrica espectral de los registros, para tener una mínima diferencia entre el espectro objetivo  $\hat{A}(T)$  y el espectro de respuesta  $A(T)$ .
3. Se calcula el factor de escalamiento SF1. Se calcula la diferencia máxima normalizada  $\hat{A}_{escalado}$  para el espectro promedio escalado definido como el promedio de los espectros escalados  $SF1 \cdot A$ .
4. Se calcula la máxima diferencia normalizada  $\varepsilon_{ASCE}$  entre el espectro objetivo y el espectro promedio escalado en un rango de periodos de  $0.2 T_n$  y  $1.5 T_n$ .
5. Se determina el valor de escala final SF para cada movimiento sísmico, con ello se verifica que el valor promedio de la respuesta espectral no sea menor que el espectro objetivo para periodos en el rango de  $0.2 T_n$  y  $1.5 T_n$ .

#### **3.4.2. Criterios que se utilizan para la elección de los registros de diseño**

Para el análisis dinámico mediante el procedimiento no lineal de respuesta en el tiempo, es necesario elegir de una manera apropiada las excitaciones sísmicas consideradas, que deben relacionarse con la zona donde se va a implantar la estructura para poder realizar un análisis y diseño que corresponda a condiciones locales. Las características más relevantes que se deben considerar son:

##### a) Número de registros sísmicos

Los valores que se relacionan directamente con los registros son las fuerzas, velocidades y desplazamientos, al tener más de 7 registros se puede hacer un promedio de resultados. Si se realiza el análisis para los 3 pares de registros mínimos, los resultados deben determinar el registro con mayor incidencia sobre la estructura, además, se recomienda que como mínimo se deben emplear tres registros sísmicos.

##### b) Sismo génesis

La elección apropiada de los registros sísmicos en relación al origen y características de la zona debe ser acorde al del lugar de implantación de la estructura,

se debe tener muy claro el origen de los sismos, por ello es necesario que los sismos sean característicos de procesos tectónicos.

c) Cercanía de la falla

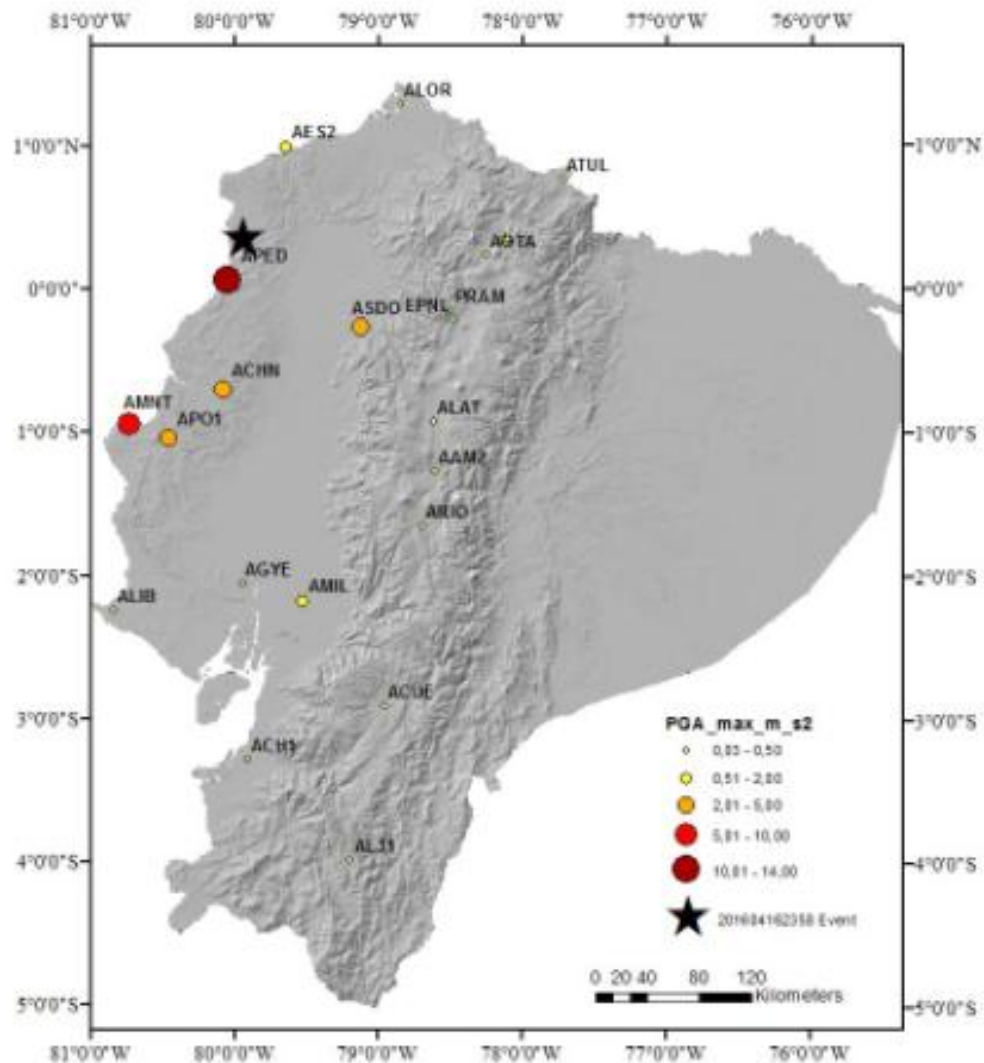
Las ondas del sismo disminuyen su intensidad en función de la distancia del epicentro, es necesario que los registros seleccionados tengan características similares en cuanto a la distancia a la falla que guarden relación entre las disminuciones de amplitud por el recorrido de ondas.

d) Características físicas del terreno

Cierto tipo de suelos amplifican fácilmente el movimiento sísmico. Las ondas sísmicas reducen su velocidad pero amplían su frecuencia; de tal manera que una tierra suelta y suave puede tener movimientos más severos que la roca dura estando a la misma distancia del terremoto.

### **3.4.3. Elección y caracterización de los registros**

En el país la Red Nacional De Sismógrafos (RENSIG) que dirige la Escuela Politécnica Nacional en el Instituto Geofísico, nos brinda la información necesaria a través de su monitoreo continuo y constante, con ello se obtienen los registros sísmicos más relevantes del país para obtener frecuencias sísmicas de banda ancha (0.1Hz-1Hz) y de periodo corto (1Hz -10 Hz). La Figura a continuación muestra la disposición de los sismógrafos en el territorio nacional.

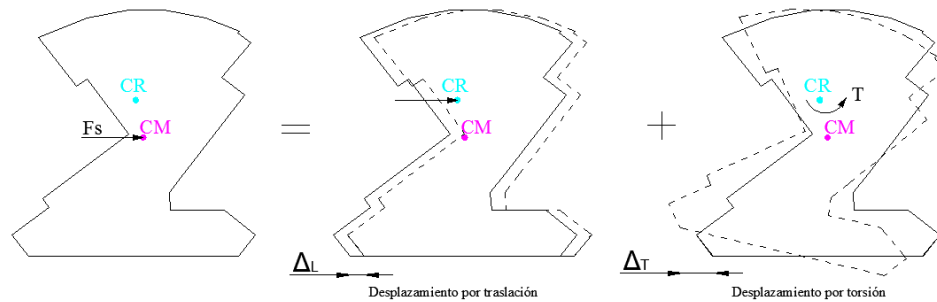


**Figura 17:** Red Nacional de estaciones sísmicas  
**Fuente:** (Instituto Geofísico - Escuela Politécnica Nacional, 2016)

La red Nacional de Acelerógrafos (RENAC) cuenta con registros en los tres componentes para el sismo del 16 de Abril del 2016 tiene registros de las tres componentes, brinda información relevante sobre este tipo de eventos. A partir de los datos del sismo de Pedernales se tiene la distribución espacial de los valores de la máxima amplitud (PGA).

### 3.5. Torsión sísmica

La torsión sísmica se presenta generalmente cuando la distribución en planta de masas, rigideces y/o resistencias de la edificación es irregular, lo que da origen a vibraciones torsionales que a su vez amplifican las vibraciones transnacionales.



**Figura 18:** Torsión sísmica

En estudios realizados en estructuras de un piso y con tres grados de libertad y tres casos diferentes de excentricidad estática, se pudo verificar que a medida que se incrementa la excentricidad estática también lo hacen los efectos de torsión dentro de la estructura. Además, se establecieron tres casos, el primero compuesto por una simetría total donde el centro de masa coincide con el centro de rigidez, el segundo caso considera que una de las dos coordenadas del centro de masa coincide con el centro de rigidez, mientras que en el tercer caso, denominado asimetría total ninguna coordenada del centro de masa coincide con el centro de rigidez.

En el comportamiento lineal de las estructuras, se genera torsión sísmica cuando existe excentricidad generada por la distancia entre el centro de masa, CM, y centro de rigidez, CR.

El centro de masa es el centro de gravedad de las cargas en dirección de la gravedad, se considera que este punto actúan las fuerzas sísmicas, el centro de cortantes, CC, es el lugar donde actúa el cortante total de entrepiso. El centro de torsión, CT y el centro de rigidez, CR, es aquel lugar donde actúa la resultante de las rigideces de piso y entrepiso, lo ideal sería que la línea de acción de la fuerza sísmica coincidiera para que no se genere la rotación en planta. Las ecuaciones que determinan el centro de rigidez de una estructura son las siguientes: CON QUE, COMO

$$X_{CR} = \frac{\sum K_i * x_i}{\sum K_i}$$

$$Y_{CR} = \frac{\sum K_i * y_i}{\sum K_i}$$

Donde,  $K_i$  = la rigidez del pórtico de análisis y  $x_i, y_i$ , son las distancias de los pórticos desde un punto de referencia.

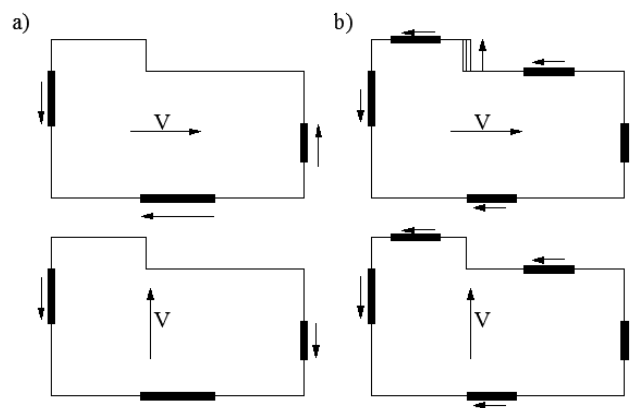
Las estructuras independientemente de su geometría, puede llegar a tener un momento de torsión adicional generado por el desplazamiento de la fuerza cortante actuante en cada entrepiso (Escobar, Mendoza, & Gómez, 2004). Este desplazamiento se denomina excentricidad accidental, expresado normalmente como un porcentaje.

### 3.6. Redundancia estructural

Las enseñanzas tras sismos pasados indican que la ductilidad y redundancia estructural uno de los medios más importantes para proporcionar seguridad contra el colapso y daños excesivos, pues mientras más severo es el sismo hace que la estructura empiece a trabajar en el rango no lineal; la filosofía de diseño sostiene que los elementos podrían sufrir daño tras un sismo fuerte, pero la estructura debe ser capaz de admitir el daño sin colapso. La redundancia genera un adecuado comportamiento estructural ya que se genera una redistribución de esfuerzos plásticos, de tal manera que los elementos se podrán desarrollar en toda su capacidad. De esta forma el mecanismo de falla podrá ser estable. Tena y Cortés (2014) sostienen que la redundancia se refiere a la existencia de una gran cantidad de líneas de defensa continuas y resistentes a la carga, que causa un alto grado de hiperestaticidad, y tiene impacto tanto en la capacidad de deformación como en la reducción de cargas.

La redundancia se debería tomar en cuenta desde el punto de vista de diseño sísmico como una de las características más importante. En edificaciones con pocos elementos estructurales ante la ausencia o falla de un elemento puede causar el colapso de la estructura, un ejemplo característico de estructuras poco redundantes serían los puentes con un eje de columnas único. Es importante distribuir las cargas sísmicas dentro del mayor número de elementos posibles, así la estructura trabajara en su máxima resistencia y se podrá aprovechar la máxima disipación de energía por histéresis. (Godinez & Tena, 2014)

La redundancia estructural es de vital importancia para un adecuado comportamiento estructural, a pesar de ello son pocas las normativas existente que introduzcan el concepto de este factor, cuando una estructura es redundante las reducciones podrían ser mayores ya que mejoran su comportamiento, por otro lado se debería castigar a sistemas menos redundantes ya que se desarrollarla menor ductilidad o resistencia adicional a la esperada. El código ASCE 7-10 establece que se puede asignar un factor de corrección por redundancia estructural en las dos direcciones ortogonales. Además se incluye un factor a utilizar de manera simple,  $\rho$ , a ser usado en los espectros de diseño inelástico y en los desplazamientos de diseño, el factor está en función del número de elementos estructurales y numero de vanos con las que cuenta la edificación en dirección paralela a la línea de análisis.



**Figura 19:** Configuración en planta de: a) Sistema no redundante; b) Estructura redundante

El factor de reducción de resistencia sísmica depende de la estructuración, de errores constructivos, calidad de los materiales. Aguiar (2007) establece varias formulaciones teóricas y experimentales, a partir de la ecuación mostrada a continuación. Bertero et al (1991), Miranda (1997), Whittaker et al (1999).

$$R = R_{\mu}R_{\Omega}R_{\xi}R_R$$

Donde  $R_{\mu}$  depende directamente de la disipación de energía estructural a partir de un sistema de un grado de libertad,  $R_{\Omega}$  representa el factor de sobresistencia que limita la capacidad última de la estructura en función de la capacidad de diseño, el factor  $R_{\xi}$  muestra la manera de disipación de energía en función de daño de la



estructura y finalmente el factor  $R_R$  es el factor de redundancia que indica la eficiencia de los elementos estructurales para distribuir la carga en el rango no lineal. Para la estructura analizada en este estudio se utiliza un factor de reducción  $R$  igual a 8 tomado de la NEC 15 capítulo de peligro sísmico para pórticos especiales sismorresistentes, de acero laminado en caliente o con elementos armados de placas.

### **3.7. Sistemas de protección sísmica**

Las configuraciones estructurales que se presentan en los últimos años y la creciente demanda de estructuras sismorresistentes han generado una necesidad de realizar diseños con una combinación de resistencia, rigidez y capacidad de disipación de energía en el rango inelástico, tomando como condición su ductilidad. (Boza & Galán, 2013). Para obtener este criterio, se necesita una combinación entre materiales resistentes, rigidez y amortiguamiento.

Los sistemas de disipación sísmica y aislamiento sísmico de base actualmente son los medios más viables para alcanzar altos niveles de rendimiento a costos razonables. Este enfoque de diseño va más allá de la filosofía de diseño tradicional que se fundamenta en que la edificación tolera daños mientras mantenga los niveles de seguridad de vida, en lugar de reducir daños en elementos estructurales y no estructurales incluso bajo movimientos terrenales severos.

Diferentes sistemas de protección sísmica se usan actualmente, existe una variada gama de elementos en el mercado que pueden ser clasificados en tres grupos significativos:

Sistemas de protección activos están diseñados para monitorear la estructura dentro de un tiempo determinado, procesa la información y rápidamente aplica un conjunto de fuerzas internas para modificar su estado de ser necesario. Este tipo de sistemas de amortiguamiento necesitan una fuente externa de poder para operar adecuadamente que puede ser una debilidad ante un evento sísmico ya que el sistema eléctrico podría colapsar también, este tipo de sistema está representado por arriostres activos, tendones activos y oscilares activos.

Los sistemas semi-activos similares a los sistemas activos excepto que utiliza un pequeño porcentaje de energía externa y no requiere sistema de monitoreo, este tipo de sistema puede ser lento e inestable ejemplos de este tipo de sistemas son los disipadores de orificio variable, dispositivos de fricción variable y disipadores fluido controlables.

Sistemas de protección pasivos por otro lado, operan sin ninguna fuente externa, estos sistemas han demostrado ser efectivos y económicos. Estos sistemas de protección dentro de los que se encuentran los aisladores sísmicos, disipadores de energía y osciladores resonantes.

Las estructuras poseen amortiguamiento inherente que reducen la amplitud de sus vibraciones dinámicas. En vibración libre, este amortiguamiento reduce la amplitud de la vibración en el tiempo hasta que el sistema represe a su posición original. (Filiatrault, Tremblay, Christopoulos, Folz, & Pettinga, 2013) Existen varios sistemas de amortiguamiento para las estructuras:

- Amortiguamiento viscoso, la fuerza de amortiguamiento es proporcional a la velocidad
- Amortiguamiento friccional, sistemas en que el amortiguamiento es constante
- Amortiguamiento interno del material, aquel en que la fuerza es proporcional a la amplitud de las deformaciones del material o desplazamientos estructurales.

Las fuentes de amortiguamiento usualmente se modelan como amortiguamiento viscoso por facilidad matemática. En este caso la fuerza de amortiguamiento  $F_D$  se obtiene como el producto entre el coeficiente de amortiguamiento  $c$  y la velocidad relativa del sistema  $\dot{x}(t)$ .

$$F_D = c\dot{x}(t).$$

La ecuación de movimiento para un sistema lineal de un grado de libertad por planta, es:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = 0$$

Que puede ser escrita también como:

$$\ddot{x}(t) + 2\zeta\omega\dot{x}(t) + \omega^2x(t) = 0$$

Donde  $\zeta$  es el coeficiente de amortiguamiento viscoso definido como:

$$\zeta = \frac{c}{c_{cr}} \geq 0$$

$c_{cr} = 2\omega m$  Definido como el coeficiente crítico de amortiguamiento del sistema.

En base a lo establecido anteriormente se puede definir la ecuación general del movimiento caso no lineal para estructuras de un grado de libertad sometido en la base a una fuerza horizontal del movimiento del suelo debido a cargas sísmicas está dado por la ecuación:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + Fr(t) = -m\ddot{x}_g$$

Donde,  $m$  representa la masa del sistema,  $c$  el coeficiente de amortiguamiento del sistema,  $\dot{x}$ ,  $\ddot{x}$  velocidad relativa y aceleración respecto al suelo,  $\ddot{x}_g$  la aceleración del suelo dada por un acelerograma y  $Fr(t)$  la fuerza no lineal.

Basado en la ecuación de movimiento a continuación se muestra la ecuación de balance de energía:

$$E_k^r(t) + E_{vd}(t) + E_a(t) = E_{in}^r(t)$$

Donde,

$E_k^r(t)$  es la energía cinética del sistema en el tiempo  $t$  es:

$$E_k^r(t) = \frac{1}{2}m(\dot{x})^2$$

$E_{vd}(t)$  es la energía disipada por amortiguamiento viscoso desde el inicio del sismo hasta el tiempo  $t$ :

$$E_{vd}(t) = \int c \dot{x} dx$$

$E_a(t)$  es la energía absorbida desde el inicio del sismo hasta el tiempo t:

$$E_a(t) = \int Fr(t) dx$$

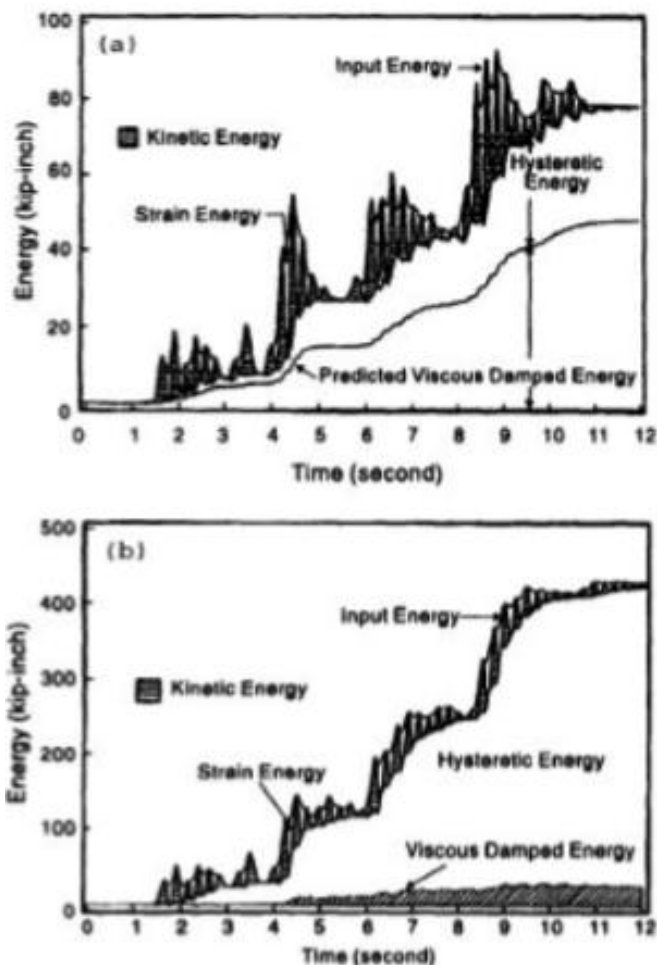
$E_{in}^r(t)$  es la energía de entrada relativa desde el comienzo del registro hasta el tiempo t:

$$E_{in}^r(t) = - \int m \ddot{x}_g dx$$

El término de energía absorbida,  $E_a(t)$ , representa la cantidad de energía total que la estructura ha absorbido tras el esfuerzo elástico y de las deformaciones inelásticas irrecuperables en el tiempo. La máxima energía absorbida durante un sismo representa la mayor demanda de miembros estructurales y se expresa como la suma de dos componentes:

$$E_a(t) = E_{es}(t) + E_h(t)$$

Donde  $E_{es}(t)$  es la energía de deformación plástica recuperable en un tiempo t y  $E_h(t)$  representa la energía disipada a través del amortiguamiento histerético hasta el tiempo t que depende de las propiedades histeréticas de la estructura.



**Figura 20:** Respuesta energética del sistema de: a) Sismo leve, ante un estado de control de daño; b) Sismo severo, estado límite del colapso

**Fuente:** (Uang & Bertero, 1986)

### 3.8. Sistemas pasivos de protección sísmica

Los sistemas de protección sísmica pasivos responden de forma inercial a la acción sísmica, resultan competitivos por su economía y son independientes de la estructura, concentran las demandas de ductilidad con propiedades mecánicas definidas. Estos sistemas se activaran durante movimientos significativos donde la intención principal es que absorban la energía del sismo.

Los aisladores sísmicos tienen el principio de aislar la estructura de los movimientos sísmicos así logran disminuir la energía que podría entrar a la estructura,

es decir, no utilizan fuentes externas para su adecuado funcionamiento, además, incrementan desplazamientos en la base pero reducen deformaciones de entrepiso. Los disipadores de energía a diferencia de los aisladores sísmicos no alteran la energía de entrada, más bien, su utilidad se muestra en la disipación de energía de amortiguamiento así evita que los elementos estructurales sufran daño.

Los sistemas de disipación de energía, ya sean los activados por desplazamiento o velocidad, influyen en la ecuación de energía durante la duración del sismo, por ende la ecuación de energía mostrada anteriormente se añade el factor de amortiguamiento pasivo:

$$E_k^r(t) + E_{vd}(t) + E_a(t) + E_{sd}(t) = E_{in}^r(t)$$

Donde el término  $E_{sd}(t)$  representa la energía disipada por el sistema adicional de amortiguamiento desde el inicio del registro sísmica hasta el tiempo  $t$ .

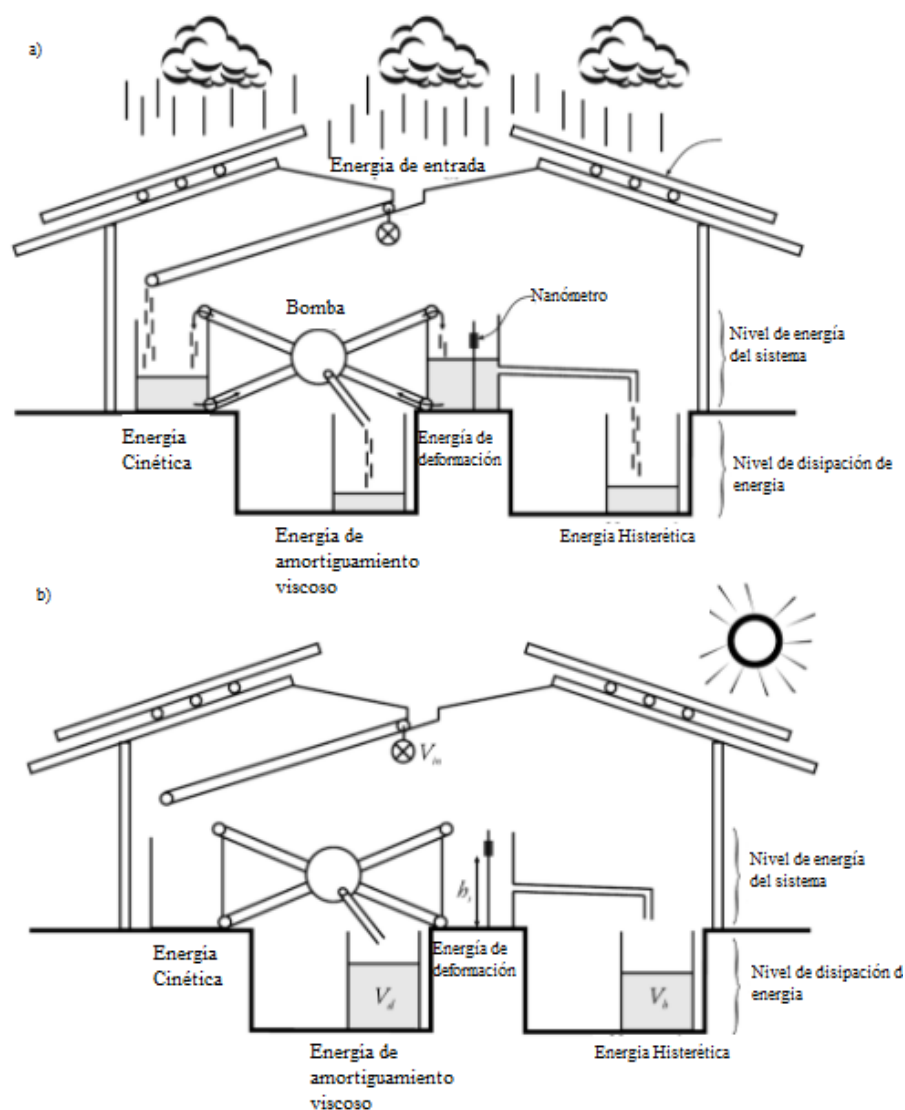
Las principales características de los disipadores para mejorar su eficiencia son su alta capacidad de disipación de energía, facilidad de ser reemplazados si han sufrido daño a través de un sismo fuerte, sencillez, economía, robustez, bajo o nulo mantenimiento, fiabilidad y durabilidad.

### 3.8.1. Analogía de flujo de agua

En el libro “Elements of Earthquake Engineering and Structural Dynamics” existe una analogía denominada el flujo de agua (Figura 21). Esta figura presenta un galpón con techo bajo lluvia (Figura 21.a). La lluvia representa el evento sísmico, mientras que la cantidad de agua que ingresa en el sistema representa la energía sísmica dentro de la estructura. La cantidad de agua que ingresa en la estructura depende de cuan desplegado este el techo, que simboliza la dependencia de la energía de entrada con las propiedades estructurales y enfatiza que la energía de entrada no es la misma para cada estructura bajo el mismo movimiento de suelo. Dependerá de cuan abierto este el techo para medir la cantidad de energía de entrada.

Si el techo está completamente cerrado el sistema no recibirá energía de entrada. El agua que entra en el sistema, simboliza la energía de entrada recolectada bajo el techo de la estructura y se reúne en el pila de la energía cinética. La cantidad

de agua recolectada en este pila representa la energía cinética generada por las propiedades estructurales. La tubería que recoge el agua del techo está compuesta por una válvula para determinar la cantidad de energía sísmica de entrada transmitida a la estructura.



**Figura 21:** Analogía de flujo de agua de un sistema estructural convencional: a) durante el evento sísmico; b) final del evento sísmico

**Fuente:** (Filiatrault, Tremblay, Christopoulos, Folz, & Pettinga, 2013)

El agua que se desliza por el techo representa la cantidad de energía sísmica que no se transmite a la estructura, no toda la energía sísmica que se produce en un sitio es absorbida por la estructura.

Cuando los elementos estructurales empiezan a vibrar, estos se deforman y absorben energía de deformación. La energía cinética se transformara a energía de deformación cuando se alcance un límite máximo de deformación. Esto se muestra en la Figura 21.a por una bomba de doble vía que conecta el fondo de la energía cinética con el tope de la energía de deformación. El flujo de esta bomba se asocia con el periodo de vibración. Esta bomba continua activa mientras exista energía cinética y energía de deformación. La energía de amortiguamiento viscoso se ve representada por la pérdida del flujo de la bomba de dos direcciones. La pérdida de este flujo es proporcional al flujo transmitido por esta bomba. Esta pérdida se recolecta permanentemente por el pila de energía de deformación que representa la cantidad de energía absorbida por el equivalente del amortiguamiento viscoso.

El sistema está compuesto por la energía cinética, de deformación y amortiguamiento esto representa un sistema lineal elástico de amortiguamiento viscoso.

Cuando el nivel de agua de la energía de deformación alcanza un nivel crítico, una cantidad de agua es desviada al pila de la energía histerética. El nivel crítico de agua de la energía de deformación representa la cantidad de energía de deformación de la estructura antes de la deformación en el rango inelástico. El nanómetro indica la cantidad máxima de energía que pueden absorber los elementos estructurales durante el sismo. El daño de la estructura se ve relacionado por la cantidad de agua acumulada en la energía histerética y la lectura final del nanómetro.

La estructura al final del evento sísmico se muestra en la Figura 21.b. La pila energía cinética y la de deformación están vacías mientras la estructura vuelve a su posición inicial. Si la estructura se mantuvo en el rango elástico en el evento sísmico, toda la energía de entrada se acumula en la pila de amortiguamiento viscoso. Si los elementos estructurales se someten a deformaciones inelásticas durante el sismo, un porcentaje de energía de entrada termina en la pila de energía histerética. Entonces la el volumen captado por la pila de amortiguamiento viscoso,  $V_d$ , y la de energía histerética,  $V_h$ , debe ser igual al volumen de agua recolectado por la válvula,  $V_m$ .



### **3.8.2. Tipos de disipadores de energía pasivos**

Los disipadores de energía pueden ser elementos histeréticos y visco elásticos. Los disipadores histeréticos dependen esencialmente de los desplazamientos de la estructura, entre ellos están los disipadores metálicos y disipadores friccionantes. Mientras que los dispositivos viscoelásticos pueden ser sólidos viscoelásticos, fluidos viscoelásticos y disipadores fluido-viscosos.

Los disipadores metálicos se basan en la plastificación de metales que son consecuencia de los esfuerzos producidos por los esfuerzos estructurales, los esfuerzos de torsión, flexión, cortante o axial puede conducir a la plastificaciones de los metales. Para reducir la respuesta estructural la mejor opción es disipar energía en base a rangos bajos de fuerza y desplazamiento, debido a que la elaboración de los dispositivos se utilizan aceros de bajo límite elástico y con gran capacidad de alargamiento en relación a los aceros de construcción convencionales.

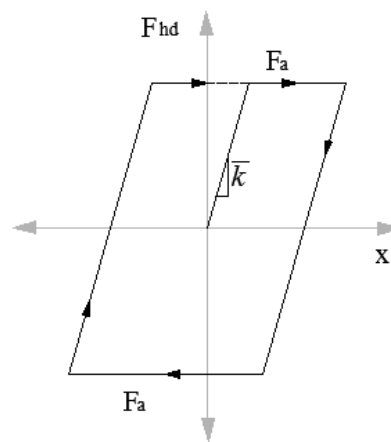
En la actualidad los dispositivos mecánicos más utilizados son los conocidos como ADAS (Added Damping and Stiffness) y TADAS (Triangular Added Damping and Stiffness), que basan su funcionamiento en la plastificación de metales en base a esfuerzos estructurales. Además de estos sistemas pasivos metálicos están los SLB (Shear Link Bozzo) relativamente nuevos en el mercado que concentran las demandas de ductilidad en conexiones fabricadas industrialmente. (Bozzo, Gaxiola, & Gonzales, 2016)

### **3.9. Propiedades de los disipadores histeréticos de fluencia**

Los disipadores metálicos usualmente colocados sobre contravientos de acero tipo Chevrón, también llamados disipadores de energía por fluencia del material, dependen básicamente de los desplazamientos de la estructura, en base a los esfuerzos de flexión, corte o torsión (Boza & Galán, 2013), al ser elementos de acero son fáciles de construir, con un costo relativamente bajo ofrecen una alta ductilidad. Estos elementos disipan energía mediante el desplazamiento relativo entre dos superficies de contacto.

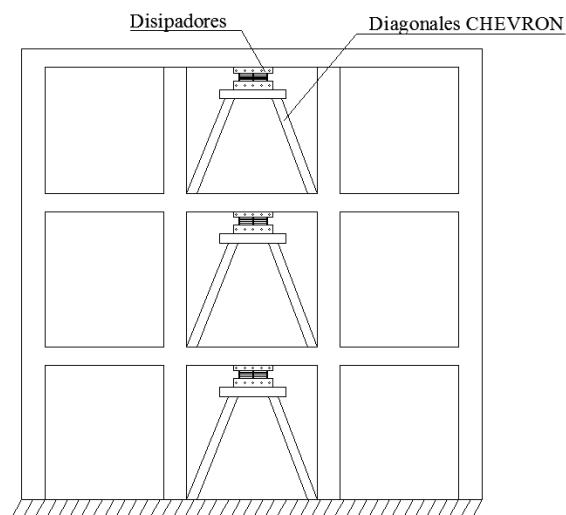
Los disipadores metálicos toman la forma del comportamiento histerético de los metales cuando estos llegan a deformarse en el rango inelástico al disipar energía,

este comportamiento relaciona la carga contra el desplazamiento. En la Figura 22 se muestra la carga  $F_a$  es aquella que activa el disipador, que corresponde a la fuerza elástica del disipador.



**Figura 22:** Relación carga desplazamiento para disipadores metálicos

Las diagonales del contraviento denominadas también tipo Chevrón son las encargadas de tener la rigidez suficiente para que trabajen en el rango elástico en un sismo significativo y para que el desplazamiento en la parte inferior del disipador sea similar al desplazamiento del entrepiso inferior.



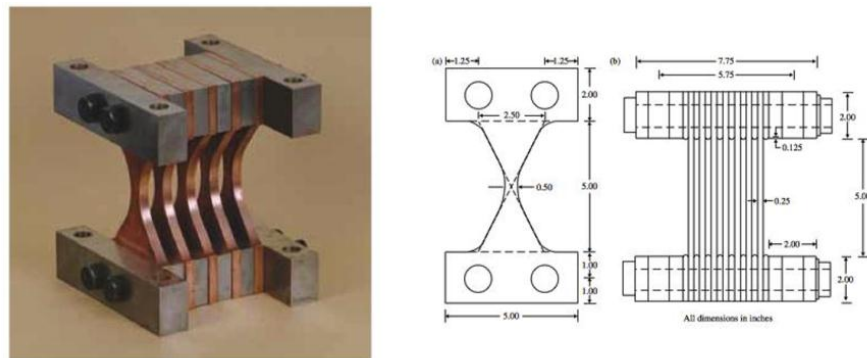
**Figura 23:** Disipadores sobre contravientos Chevrón

Existe una hipótesis conservadora que considera un modelo elasto-completamente plástico, en el comportamiento del acero, que indica que cuando se

supera el desplazamiento de fluencia no hay incremento en su resistencia; además se debe considerar que la placa e los disipadores se plastifican.

### 3.9.1. Disipadores tipo ADAS

Los dispositivos tipo Added Damping and Stiffnes, ADAS, conformados por placas colocadas paralelamente, la forma de estos dispositivos permiten una plastificación uniforme. Estos dispositivos deben estar empotrados en sus dos extremos así se optimizaran las propiedades de disipación de energía; la histéresis producida será estable en varios ciclos del rango inelástico (Sánchez A. , 2014).



**Figura 24:** Disipador ADAS

**Fuente:** (Aiken, Nims, Whittaker, & Kelly, 1993)

#### Parámetros elásticos del disipador ADAS

Las fórmulas que de los parámetros elásticos del disipador ADAS se demuestran en el libro “Análisis sísmico de estructuras con disipadores de energía ADAS o TADAS” de Aguiar, Rodríguez & Mora, 2016. Las ecuaciones se muestran a continuación, donde  $b$  es el ancho de la placa,  $h$  la altura,  $t$  el espesor,  $F_y$  el esfuerzo de fluencia del acero y  $E$  el módulo de elasticidad.

El momento de fluencia de estos dispositivos está dado por la ecuación:

$$F_y = \frac{n f_y b t^2}{3 h}$$

El desplazamiento de fluencia:

$$\Delta y = \frac{f_y h^2}{2E t}$$

La rigidez elástica del disipador TADAS:

$$K_{DEE} = \frac{Fy}{\Delta y}$$

La fuerza de corte:

$$Fu = n \frac{fy b t^2}{2h}$$

La rigidez post fluencia:

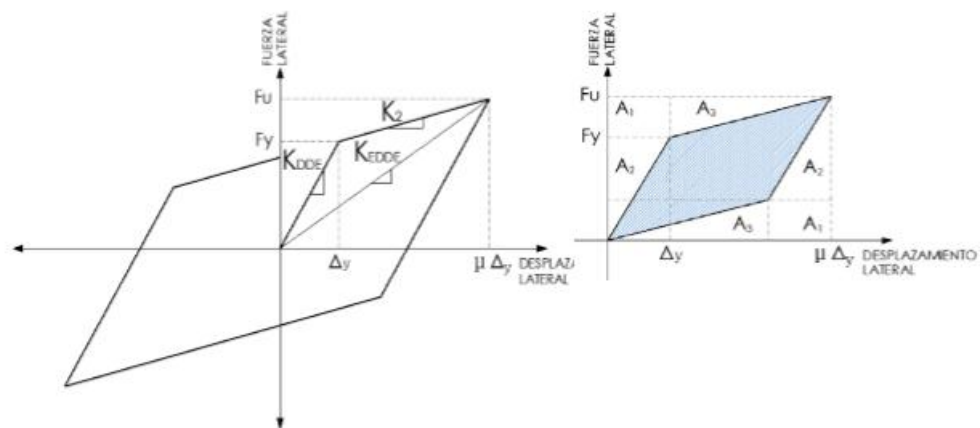
$$kp = \frac{Fu - Fy}{\Delta u - \Delta y}$$

La rigidez efectiva

$$kef = \frac{Fu}{\Delta u}$$

### Diagrama de histéresis del disipador ADAS

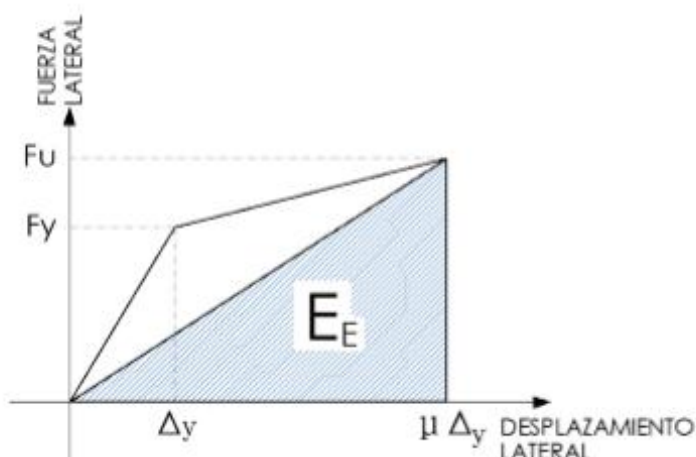
El modelo de comportamiento bilineal de los disipadores permite calcular el factor de amortiguamiento equivalente  $\xi_{eq}$  que se obtiene tras la evaluación de la energía disipada en un ciclo de histéresis y la energía elástica (Aguiar, Rodríguez, & Mora, 2016).



**Figura 25:** Diagrama de histéresis de disipador ADAS  
**Fuente:** (Aguiar, Rodríguez, & Mora, 2016)

La energía disipada de un disipador es el área sombreada del ciclo de histéresis, como se muestra en la Figura 25 derecha, está dada por la ecuación:

$$E_D = 4\Delta y (\mu F_y - F_u)$$



**Figura 26:** Energía elástica de un ciclo de histéresis

**Fuente:** (Aguilar, Rodríguez, & Mora, 2016)

Del análisis de la Figura 26, el área de la Figura sombreada representa la energía elástica de un disipador dentro de un ciclo de histéresis. La ecuación de la energía elástica es:

$$E_E = \frac{1}{2} K_{DEE} (\mu \Delta y)^2$$

El factor de amortiguamiento de este tipo de disipadores se define por la siguiente ecuación:

$$\xi_{eq} = \frac{E_D}{4\pi E_E}$$

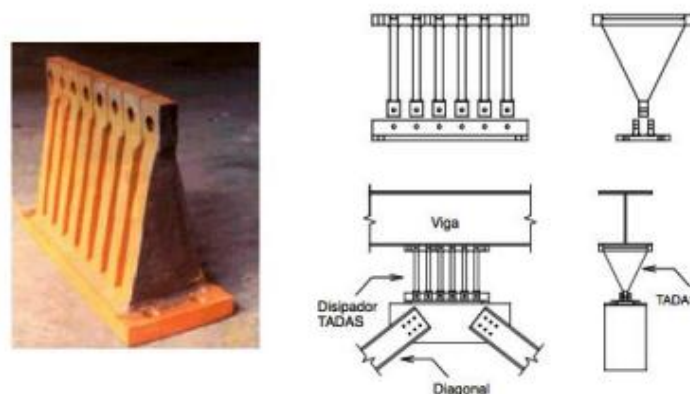
El amortiguamiento equivalente del disipador en función del periodo de vibración de la estructura es:

$$C_d = \frac{2\Delta y (K_{DEE} - K_2) (\mu \Delta y - \Delta y) T}{\pi^2 (\mu \Delta y)^2}$$

### 3.9.2. Disipadores tipo TADAS

Los disipadores Triangular Plate Added Damping and Stiffnes (TADAS) se desarrollaron por Tsai et al. (1993). Se basa en colocar placas sobre una placa de acero rectangular, así trabajarán de una manera compacta. Estos disipadores pueden tener  $n$  placas que trabajan a flexión.

Los dispositivos tipo, TADAS, conformados por placas de forma triangular colocadas paralelamente, se basa en el principio de disipación de energía de los disipadores ADAS con la diferencia que no se encuentran empotrados en ambos extremos. En el caso analizado el disipador en su ancho mayor se encuentra empotrado con la viga y articulado con el arriostramiento de tipo Chevrón, lo que da origen a deformaciones en curvatura simple. La forma de este tipo de disipadores se justifica dentro de parámetros de optimización y plastificación uniforme en toda su longitud. (Tsai, Chen, Hong, & Su, 1993)



**Figura 27:** Disipador TADAS

**Fuente:** (Corporación de Desarrollo Tecnológico - Cámara Chilena de la Construcción, 2011)

#### Parámetros elásticos del disipador TADAS

Los dispositivos TADAS al tener el comportamiento histerético similar a los dispositivos ADAS, se utilizan ecuaciones diferentes únicamente para el momento y el desplazamiento de fluencia.

El momento de fluencia de estos dispositivos está dado por la ecuación:

$$F_y = \frac{n f_y b t^2}{6 h}$$

El desplazamiento de fluencia:

$$\Delta y = \frac{f_y h^2}{E t}$$

### 3.9.3. Disipadores tipo Shear Link Bozzo

Los dispositivos Shear Link Bozzo, fueron desarrollados por Cahis y Bozzo (1998), este dispositivo a diferencia de los anteriores basa su principio de disipación en el cortante, lo que produce una respuesta histerética estable. Tienen una configuración geométrica similar a un perfil tipo I con rigidizadores horizontales.

Según Bozzo y Barbat (2004) este tipo de disipadores presenta un doble mecanismo de falla. Según Bozzo y Barbat (2004) en un principio se presenta un mecanismo de disipación por cortante caracterizado por una deformación lineal y una distribución uniforme de fluencia en todo el elemento, luego el mecanismo degradará su resistencia y empezará a funcionar el mecanismo de disipación por flexión y su deformación deja de ser lineal a lo largo del elemento, a partir de esto el dispositivo presenta curvas histeréticas con una mejor rigidez y lazos más alargados.

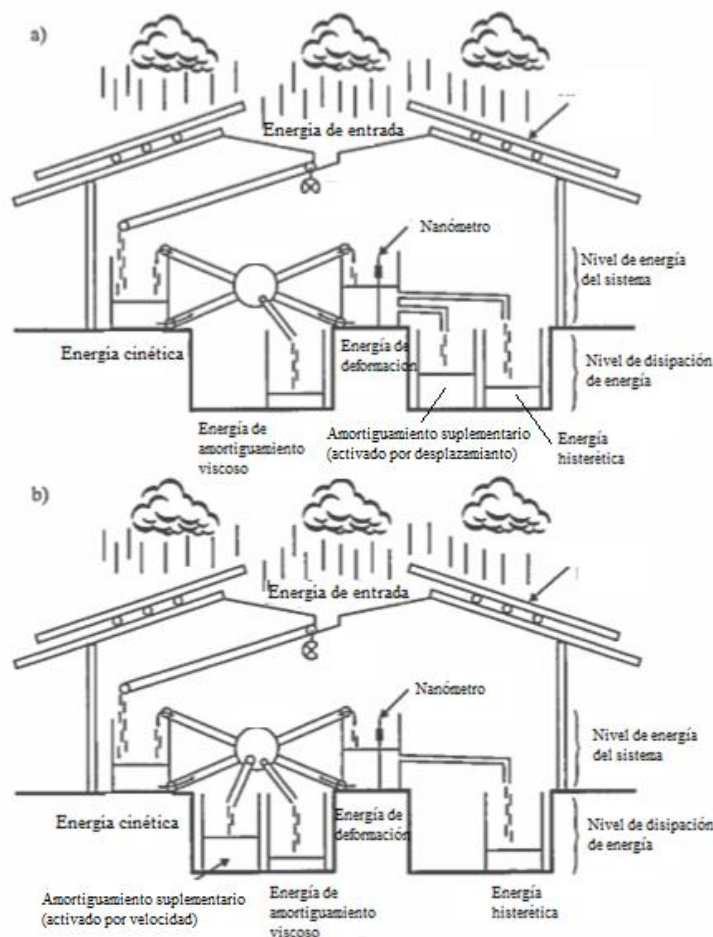


**Figura 28:** Fotografía ensayo disipador SLB  
Fuente: (Bozzo, 2016)

### 3.9.4. Influencia de disipadores de energía pasivos en el balance de energía

El uso de disipadores de energía pasivos ya sean los activados por desplazamiento, velocidad o movimiento en un sistema estructural modifica el balance de energía durante un evento sísmico. Para explicar cómo este tipo de dispositivos benefician a la estructura se utilizara nuevamente la analogía de flujo de agua.

El estado de energía durante un sismo con dispositivos activados por velocidad se muestra en la Figura 29.a, se ha introducido un segundo nivel crítico en la energía de deformación. Este segundo nivel crítico está localizado junto al nivel de energía histerética, representa la cantidad crítica de energía de deformación que es absorbida por la estructura cuando los disipadores adicionales se activan. Una vez que el segundo nivel de agua es alcanzado, algo de agua es drenada permanentemente en la pila adicional de energía de amortiguamiento, así se reduce la cantidad de energía dentro de la estructura.



**Figura 29:** Analogía de flujo de agua: a) Sistema activado por desplazamiento; b) sistema activado por velocidad

**Fuente:** (Filiatrault, Tremblay, Christopoulos, Folz, & Pettinga, 2013)



El estado de energía de la estructura equipado con dispositivos activados por velocidad durante un evento sísmico se muestra en la Figura 29.b. La presencia de los disipadores causa un aumento de la pérdida del flujo en la bomba de dos direcciones que conectan la energía de deformación con la energía cinética. Esta pérdida suplementaria del flujo se recolecta en la energía de suplemento de amortiguamiento, así reducirá el flujo de energía de la estructura.

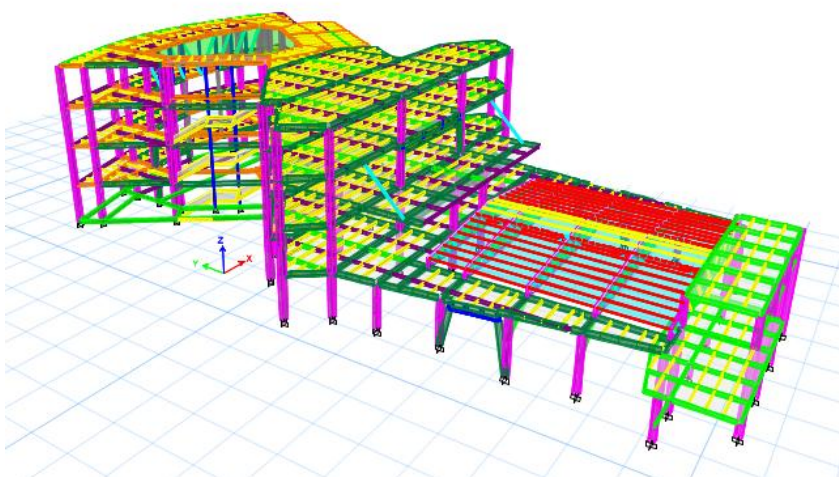
## CAPÍTULO III: DESARROLLO

### 4.1. Descripción de la estructura

La estructura que servirá de análisis en este estudio es el denominado Bloque 4 y 5 del nuevo Centro de Investigaciones Científicas de la Universidad de las Fuerzas Armadas –ESPE. El bloque 4 tiene cuatro entrepisos, con una altura de 19.72 metros este bloque principalmente servirá de área de circulación a los demás bloques. El bloque 5 está conformado por el auditorio, aulas y cafeterías. A continuación, se describe la configuración estructural, propiedades de los materiales, secciones de los elementos estructurales y cargas de la estructura.

#### 4.1.1. Configuración estructural

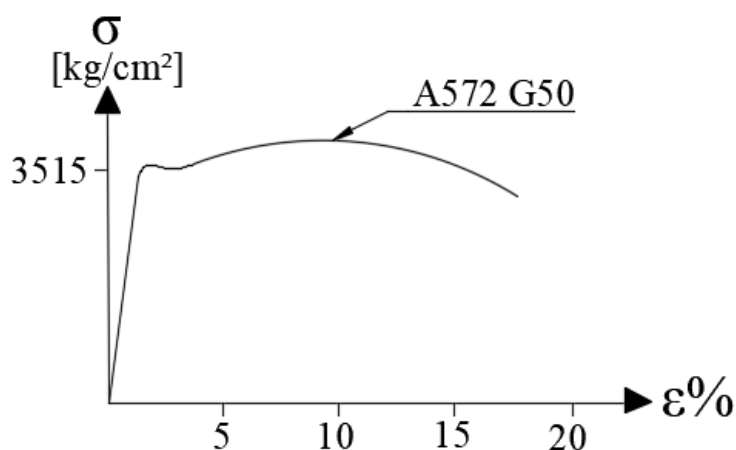
El bloque estructural 4 y 5 del nuevo Centro de Investigaciones Científicas está conformado por elementos estructurales de acero y de hormigón armado usado especialmente en la cimentación. Los dos bloques trabajan como una sola estructura con una disposición arquitectónica y estructural irregular en planta y elevación, la Figura 30 muestra un esquema tridimensional del bloque de análisis.



**Figura 30:** Bloque 4 y 5 del Centro de Investigaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE

El uso de hormigón armado se destinó principalmente para elementos estructurales como plintos, cadenas, pedestales y losas colaborantes, se utilizó un hormigón con resistencia a la compresión de  $210 \text{ kg/cm}^2$  y el acero de refuerzo tiene una resistencia de  $4200 \text{ kg/cm}^2$ . Los replantillos de hormigón simple poseen una resistencia de  $140 \text{ kg/cm}^2$ .

La estructura está compuesta por vigas principales, vigas secundarias, viguetas y columnas de acero estructural ASTM A-572 grado 50. El acero A572 G50 tiene una resistencia a la tracción de  $4570 \text{ kg/cm}^2$  y el punto mínimo de fluencia es de  $3515 \text{ kg/cm}^2$ . La curva de esfuerzo deformación se muestra en la Figura 31.

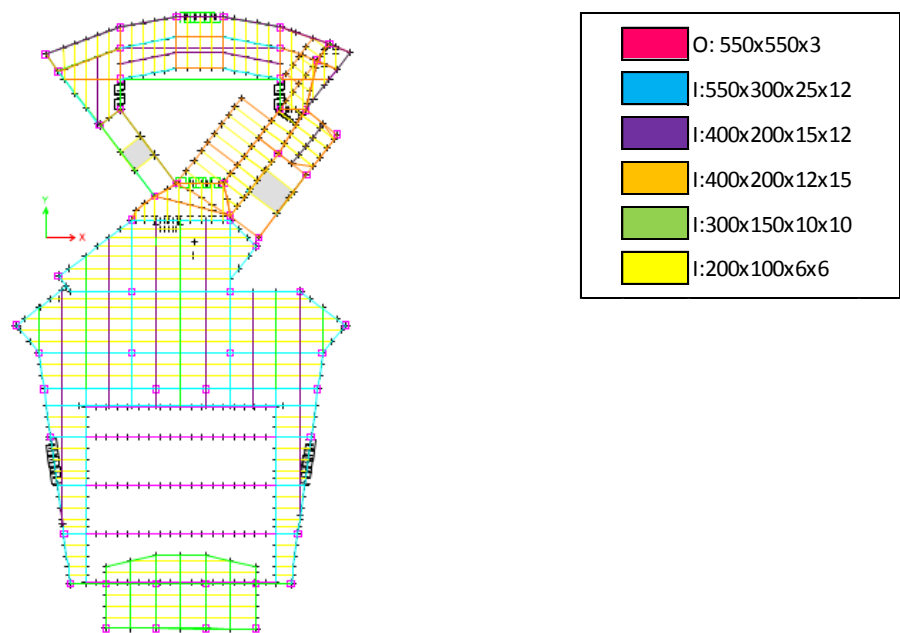


**Figura 31:** Curva esfuerzo deformación acero A 572 G 50

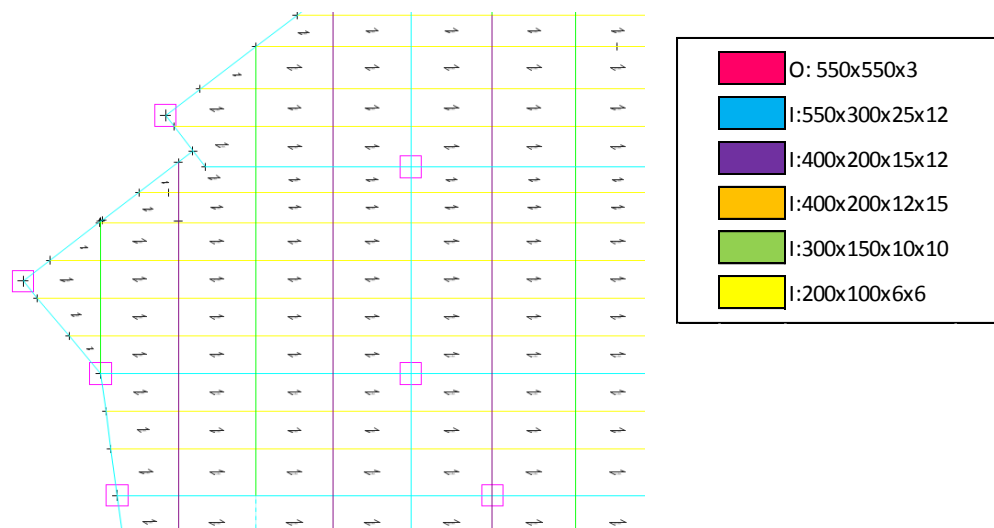
El diseño de los elementos sismorresistentes se realizó bajo una metodología basada en capacidad, donde los elementos estructurales se diseñan por resistencia del más débil al más fuerte, con lo que se espera que el mecanismo de colapso sea columna fuerte –viga débil – contraviento más débil.

La edificación está compuesta por un mismo tipo de columnas secciones tubulares rectangulares de 550 mm y con un espesor de 2 mm. Las vigas tipo I, las principales tienen una sección de  $550 \times 300 \times 25 \times 12$ , las vigas secundarias de  $400 \times 200 \times 15 \times 12$ ,  $400 \times 200 \times 12 \times 15$  y  $300 \times 150 \times 10 \times 10$ , mientras que las viguetas poseen una dimensión de  $200 \times 100 \times 6 \times 6$ . La Figura 30 indica las secciones utilizadas en la estructura.

La Figura 32 muestra un esquema en planta del nivel N+4.94 con la leyenda respectiva de cada una de las secciones utilizadas. Mientras que en la Figura 33 se aprecia la distribución de elementos estructurales en un área determinada.



**Figura 32:** Nivel N+4.94m bloque 4 y 5 del Centro de Investigaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE

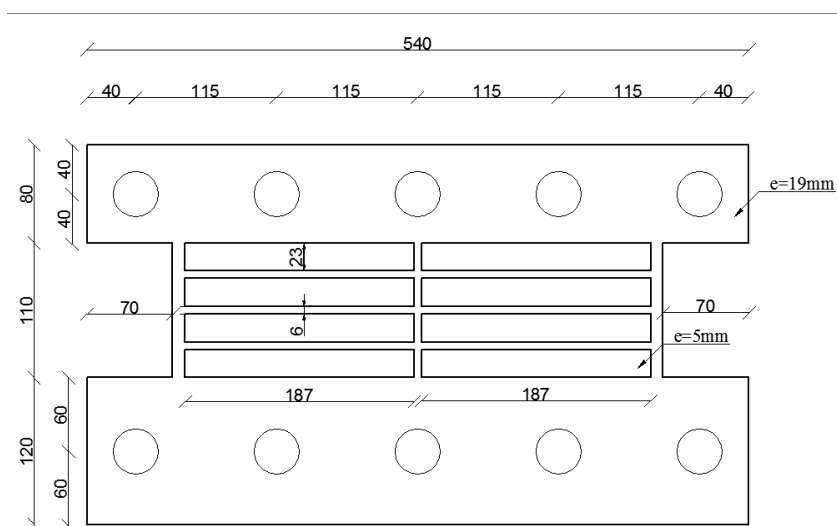


**Figura 33:** Distribución elementos estructurales losa N+4.94m bloque 4 y 5 del Centro de Investigaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE

**Tabla 2.**  
**Secciones elementos estructurales**

Sección	Esquema
Columna Tipo	<p>A square cross-section of a column with a side length of 550 mm and a wall thickness of 3 mm.</p>
Viga Principal	<p>A cross-section of a main beam with a top flange width of 300 mm, a total height of 550 mm, and a web thickness of 12 mm.</p>
Vigas Secundarias	<p>Three cross-sections of secondary beams:                 <ul style="list-style-type: none"> <li>Beam 1: Top flange width 200 mm, height 400 mm, web thickness 15 mm.</li> <li>Beam 2: Top flange width 200 mm, height 400 mm, web thickness 12 mm.</li> <li>Beam 3: Top flange width 150 mm, height 300 mm, web thickness 10 mm.</li> </ul> </p>
Viguetas	<p>A cross-section of a joist with a top flange width of 100 mm, a total height of 200 mm, and a web thickness of 6 mm.</p>

La estructura posee disipadores de energía tipo SLB40\_5, conformado por una placa de acero A36 de 19 mm de espesor, como la mostrada en la Figura 34. El disipador se configura en base al laminado de placas para conseguir 8 ventanas que cuentan con 187 mm de largo y una altura de 23 mm.



**Figura 34:** Geometría disipador SLB 40\_5

#### 4.1.2. Cargas de la estructura

La estructura posee cargas de tipo: permanentes (cargas muertas), variables y accidentales.

La carga permanente se compone por materiales estructurales y no estructurales e instalaciones (NEC-SE-CG, 2015), además del peso propio de la estructura se agrega la carga muerta adicional. En la Tabla 3 se especifica el valor de carga permanente de la estructura para losas de entrepiso y cubierta.

**Tabla 3.**  
**Carga permanente**

Entrepiso		Cubierta	
Elemento	Peso [kg/m <sup>2</sup> ]	Elemento	Peso [kg/m <sup>2</sup> ]
Steel Framing	25	Acabados	120
Acabados	120	<b>Total</b>	<b>120</b>
Enlucidos	50		
<b>Total</b>	<b>195</b>		

La carga viva depende del uso que se dará a la estructura. Estará determinada por la ocupación de la cual estará destinada. Según NEC-SE-CG la carga viva para Unidades Educativas establece cargas para aulas de  $200 \text{ kgf/m}^2$ , corredores de primer piso  $480 \text{ kgf/m}^2$  y corredores para pisos superiores de  $400 \text{ kgf/m}^2$ . Además, para losas de cubierta se utilizara una carga viva de  $100 \text{ kgf/m}^2$ .

La Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) en el Capítulo del Peligro Sísmico numeral 6.1.7 establece que el porcentaje de participación de masa para estructuras normales debe ser el 100% de la carga viva, mientras para estructuras con una ocupación especial para bodegas y almacenamiento se deberá aumentar el 25% de la carga viva.

El numeral 3.4 de la NEC en el capítulo de Cargas establece combinaciones de carga en función de la carga permanente D, carga sísmica E, sobrecarga L, sobrecarga de cubierta  $L_r$ , carga de granizo S y carga de viento W. Las combinaciones se expresan a continuación:

1.  $1.4 D$
2.  $1.2 D + 1.6 L + 0.5 \text{ máx.}[L_r; S ; R]$
3.  $1.2 D + 1.6 \text{ máx.}[L_r; S ; R] + \text{máx.}[L ; 0.5W]$
4.  $1.2 D + 1.0 W + L + 0.5 \text{ máx. } [L_r; S ; R]$
5.  $1.2 D + 1.0 E + L + 0.2 S$
6.  $0.9 D + 1.0 W$
7.  $0.9 D + 1.0 E$

#### **4.2. Análisis modal espectral**

Es el más utilizado para el cálculo de fuerzas sísmicas en la estructura. Para determinar el espectro de diseño se han analizado los parámetros sísmicos en función de la zona donde será implantada la estructura y la tipología estructural de la misma. A continuación se analizara los parámetros sísmicos y el espectro de análisis según la NEC 15 y la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles, ASCE por sus siglas en ingles.

#### 4.2.1. Parámetros sísmicos

El espectro elástico de diseño se obtiene a partir de la relación de la zona sísmica  $Z$ , el tipo de suelo sobre el cual se va a cimentar la estructura y los coeficientes de amplificación de suelo.

La estructura está ubicada en la Sierra por la razón entre la aceleración espectral y PGA para el periodo de retorno ( $\eta$ ) de 2.48 para provincias de la Sierra, Sangolquí pertenece a la zona sísmica “V” por ende su factor de zona es de 0.4. La estructura está implantada en el suelo tipo C que tiene un coeficiente de amplificación de suelo en la zona de periodo corto,  $F_a$ , de 1.20, el factor de amplificación de las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para diseño de roca,  $F_d$ , de 1.11 y el comportamiento no lineal para suelo C,  $F_s$ , es de 1.11 a partir de estos datos se puede determinar el periodo límite de vibración en el espectro sísmico elástico de aceleraciones. (NEC-SE-DS, 2015).

#### 4.2.2. Espectro de análisis

##### Espectro elástico Norma Ecuatoriana de la Construcción

El espectro elástico de diseño expresado en función de la gravedad se muestra en la Figura 35. Los límites para el período de vibración para el espectro están definidos por  $T_o$ ,  $T_c$  y  $T_L$

$$T_o = 0.1 F_s \frac{F_d}{F_a}$$

$$T_c = 0.55 F_s \frac{F_d}{F_a}$$

$$T_L = 2.4 F_d$$

Las ecuaciones que definen el espectro de diseño son las siguientes:

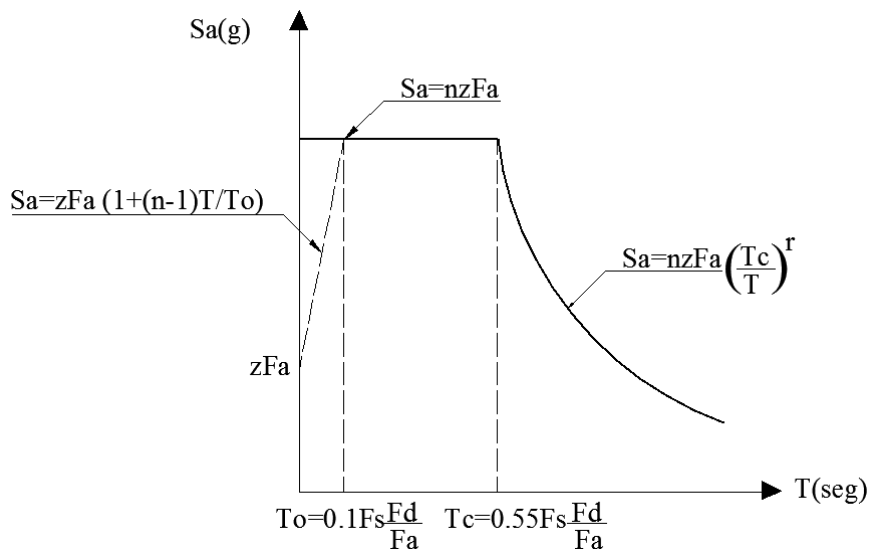
1. Para periodos entre  $0 \leq T \leq T_c$  se utiliza la ecuación:

$$S_a = nZFa$$

2. Periodos mayores que  $T_c$  están definidos dentro de la ecuación

$$S_a = nZFa \left( \frac{T_c}{T} \right)^r$$





**Figura 35:** Espectro Elástico de aceleraciones

A partir de ello la NEC, muestra dos métodos para determinar el periodo de vibración fundamental de la estructura, a continuación, se muestra el cálculo con el método 1 que relaciona la altura del edificio y su tipología estructural. (NEC-SE-DS, 2015).

$$T = C_t h_n^\alpha$$

La estructura en particular posee un coeficiente  $C_t$  de 0.072 y un factor  $\alpha$  de 0.80,  $h_n$  representa la altura máxima de la edificación siendo esta 19,72 m. Los factores necesarios para el espectro de la NEC necesarios para el Espectro de Diseño se muestran en la Tabla 7.

### Cortante basal de diseño

La norma ecuatoriana de la construcción estipula que el cortante basal total de diseño,  $V$ , que será aplicado a una estructura en una dirección dada, se determina mediante la siguiente expresión:

$$V = \frac{IS_a(T_a)}{R\phi_P\phi_E} W$$

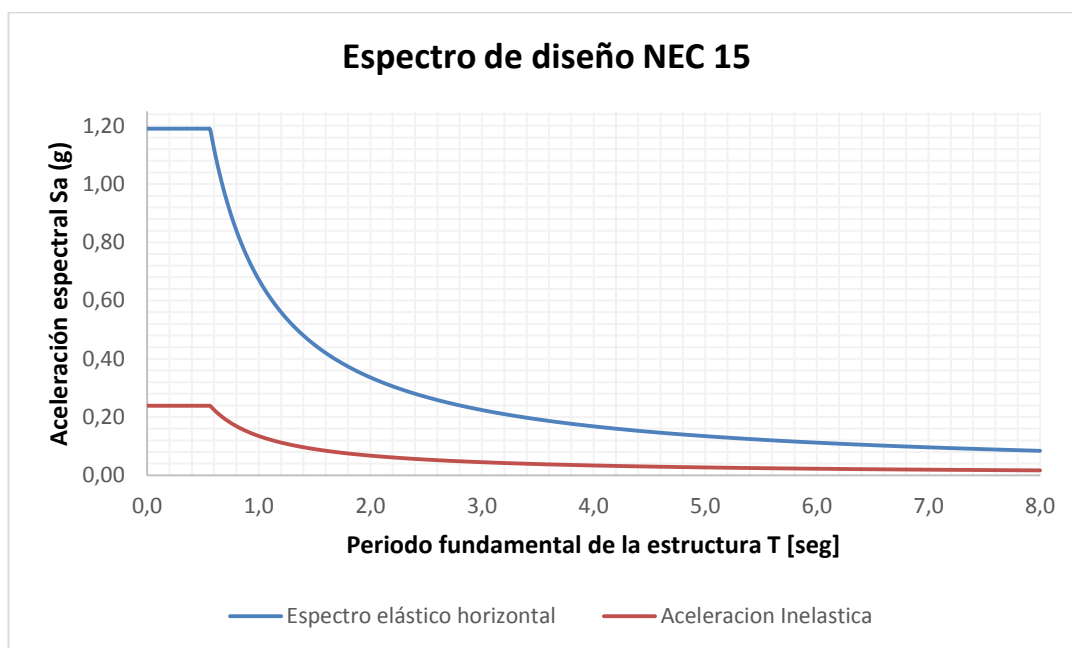
La estructura en estudio pertenece a estructuras de ocupación especial por ende posee un factor de importancia de 1.3. Por su configuración estructural poseen irregularidad en planta de tipo 4, es decir, ejes estructurales no paralelos y en cuanto a

irregularidad en elevación posee irregularidad geométrica, por ende se debe aplicar un factor de reducción en planta y elevación de 0.9 para cada una de ellas. (NEC-SE-DS, 2015).

En la Tabla 4 se presenta un cuadro resumen correspondiente a los valores necesarios para formar el espectro de respuesta elástico de aceleraciones para la estructura ubicada en suelo tipo C, dentro de Sangolquí con pórticos de acero laminado en caliente sismo resistentes con una altura de 19,72 m, irregular en planta como en elevación, con un factor de reducción de fuerza sísmica de  $R=8$  y un factor de importancia 1.3, la Figura 36 muestra el espectro de respuesta elástico e inelástico de aceleraciones según NEC15.

**Tabla 4.**  
***Factores espectro de respuesta de aceleraciones NEC 15***

Espectro de Respuesta elástico		
<b>n=</b>	2,48	Relación espectral $S_a$ y el PGA
<b>z=</b>	0,40	Valor del factor de zona Z
<b>Fa=</b>	1,20	Factor de amplificación
<b>Fd=</b>	1,11	Factor del sitio
<b>Fs=</b>	1,11	Factor del comportamiento
<b>r=</b>	1,00	Factor de suelo
<b>Tc=</b>	0,56	Periodo límite de vibración
<b>nzFa=</b>	1,19	Espectro de repuesta elástico de aceleraciones $0 < T < T_c$
Periodo de vibración fundamental		
<b>Ct=</b>	0,07	Coeficiente
<b>h=</b>	19,72	Altura máxima del edificio
<b><math>\alpha</math>=</b>	0,80	Coeficiente
<b>Tf=</b>	0,78	Periodo límite de vibración
Espectro de Respuesta inelástico		
<b>Sa=</b>	0,85	Espectro de repuesta elástico de aceleraciones $T > T_c$
<b>I=</b>	1,30	Factor de importancia
<b><math>\phi_p</math>=</b>	0,90	Factor de irregularidad en planta
<b><math>\phi_e</math>=</b>	0,90	Factor de irregularidad en elevación
<b>R=</b>	8,00	Factor de reducción de resistencia sísmica
<b>Vmin=</b>	0,1724	Valor del cortante basal mínimo



**Figura 36:** Espectro de respuesta de aclaraciones elástico e inelástico

### Espectro elástico norma ASCE 7-10

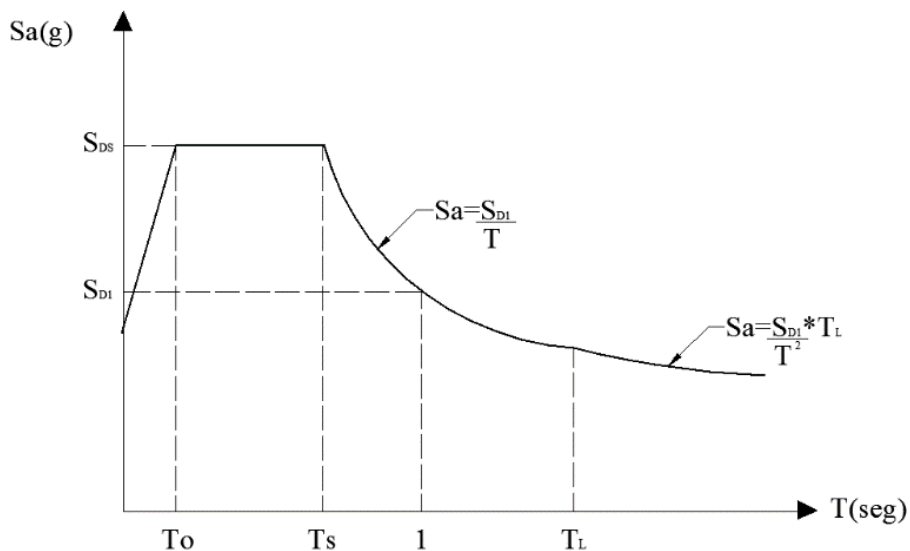
Los parámetros necesarios para el espectro de respuesta de propuesta por Sociedad Americana de Ingenieros Civiles, ASCE por sus siglas en inglés, se obtienen a partir de la aceleración espectral para periodo corto  $S_s$  y la aceleración espectral para periodo de 1 segundo  $S_1$ , además, se deberá realizar los ajustes de la aceleración espectral para el tramo controlado por la velocidad con factor  $F_v$  y para el tramo controlado por la aceleración  $F_a$ . El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) proporciona datos correspondientes para la ciudad de Sangolquí y suelo tipo C.

**Tabla 5.**

#### **Factores espectro ASCE 7-10**

Parámetros de aceleración	$S_s$	2,04
espectral	$S_1$	0,82
Factores de amplificación	$F_a$	1,00
(Suelo C)	$F_v$	1,30

Los parámetros de aceleración espectral y los factores de amplificación permiten definir las ecuaciones de los tramos del espectro elástico ASCE 7-10.



**Figura 37:** Espectro elástico de diseño ASCE 7-10

Existen cuatro zonas en el espectro elástico de diseño según el ASCE 7-10 basados en los periodos de la estructura, denominados  $T_0$ ,  $T_s$ ,  $T$  y  $T_L$ .

Los periodos del espectro son definidos como:

$T = \text{el periodo fundamental de la estructura [s]}$

$$T_0 = \frac{0.2 S_{D1}}{S_{DS}}$$

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}}$$

$T_L = \text{periodo largo de transición, disponible en mapas USGS [s]}$

**Tabla 6.**  
**Periodo de la estructura ASCE 7-10**

Periodo fundamental [s]	
$T_0$	0,105
$T_s$	0,523
$T_L$	4

Las ecuaciones que definen el espectro de diseño se representan a continuación:

1. Periodos menores de  $T_0$ , la aceleración espectral en el primer tramo  $S_a$  está regulado por la ecuación:  $S_a = S_{DS} \left( 0.4 + 0.6 \frac{T}{T_0} \right)$

Donde  $S_{DS}$  corresponde al espectro de aceleraciones en periodos cortos

2. Periodos mayores a  $T_0$  y menores que  $T_s$ , la aceleración espectral será igual al  $S_{DS}$ .
3. Los periodos mayores que  $T_s$  y menores o iguales a  $T_L$  la aceleración espectral estará dada por la siguiente ecuación:  $S_a = \frac{S_{D1}}{T}$

Donde  $S_{D1}$  corresponde al espectro de aceleraciones mayores a 1s.

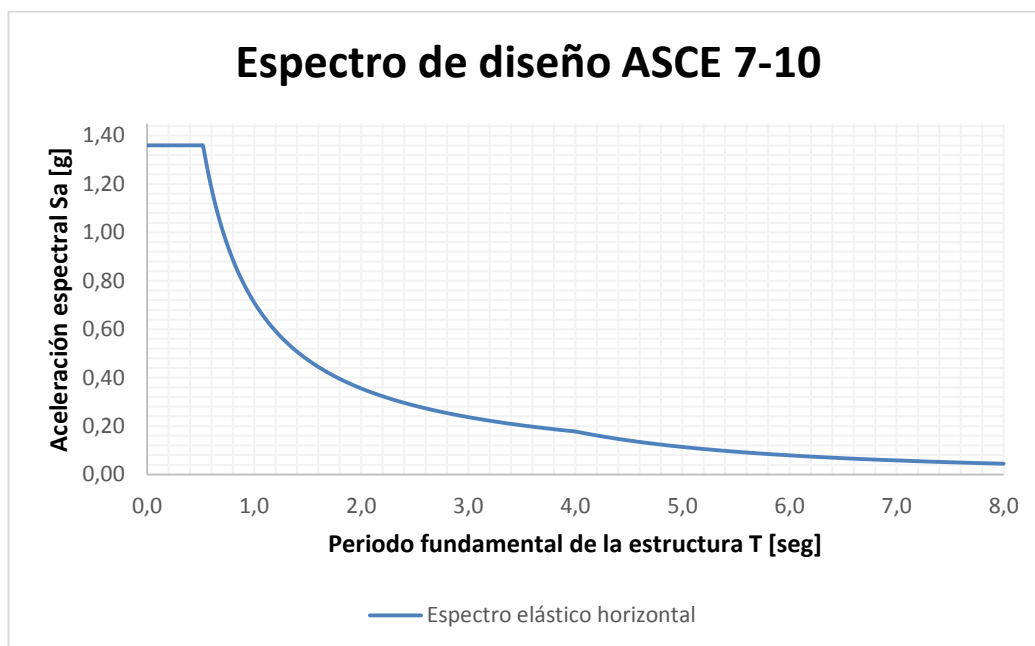
4. La aceleración espectral para periodos mayores a  $T_L$  estará regido por:

$$S_a = \frac{S_{D1} T_L}{T}$$

**Tabla 7.**  
***Aceleraciones espectrales para diseño***

$S_{SM}$	$S_{SM} = F_a * S_s$	2,040
$S_{M1}$	$S_{M1} = F_V * S_1$	1,066
$S_{DS}$	$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{SM}$	1,360
$S_{D1}$	$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1}$	0,710

El espectro de diseño elástico según ASCE 7-10 para suelo tipo C en la ciudad de Sangolquí se muestra en la Figura 38.



**Figura 38:** Espectro elástico de diseño

### Comparación espectros elásticos entre NEC 15 y ASCE 7-10

Los espectros mostrados en la Figura 33 representan los espectros elásticos de la norma ASCE 7-10 y NEC 15, el ASCE 7-10 para suelo tipo C dentro de la ciudad de Sangolquí. Los requisitos de diseño sísmico en la NEC y los establecidos por el ASCE, son similares; a partir de la elaboración de estos espectros se ha definido sus principales diferencias y semejanzas. Los datos de los espectros comparados se presentan en la Tabla 8.

**Tabla 8.**

**Factores espectro de respuesta de aceleraciones ASCE 7 10 y NEC 15**

T	Sa (g) ASCE	Sa (g) NEC 15
0,0	1,3600	1,1904
0,1	1,3600	1,1904
0,2	1,3600	1,1904
0,3	1,3600	1,1904
0,4	1,3600	1,1904
0,5	1,3600	1,1904
0,6	1,1844	1,1204
0,7	1,0152	0,9603
0,8	0,8883	0,8403
0,9	0,7896	0,7469
1,0	0,7107	0,6722

CONTINÚA

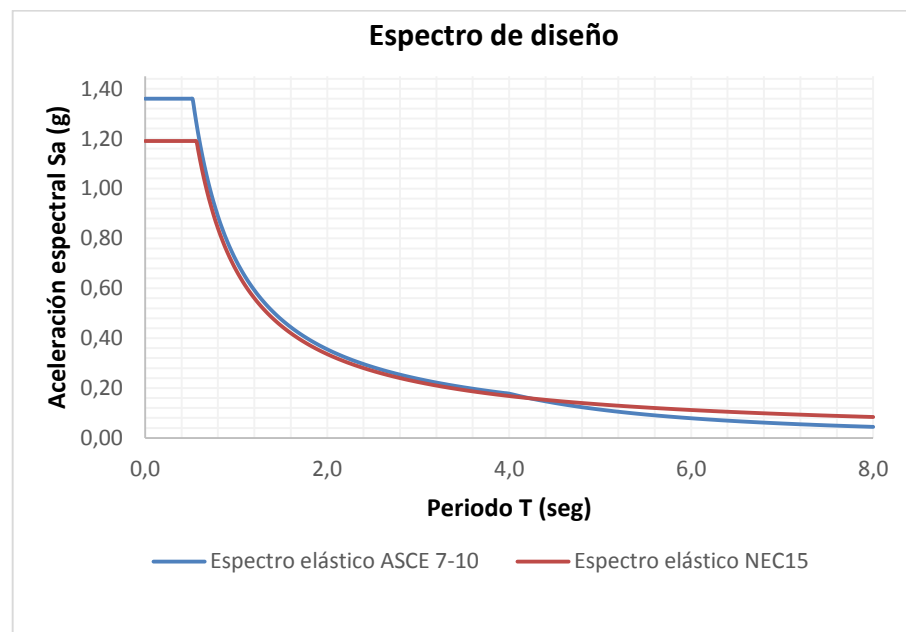


1,1	0,6461	0,6111
1,2	0,5922	0,5602
1,3	0,5467	0,5171
1,4	0,5076	0,4802
1,5	0,4738	0,4482
1,6	0,4442	0,4201
1,7	0,4180	0,3954
1,8	0,3948	0,3735
1,9	0,3740	0,3538
2,0	0,3553	0,3361
2,1	0,3384	0,3201
2,2	0,3230	0,3056
2,3	0,3090	0,2923
2,4	0,2961	0,2801
2,5	0,2843	0,2689
2,6	0,2733	0,2586
2,7	0,2632	0,2490
2,8	0,2538	0,2401
2,9	0,2451	0,2318
3,0	0,2369	0,2241
3,1	0,2292	0,2168
3,2	0,2221	0,2101
3,3	0,2154	0,2037
3,4	0,2090	0,1977
3,5	0,2030	0,1921
3,6	0,1974	0,1867
3,7	0,1921	0,1817
3,8	0,1870	0,1769
3,9	0,1822	0,1724
4,0	0,1777	0,1681
4,1	0,1691	0,1640
4,2	0,1611	0,1601
4,3	0,1537	0,1563
4,4	0,1468	0,1528
4,5	0,1404	0,1494
4,6	0,1343	0,1461
4,7	0,1287	0,1430
4,8	0,1234	0,1400
4,9	0,1184	0,1372
5,0	0,1137	0,1344
5,1	0,1093	0,1318
5,2	0,1051	0,1293
5,3	0,1012	,1268
5,4	0,0975	0,1245
5,5	0,0940	0,1222
5,6	0,0906	0,1200

CONTINÚA



5,7	0,0875	0,1179
5,8	0,0845	0,1159
5,9	0,0817	0,1139
6,0	0,0790	0,1120
6,1	0,0764	0,1102
6,2	0,0740	0,1084
6,3	0,0716	0,1067
6,4	0,0694	0,1050
6,5	0,0673	0,1034
6,6	0,0653	0,1019
6,7	0,0633	0,1003
6,8	0,0615	0,0989
6,9	0,0597	0,0974
7,0	0,0580	0,0960
7,1	0,0564	0,0947
7,2	0,0548	0,0934
7,3	0,0533	0,0921
7,4	0,0519	0,0908
7,5	0,0505	0,0896
7,6	0,0492	0,0885
7,7	0,0479	0,0873
7,8	0,0467	0,0862
7,9	0,0455	0,0851
8,0	0,0444	0,0840



**Figura 39:** Espectro elástico de diseño



- Los valores de aceleración por movimiento en el terreno ( $S_s$  y  $S_1$ ) se definen por las coordenadas geográficas del lugar donde estará la estructura. Los valores de aceleración sísmica (factor  $Z$ ) de la NEC 15 están definidos por el mapa de zonificación sísmica en base a los sectores de riesgo sísmico.
- Las dos normas definen el tipo de suelo en función de la onda de corte. Las dos establecen A para suelo de roca dura hasta suelo tipo F como arcillas y rellenos.
- Los factores de modificación para la aceleración de movimiento del terreno están referidos según el tipo de suelo. La norma ASCE establece los valores  $S_s$  y  $S_1$  mediante el coeficiente  $F_a$  para la aceleración de periodo corto, correspondiente al rango de aceleración, y  $F_v$  para aceleración a periodo de 1 segundo dentro del rango de velocidades. Mientras, que la NEC define el valor del factor  $Z$  con los coeficientes  $F_a$  y  $r$  en los rangos de aceleración y velocidades, según el tipo de suelo está el parámetro  $n$  que no está fundamentado de la mejor manera ya que se sustenta en divisiones geopolíticas.
- En cuanto al periodo de retorno y la probabilidad de excedencia para el sismo máximo considerado, la norma ASCE estima una probabilidad de excedencia del 2% en 50 años, asociadas a un sismo con periodo de retorno de 2500 años (American Society of Civil Engineers, 2010), mientras que la norma NEC 15 define la probabilidad de excedencia en 10% en 50 años que está relacionada con un sismo con una frecuencia de 475 años. (NEC-SE-DS, 2015)

En la Tabla 9 indica que el espectro de respuesta elástico de aceleraciones es mayor en el ASCE 7-10 y el periodo límite de vibración es mayor en la NEC. A partir de los 0.6 segundos no existe una diferencia significativa entre las dos curvas.

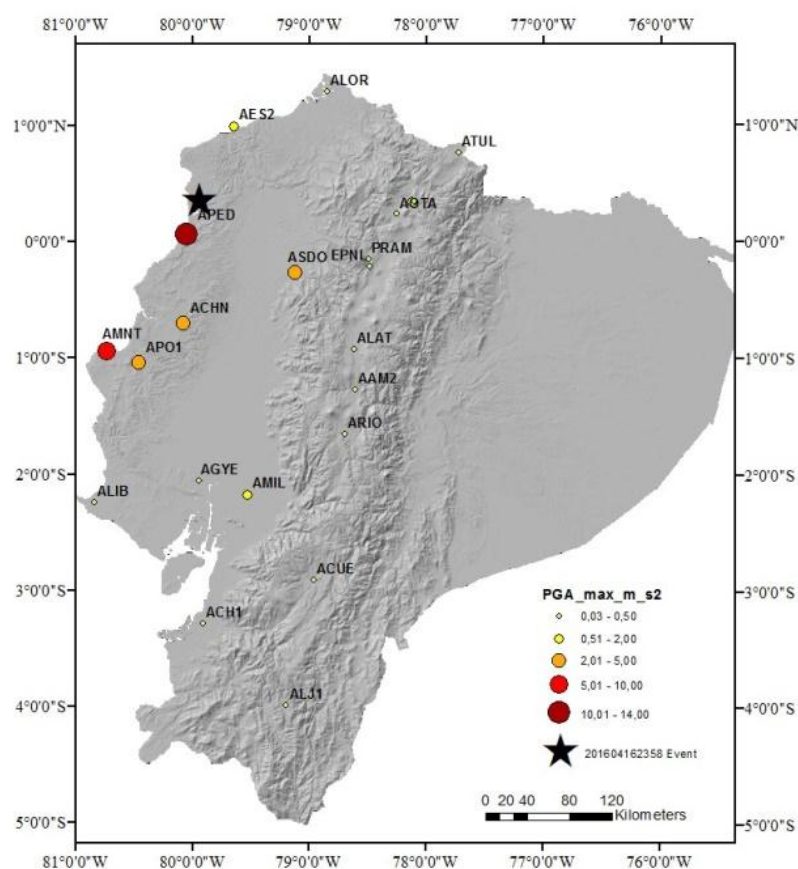
**Tabla 9.**  
***Aceleraciones espectrales para diseño***

Norma	NEC 15	ASCE 7-10
Espectro de respuesta elástico de aceleraciones	1,19 [g]	1,36 [g]
Periodo límite de vibración $T_0$	0,56 [seg]	0,52 [seg]

### 4.3. Análisis tiempo historia

El análisis de la respuesta no lineal en el tiempo se ha basado en los sismos de Manta, Pedernales y Quito, estos registros se obtuvieron de la red de acelerógrafos

dispuestos a lo largo del país y son de vital importancia por su incidencia en el país. Además, ya se han hecho análisis estructurales a partir de estos sismos. En la Figura 38 se muestra la disposición de las estaciones y el PGA máximo de cada estación del sismo con epicentro en Pedernales.



**Figura 40:** Estaciones de la Red Nacional de Acelerógrafos

**Fuente:** (RENAC, 2016)

En la Tabla 10 se muestra los valores de la máxima amplitud obtenidos para cada componente de las estaciones que son parte de este estudio (Quito, Manta y Pedernales) y su ubicación dentro de la Red Nacional de Acelerógrafos. El Anexo 3 muestra las aceleraciones de los tres registros en dirección Este y Norte.

**Tabla 10.**

*Valores de la máxima amplitud para cada componente.*

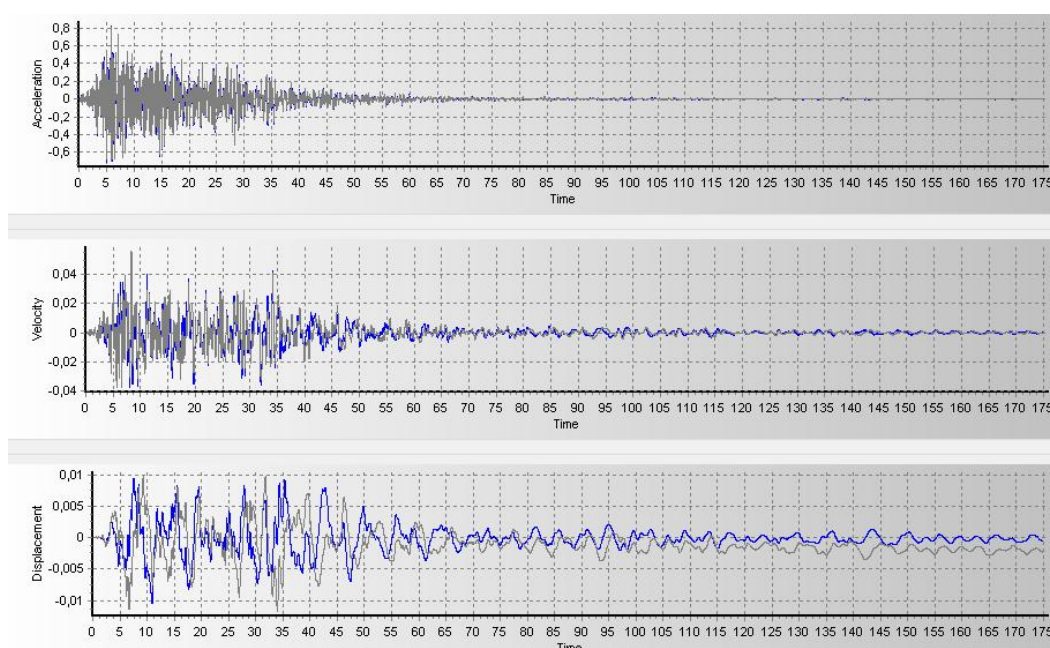
Estación	Latitud	Longitud	Altitud	PGA E	PGA N	PGA Z
			[m]	[m/s <sup>2</sup> ]	[m/s <sup>2</sup> ]	[m/s <sup>2</sup> ]

Pedernales	0,068	-80,057	15	13,80	8,31	7,27
Quito	-0,212	-78,492	2813	0,24	0,23	0,13
Manta	-0,941	-80,735	38	3,97	5,14	1,62

**Fuente:** (RENAC, 2016)

Los datos proporcionados por la Red Nacional de Acelerógrafos (RENAC) se encuentran en [cm/seg<sup>2</sup>] por ello es necesario transformarlos a [m/seg<sup>2</sup>] y a su vez dividir para 9.81 y obtener estos datos en un porcentaje de la gravedad.

La Figura 41 representa la aceleración máxima obtenida de la estación de Pedernales donde se registró un valor de 13.80 m/s<sup>2</sup>, es decir, 1.407 g, con el programa SeismoSpect se puede analizar gráficamente los datos entregados por la RENAC donde se puede realizar el grafico de aceleración velocidad y desplazamiento a partir de los datos entregados.

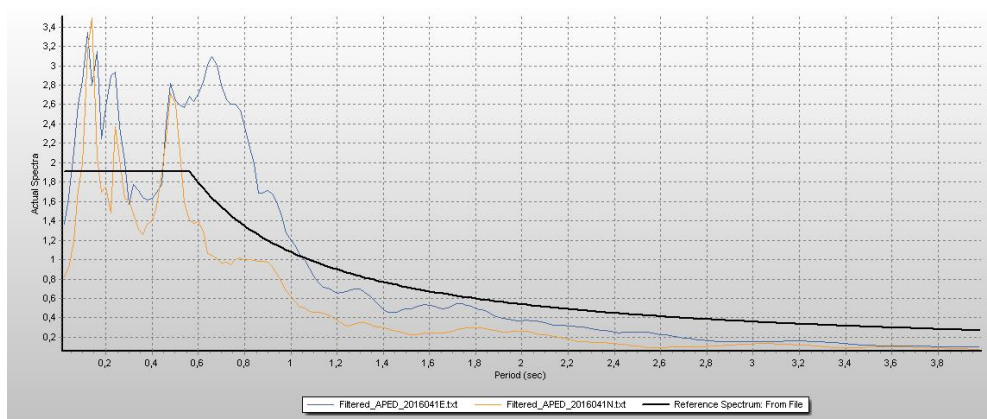


**Figura 41:** Espectro de respuesta de aclaraciones elástico e inelástico

**Fuente:** (SeismoSpect, 2017)

Este estudio considera la NEC 15 como documento de referencia para escalar sismos usando los espectros propuestos por esta norma, sin embargo, los registros sísmicos del sismo de Pedernales del 16 de Abril están sobre el espectro indicado de la NEC 15.

Un adecuado análisis tiempo historia requiere realizar el escalamiento de los mismos con la finalidad que el espectro de aceleraciones de los registros se ajuste al espectro de diseño establecido por una norma, se espera que la fase, características y duración de los sismos de los acelerogramas originales se mantengan (Villalva, 2015). En la Figura 42 se muestra el espectro inelástico para la ciudad de Sangolquí en suelo tipo C y el espectro que genera el acelerograma de la estación de Pedernales.

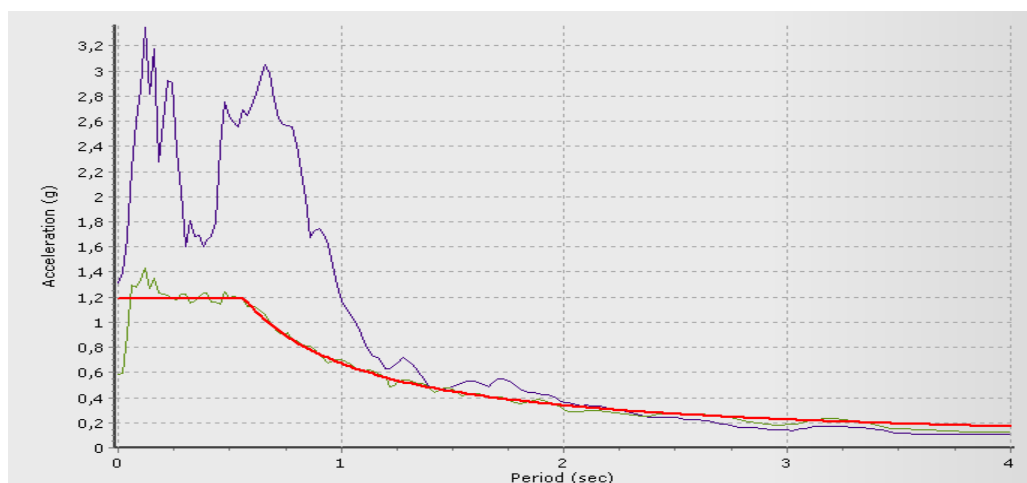


**Figura 42:** Espectro de respuesta de aclaraciones elástico e inelástico

**Fuente:** (SeismoSpect, 2017)

El espectro generado por el acelerograma de la estación de Pedernales llega a ser 1.34 veces mayor que el espectro elástico, para hacer un adecuado análisis de la estructura paso a paso, se debe escalar el sismo.

El escalamiento de los espectros de aceleraciones se realizó el programa SeimoMatch que reporta los datos necesarios del espectro escalado y el acelerograma corregido. En la Figura 43 se muestra el espectro de la estación de Pedernales de la coordenada Este en color azul, el espectro elástico de la NEC 15 en rojo y el espectro escalado en verde.

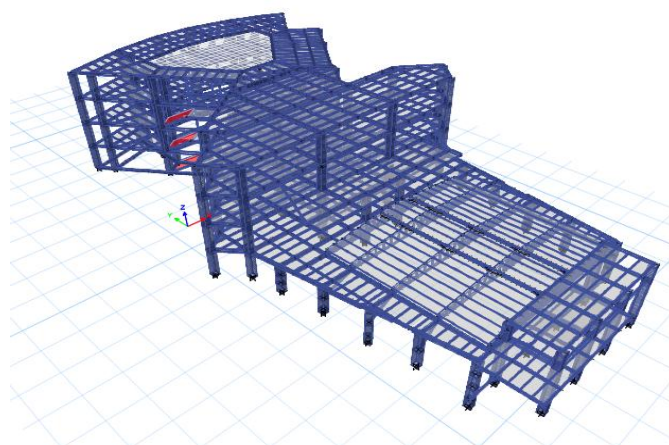


**Figura 43:** Espectro de respuesta de aclaraciones elástico e inelástico

**Fuente:** (SeismoMatch, 2017)

#### 4.4. Análisis de la estructura sin disipadores

El análisis estructural que se muestra a continuación correspondiente a los bloques 4 y 5 del nuevo Centro de Investigaciones Científicas reflejara resultados del análisis estructural en cuanto a derivas de piso, desplazamientos máximos, periodos de vibración y porcentaje de participación modal, además, la respuesta energética de la estructura, análisis de torsión en planta y análisis estático no lineal. La Figura 44 corresponde a un esquema tridimensional de la edificación.



**Figura 44:** Bloque 4 y 5 del Nuevo Centro de Investigaciones Científicas

**Fuente:** (ETABS, 2016)

#### 4.4.1. Derivas de piso

Los resultados de las derivas de piso de la estructura sin disipadores se muestran en la Tabla 11. La Tabla 11 incluye los datos del análisis espectral, así como los valores del análisis tiempo historia de los sismos de Pedernales, Manta y Quito y para cada sentido de análisis.

**Tabla 11.**  
*Derivas de piso estructura sin disipadores*

Pisos	Deriva de piso %							
	Análisis espectral		Análisis Tiempo Historia					
	X	Y	Pedernales		Manta		Quito	
X			Y	X	Y	X	Y	
<b>N +19.76</b>	1,35%	1,55%	1,08%	1,53%	1,28%	1,33%	0,82%	1,01%
<b>N +14.82</b>	1,25%	1,42%	1,09%	1,07%	1,20%	1,21%	0,77%	0,91%
<b>N +9.88</b>	1,00%	1,06%	0,92%	1,02%	0,97%	0,91%	0,65%	0,68%
<b>N +4.94</b>	0,23%	0,23%	0,21%	0,24%	0,22%	0,21%	0,15%	0,16%

Todos los valores de la deriva de piso están bajo el límite máximo que establece la NEC en el Capítulo de Peligro Sísmico en el numeral 4.2.2 que establece el valor máximo del 2% aplicada a la metodología del diseño sismorresistente.

Los acelerogramas usados en el análisis tiempo historia, están escalados dentro del espectro elástico de la ciudad de Quito para suelo tipo C. A pesar de ello existe una pequeña variación entre los resultados, esta variación es resultado del análisis paso a paso, en función de los acelerogramas.

#### 4.4.2. Desplazamientos máximos

La Tabla 12 muestra los valores de desplazamiento de piso para el análisis modal espectral y análisis de historia en el tiempo con los sismos de Pedernales, Manta y Quito, con un desplazamiento máximo de 26 cm en sentido Y del registro de la componente Este de Pedernales.

**Tabla 12.**  
**Desplazamientos máximos de la estructura sin disipadores**

Pisos	Desplazamientos [m]							
	Análisis espectral		Análisis Tiempo Historia					
	X	Y	Pedernales		Manta		Quito	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
<b>N +19.76</b>	0,19	0,21	0,23	0,26	0,22	0,24	0,16	0,18
<b>N +14.82</b>	0,12	0,13	0,16	0,17	0,16	0,15	0,11	0,12
<b>N +9.88</b>	0,06	0,06	0,13	0,26	0,24	0,17	0,10	0,17
<b>N +4.94</b>	0,01	0,01	0,06	0,17	0,15	0,07	0,05	0,10

#### 4.4.3. Periodos de vibración dinámicos y porcentaje de participación modal

El análisis dinámico modal establece que para un adecuado comportamiento estructural los dos primeros modos de vibrar deben tener movimientos traslacionales con el 90% de participación de la masa. Dentro del primer modo de vibrar el mayor porcentaje de la masa se debe concentrar en el sentido X, mientras que en el segundo modo de el mayor porcentaje de participación modal debe concretarse en el sentido Y. A partir del tercer modo de vibración, la estructura empezara a rotar por lo que se espera el mayor porcentaje en el sentido Z.

**Tabla 13.**  
**Periodos de vibración de la estructura sin disipadores**

Modo	Periodo [seg]	Porcentaje de participación modal		
		UX	UY	UZ
<b>1</b>	0,703	0,9317	0,0020	0,0000
<b>2</b>	0,658	0,9371	0,9324	0,0556
<b>3</b>	0,53	0,9438	0,9424	0,9248
<b>4</b>	0,509	0,9464	0,9468	0,9266
<b>5</b>	0,478	0,9528	0,9486	0,9285
<b>6</b>	0,440	0,9533	0,9493	0,9304
<b>7</b>	0,405	0,9538	0,9498	0,9322
<b>8</b>	0,373	0,9542	0,9503	0,9341
<b>9</b>	0,343	0,9545	0,9511	0,9360
<b>10</b>	0,312	0,9551	0,9515	0,9378
<b>11</b>	0,283	0,9647	0,9521	0,9397
<b>12</b>	0,246	0,9651	0,9525	0,9416

CONTINÚA



<b>13</b>	0,245	0,9655	0,9534	0,9435
<b>14</b>	0,245	0,9659	0,9538	0,9454
<b>15</b>	0,243	0,9663	0,9542	0,9472

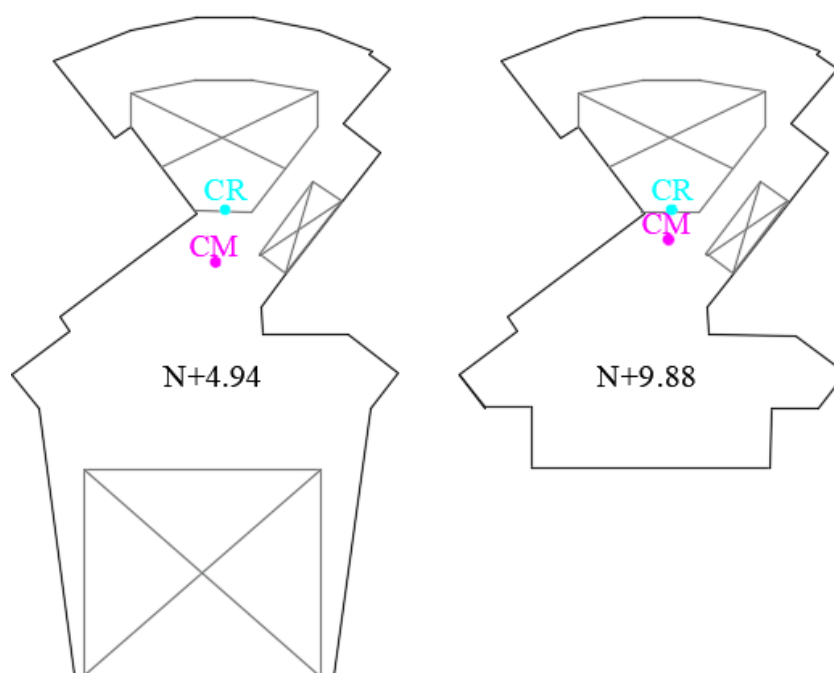
#### 4.4.4. Análisis de la torsión en planta de la estructura

La estructura de análisis posee una distribución irregular en planta, por lo que se espera controlar las vibraciones torsionales y así controlar las vibraciones traslacionales. El cálculo del centro de masas y rigidez de cada piso da como resultado la excentricidad de piso; definida como la distancia entre el centro de masas y el centro de rigidez correspondiente para cada sentido de análisis. En la Tabla 14 se presentan las coordenadas del centro de masas y centro de rigidez para cada piso. Se muestra gráficamente la distancia entre estos puntos en las Figuras 45 y 46 para cada planta.

**Tabla 14.**

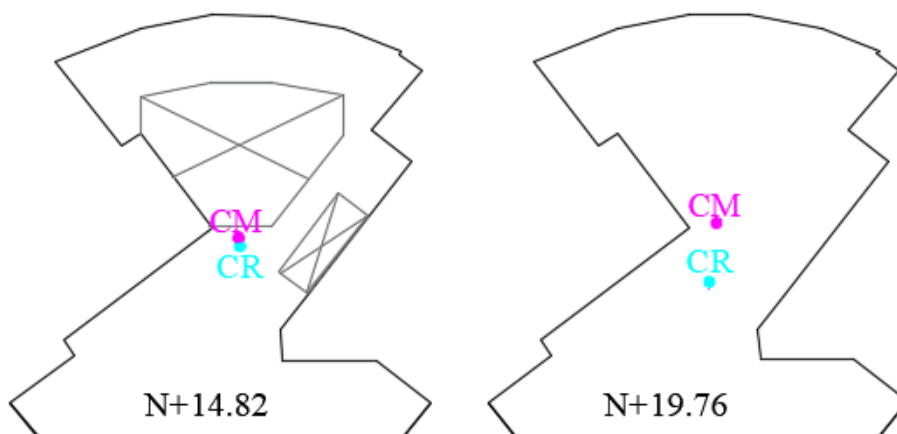
*Coordenadas del centro de masas y centro de rigidez por piso de la estructura*

Piso	XCM [m]	YCM [m]	XCR [m]	YCR [m]	Ex [m]	Ey [m]
<b>N +19.76</b>	20,32	6,97	19,25	1,03	1,07	5,94
<b>N +14.82</b>	20,25	6,99	19,89	3,60	0,36	3,39
<b>N +9.88</b>	20,09	4,63	19,96	5,51	0,13	0,88
<b>N +4.94</b>	19,25	0,84	20,02	6,99	0,77	6,15





**Figura 45:** Centro de masas y rigidez por planta estructura sin disipadores N+4.04 y N+9.88



**Figura 46:** Centro de masas y rigidez estructura sin disipadores planta N+14.82 y N+19.76

Esta estructura por su composición estructural posee una excentricidad generada por la distancia del centro de rigideces y el de masa. La fuerza sísmica, aplicada en el centro de rigidez, generará un momento torsional definido como el producto de la fuerza sísmica lateral y la excentricidad, se intenta tener un efecto mínimo en cada planta para que así sus elementos estructurales funcionen de la mejor manera.

#### 4.4.5. Ajuste del cortante basal estático y dinámico

Las normas NEC y ASCE 7-10 establecen que la fuerza estática equivalente debe ser igual a la carga muerta del edificio y en casos especiales se debe aumentar un 25% de la carga reactiva.

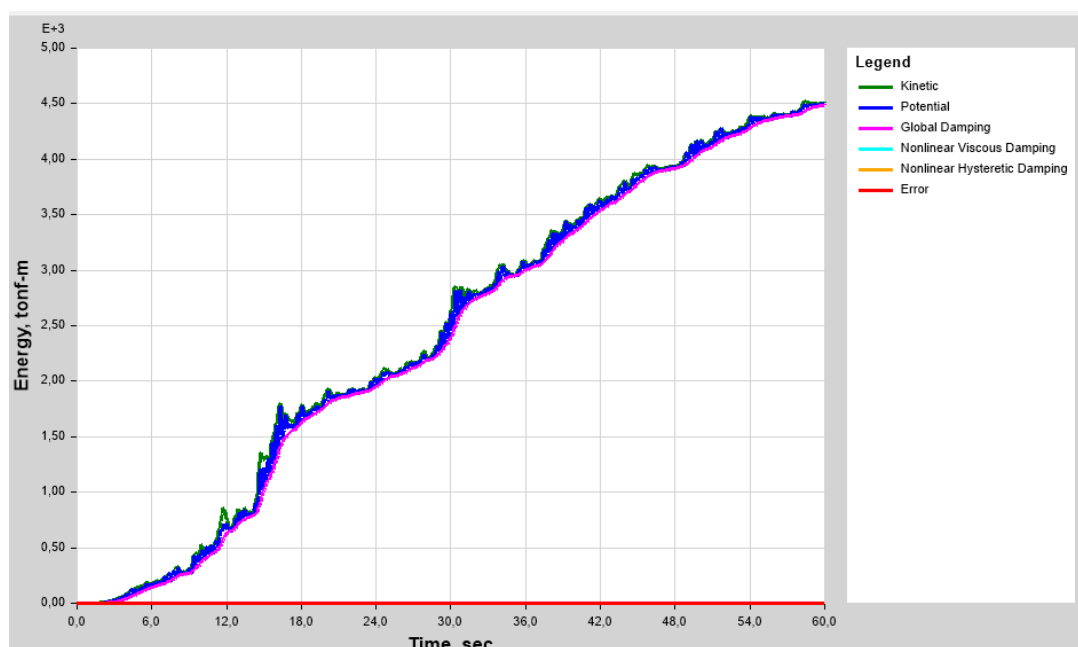
El valor del cortante basal dinámico debe ser menor al 80% del cortante basal estático para estructuras regulares y al menos el 85% para estructuras irregulares del cortante basal estático, según el capítulo de peligro sísmico de la NEC. De igual forma la Norma ASCE 7-10 establece que cuando el cortante dinámico es menor al 85% del

corte basal estático, entonces las fuerzas, pero no las derivas deberían ser multiplicadas por un factor de corrección.

$$f_c = 0.85 * \frac{V_{estático}}{V_{dinámico}}$$

#### 4.4.6. Respuesta energética sin disipadores

Los resultados energéticos de la estructura sin disipadores reflejan la energía potencial, cinética y energía de amortiguamiento modal. El análisis se realizará para los primeros 60 segundos de los registros de aceleración por ser los más críticos, a partir de ese tiempo la aceleración tiende a cero.



**Figura 47:** Resultados energéticos de la estructura sin disipadores

**Fuente:** (ETABS, 2016)

El balance de energías nos ayudara a limitar las deformaciones en función de las propiedades estructurales, las conexiones y propiedades del suelo. La energía acumulativa de entrada es la suma de la energía de amortiguamiento (elástica) más la energía acumulativa de histéresis, la energía potencial y la energía cinética integran la ecuación de balance de energía. El rendimiento se mejora a partir de la reducción de la ductilidad o la demanda de disipación de energía por histéresis. En la Tabla 15 se presenta el resultado de la energía para los registros de Pedernales, Manta y Quito.

**Tabla 15.**  
***Respuesta energética estructura sin disipadores***

Registro de historia en el tiempo			
Tipo de energía	Pedernales	Quito	Manta
Energía de entrada [KN-m]	4243,03	3951,49	4334,09
Energía Cinética [KN -m]	698,36	359,43	474,44
Energía Potencial [KN -m]	726,12	354,03	488,09
Energía de Amortiguamiento Modal [KN -m]	4106,44	3779,87	4331,48

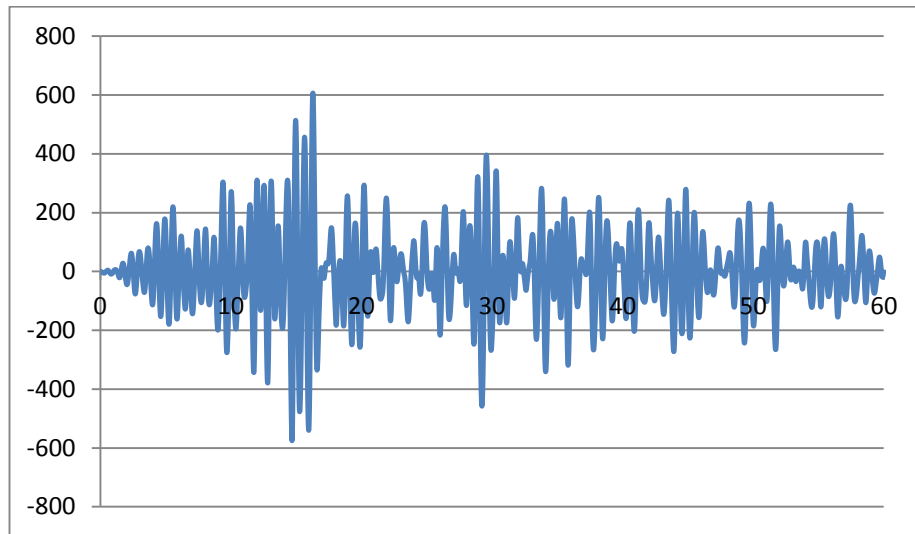
#### 4.4.7. Redundancia estructural sin disipadores

La redundancia estructural proporciona una adecuada transmisión de cargas laterales en los elementos estructurales. Un sistema redundante transmite la carga lateral, aplicada en la dirección de análisis, y así distribuir entre varios elementos que actúan en paralelo, de esta manera el fallo de los elementos no disminuirá la resistencia del sistema.

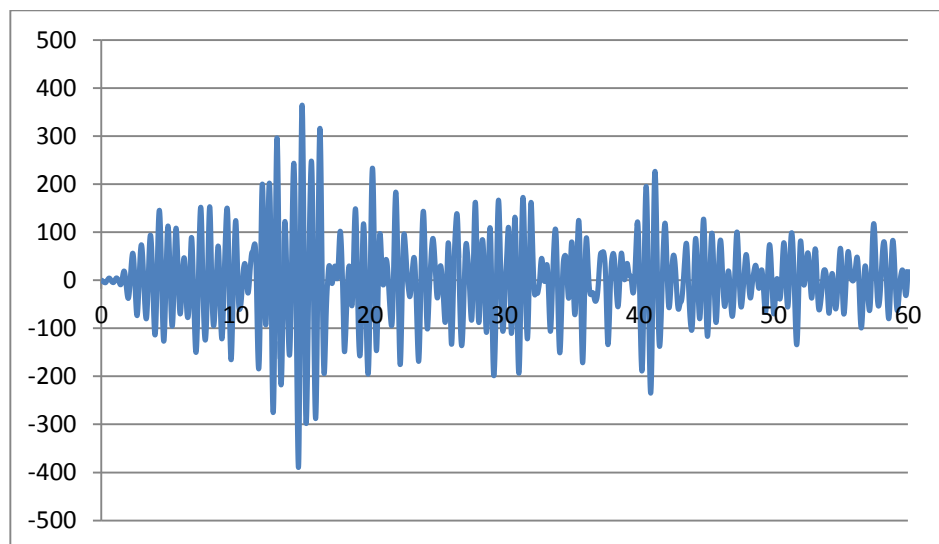
Para definir la capacidad de carga de los elementos a detalle se mostrará las cargas que soportan varias columnas dentro del análisis de historia en el tiempo del registro sísmico de Pedernales (Tabla 16). La columna denominada C1 está ubicada en el eje N18, eje en el que posteriormente se incluirá disipadores. La columna C2, está ubicada en el eje S21. Se analizará la carga axial, cortante y momento para posteriormente compararlas cuando se implementen los disipadores de energía a la estructura.

**Tabla 16.**  
***Cargas de columnas estructura sin disipadores***

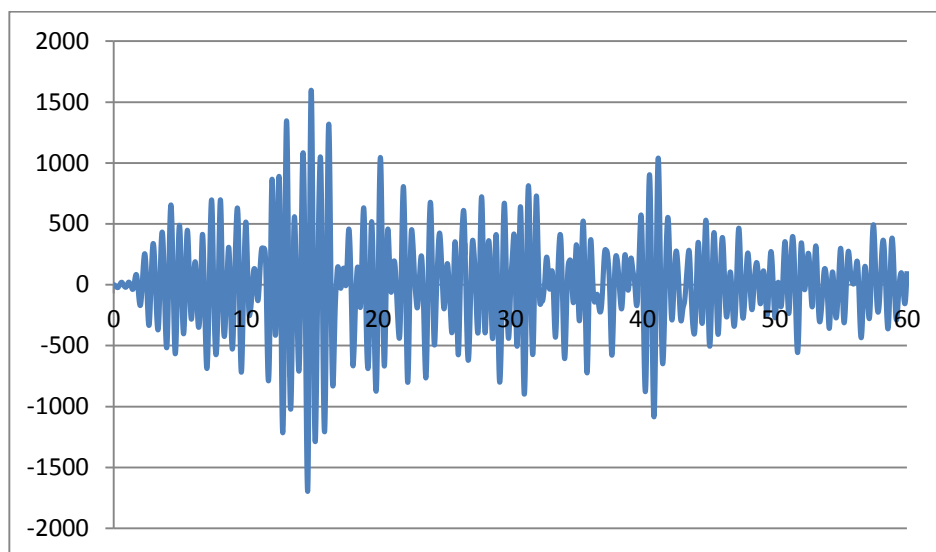
	C1	C2
Axial [KN]	606,50	124,10
Cortante [KN]	364,42	116,13
Momento [KN m]	1597,15	1232,50



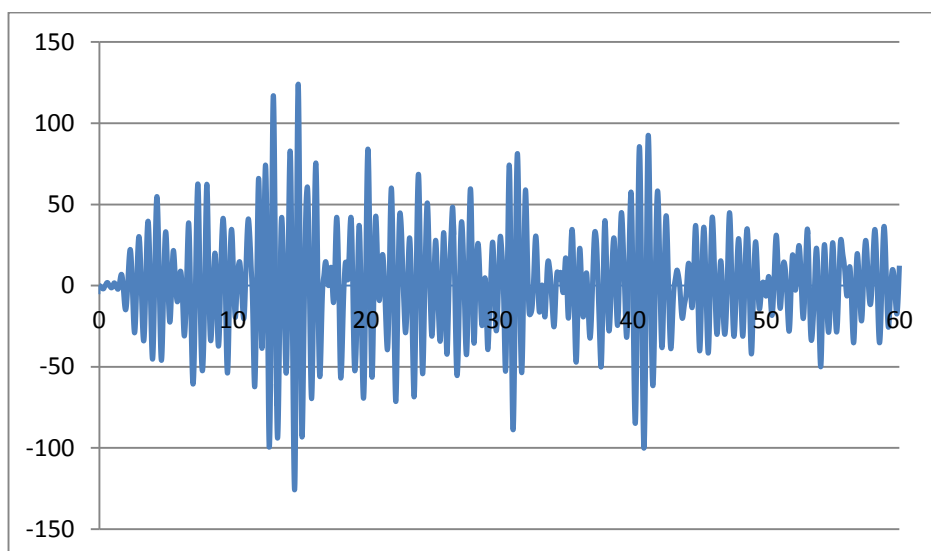
**Figura 48:** Axial columna C1 sin disipadores registro Pedernales



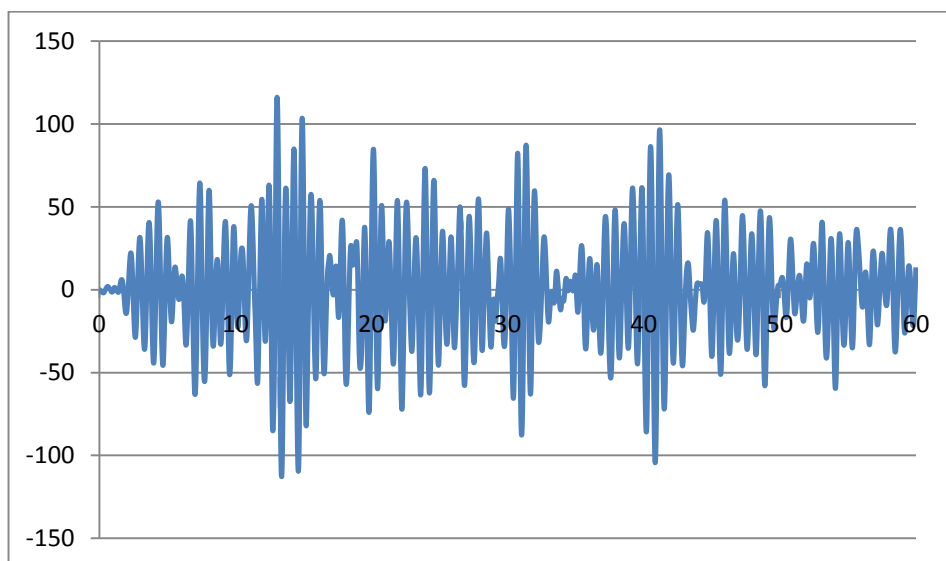
**Figura 49:** Cortante columna C1 sin disipadores registro Pedernales



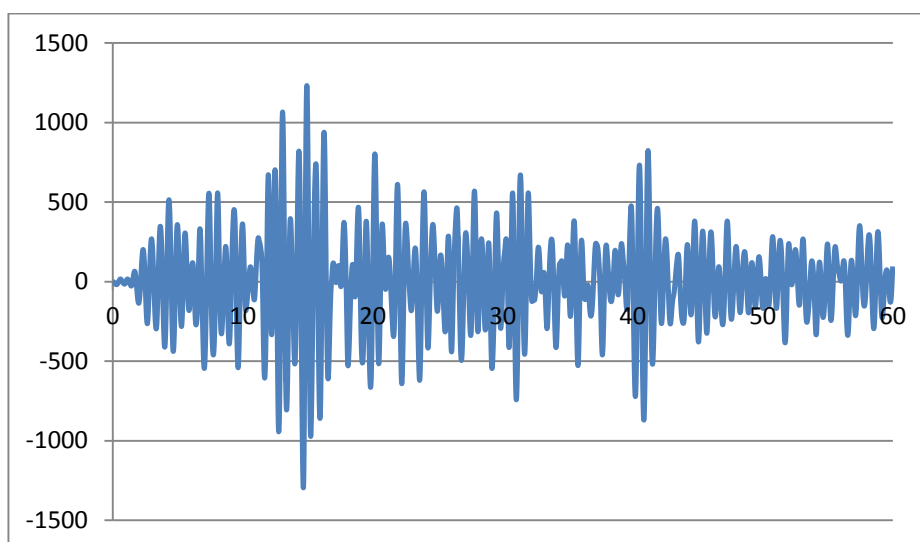
**Figura 50:** Momento columna C1 sin disipadores registro Pedernales



**Figura 51:** Axial columna C2 sin disipadores registro Pedernales



**Figura 52:** Cortante columna C2 sin disipadores registro Pedernales



**Figura 53:** Momento columna C2 sin disipadores registro Pedernales

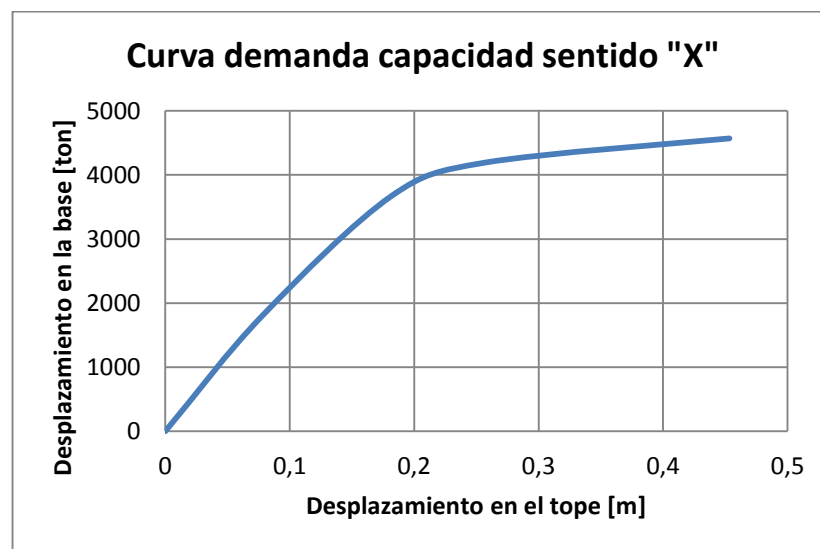
#### 4.4.8. Análisis estático no lineal

##### Análisis de colapso (Push Over)

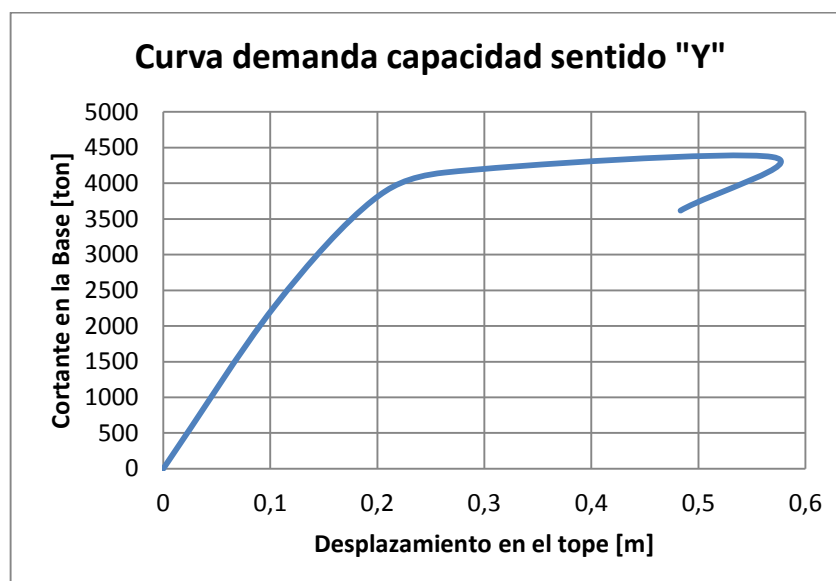
Las rotulas plásticas son indispensables para el análisis no lineal de historia en el tiempo. La recomendación principal es colocar las rotulas plásticas al 0% y 100% de la longitud total del elemento. Las rotulas plásticas se basan en la metodología del FEMA-356 o ASCE 41-13. En vigas domina el momento, M3, y las columnas bajo fuerza axial, biaxial y momento, P-M2-M3.

El análisis el Push Over muestra la curva de demanda capacidad de la estructura. A través del programa comercial, ETABS, se presenta a continuación el análisis estático no lineal en el sentido "X" y "Y".

El análisis de colapso tiene varios criterios de falla en la estructura: la rigidez de la estructura es inestable, el corrimiento en el tope sea menor que el 4% de la altura total y cuando las secciones que concurren a un nudo fallan. Para este análisis se utilizó el control por desplazamiento. En la Figura 54 representa el análisis Push Over de la estructura sin disipadores en el sentido X y la Figura 55 en el sentido Y.



**Figura 54:** Curva de capacidad de la estructura sin disipadores sentido X



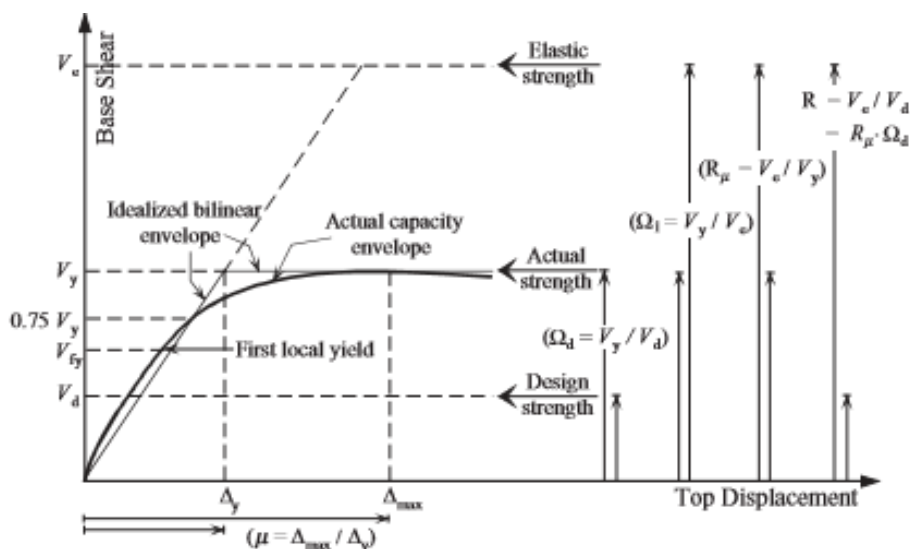
**Figura 55:** Curva de capacidad de la estructura sin disipadores sentido Y

### Método del espectro demanda capacidad

El ATC-19 (1995) establece que el factor de reducción sísmica es el resultado del producto de factor de reducción de ductilidad, sobre resistencia y redundancia.

$$R = R_{\mu}R_{\Omega}R_R$$

En el análisis no lineal, la estructura disipa energía por histéresis. A partir de la aplicación de cargas monotónicas se obtiene la curva de capacidad estructural. En la Figura 54 se presentan la definición del factor por reducción de ductilidad  $R_{\mu}$  y el factor de sobre resistencia  $R_R$  y la definición de la demanda de ductilidad  $\mu$ .



**Figura 56:** Relación entre ductilidad, factor de reducción de ductilidad y sobrerresistencia.

**Fuente:** (Elnashai & Di Sarno, 2008)

La Figura 56 indica las relaciones del factor de reducción por ductilidad de la estructura y sobrerresistencia. La ductilidad del sistema es la relación del desplazamiento máximo y el desplazamiento relacionado al cortante de fluencia, la ductilidad del sistema debe ser mayor a la unidad.

$$R_{\mu} = \frac{V_e}{V_y}; R_{\Omega} = \frac{V_y}{V_d}; \mu = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_y}$$

**Tabla 17.**

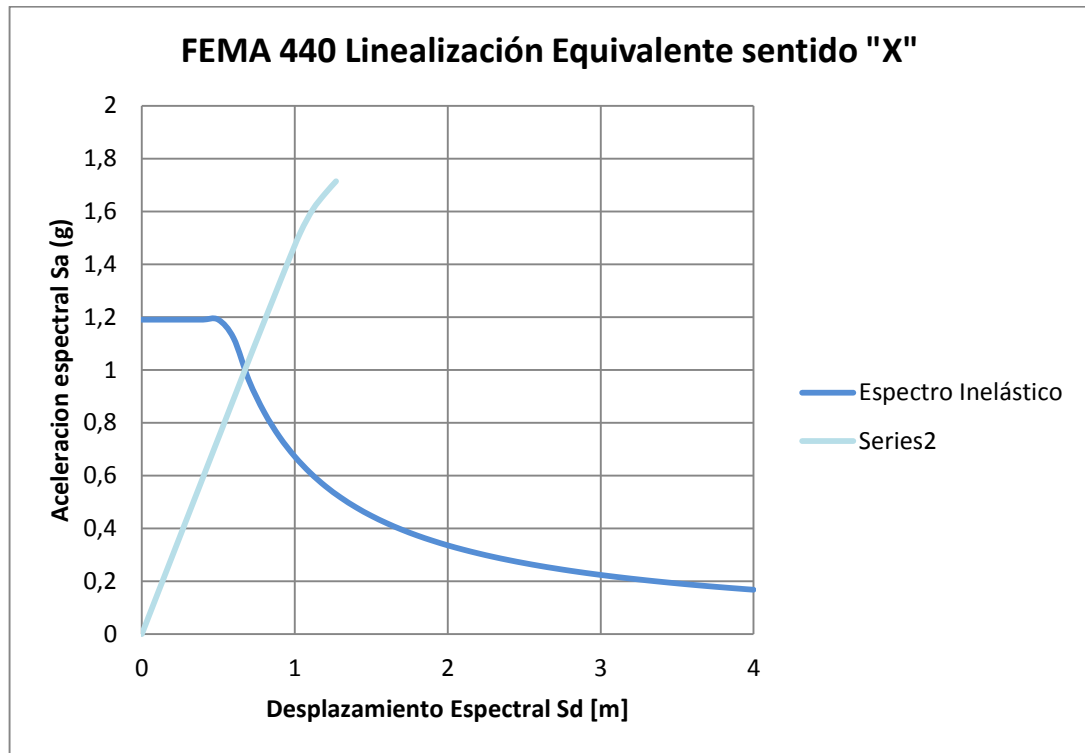


**Parámetros análisis bilineal**

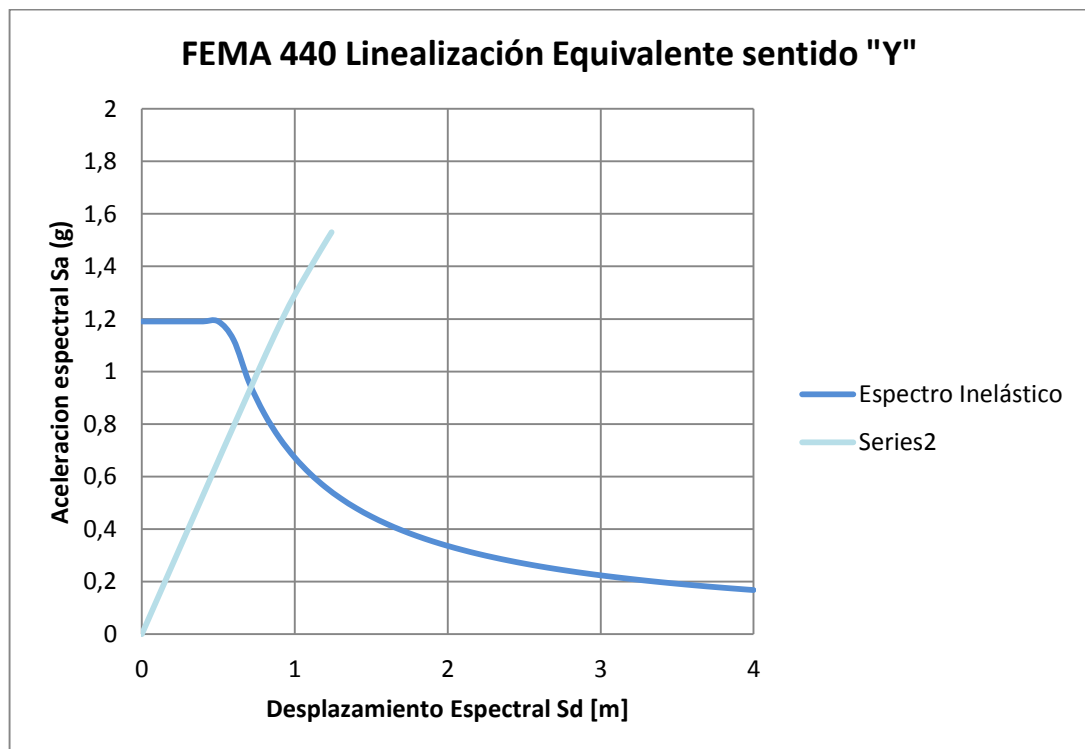
Parámetro	Sentido X	Sentido Y	Definición
Vd [KN]	547,33	547,33	Cortante de diseño
Vy [KN]	2702,02	2162,80	Cortante de fluencia
Ve [KN]	3334,95	2941,57	Cortante elástico
$\Delta d$ [m]	0,0510	0,0630	Desplazamiento relacionado al cortante de diseño
$\Delta y$ [m]	0,2503	0,2487	Desplazamiento relacionado al cortante de fluencia
$\Delta_{max}$ [m]	0,3099	0,3426	Desplazamiento último de la estructura
R $\Omega$	4,94	3,95	Factor de reducción de sobrerresistencia Vy/Vd
R $\mu$	1,23	1,36	Factor de reducción por ductilidad Ve/Vy
RR	1	1	Factor de reducción de redundancia
R elástico	8	8	Factor de reducción NEC 15
R	6,09	5,37	Factor de reducción calculado $R = R_{\mu} R_{\Omega} R_R$
$\mu$	1,24	1,38	Ductilidad $\Delta_{max}/\Delta y$

CONTINÚA **Método del coeficiente de desplazamiento**

El análisis estático no lineal define el punto de desempeño, que indica el desplazamiento máximo de la estructura ante el sismo de diseño. La Figura 55 muestra las coordenadas del punto de desempeño, a través de la intersección del espectro de demanda y de capacidad.



**Figura 57:** Punto de desempeño sentido X



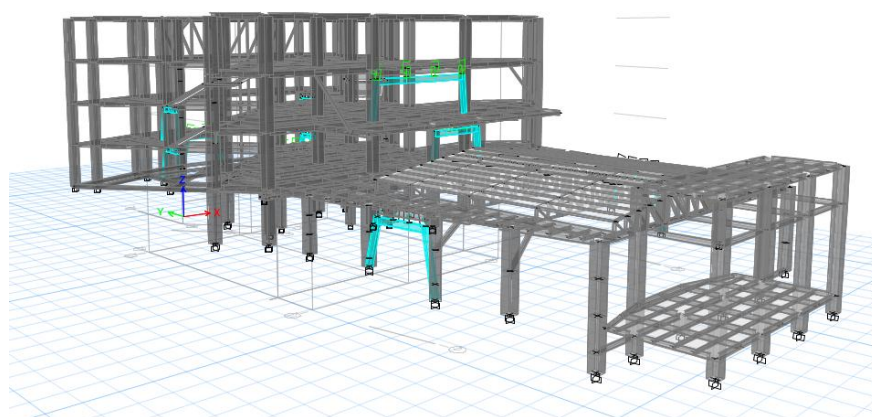
**Figura 58:** Punto de desempeño sentido Y

**Tabla 18.**  
**Punto de desempeño**

	Sentido X	Sentido Y
Sd [m]	0,60	0,75
Sa [g]	0,94	1,02
V [tonf]	3330,53	2959,88

#### 4.5. Análisis de la estructura con disipadores Shear Link Bozzo (SLB)

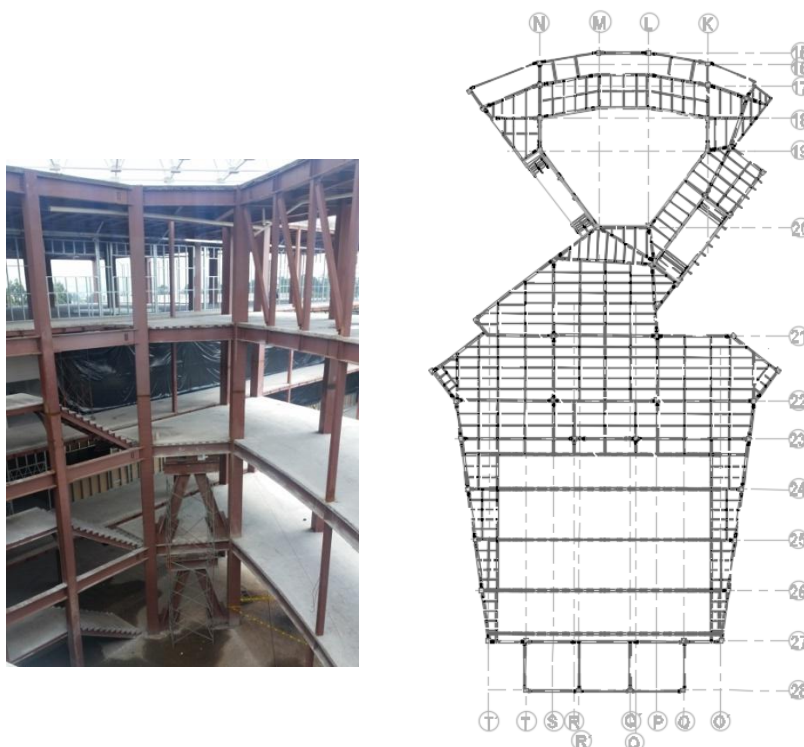
La estructura denominada Bloques 4 y 5 del Nuevo Centro de Investigaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas que se encuentra hasta el mes de Julio en etapa de construcción se ha diseñado con la disposición de los disipadores de energía mostrados en la Figura 59, en este acápite se plantea realizar el análisis estructural de la estructura construida y posteriormente se propondrán propuestas para mejorar su comportamiento.



**Figura 59:** Esquema tridimensional del bloque 4 y 5 del Nuevo Centro de Investigaciones con disipadores Shear Link Bozzo

**Fuente:** (ETABS, 2016)

La estructura posee 39 disipadores de energía SLB 40\_5 ubicados a diferentes niveles sobre diagonales tipo Chevrón, la Figura 60 muestra la disposición de los disipadores en el pórtico N de la edificación.



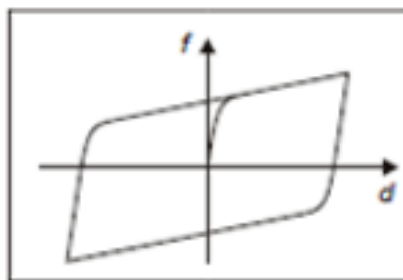
**Figura 60:** Disposición de disipadores pórtico N en bloque 4 y 5 del Nuevo Centro de Investigaciones

Los disipadores están ubicados en los pórticos N, K, T', O', 15, 20, 22 y 23. El Anexo 1 se muestra la disposición de los disipadores en cada uno de los ejes. En la Figura 61 se muestra el esquema en planta del nivel N+4.94.

**Figura 61:** Esquema en planta N+4.94 del bloque 4 y 5 del Nuevo Centro de Investigaciones

#### 4.5.1. Propiedades de disipadores de energía Shear Link Bozzo

El diseño de los disipadores SLB se basa en la respuesta no lineal por medio de elementos no lineales tipo link. Se utiliza el modelo plástico de Wen, propuesto en 1976, que simula las características del comportamiento histerético de los disipadores metálicos (Figura 62).



**Figura 62:** Comportamiento Histerético modelo plástico Wen  
**Fuente:** (Computers and Structures Inc., 2016)

### Prediseño dispositivos Shear Link Bozzo (SLB)

Es necesario realizar el análisis dinámico modal convencional agregando diagonales sobre las cuales se colocara el disipador y elementos tipo W de 200x100x6x5 con ello se puede obtener el cortante inicial para un prediseño. La Tabla 19 establece los valores de la Fuerza de plastificación ( $F_y$ ) para una adecuada selección del dispositivo Shear Link Bozzo (SLB).

### Asignación de parámetros de disipadores con características de laboratorio

Los elementos tipo link se crean en función de la dirección que se va a ubicar el disipador, la dirección U2, rigidez lateral, pertenece a las propiedades de los disipadores, la dirección U1 es la rigidez axial.

General							
Link Property Name	<input type="text" value="SLB40_5-X"/>			Link Type	Plastic (Wen)		
Total Mass and Weigh							
Mass	<input type="text"/>	ton*s <sup>2</sup> /m	Rotational Inertia 1	<input type="text"/>	ton <sup>2</sup> *m*s <sup>2</sup>		
Weight	<input type="text"/>	tonf	Rotational Inertia 2	<input type="text"/>	tonf*s <sup>2</sup> *m		
			Rotational Inertia 3	<input type="text"/>	tonf*s <sup>2</sup> *m		
Directional Popieties							
Direction	Fixed	NonLinear	Propieties	Direction	Fixed	NonLinear	Propieties
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="Modify/Show for U1..."/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="Modify/Show for U1..."/>
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text" value="Modify/Show for U2..."/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="Modify/Show for U2..."/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="Modify/Show for U3..."/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="Modify/Show for U3..."/>

**Figura 63:** Propiedades de elementos SLB 40-5 tipo Link

Las propiedades principales de los elementos tipo link en el rango no lineal, es la *Rigidez lineal/no lineal (Effective Stifness)* que es igual a la rigidez axial de los

elementos conectores (QuakeTek, 2016), la *Fuerza de Plastificación (Yield Strength)* es la capacidad del disipador, con la que disipara energía, el *Coefficiente de Plastificación (Post Yield Stiffness Ratio)* debe estar cerca del valor 0.0001 y el *Exponente de Plastificación (Yielding Exponent)* indica el cambio repentino del comportamiento elástico e inelástico del dispositivo se utilizan generalmente valores entre 0 y 20.

Las propiedades que se deben asignar en cada dirección dependen de las propiedades lineales en este caso el esfuerzo efectivo  $kI$  y las propiedades no lineales como su rigidez  $kI$ , el límite elástico  $f_y$  y el coeficiente de plastificación de plastificación es la relación entre la rigidez post-plastificación y la rigidez inicial  $k2/k1$ ; En la Figura 64 muestra las propiedades para el disipador SLB 40\_5 utilizados en la estructura de análisis.

Link/Support Directional Properties		
<b>Identification</b>		
Property Name	<input type="text" value="SLB40_5-X"/>	
Direction	<input type="text" value="U2"/>	
Type	<input type="text" value="Plastic (Wen)"/>	
Nonlinear	<input type="text" value="Yes"/>	
<b>Lineat Propoerties</b>		
Effective Stiffness	<input type="text" value="10777400"/>	Kn/m
Effective Damping	<input type="text" value="0"/>	Kn*s/m
<b>Shear Deformation Location</b>		
Distance from End-J	<input type="text" value="0"/>	m
<b>Nonlinear Properties</b>		
Stiffnes	<input type="text" value="10777400"/>	Kn/m
Yield Stength	<input type="text" value="614,29"/>	Kn
Post Yield Stiffness Ratio	<input type="text" value="0,002951"/>	
Yielding Exponent	<input type="text" value="1"/>	

**Figura 64:** Propiedades de los disipadores en la dirección de análisis

Los disipadores trabajan mediante un análisis dinámico no lineal (Figura 65), ETABS posee un modelo de resolución denominado Fast Nonlinear Analysis (FNA) desarrollado por Wilson. Un método eficiente, utilizado para sistemas elásticos que poseen un número limitado de elementos no lineales (Computers and Structures Inc., 2016).

**Load Case Data**

**General**

Load Case Name: TH Pedernales

Load Case Type/Subtype: Time History: Nonlinear Modal (FNA)

Exclude Objects in this Group: Not Applicable

Mass Source: MsScr1

**Initial Conditions**

Zero Initial Conditions-Start from Unstressed State

Continue from State at End of Nonlinear Case (Loads at End of Case ARE Included)

Non Linear Case    DEAD-no lineal

**Loads Applied**

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Acceleration	U1	Pedernales E	9,81
Acceleration	U2	Pedernales N	9,81

**Other Parameters**

Modal Load Case: Modal 1

Number of Output Time Steps: 60

Output Time Step Size: 0,02

Modal Damping: Mass 0,1903 Stiff 0,0021

Nonlinear Parameters: User Defined

**Figura 65:** Propiedades Tiempo Historia en el tiempo no lineal

Las propiedades de los disipadores Shear Link Bozzo están descritas en la Tabla 19 permitirán definir las propiedades no lineales al elemento tipo Link. Donde  $k_1$  es la rigidez inicial,  $k_2$  rigidez post-plastificación,  $d_y$  desplazamiento inicial de plastificación,  $f_y$  fuerza inicial de plastificación,  $D_y$  desplazamiento de plastificación,  $F_y$  fuerza de plastificación,  $F_{max}$  1.559 cm de fuerza de desplazamiento hacia  $D_a$ ,  $D_a$  desplazamiento del elemento disipador y  $E_d$  representa la energía disipada (Bozzo, Gaxiola, & Gonzales, 2016).

**Tabla 19.*****Propiedades de los disipadores Shear Link Bozzo***

Device	e	K1	K2	fy	Dy	Fy	Fmax	Da	Ed
		(KN/cm)	(KN/cm)	(kN)	(mm)	(kN)	(kN)	(mm)	(kN*cm)
SL5_2	2	546,1	14,4	13,65	0,463	25,27	47,32	39,93	54
SL5_3	3	663,5	13,4	21,30	0,549	36,40	56,59	89,87	69
SL5_4	4	763,8	11,8	27,27	0,628	47,96	65,26	159,83	84
SL5_5	5	834,3	8,8	29,78	0,716	59,76	72,93	249,81	97
SL10_2	2	1273,8	22,1	31,85	0,437	55,68	89,56	29,81	109
SL10_3	3	1644,4	21,6	45,55	0,419	80,67	113,62	67,10	146
SL10_4	4	1979,1	20,1	60,16	0,540	106,86	136,91	119,35	182
SL10_5	5	2216,7	17,4	73,26	0,600	133,00	159,27	186,45	216
SL15_2	2	2285,9	22,4	57,15	0,567	129,60	163,04	20,29	216
SL15_3	3	2929,6	23,3	78,51	0,565	165,55	200,32	45,66	271
SL15_4	4	3493,5	22,9	99,91	0,573	200,20	236,30	81,18	325
SL15_5	5	3856,1	22,3	123,78	0,618	238,33	271,48	126,85	377
SL20_2	2	2971,2	24,1	74,28	0,536	159,18	195,36	15,96	263
SL20_3	3	3980,0	24,9	106,66	0,527	209,68	247,72	35,92	339
SL20_4	4	4719,3	25,8	134,97	0,553	261,00	298,88	63,85	414
SL20_5	5	5262,7	24,0	168,93	0,596	313,46	349,12	99,77	489
SL25_2	2	3660,6	24,3	91,51	0,514	188,18	224,74	14,44	305
SL25_3	3	4859,0	25,2	130,22	0,524	254,52	292,09	32,50	404
SL25_4	4	5921,3	24,7	169,35	0,544	321,82	358,05	57,79	501
SL25_5	5	6613,5	24,5	212,29	0,588	389,20	423,17	90,30	597
SL30_2	2	4353,6	24,5	108,84	0,497	216,56	253,78	13,75	348
SL30_3	3	5791,0	25,5	155,20	0,523	297,22	336,02	30,93	468
SL30_4	4	7129,9	25,4	203,91	0,531	378,46	416,81	54,99	587
SL30_5	5	7981,8	25,2	256,21	0,575	459,17	496,73	85,92	704
SL40_2	2	5820,4	30,9	145,41	0,490	285,12	331,02	14,02	455
SL40_3	3	7778,5	32,0	208,35	0,507	394,44	442,74	31,55	619
SL40_4	4	9621,2	33,1	275,17	0,532	503,33	553,98	66,90	781
<b>SL40_5</b>	<b>5</b>	<b>10777,4</b>	<b>31,8</b>	<b>345,95</b>	<b>0,570</b>	<b>614,29</b>	<b>662,15</b>	<b>104,53</b>	<b>941</b>
SL50_2	2	7223,6	32,9	180,59	0,473	342,00	301,08	13,40	542
SL50_3	3	9703,1	35,9	260,04	0,495	480,00	533,58	30,16	749
SL50_4	4	12109,3	32,7	346,33	0,514	622,22	671,76	53,62	954
SL50_5	5	13566,7	31,0	435,49	0,563	764,00	810,65	83,79	1160

**Revisión de fuerza cortante en disipadores SLB**

El dispositivo SL40\_5 con un Fy de 614.29 KN fue asignado tras el prediseño a partir de la fuerza cortante. Después del análisis se debe analizar que la fuerza máxima a la que está sometida el dispositivo con ello se puede utilizar un dispositivo de mayor o menor resistencia.



#### 4.5.2. Derivas de piso de la estructura con disipadores Shear Link Bozzo

Se presentan a continuación las derivas inelásticas de la estructura al incluir disipadores, con el análisis espectral y el análisis de historia en el tiempo no lineal, el más aproximado al comportamiento real de la estructura con disipadores. En la Tabla 20 se muestra las derivas de piso al incluir disipadores en la estructura.

**Tabla 20.**  
*Derivas de piso de la estructura con disipadores SLB*

Pisos	Deriva %							
	Análisis espectral		Análisis Tiempo Historia					
	X	Y	Pedernales		Manta		Quito	
X			Y	X	Y	X	Y	
<b>N +19.76</b>	1,08%	1,27%	0,91%	0,99%	1,29%	1,12%	0,88%	1,13%
<b>N +14.82</b>	1,09%	1,13%	0,86%	0,86%	1,27%	1,03%	0,88%	1,04%
<b>N +9.88</b>	0,89%	0,82%	0,68%	0,67%	1,03%	0,75%	0,73%	0,77%
<b>N +4.94</b>	0,21%	0,18%	0,19%	0,14%	0,22%	0,16%	0,16%	0,16%

#### 4.5.3. Desplazamientos máximos de la estructura con disipadores Shear Link Bozzo

La Tabla 21 muestra el valor de los desplazamientos para el análisis espectral y la historia en el tiempo de la estructura al incluir disipadores SLB.

**Tabla 21.**  
*Desplazamientos de piso de la estructura con disipadores SLB*

Pisos	Desplazamientos [m]							
	Análisis espectral		Análisis Tiempo Historia					
	X	Y	Pedernales		Manta		Quito	
X			Y	X	Y	X	Y	
<b>N +19.76</b>	0,16	0,17	0,17	0,17	0,26	0,21	0,18	0,21
<b>N +14.82</b>	0,11	0,11	0,11	0,12	0,17	0,13	0,12	0,14
<b>N +9.88</b>	0,05	0,05	0,13	0,08	0,11	0,09	0,11	0,09
<b>N +4.94</b>	0,01	0,01	0,05	0,12	0,07	0,14	0,06	0,13

La principal finalidad del uso de los disipadores es controlar la energía entregada por fuerzas de origen dinámico, protegiendo y reduciendo los daños en elementos, si bien es cierto aportan a controlar el desplazamiento de la estructura no es la función específica del uso de estos dispositivos.

#### 4.5.4. Periodos de vibración de la estructura

Los periodos de vibración dependen de la rigidez de la estructura y la matriz de masas, en este caso se ve que existe una reducción en los modos de vibración en un promedio del 9% en el periodo fundamental de vibración, lo que indica que al usar los disipadores la estructura adquiere una mayor rigidez.

**Tabla 22.**

#### *Desplazamientos de piso de la estructura con disipadores SLB*

Modo	Periodo [seg]
1	0,64
2	0,63
3	0,509
4	0,509
5	0,509
6	0,509
7	0,509
8	0,509
9	0,494
10	0,312
11	0,284
12	0,246
13	0,245
14	0,245
15	0,243

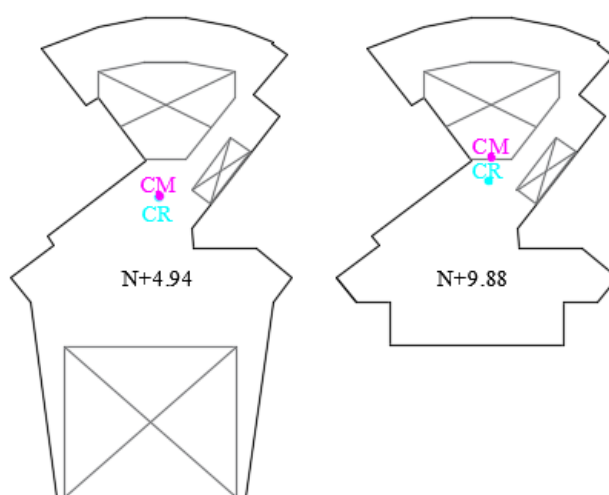
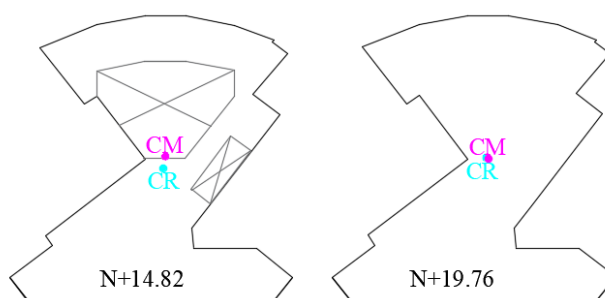
#### 4.5.5. Análisis de la torsión en planta de la estructura con disipadores Shear

##### **Link Bozzo**

El uso de los disipadores de energía modifica el centro de rigidez por las características que estos dispositivos poseen y su ubicación. En este caso se ha disminuido la distancia entre el centro de masa y el centro de rigidez por lo que se generara menor momento de torsión. En la Tabla 23 se muestra el centro de rigidez tras el uso de disipadores de energía y la excentricidad en cada sentido. Además, se muestran las Figuras 66 y 67 que muestran la posición del centro de masas y rigidez en cada planta.

**Tabla 23.****Centro de masa y rigidez estructura con disipadores**

Piso	XCM [m]	YCM [m]	XCR[m]	YCR[m]	Ex[m]	Ey[m]
N +19.76	20,32	6,97	19,95	6,78	0,37	0,19
N +14.82	20,25	6,99	19,92	5,19	0,33	1,8
N +9.88	20,09	4,63	19,86	3,27	0,23	1,36
N +4.94	19,25	0,84	19,18	0,86	0,07	0,02

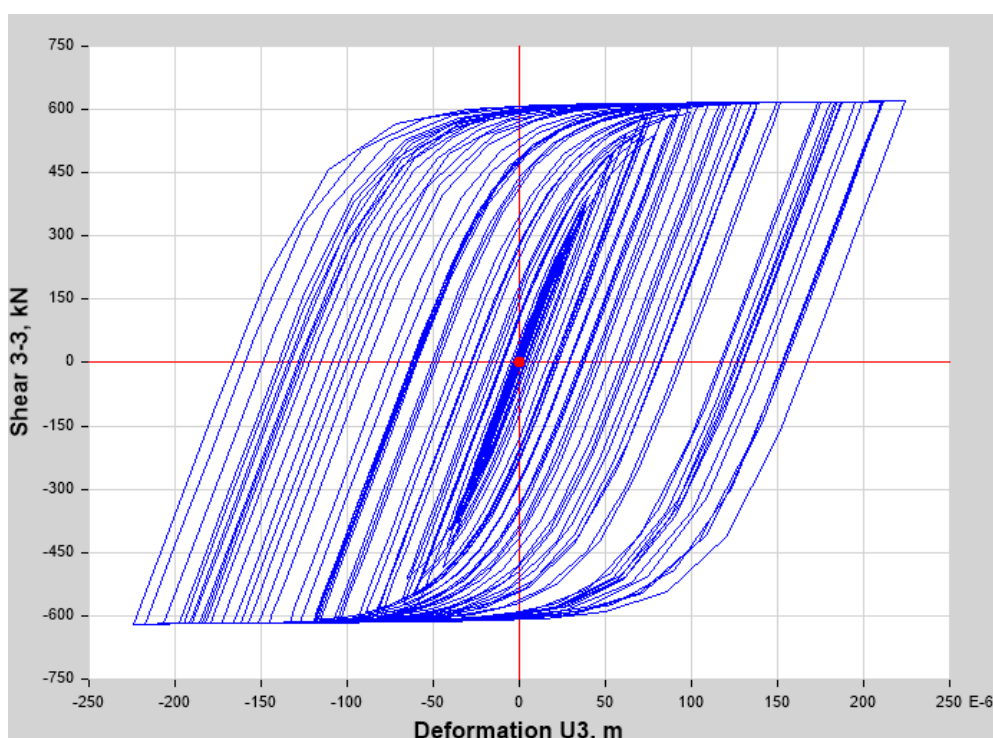
**Figura 66:** Centro de masas y rigidez estructura con disipadores SLB planta N+4.94 y N+9.88**Figura 67:** Centro de masas y rigidez estructura con disipadores SLB planta N+14.82 y N+19.76

#### 4.5.6. Histéresis de los disipadores Shear Link Bozzo

Los disipadores se han analizado con la historia no lineal en el tiempo, como resultado se obtienen los diagramas de histéresis que relacionan la fuerza cortante y la

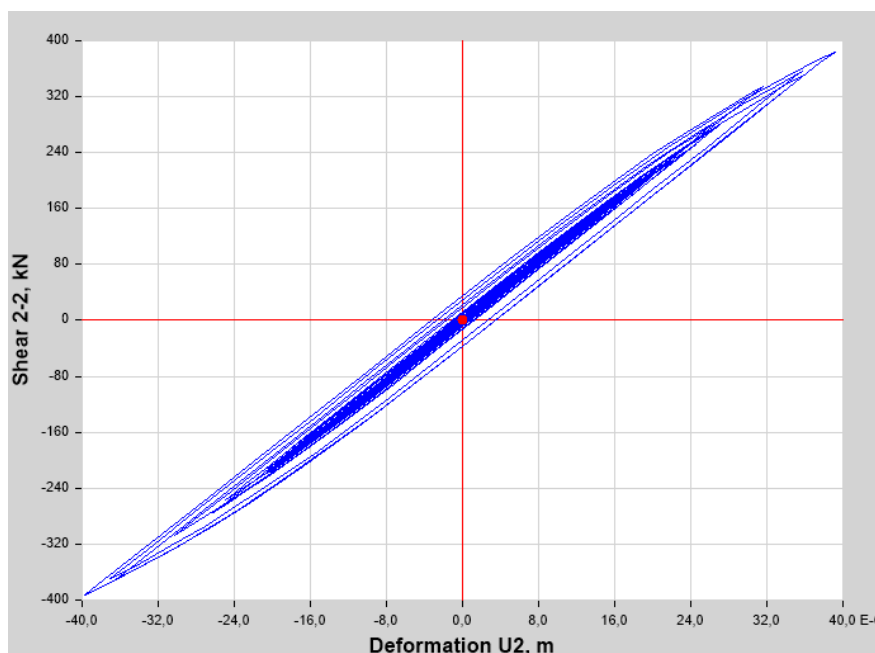
deformación. Estos mecanismos disipan diferente magnitud de entrada de energía dependiendo de cada sismo, así el sismo de Pedernales es el que mayor daño causó a los disipadores. La Figura 68 representa el máxima fuerza cortante de los disipadores en el sismo de Pedernales, con una fuerza de plastificación de 619.61 KN.

En el Anexo 2 se muestra la fuerza de plastificación máxima de todos los disipadores para cada historia en el tiempo y su diagrama de histéresis.



**Figura 68:** Histéresis SLB 40-5, registro Pedernales elemento K13  
**Fuente:** (ETABS, 2016)

El sismo de Quito por sus componentes en la aceleración muestra la menor deformación para los elementos disipadores como se aprecia en la Figura 69, con una fuerza de plastificación de 462,16 KN, esto nos muestra que el disipador no llegó al punto de fluencia.



**Figura 69:** Histéresis SLB 40-5, registro Quito elemento K4  
**Fuente:** (ETABS, 2016)

#### 4.5.7. Respuesta energética con disipadores Shear Link Bozzo

El uso de disipadores muestra en la respuesta energética de la estructura la cantidad de energía de entrada por el sismo que ha sido absorbida por los disipadores como se muestra en la Figura 68, la línea anaranjada muestra la cantidad de energía que absorben los disipadores, en este caso no se disipa la cantidad de energía que se espera por la alta aceleración del sismo de Pedernales y el hecho de que algunos disipadores no llegan al punto de fluencia, por ello el objetivo de este trabajo es sacar conclusiones para mejorar el comportamiento energético de los disipadores. Este análisis se realizó dentro de los 60 primeros segundos del análisis ya que los registros mostraron una aceleración elevada.

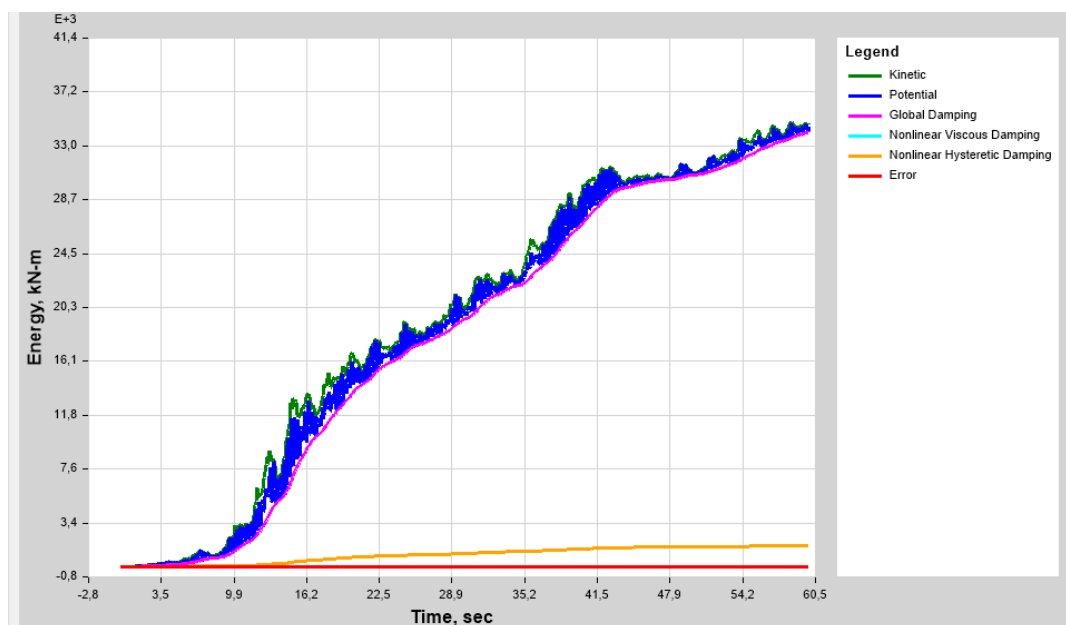
Los resultados energéticos ahora muestra la energía de amortiguamiento histérico no lineal, la energía absorbida por los disipadores, esta energía se calcula midiendo el área que genera cada ciclo de histéresis que relaciona el desplazamiento y la deformación.

La Tabla 24 muestra la respuesta energética para la estructura con disipadores. La energía de ingreso puede incrementarse en un pequeño rango al incluir los dispositivos de disipación de energía, sin embargo el principal parámetro de control

en la respuesta energética es la energía disipada por la inelasticidad en los elementos estructurales, mostrada en la energía histerética obtenida, este parámetro indica el daño estructural. Al incluir los disipadores la energía de amortiguamiento modal se reduce, mientras se presenta la energía de amortiguamiento histerético inexistente en el análisis previo.

**Tabla 24.**  
**Respuesta energética estructura con disipadores**

Registro de historia en el tiempo			
Tipo de energía	Pedernales	Quito	Manta
Energía de entrada [KN-m]	4402,43	4568,07	4035,91
Energía Cinética [KN-m]	402,42	432,40	445,64
Energía Potencial [KN -m]	427,90	400,55	541,34
Energía de Amortiguamiento Modal [KN -m]	1360,44	1385,33	1023,34
Energía de Amortiguamiento Histerético no lineal [KN -m]	35,93	40,17	38,26
Energía disipada por dispositivos SLB[KN -m]	3006,06	3142,57	29,7431



**Figura 70:** Respuesta energética con disipadores SLB 40\_5  
**Fuente:** (ETABS, 2016)

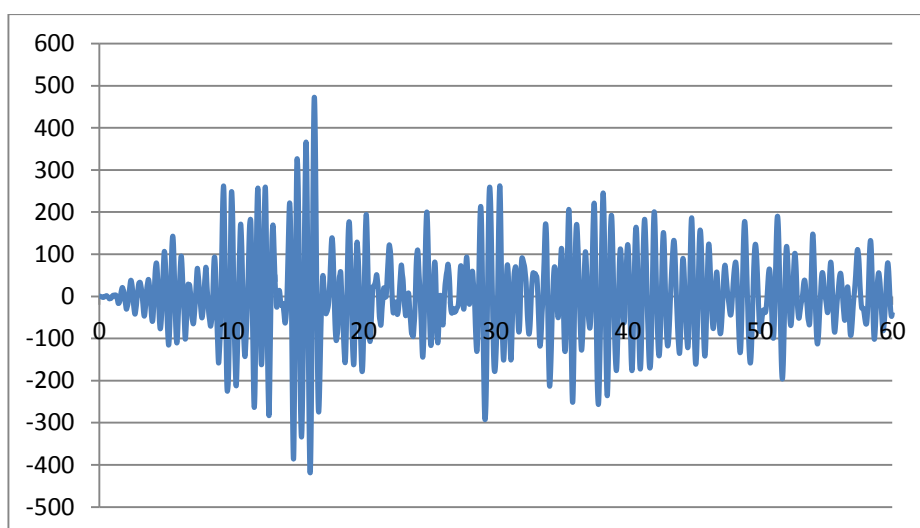
#### 4.5.8. Redundancia estructural con disipadores

Existe un efecto que favorable en la estructura con el uso de los disipadores de energía, ya que existe una mejor distribución del comportamiento inelástico, así se obtendrá mecanismos de colapso estable. El número de contravientos influirá directamente en la resistencia y en la capacidad de deformación de la estructura.

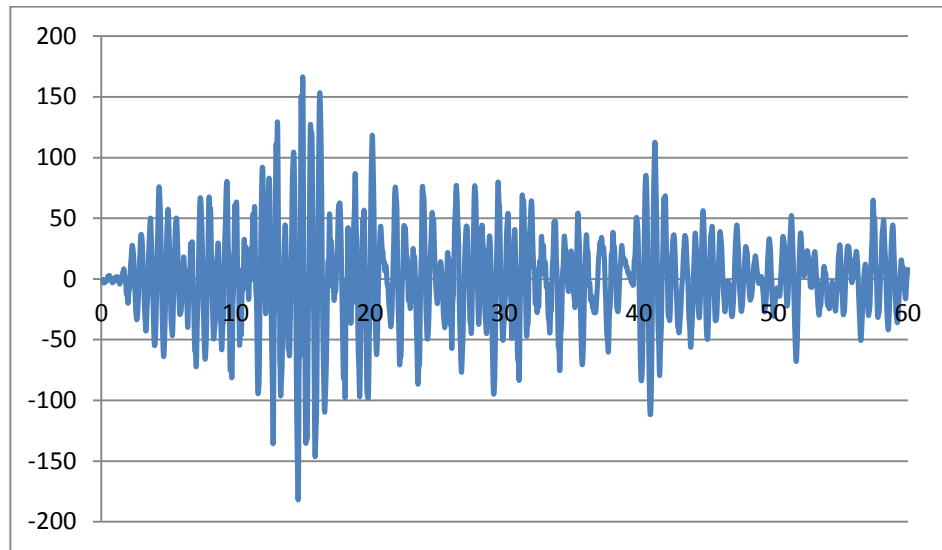
El uso de disipadores de energía redistribuyen las fuerzas actuantes en los elementos estructurales, por ello es necesario comparar las cargas que soporta un elemento estructural antes y después del uso de disipadores de energía. Se muestran en la Tabla 25 los resultados de la fuerza axial, cortante y momento de las columnas analizadas en el numeral 3.4.7 de este trabajo con la finalidad de mostrar la disminución de la magnitud de las cargas actuantes sobre los elementos estructurales.

**Tabla 25.**  
*Cargas actuantes sobre la columna*

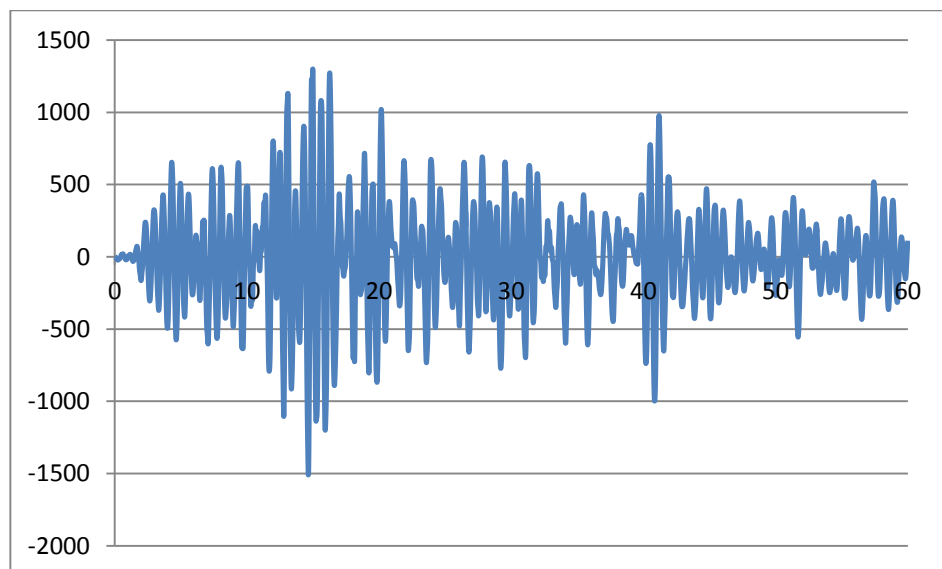
	C1	C2
Axial [Ton]	472,56	88,33
Cortante [Ton]	166,49	99,35
Momento [Ton m]	1299,72	1052,99



**Figura 71:** Axial columna C1 con disipadores SLB registro Pedernales

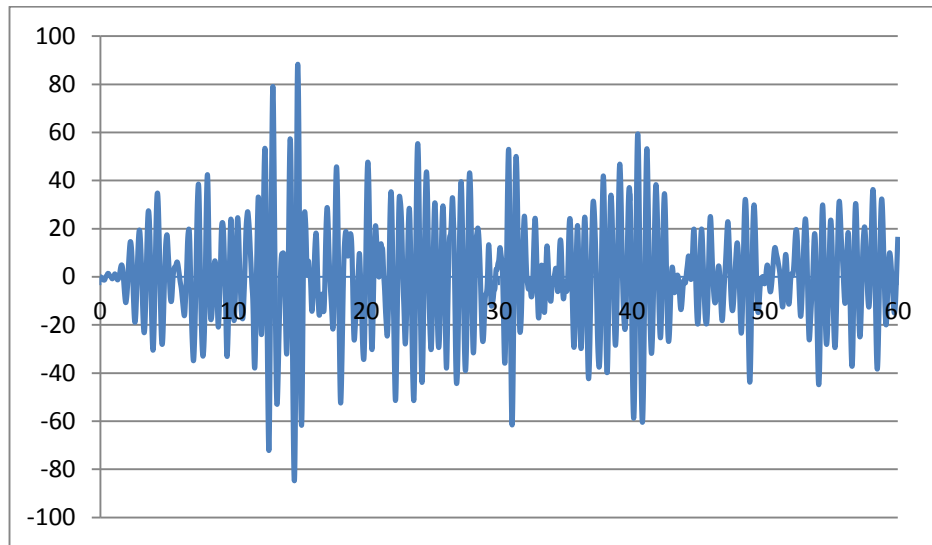


**Figura 72:** Cortante columna C1 con disipadores SLB registro Pedernales

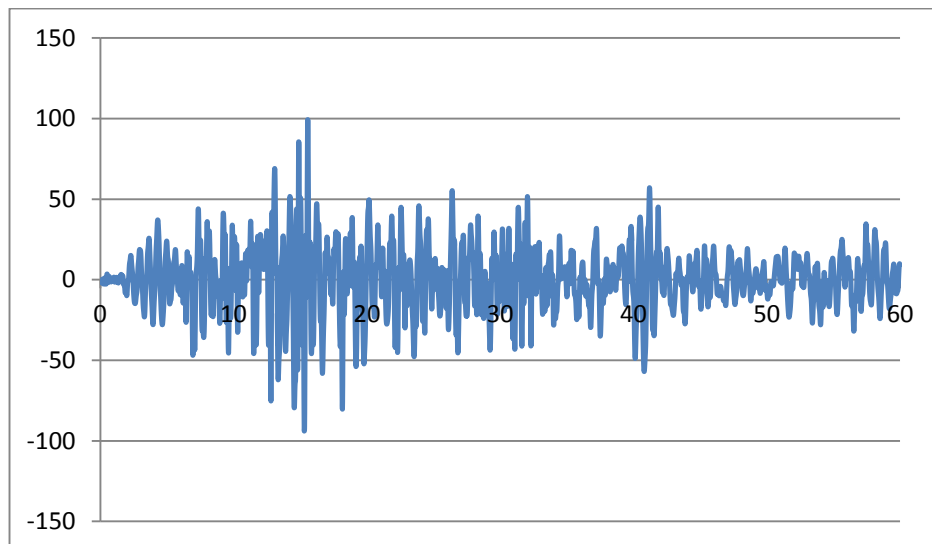


**Figura 73:** Momento columna C1 con disipadores SLB registro Pedernales

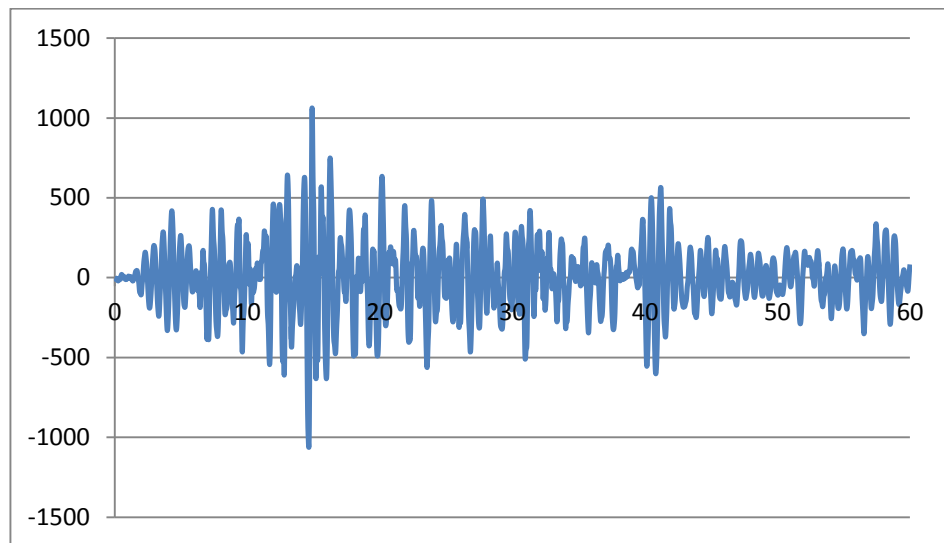




**Figura 74:** Axial columna C2 con disipadores SLB registro Pedernales



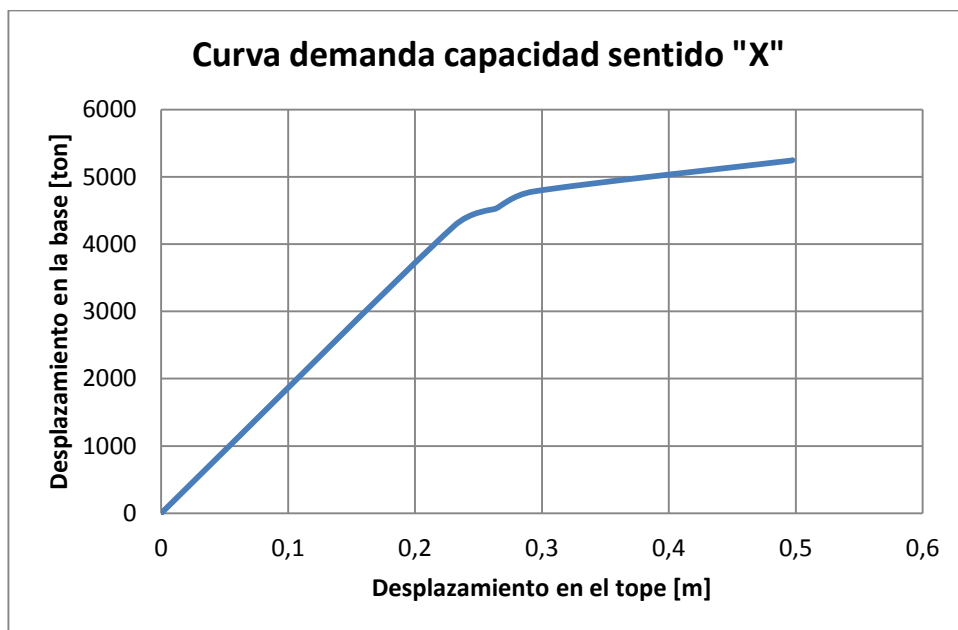
**Figura 75:** Cortante columna C2 con disipadores SLB registro Pedernales



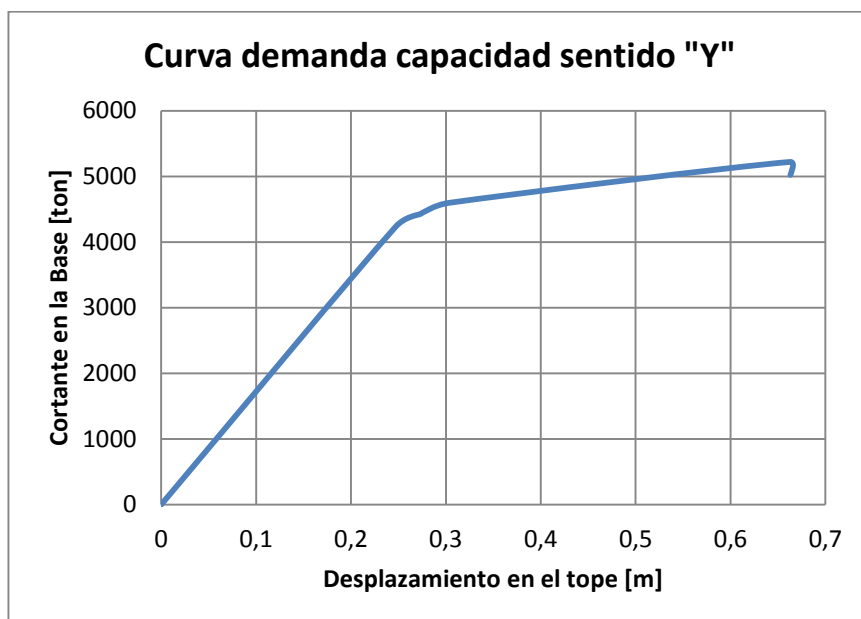
**Figura 76:** Momento columna C2 con disipadores SLB registro Pedernales

#### 4.5.9. Análisis estático no lineal

##### Análisis de colapso (Push Over)



**Figura 77:** Curva de capacidad estructura con disipadores SLB sentido “X”



**Figura 78:** Curva de capacidad estructura con disipadores sentido "Y"

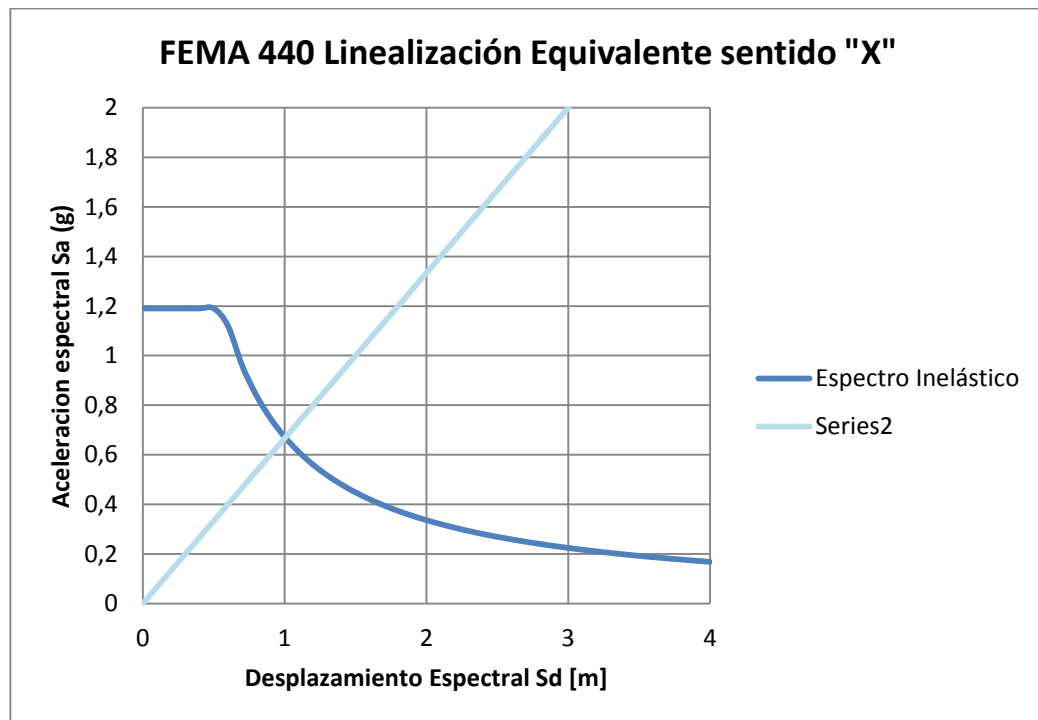
### Método del espectro demanda capacidad

**Tabla 26.**

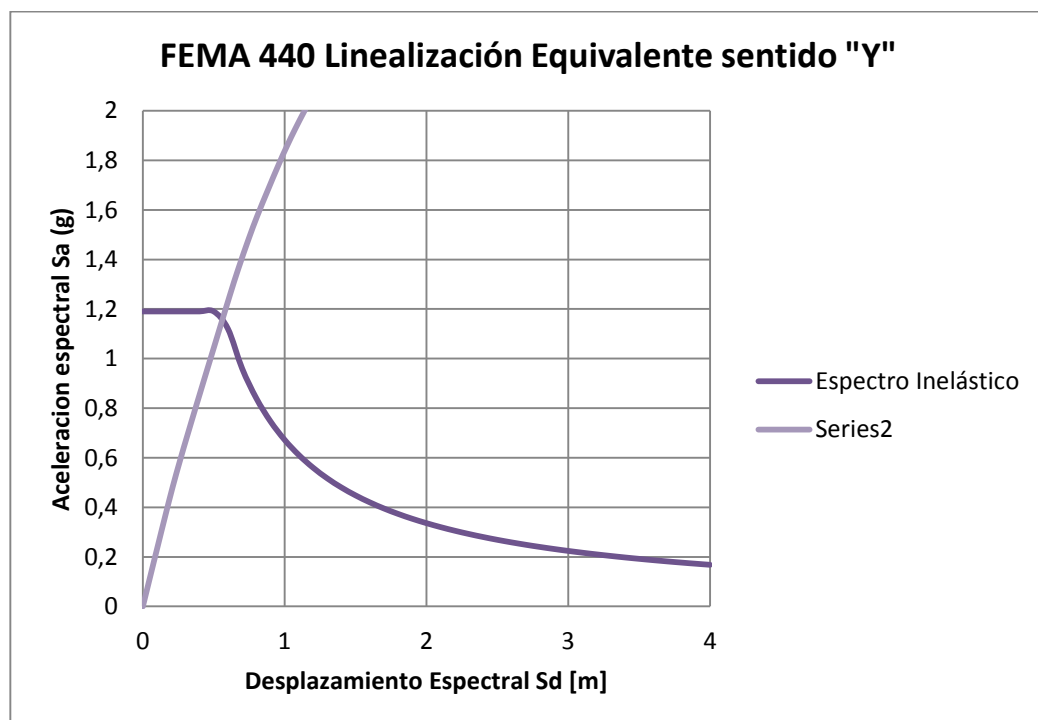
**Parámetros análisis bilineal**

Parámetro	Sentido X	Sentido Y	Definición
Vd [KN]	551,71	551,71	Cortante de diseño
Vy [KN]	1606,92	1196,98	Cortante de fluencia
Ve [KN]	3432,84	3029,28	Cortante elástico
$\Delta_d$ [m]	0,0480	0,0552	Desplazamiento relacionado al cortante de diseño
$\Delta_y$ [m]	0,1286	0,1106	Desplazamiento relacionado al cortante de fluencia
$\Delta_{max}$ [m]	0,2891	0,3108	Desplazamiento último de la estructura
$R_\Omega$	2,91	2,17	Factor de reducción de sobrerresistencia $V_y/V_d$
$R_\mu$	2,14	2,53	Factor de reducción por ductilidad $V_e/V_y$
RR	1	1	Factor de reducción de redundancia
R elástico	8	8	Factor de reducción NEC 15
R	6,22	5,49	Factor de reducción calculado $R = R_\mu R_\Omega R_R$
$\mu$	2,25	2,81	Ductilidad $\Delta_{max}/\Delta_y$

### Método del coeficiente de desplazamiento



**Figura 79:** Punto de desempeño sentido X



**Figura 80:** Punto de desempeño sentido Y

**Tabla 27.*****Punto de desempeño***

	Sentido X	Sentido Y
Sd [m]	0,95	0,55
Sa [g]	0,64	1,14
V [Ton]	3529,72	3220,94

**4.6. Análisis de la estructura con disipadores TADAS**

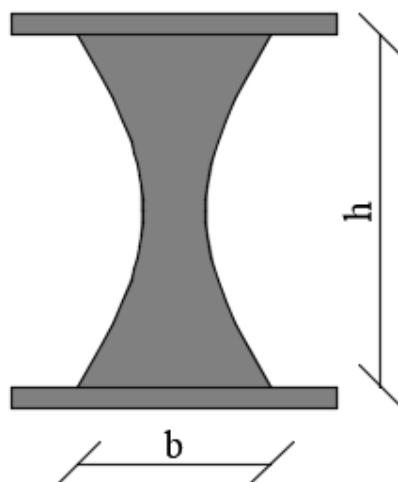
Existen varios tipos de disipadores de energía TADAS, estos son el resultado de investigaciones experimentales; poseen diferente altura, ancho y espesor. A partir de la primera placa de análisis se pueden calcular los parámetros elásticos de los disipadores con las ecuaciones mostradas en el Capítulo 2 de este trabajo.

**Tabla 28.*****Propiedades disipador TADAS***

Device	T (mm)	H (mm)	B (mm)	N	$\Delta y$ (mm)	$F_y$ (kN)	$F_u$ (kN)	$K_{dee}$ (Kn/cm)
<b>1A1</b>	20,0	130,2	150,0	8	1,06	182,40	273,60	1720,75
<b>1A2</b>	20,0	219,5	150,0	8	2,88	107,90	161,85	374,65
<b>1A3</b>	20,0	305,0	150,0	8	5,48	77,50	116,25	141,42
<b>1B1</b>	35,0	189,0	150,0	8	1,20	357,00	535,50	2975,00
<b>0B2</b>	35,0	304,0	150,0	8	3,11	222,60	333,90	715,76
<b>1B2</b>	35,0	304,0	150,0	8	3,11	222,60	333,90	715,76
<b>1B3</b>	35,0	414,5	150,0	8	5,80	162,80	244,20	280,69
<b>2B2</b>	36,1	304,0	133,3	8	3,11	210,00	315,00	675,24
<b>3B2</b>	36,0	304,0	133,3	8	3,11	130,70	196,05	420,26
<b>1C1</b>	36,0	325,0	177,6	8	3,60	260,20	390,30	722,78
<b>1C2</b>	36,0	325,0	178,5	8	3,60	163,50	245,25	454,17

Fuente: (Tsai, Chen, Hong, & Su, 1993)

Dónde:  $t$  es el espesor del dispositivo,  $h$  la altura,  $b$  la base,  $N$  el número de placas,  $\Delta y$  el desplazamiento de fluencia,  $F_y$  la fuerza de fluencia,  $F_u$  fuerza de corte y  $K_{dee}$  la rigidez elástica o inicial del sistema.



**Figura 81:** Dimensiones disipadores TADAS

A partir del predimensionamiento para los disipadores SLB se ha escogido un tipo de dispositivo tipo ADAS que posea similares características de fuerza de plastificación que las del SLB. La Tabla 29 muestra los valores de las propiedades del disipador SLB 40-5 usados en este estudio.

**Tabla 29.**

**Propiedades disipador SLB 40-5**

<b>K1 (KN/cm)</b>	<b>10777,4</b>	<b>Rigidez inicial o rigidez elástica</b>
<b>K2 (KN/cm)</b>	31,8	Rigidez post plastificación
<b>fy (KN)</b>	345,95	Desplazamiento inicial de plastificación
<b>Dy (mm)</b>	0,570	Fuerza inicial de plastificación
<b>Fy (KN)</b>	614,29	Desplazamiento de plastificación
<b>F max (KN)</b>	662,15	Fuerza de plastificación
<b>Da (mm)</b>	104,53	1.559 cm de fuerza de desplazamiento hacia Da
<b>Ed (kN*cm)</b>	941	Energía disipada

La rigidez elástica de un disipador TADAS no es suficiente para igualar los 10777.4 [KN/cm] por ello se sugiere utilizar varios dispositivos TADAS para tener una rigidez similar a la del disipador SLB 40-5.

Para obtener una rigidez elástica similar a la del dispositivo SLB 40-5 es necesario utilizar un dissipador TADAS con 30 placas, cuyas dimensiones son  $b=15\text{cm}$ ,  $h=18.9\text{ cm}$ ,  $t=3.5\text{ cm}$  y  $\Delta u=1\text{ cm}$ . En la Tabla 30 se muestra las otras características del dissipador TADAS denominado 1B1.

**Tabla 30.**  
**Propiedades dissipador TADAS 1B1**

N	30	Número de placas utilizadas
b [mm]	150	Ancho de la placa en la base
t [mm]	3,5	Espesor de la placa
h [mm]	18,9	Altura del dispositivo
E [kN/cm <sup>2</sup> ]	23422770	Módulo de elasticidad del material del dispositivo
Fy [kN/cm <sup>2</sup> ]	27540	Esfuerzo de Fluencia del material del dispositivo

En la Tabla 31 se muestran los parámetros elásticos del dissipador TADAS con las ecuaciones mostradas en el Capítulo 2 de este trabajo.

**Tabla 31.**  
**Parámetros elásticos dissipador TADAS 1B1**

Fuerza de Fluencia [KN]	$F_y = \frac{n f_y b t^2}{6h}$	1338,75
Desplazamiento de fluencia [cm]	$\Delta y = \frac{f_y h^2}{E t}$	0,12
Rigidez elástica [KN/cm]	$K_{DEE} = \frac{F_y}{\Delta y}$	11156,25
Ductilidad	$u = \frac{\Delta u}{\Delta y}$	8,33
Fuerza de corte [KN]	$F_u = n \frac{f_y b t^2}{2h}$	2008,13
Rigidez post fluencia [KN/m]	$k_p = \frac{F_u - F_y}{\Delta u - \Delta y}$	76065,34
Rigidez efectiva [KN/m]	$k_{ef} = \frac{F_u}{\Delta u}$	200812,50

En el software comercial, ETABS, es necesario ingresar la rigidez elástica/ *effective stiffness*  $K_{DEE}$ , el coeficiente de amortiguamiento/ *effective damping*,  $C_d$ , que se encuentra en función de la energía de disipación y la energía elástica y la rigidez

post fluencia,  $kp$ . La Tabla 32 muestra los parámetros necesarios para la curva bilineal del disipador, además el cálculo del coeficiente de amortiguamiento del disipador.

**Tabla 32.**  
**Cálculo del coeficiente de amortiguamiento disipador TADAS 1B1**

Parámetros	Ecuación	Valor
Energía disipada [KN cm]	$E_D = 4\Delta y (\mu Fy - Fu)$	4391,10
Energía elástica [KN cm]	$E_E = \frac{1}{2} K_{DEE} (\mu\Delta y)^2$	1004,06
Amortiguamiento equivalente	$\xi_{eq} = \frac{E_D}{4\pi E_E}$	0,35
Periodo fundamental de vibración [seg]	$T = \frac{2\pi}{Wn}$	0,67
Amortiguamiento equivalente [KN s/cm]	$Cd = \frac{2\Delta y (K_{DEE} - K_p) (\mu\Delta y - \Delta y) T}{\pi^2 (\mu\Delta y)^2}$	<b>148,38</b>

La Tabla 33 indica los parámetros principales del uso de disipadores SLB40-5 y tres disipadores 1B1-10.

**Tabla 33.**  
**Parámetros disipadores SLB 40-5 y TADAS 1B1**

Parámetros		SLB 40-5	1B1-30
Rigidez elástica	Kdee [KN/cm]	10777,40	11156,25
Fuerza de Corte	Fu [KN]	614,29	2008,13
Energía disipada	Ed [KN]	941,00	15101,10

La rigidez elástica tras el uso de 2 disipadores 1B1 con 30 placas es 3.51% mayor respecto al SLB 40-5, mientras que los disipadores TADAS presentan un mejor comportamiento en cuanto a la disipación de energía, 16.04 veces mayor al SLB40-5, y la fuerza de corte es 3.26 veces la fuerza de corte de SLB40-5. Esto se debe al comportamiento histerético de cada uno de los dispositivos.



Los dispositivos TADAS actúan bajo la condición Bilineal (Multilinear Plastic). En este tipo de análisis todas las deformaciones son independientes. La curva que se obtiene de este análisis muestra la relación fuerza-deformación bajo cargas monotónicas. En la Figura 82 se muestra las propiedades tipo Link de los disipadores TADAS.

Link Property Data							
<b>General</b>							
Link Property Name				<input type="text" value="1B1-10"/>	Link Type		<input type="text" value="MultiLinear Plastic"/>
<b>Total Mass and Weigh</b>							
Mass		<input type="text"/>	ton*s <sup>2</sup> /m	Rotational Inertia 1		<input type="text"/>	tonf*m*s <sup>2</sup>
Weight		<input type="text"/>	tonf	Rotational Inertia 2		<input type="text"/>	tonf*m*s <sup>2</sup>
				Rotational Inertia 3		<input type="text"/>	tonf*m*s <sup>2</sup>
<b>Directional Popieties</b>							
Direction	Fixed	NonLinear	Propieties	Direction	Fixed	NonLinear	Propieties
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="Modify/Show for U1..."/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="Modify/Show for U1..."/>
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text" value="Modify/Show for U2..."/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="Modify/Show for U2..."/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="Modify/Show for U3..."/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="Modify/Show for U3..."/>

**Figura 82:** Propiedades de disipadores TADAS 1B1

Las propiedades no lineales de los disipadores TADAS se muestran en la Figura 83, en congruencia con los datos obtenidos en las Tabla 33, para el disipador TADAS denominado 1B1-15

**Link/Support Directional Properties**

**Identification**

Property Name

Direction

Type

Nonlinear

**Lineat Propierties**

Effective Stiffness  Kn/m

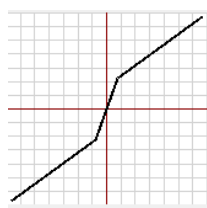
Effective Damping  Kn\*s/m

**Shear Deformation Location**

Distance from End-J  m

**Multilinear Force- Displ Relation**

Pt	Displ (cm)	Force (Kn)
1	-1	-2008,12
2	-0,12	-1338,75
3	0	0
4	0,12	1338,75
5	1	2008,12



**Figura 83:** Propiedades no lineales del disipador TADAS 1B1

A continuación se muestra el análisis sísmico para la estructura analizada después de incluir los disipadores TADAS 1B1 con la misma rigidez elástica que el SLB 40-5.

#### 4.6.1. Derivas de piso 1B1

Los resultados anteriores demostraron que para analizar la estructura partiendo de la misma rigidez elástica que los disipadores SLB 40-5, se necesita un disipador TADAS con 30 placas, cuyas dimensiones son  $b=15\text{cm}$ ,  $h=18.9\text{ cm}$ ,  $t=3.5\text{ cm}$ . El análisis a continuación se muestra los resultados de usar 39 disipadores TADAS de características 1B1-30.

Todos los resultados que se muestran a continuación están en base a los parámetros utilizados para el análisis previo de la estructura sin disipadores y con disipadores SLB 40-5.

**Tabla 34.**  
***Derivas de la estructura con disipadores TADAS 1B1***

Pisos	Deriva %							
	Análisis espectral		Análisis Tiempo Historia					
	X	Y	Pedernales		Manta		Quito	
X			Y	X	Y	X	Y	
N +19.76	1,08%	1,27%	0,91%	0,99%	1,29%	1,12%	0,88%	1,13%
N +14.82	1,09%	1,13%	0,86%	0,86%	1,27%	1,03%	0,88%	1,04%
N +9.88	0,89%	0,82%	0,68%	0,67%	1,03%	0,75%	0,73%	0,77%
N +4.94	0,21%	0,18%	0,19%	0,14%	0,22%	0,16%	0,16%	0,16%

#### 4.6.2. Desplazamientos 1B1-15

**Tabla 35.**  
***Desplazamientos de la estructura con disipadores TADAS 1B1***

Pisos	Desplazamientos [m]							
	Análisis espectral		Análisis Tiempo Historia					
	X	Y	Pedernales		Manta		Quito	
X			Y	X	Y	X	Y	
N +19.76	0,16	0,17	0,17	0,17	0,26	0,21	0,18	0,21
N +14.82	0,11	0,11	0,11	0,12	0,17	0,13	0,12	0,14
N +9.88	0,05	0,05	0,13	0,08	0,11	0,09	0,11	0,09
N +4.94	0,01	0,01	0,05	0,12	0,07	0,14	0,06	0,13

#### 4.6.3. Periodos de Vibración 1B1-15

**Tabla 36.**  
***Periodos de vibración de la estructura con disipadores TADAS 1B1***

Modo	Periodo [seg]
1	0,64
2	0,63
3	0,509
4	0,509
5	0,509
6	0,509
7	0,509
8	0,509

CONTINÚA



9	0,494
10	0,312
11	0,284
12	0,246
13	0,245
14	0,245
15	0,243

#### 4.6.4. Análisis de la torsión en planta 1B1-15

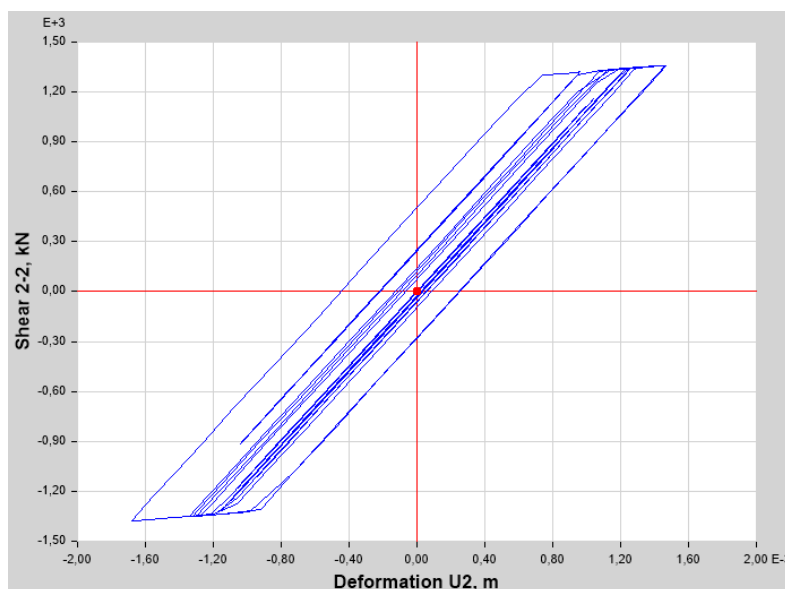
Tabla 37.

*Cálculo de la excentricidad estructural con disipadores TADAS 1B1*

Piso	XCM [m]	YCM [m]	XCR[m]	YCR[m]	Ex[m]	Ey[m]
N +19.76	20,32	6,97	19,95	6,78	0,37	0,19
N +14.82	20,25	6,99	19,92	5,19	0,33	1,8
N +9.88	20,09	4,63	19,86	3,27	0,23	1,36
N +4.94	19,25	0,84	19,18	0,86	0,07	0,02

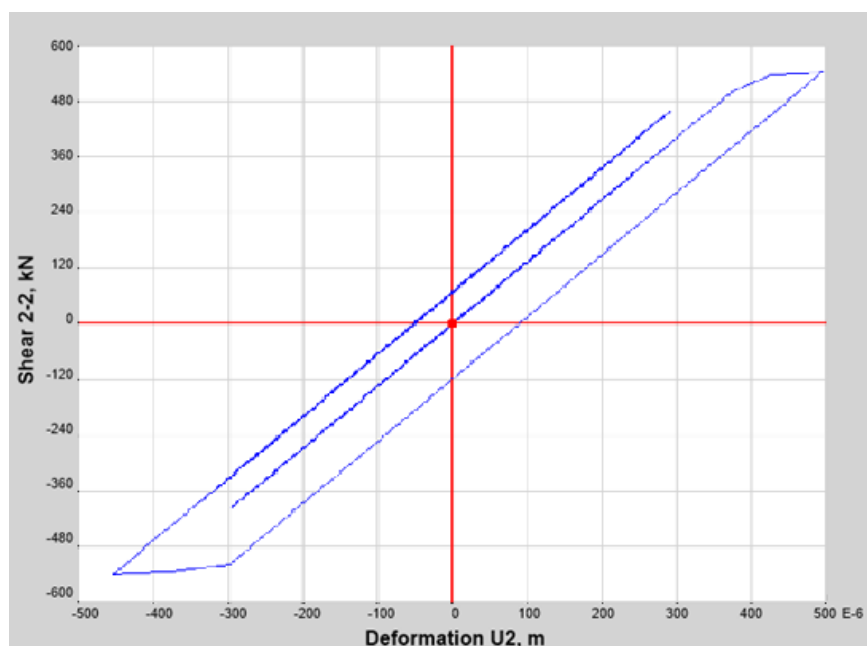
#### 4.6.5. Histéresis de los disipadores 1B1-15

La Figura 84 representa el máxima fuerza cortante de los disipadores en el sismo de Pedernales con una fuerza de plastificación de 1359.21 KN. Estos disipadores tienen como fuerza de plastificación máxima 2008.13 KN.



**Figura 84:** Histéresis TADAS 1B1-15, registro Pedernales elemento K13  
Fuente: (ETABS, 2016)

La Figura 85 indica el diagrama de histéresis de tipo Bilineal con una fuerza de plastificación de 462.78 KN, esto nos muestra que el disipador no llego al punto de fluencia.



**Figura 85:** Histéresis TADAS 1B1-15, registro Quito elemento K4  
**Fuente:** (ETABS, 2016)

#### 4.6.6. Respuesta energética con disipadores 1B1-15

**Tabla 38.**

***Respuesta energética de la estructura con disipadores TADAS 1B1-15***

Registro de historia en el tiempo

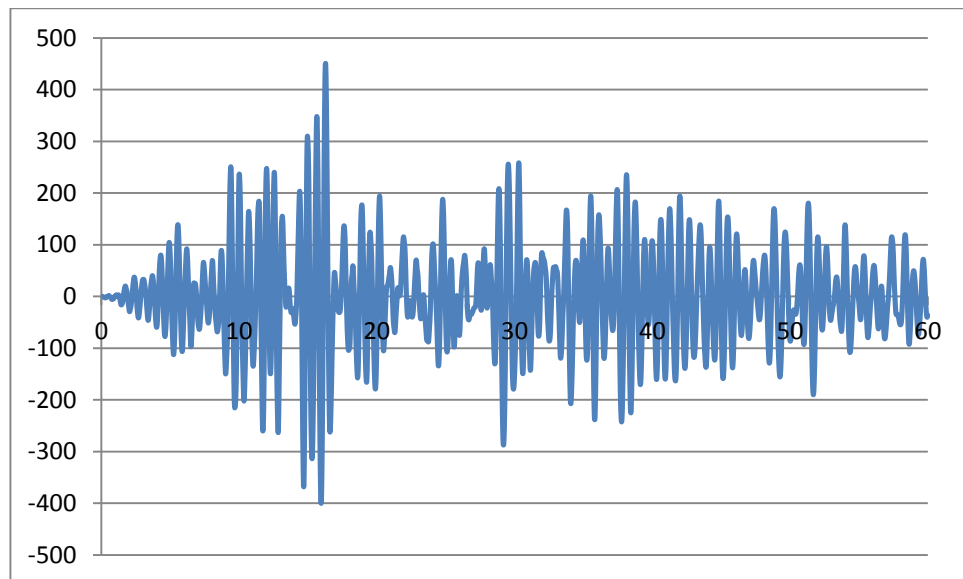
Tipo de Energía	Pedernales	Quito	Manta
Energía de entrada [KN m]	4402,43	4568,07	4035,91
Energía Cinética [KN-m]	402,42	432,40	445,64
Energía Potencial [KN-m]	427,90	400,55	541,34
Energía de Amortiguamiento Modal [KN-m]	1360,44	1385,33	1023,34
Energía de Amortiguamiento Histerético no lineal [KN-m]	35,93	40,17	38,26
Energía Disipador TADAS [KN-m]	3006,06	3142,57	2974,31

#### 4.6.7. Redundancia Estructural

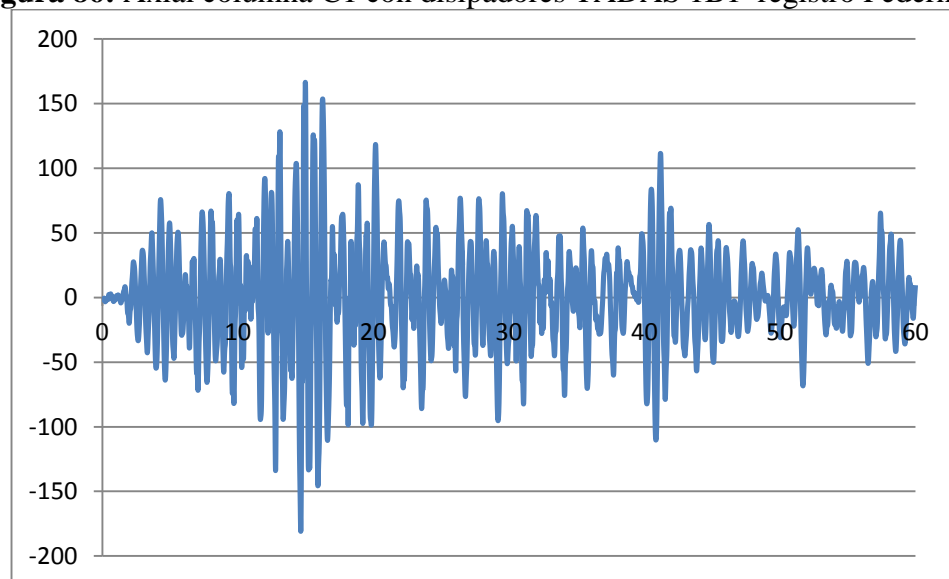
**Tabla 39.**

*Carga axial, cortante y momento para las columnas C1 y C2*

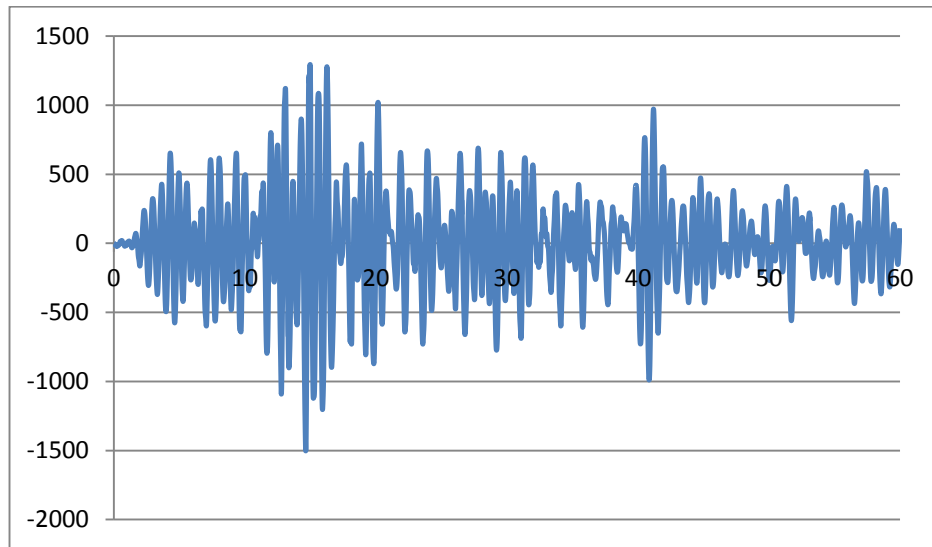
	C1	C2
Axial [KN]	450,80	80,49
Cortante [KN]	166,49	98,71
Momento [KN m]	1294,93	100,82



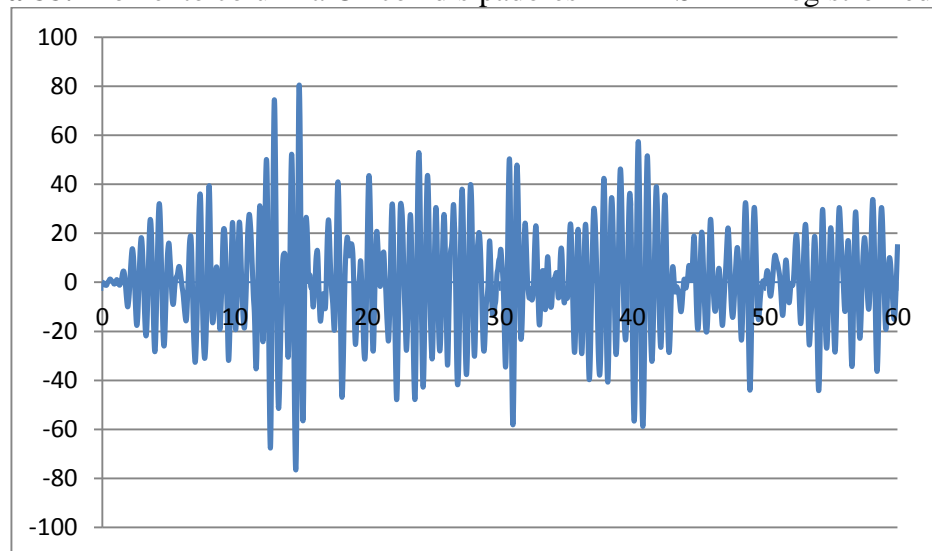
**Figura 86:** Axial columna C1 con disipadores TADAS 1B1 registro Pedernales



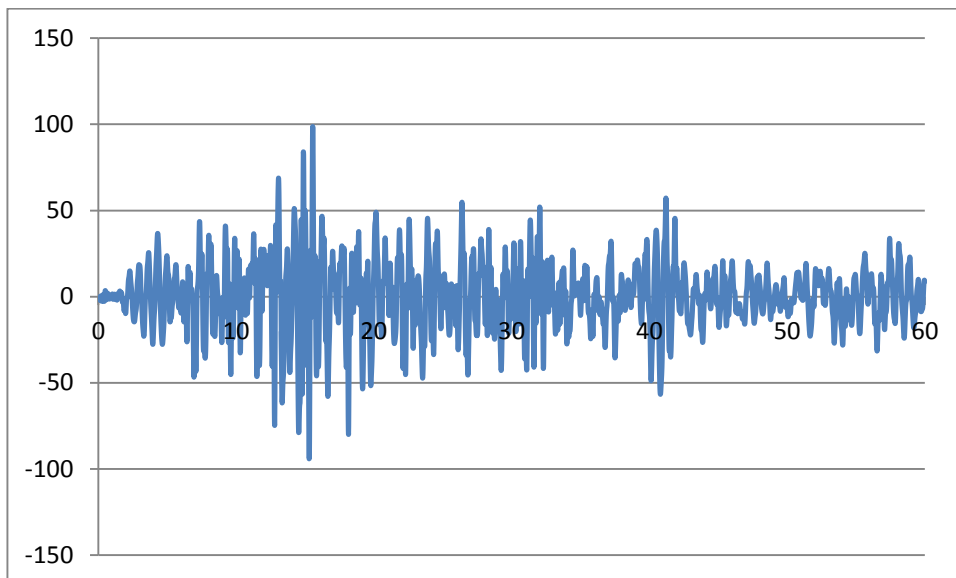
**Figura 87:** Cortante columna C1 con disipadores TADAS 1B1 registro Pedernales



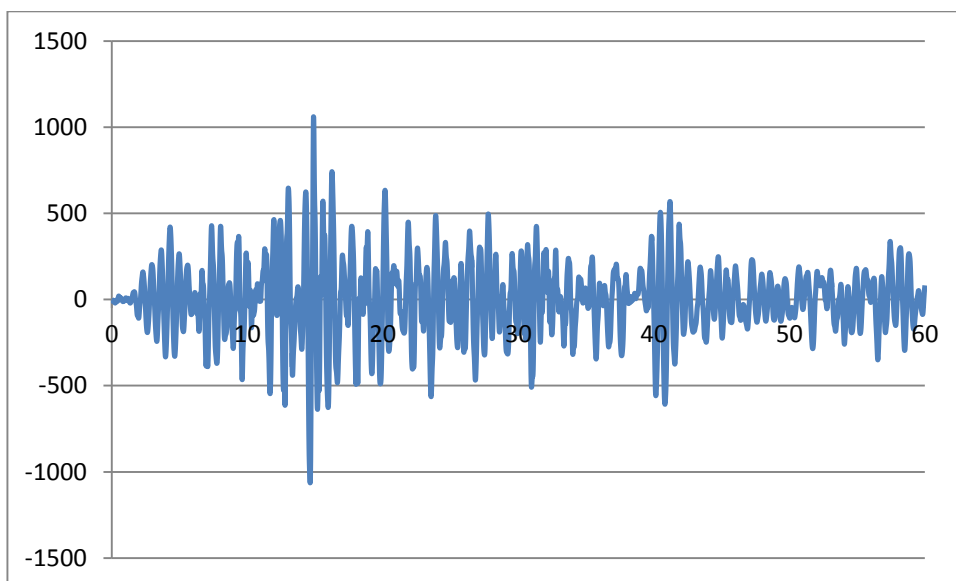
**Figura 88:** Momento columna C1 con disipadores TADAS 1B1 registro Pedernales



**Figura 89:** Axial columna C2 con disipadores TADAS 1B1 registro Pedernales



**Figura 90:** Cortante columna C2 con disipadores TADAS 1B1 registro Pedernales

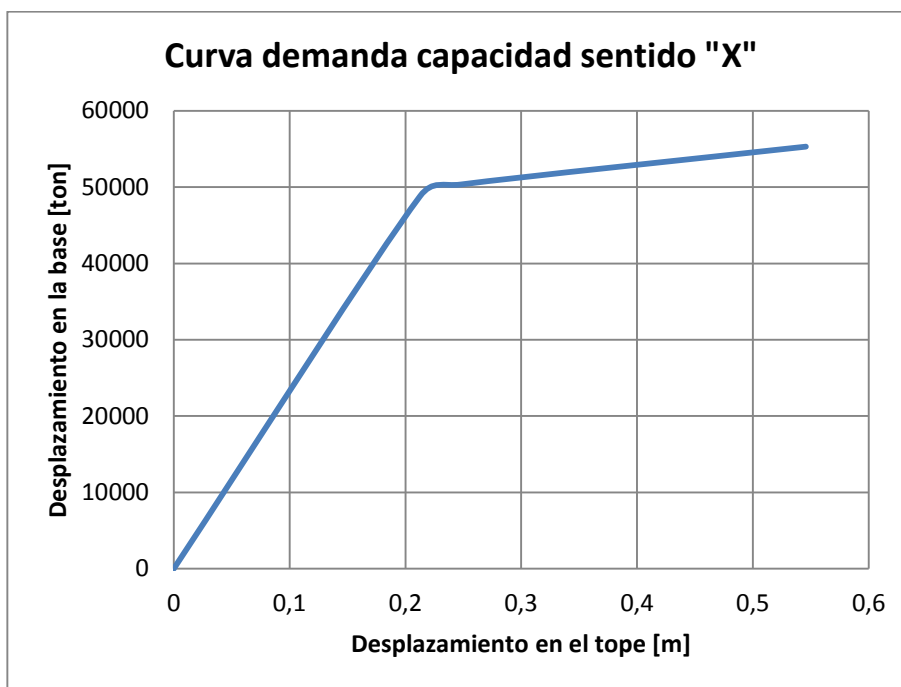


**Figura 91:** Momento columna C2 con disipadores TADAS 1B1 registro Pedernales

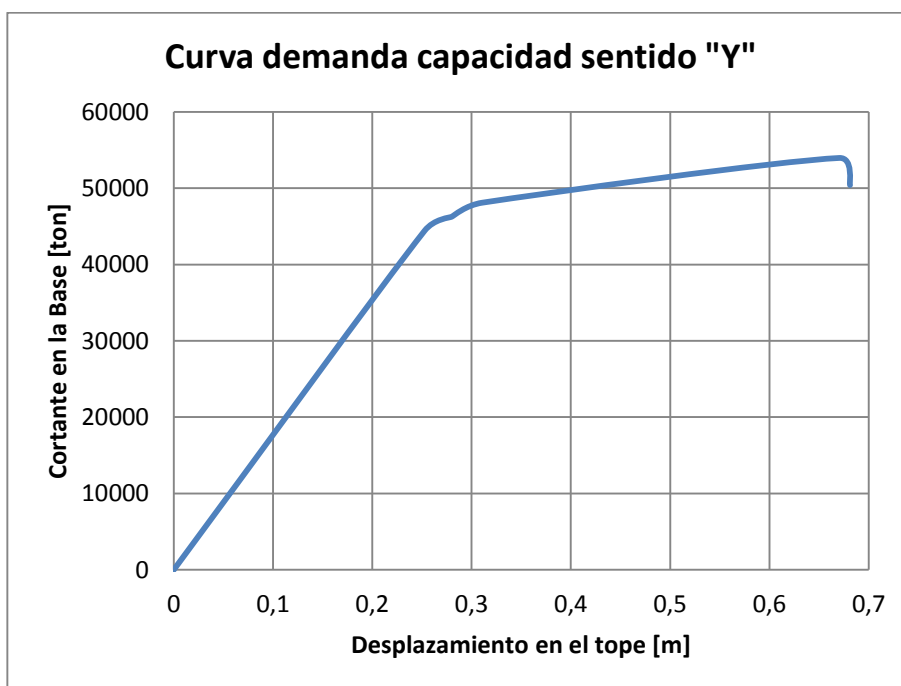
#### 4.6.8. Análisis estático no lineal

##### Análisis de colapso (Push Over)





**Figura 92:** Curva de capacidad estructura con disipadores TADAS sentido "X"



**Figura 93:** Curva de capacidad estructura con disipadores TADAS sentido "Y"

## Método del espectro demanda capacidad

**Tabla 40.**  
*Parámetros análisis bilineal*

Parámetro	Sentido X	Sentido Y	Definición
<b>Vd [ton]</b>	551,71	551,71	Cortante de diseño
<b>Vy [ton]</b>	1606,92	1196,98	Cortante de fluencia
<b>Ve [ton]</b>	3432,84	3029,28	Cortante elástico
<b><math>\Delta_d</math> [m]</b>	0,0480	0,0552	Desplazamiento relacionado al cortante de diseño
<b><math>\Delta_y</math> [m]</b>	0,1286	0,1106	Desplazamiento relacionado al cortante de fluencia
<b><math>\Delta_{max}</math> [m]</b>	0,2891	0,3108	Desplazamiento último de la estructura
<b><math>R_\Omega</math></b>	2,91	2,17	Factor de reducción de sobrerresistencia $V_y/V_d$
<b><math>R_\mu</math></b>	2,14	2,53	Factor de reducción por ductilidad $V_e/V_y$
<b>RR</b>	1	1	Factor de reducción de redundancia
<b>R elástico</b>	8	8	Factor de reducción NEC 15
<b>R</b>	6,22	5,49	Factor de reducción calculado $R = R_\mu R_\Omega R_R$
<b><math>\mu</math></b>	2,25	2,81	Ductilidad $\Delta_{max}/\Delta_y$

### Método del coeficiente de desplazamiento

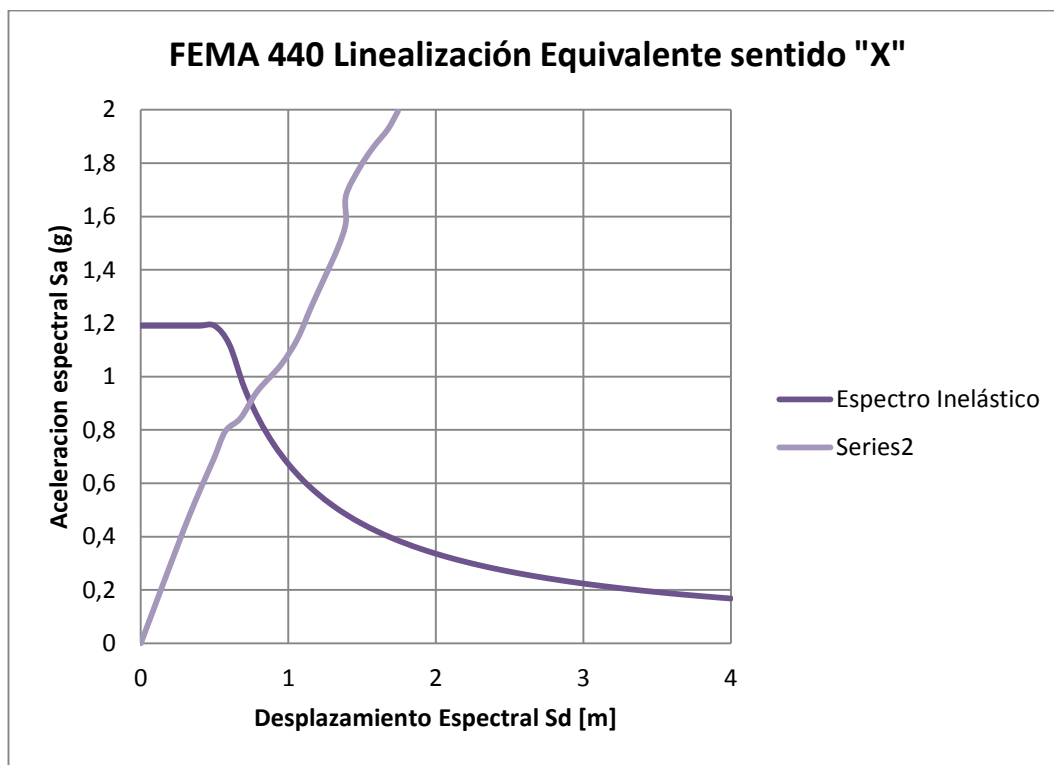


Figura 94: Punto de desempeño sentido X

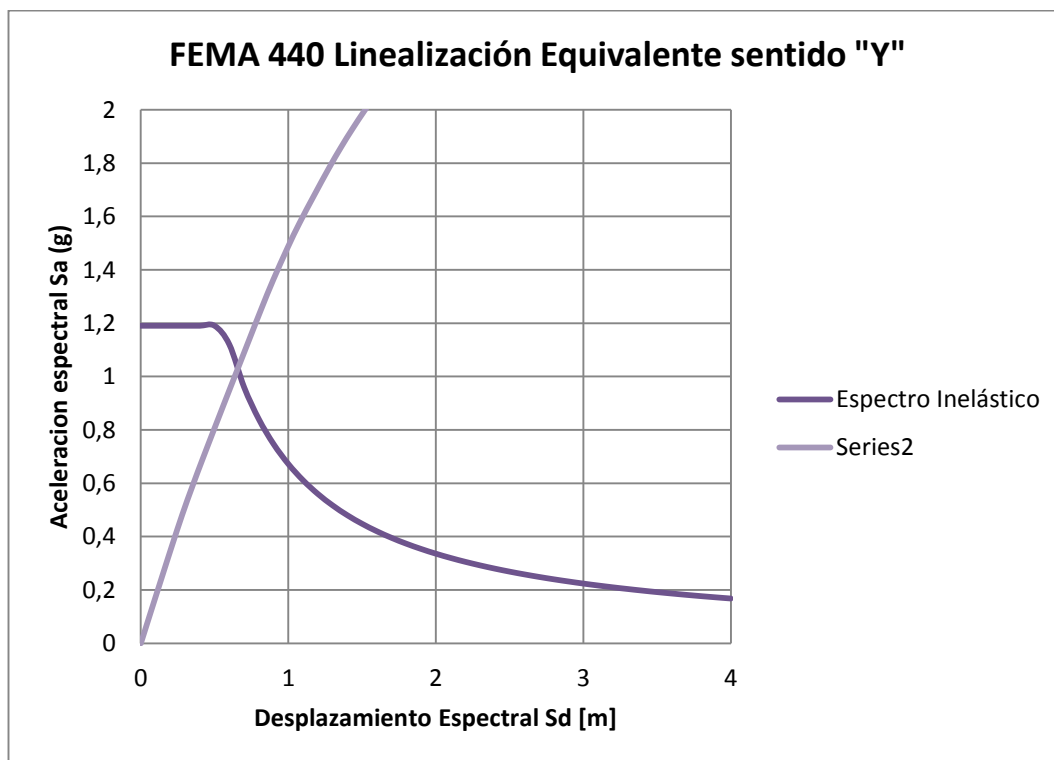


Figura 95: Punto de desempeño sentido Y

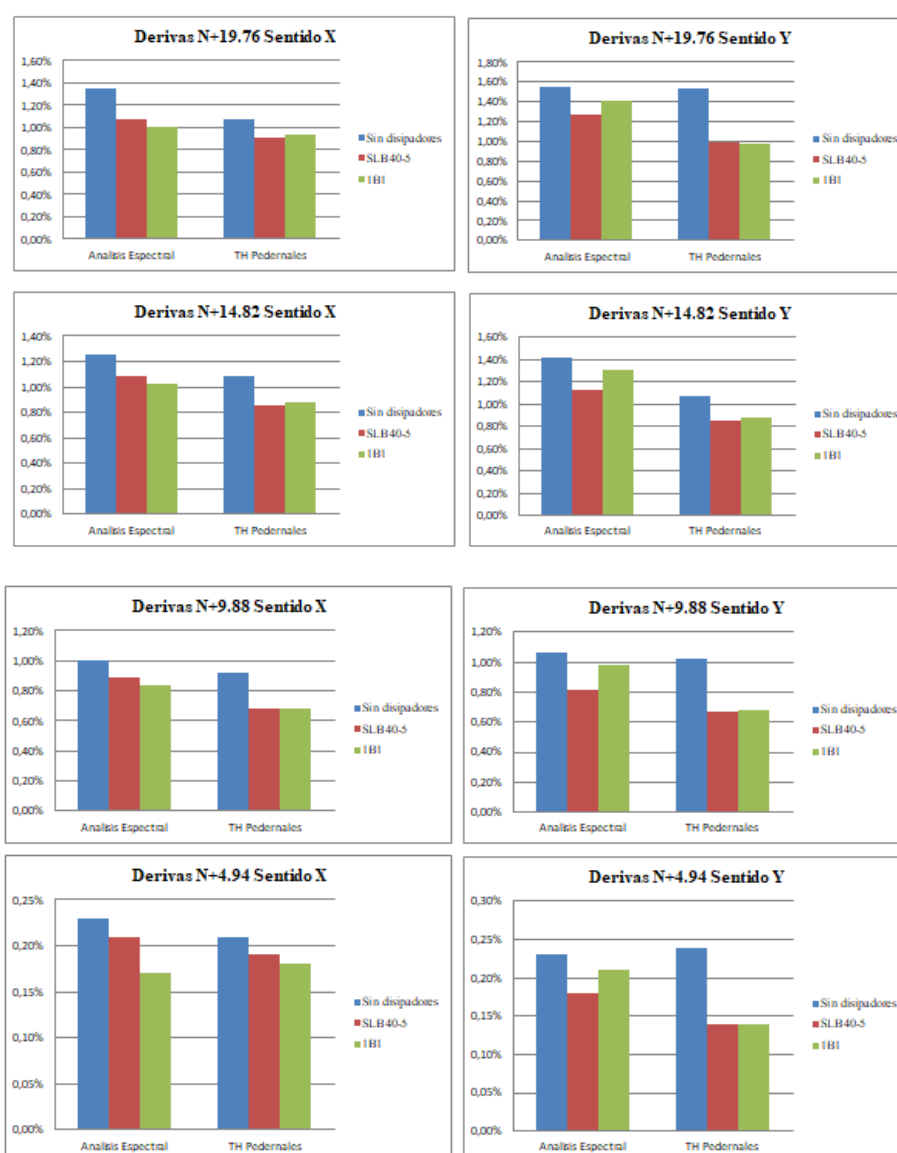
**Tabla 41.*****Punto de desempeño***

	<b>Sentido X</b>	<b>Sentido Y</b>
<b>Sd [m]</b>	0,66	0,200
<b>Sa [g]</b>	1,04	1,1904
<b>V [Ton]</b>	2718,99	3220,94

## CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez realizado el análisis lineal y no lineal de la estructura, se procederá a realizar un análisis para comparar el uso de disipadores de energía SLB y TADAS. Con el análisis que se realizara a continuación se desea establecer conclusiones respecto al comportamiento no lineal de los disipadores y como estos mejoraran la torsión en planta y la redundancia estructural.

### 5.1. Derivas de piso

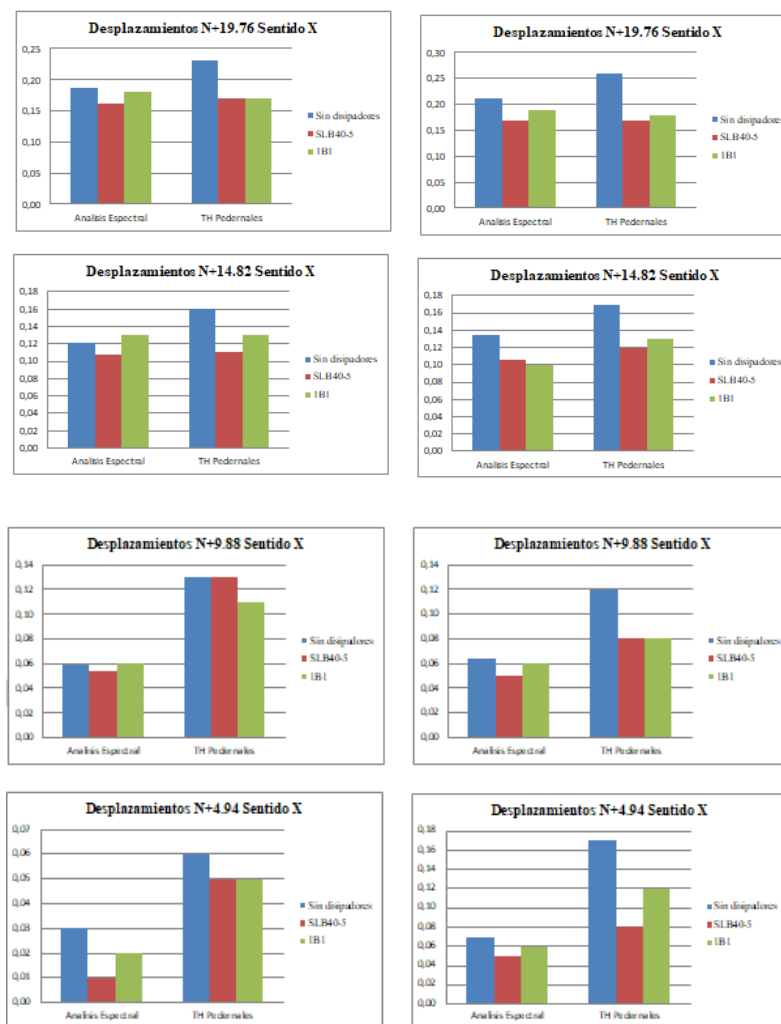


**Figura 96:** Comparación de derivas del análisis estructural sin disipadores, con disipadores SLB y TADAS

La Figura 96 muestra las derivas de piso para todos los niveles en los dos sentidos de análisis. Se analiza principalmente el análisis espectral y el análisis de historia en el tiempo para el registro de Pedernales; sismo esperado en la ciudad de Quito.

Los valores de las derivas de piso en todos los niveles están bajo el límite máximo de lo establecido por la filosofía sismorresistente. Los disipadores de energía brindan mayor rigidez a la estructura. El uso de los disipadores SLB 40-5 reduce las derivas de piso en un promedio del 14%. Los disipadores TADAS 1B1 reducen la deriva en un 15%

## 5.2. Desplazamientos

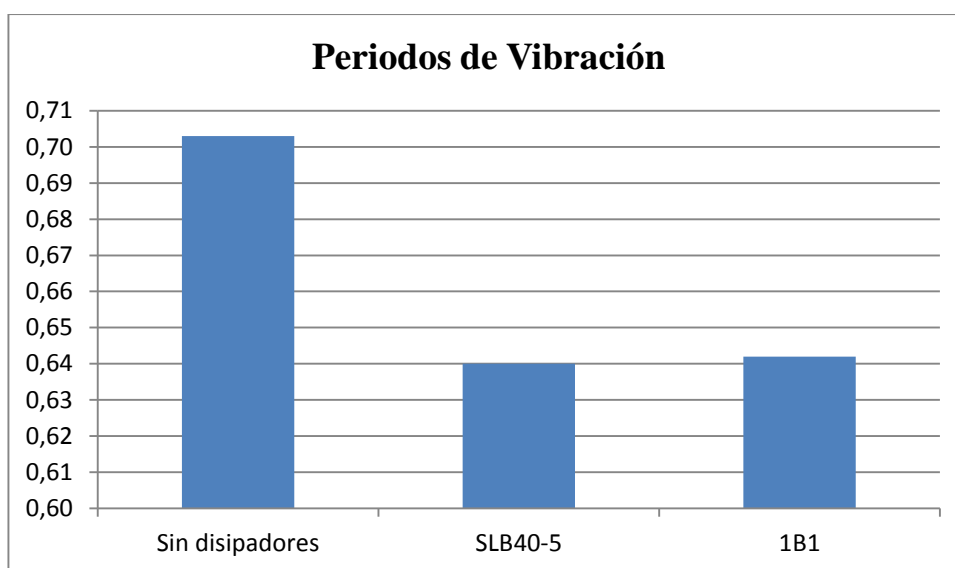


**Figura 97:** Comparación de desplazamientos del análisis estructural sin disipadores, con disipadores SLB y TADAS

Los desplazamientos de la estructura se relacionan con la rigidez de la estructura por ello se presenta una reducción de los desplazamientos tras el uso de los disipadores.

### 5.3. Periodos de Vibración

El uso de disipadores de energía rigidiza la estructura por ende existe una reducción del modo fundamental de vibración. Siendo la estructura con disipadores SLB la que presenta menor modo, por ende la más rígida.

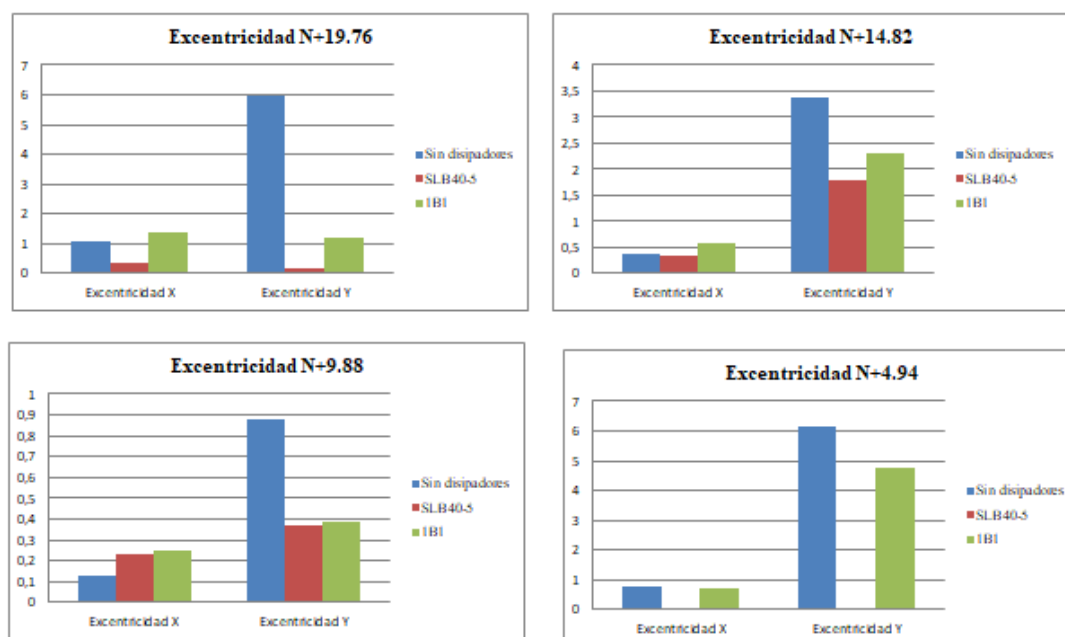


**Figura 98:** Comparación de periodos fundamental de vibración del análisis estructural sin disipadores, con disipadores SLB y TADAS

### 5.4. Análisis de la torsión en planta

La torsión en planta se genera tras la excentricidad que origina la distancia del centro de masas y el centro de rigidez. El uso de disipadores de energía reduce la excentricidad tras rigidizar la estructura.

La Figura 79 muestra la excentricidad por planta de cada uno de los pisos, el uso de los disipadores reduce la distancia entre el centro de masas y rigidez; pero el uso de los disipadores SLB 40\_5 por sus características es el que mejor comportamiento brinda a la estructura en términos torsionales.



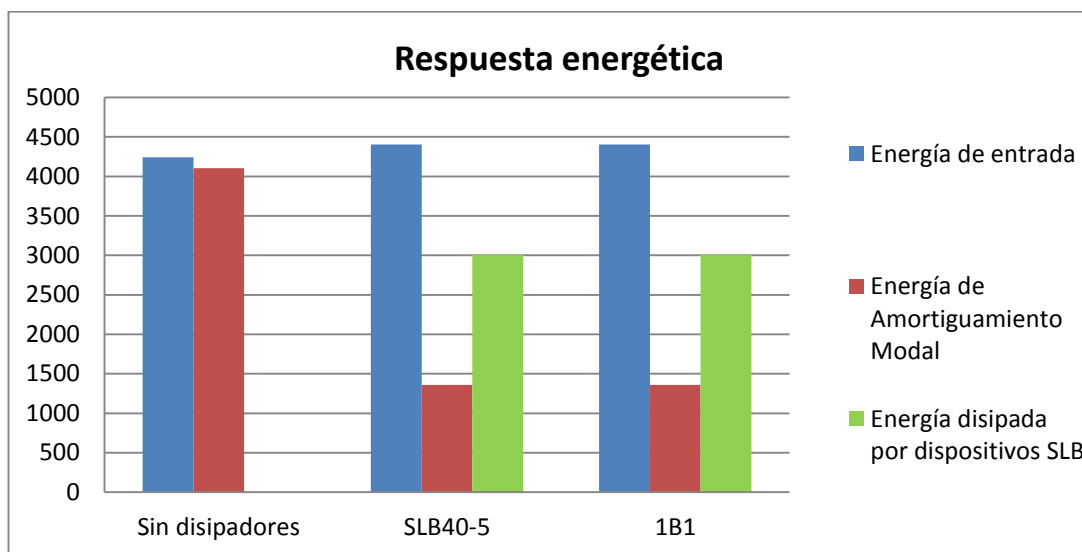
**Figura 99:** Comparación de excentricidad por planta del análisis estructural sin disipadores, con disipadores SLB y TADAS

### 5.5. Respuesta Energética

La energía de entrada, generada por la excitación externa, es la suma de las energía cinética, amortiguamiento y energía de deformación elástica e inelástica. La energía cinética y la energía de deformación elástica dependen de las condiciones elásticas del sistema.

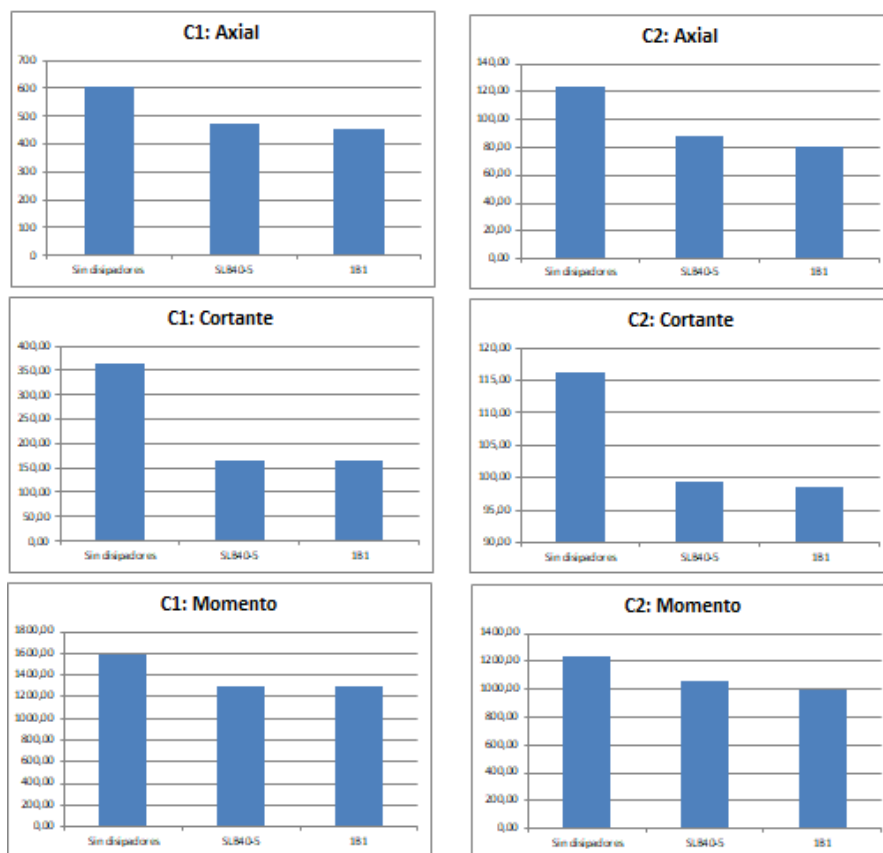
La estructura sin disipadores únicamente posee una energía de amortiguamiento modal por su configuración estructural. Al incluir disipadores aumenta significativamente la energía disipada por los dispositivos y la energía de amortiguamiento modal se reduce; con ello los elementos estructurales incursionaran en menor medida en el rango inelástico.





**Figura 100:** Comparación de respuesta energética del análisis estructural sin disipadores, con disipadores SLB y TADAS

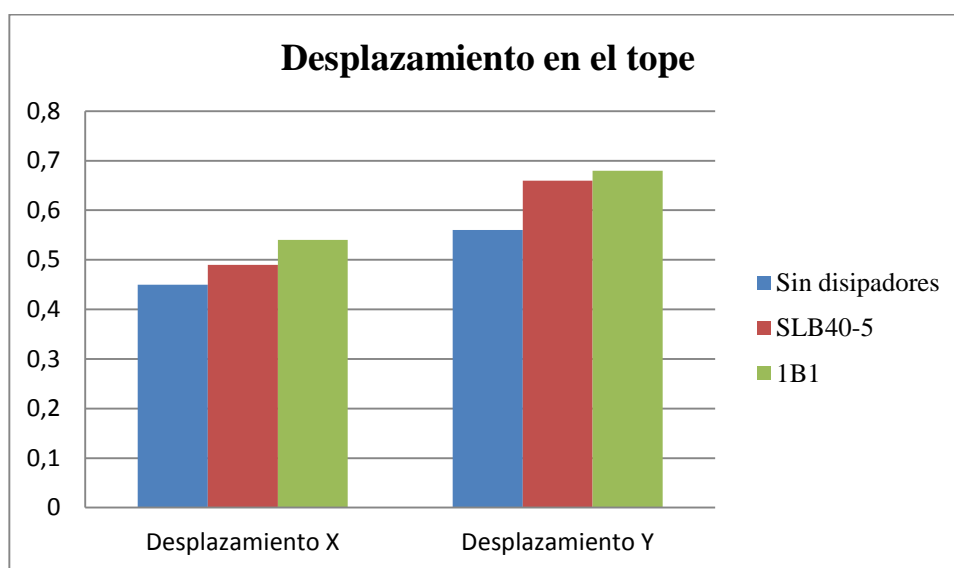
### 5.6. Redundancia Estructural



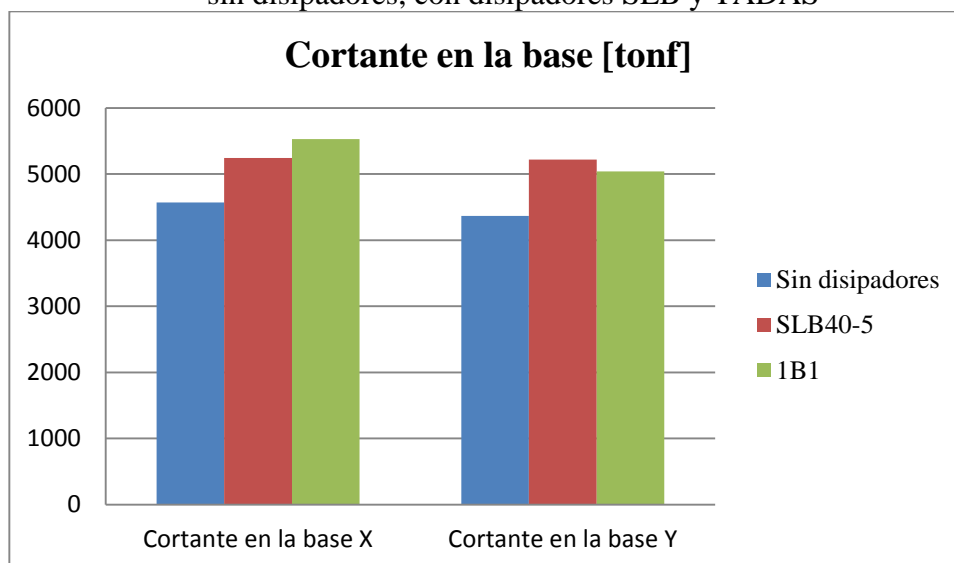
**Figura 101:** Comparación de las fuerzas actuantes del análisis estructural sin disipadores, con disipadores SLB y TADAS

El uso de disipadores de energía redistribuye las cargas actuantes de la estructura. En la columna que pertenece al pórtico con disipadores, C1, la fuerza axial se reduce 31.44%, el cortante se reduce 2.18 veces y el momento 23.11%. La columna del pórtico sin disipadores se reduce 47.33% de la fuerza axial, 17.26% del cortante y 20.09% de los momentos.

### 5.7. Análisis estático no lineal



**Figura 102:** Comparación del desplazamiento en el tope del análisis estructural sin disipadores, con disipadores SLB y TADAS



**Figura 103:** Comparación del cortante en la base del análisis estructural sin disipadores, con disipadores SLB y TADAS

## **CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **7.1. Conclusiones**

1. La incorporación de los disipadores de energía tipo TADAS y SLB mejoran el comportamiento sísmico de estructuras. El uso de disipadores de energía hysteréticos rigidiza el sistema estructural, influye la disminución de los desplazamientos, derivas y redistribuye de las cargas actuantes sobre los elementos.
2. El principal objetivo de los disipadores de energía es absorber un porcentaje de la energía de entrada y así disminuir la demanda sísmica en elementos estructurales y no estructurales, evitando la formación de deformaciones plásticas en elementos principales.
3. Los disipadores de energía a diferencia de la aislación sísmica de base se pueden aplicar en diferentes lugares de la estructura y aumentar el número de dispositivos en la estructura. La aislación sísmica de base puede utilizarse únicamente un número limitado de aisladores y será igual al número de columnas que lleguen a la base.
4. Los disipadores hysteréticos TADAS se adaptan a las necesidades de diseño, pues sus parámetros elásticos se pueden manipular con facilidad. Este tipo de disipadores son una opción factible dentro de la estructura, debido que no se requiere alta tecnología necesaria para fabricarlos.
5. Los dispositivos SLB son relativamente nuevos en el mercado, sus resultados experimentales brindan excelentes características de rigidez y disipación de energía. Estos dispositivos se fabrican en una empresa peruana, por ello son de fácil acceso para la constructora y son de bajo costo en relación con otros disipadores hysteréticos existentes en el mercado.
6. La respuesta energética de la estructura se obtiene mediante el análisis no lineal, FNA, la energía que ingresa a la estructura es absorbida por los disipadores de energía hysteréticos y un porcentaje por la ductilidad de los materiales. La energía

de entrada por un evento sísmico es captada por los disipadores y estos son los que sufren mayor daño, la ventaja es que estos dispositivos pueden ser reemplazados fácilmente.

7. Los periodos de vibración dependen de la rigidez de la estructura y de la matriz de masas; al ser la matriz de masas la misma para el análisis de la estructura con y sin disipadores, el uso de disipadores influye directamente en la rigidez estructural. El periodo fundamental de la estructura sin disipadores es de 0.703s, los disipadores de energía SLB aportan un 9.84% de rigidez adicional. Los dispositivos TADAS aportan 9.50% de rigidez a la estructura.
8. Los resultados de las derivas tras el análisis estructural están bajo el límite permitido por la norma ecuatoriana de la construcción. Tras el uso de los disipadores las derivas se reducen en un promedio de 15% para los disipadores SLB y 14% para los dispositivos TADAS.
9. Los disipadores de energía al aporta rigidez a los pórticos, influye directamente en la posición del centro de rigidez. La Figura 99 compara la excentricidad generada en cada piso y muestra que la por las propiedades elásticas el disipador SLB es el que genera menor excentricidad. La excentricidad dependerá de las propiedades mecánicas del disipador y la posición de estos en la estructura.
10. El uso de disipadores de energía genera una redistribución de las fuerzas actuantes en los miembros estructurales, en la Figura 101 muestra la disminución de axiales, cortantes y momentos. En este caso los disipadores influyen en mayor magnitud en el pórtico con disipadores, el uso de disipadores en promedio reducen las fuerzas axiales en un 39%, cortantes en 68% y momentos 21%. Cada estructura y pórtico es diferente por lo que no se puede generalizar el porcentaje de reducción en las fuerzas actuantes, con este trabajo se ve que los disipadores reducen las fuerzas actuantes en los elementos estructurales.
11. Los dispositivos tipo SLB 40-5 basan su comportamiento histerético en el modelo plástico tipo Wen, las características de estos dispositivos se han obtenido en laboratorio, con 8 placas la rigidez elástica,  $k_{dee}$ , es de 10777.40 KN, fuerza de corte,  $F_u$ , 614.29 KN y la energía que disipan estos elementos,  $Ed$ , es de 941 KN. Los disipadores de energía tipo TADAS con 30 placas 1B1 se basan en un modelo constitutivo bilineal, las características de estos dispositivos se sustentan en

laboratorio y mediante el uso de ecuaciones tras la aplicación del sistema bilineal, como principales características  $k_{dee}$ , de 11156,25,  $F_u$  es 2008,13 y  $E_d$  es de 15101,1.

12. La rigidez elástica de los disipadores es similar por ende no existe una diferencia significativa en el análisis dinámico; mientras que en el análisis energético, especialmente en la energía de amortiguamiento histerético no lineal, el uso de los disipadores TADAS absorbe una gran energía en el sistema comparado con el SLB.
13. Los resultados de esta investigación pretenden explicar y demostrar la importancia de la prevención sísmica dentro del país, que debe ser socializada a ingenieros, inversionistas y promotores dentro de la industria de la construcción. Este estudio es una pauta para motivar el desarrollo e implementación de este tipo de dispositivos en las estructuras del país.

## **7.2. Recomendaciones**

1. La implementación de estos dispositivos permite disminuir las fuerzas actuantes sobre los elementos estructurales, debido a una distribución de cargas por ello se puede disminuir las secciones de los elementos estructurales tras su correcta aplicación.
2. Los mecanismos de disipación de energía se deben colocar en lugares con desplazamientos significativos, así el dispositivo se deformará y trabajará en el rango no lineal. Los disipadores de energía disminuirán la energía elástica que ingresa al sistema.
3. Es importante encontrar un dispositivo que encuentre el equilibrio entre un análisis dinámico y análisis energético de tal manera que sus dimensiones no estén sobre dimensionadas, de tal manera que para el constructor sea accesible en términos constructivos y económicos.
4. Los disipadores de energía deberán ser ensayados, de esta manera se tendrán datos experimentales con ello se espera corroborar el modelo matemático de los modelos. Además, se obtendrán las propiedades mecánicas y se estimará la ductilidad de estos dispositivos.

5. El escalamiento de sismos se debe realizarse en compatibilidad de unidades, el espectro objetivo (espectro elástico) y el espectro de referencia (registros sísmicos) deben estar en unidades g. Los periodos del espectro de referencia deben estar en un rango del 0.2-1.5 T<sub>n</sub> del espectro objetivo.
6. El análisis de historia en el tiempo necesita mínimo de tres registros sísmicos, es importante definir el intervalo de tiempo más relevante de estos registros para analizarlos. Los registros de Pedernales, Manta y Quito presentan un pico de aceleraciones importantes en los primeros 60 segundos.
7. Los registros de aceleraciones generados tras el sismo del 16 de Abril con epicentro en Pedernales, generan espectros mayores a los establecidos por la NEC 15, por ello se genera la necesidad de modificar la norma.
8. El análisis estático no lineal debe partir de un estado denominado “Permanente no lineal”, como su nombre lo indica es un estado de carga en el que participa la carga muerta en un análisis no lineal. Este estado se asemeja al estado real de la estructura antes de aplicar cargas cíclicas.
9. Un análisis costo beneficio es indispensable para difundir el uso de disipadores de energía, por la redistribución de esfuerzos se pueden optimizar secciones. El beneficio económico es más notorio a largo plazo después de los costos de rehabilitación que se puedan evitar después de un evento severo. La disminución en costos al optimizar las secciones puede equivaler al costo del uso de los disipadores en la estructura; tras un sismo severo se espera reemplazar los dispositivos y no los elementos estructurales.
10. Los disipadores de energía deben ser usados en estructuras esenciales, ya que necesitan mantenerse operativas durante y después de un sismo severo. Es necesario incluir estos dispositivos para proteger la inversión realizada en todos los proyectos.

## REFERENCIAS

- A., W., G., H., & C., R. (1999). "Seismic response modification factor. *Journal of Structural Engineering ASCE*, 125 (4), 438-444.
- Aguiar, R. (2012). *Dinámica de Estructuras con CEINCI LAB*.
- Aguiar, R., & Morales, E. (2016). Desempeño del Aislador FPT8833/12-12/8-6 Empleado en la Construcción del Centro de Investigaciones de UFA-ESPE. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*.
- Aguiar, R., Bozzo, L., Mora, D., Apaestegui, H., Caiza, P., & Coyago, H. (2016). Protocolo de instalación de disipadores Shear Link Bozzo SLB40\_3 y Placas Gusset en el bloque estructural 4 de la UFA-ESPE. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 127-150.
- Aguiar, R., Bozzo, L., Mora, D., Silva, H., Caiza, P., & Coyago, H. (2016). Protocolo de instalación de disipadores Shear Link Bozzo SLB40\_3 y placas gusset en el bloque estructural 4 de la UFA-ESPE. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 150.
- Aguiar, R., Rodríguez, M., & Mora, D. (2016). *Análisis sísmico de estructuras con disipadores de energía ADAS o TADAS*. Barcelona.
- Aiken, I., Nims, D., Whittaker, A., & Kelly, J. (1993). Testing of Passive Energy Dissipation Systems. *Earthquake Spectra*, 9(3), 1-33.
- American Society of Civil Engineers, A. 7.-1. (2010). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. Reston.
- ASCE 7-10. (2010). *Minimum design loads for buildings and other structures*. ASCE Standard ASCE/SEI 7-10, American Society of Civil Engineers.
- Boza, Z., & Galán, D. (2013). *Diseño de un edificio aporticado con disipadores en arreglo Chevron*. Lima.
- Bozzo, L., & Barbat, A. (2004). *Diseño Sismorresistente de Edificios: Técnicas Convencionales y Avanzadas*. Barcelona, España: Reverté, S.A.

- Bozzo, L., Gaxiola, g., & Gonzales, H. (2016). Proceso de análisis y diseño utilizando disipadores sismicos tipo SLB. *Luis Bozzo Estructuras y Proyectos S.L.*
- Bruneau, M., Uang, C., & Whittaker, A. (1998). *Ductile Design of Steel Structures*. Boston. Massachusetts: McGraw Hill, Inc.
- Computers and Structures Inc. (2016). *CSI Analysis Reference Manual*.
- E, M. (2000). Inelastic displacement ratios for structures on firm sites. *ournal of Structural Engineerin*, 126 (10), 1150-1159.
- Elnashai, A., & Di Sarno, L. (2008). *Fundamentals of Earthquake Engineering*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Elorduy, J., & Rosenblueth, E. (1968). *Torsiones sísmicas en edificios de un piso*. México: UNAM, Instituto de Ingeniería, Series del Instituto de Ingeniería 164.
- Escobar, J., Mendoza, A., & Gómez, R. (2004). *Diseño simplificado por torsión sísmica estática*. Revista de Ingeniería Sísmica 70, 77-107 .
- ETABS. (2016). *Computers and Structures* .
- Federal Emergencu Management Agency, F. (1997). *Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings – NEHRP. FEMA273 - 274*. Washington, D.C.
- Federal Emergency Management Agency, F. (s.f.). *Multihazard Loss Estimation Methodology Hazus*. Washington, D.C. .
- Filiatrault, A., Tremblay, R., Christopoulos, C., Folz, B., & Pettinga, D. (2013). *Elements of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. Québec: Presses Internationales Polytechnique.



- Godínez, E., & Tena, A. (2014). Redundancia estructural en marcos dúctiles de concreto con contraventeo metálico tipo Chevron. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural*.
- Guevara, N., & Osorio, S. (2006). *Evaluación de la capacidad estructural del edificio de la Biblioteca de las Ingenierías y Arquitectura utilizando análisis estático no lineal (Pushover)*.
- Hibbeler, R. C. (2012). *Structural Analysis*. New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- Hurtado, F., & L, B. (2008). Numerical and experimental analysis of a shear-link energy dissipater for seismic protection of buildings. *14th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17*.
- Mora, D., & Aguiar, R. (2015). Modelación de diagrama momento-curvatura momento-rotación en secciones de acero estructural. *Revista CIENCIA*, 99-124.
- Mora, M. (2015). *Comportamiento de estructuras de acero con y sin disipadores de energía tipo TADAS, ubicadas en la ciudad de Quito, por el método de espectro de capacidad*. Quito.
- NEC-SE-CG. (2015). *Norma Ecuatoriana de la Construcción, Cargas No Sísmicas*. Quito: Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda.
- NEC-SE-DS. (2015). *Norma Ecuatoriana de la Construcción, Peligro Sísmico y Requisitos de Diseño Sísmico Resistente*. Quito: Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda.
- QuakeTek. (2016).
- Sánchez, A. (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*. Guayaquil.

- Sánchez, A. (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*. Guayaquil.
- SEAOC, S. E. (1995). *Recommended Lateral Force Requirements and Commentary (The Blue Book)*.
- SeismoSpect. (2017). *SeismoSoft*.
- Soong, T., & Dargush, G. (1997). *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*. West Sussex, England.
- Structural Engineers Association of California, S. (1995). *Recommended Lateral Force Requirements and Commentary (The Blue Book)*. California.
- Tena, A., & Cortés, J. (2014). Impacto de la redundancia estructural en el comportamiento sísmico de marcos dúctiles de concreto reforzado. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras, Vol. 19*, 1-34.
- Tsai, K., Chen, H., Hong, C., & Su, Y. (1993). Design of Steel Triangular Plate Energy Absorbers for Seismic-Resistant Construction. *Earthquake Spectra*, 505-528.
- Uang, C., & Bertero, V. (1986). *Earthquake Simulation Tests and Associated Studies of a 0.3 Scale Model of a Six-Story Concentrically Braced Steel Structure*. Berkeley, California.
- V., B., J., A., H., K., & E., M. (1991). “ Design guidelines for ductility and drift limits: Review of state-of-the-practice and of-the-art on ductility and drift-based earthquake-resistant design of buildings. *Report on Task1, A CUREeKajima Research Report*. .
- Villalva, P. (2015). *Comparación del análisis modal espectral, lineal y no lineal*. Quito.