



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA: INGENIERÍA CIVIL**

TÍTULO:

**ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DE DISIPADORES DE FRICCIÓN PARA
EL MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS
DE HORMIGÓN ARMADO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.**

AUTOR:

Jurado Guzmán, Max Elías

**Trabajo de Seminario de Graduación previo a la obtención
del Título de:**

INGENIERO CIVIL

TUTOR:

Casal Rodríguez, Xavier Federico

Guayaquil, Ecuador

2015



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA: INGENIERÍA CIVIL**

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por **Max Elías Jurado Guzmán**, como requerimiento parcial para la obtención del Título de **Ingeniero Civil**.

TUTOR

Xavier Federico, Casal Rodríguez

DIRECTOR DE LA CARRERA

Stefany Esther, Alcívar Bastidas

Guayaquil, a los 19 días del mes de Marzo del año 2015



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA: INGENIERÍA CIVIL**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Max Elías Jurado Guzmán**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación **ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DE DISIPADORES DE FRICCIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL** previa a la obtención del Título de Ingeniero Civil, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 21 días del mes de Febrero del año 2015

EL AUTOR

Max Elías, Jurado Guzmán



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA: INGENIERÍA CIVIL**

AUTORIZACIÓN

Yo, **Max Elías Jurado Guzmán**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DE DISIPADORES DE FRICCIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 21 días del mes de Febrero del año 2015

EL AUTOR

Max Elías, Jurado Guzmán

AGRADECIMIENTO

A Dios por su constante guía y soporte, porque es Él quien ha puesto las personas adecuadas para alcanzar mis metas en la vida y ha trazado los senderos que he de recorrer.

A mis padres, Javier y Patricia, motores principales de mi vida porque gracias a su ejemplo de trabajo y amor me han dado la fuerza necesaria para salir adelante y son mis modelos a seguir.

A mis hermanos, Amanda y Andrés, en quienes he encontrado los mejores amigos que hubiera podido desear y son parte fundamental de mi vida.

A mi enamorada, Nickole, compañera de caminar en quien he encontrado un apoyo constante para librar los obstáculos y un motivo para superarme y ser mejor cada día.

A mis maestros por mi formación universitaria; especialmente al Ingeniero Xavier Casal, por el apoyo, experiencia y tiempo brindado para desarrollar este trabajo.

Un agradecimiento especial al Ingeniero Carlos Chon, por haber complementado mi formación como profesional.

Max Jurado

DEDICATORIA

A Dios y mis padres, por todo el amor, esfuerzo y sacrificio que han puesto para formarme como ser humano.

Max Jurado



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA: INGENIERÍA CIVIL**

CALIFICACIÓN

Xavier Federico Casal Rodríguez

PROFESOR GUÍA O TUTOR

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
I.1 GENERALIDADES	1
I.2 ANTECEDENTES	2
I.3 ALCANCE	3
I.4 OBJETIVOS	3
CAPÍTULO 1: CARACTERIZACION DE SUELOS Y ZONIFICACION SISMICA DE GUAYAQUIL	5
1.1. INTRODUCCIÓN	5
1.2. SISMICIDAD HISTÓRICA DE GUAYAQUIL	7
1.2.1. ANTECEDENTES	7
1.2.2. PELIGRO SÍSMICO DE GUAYAQUIL.....	8
1.2.2.1. FUENTE 1: COSTA NOROESTE DE ECUADOR	8
1.2.2.1.1. SISMO DEL 13 DE MAYO DE 1942	9
1.2.2.2. FUENTE 2: ZONA SUR-ORIENTAL DE ECUADOR	10
1.2.2.3. FUENTE 3: ZONA LOCAL PRÓXIMA A GUAYAQUIL	11
1.2.3. ZONIFICACIÓN SÍSMICA DE GUAYAQUIL.....	11
1.3. CARACTERÍSTICAS DE SUELOS DE GUAYAQUIL	13
CAPÍTULO 2: COMPORTAMIENTO DINAMICO DE ESTRUCTURAS AMORTIGUADAS	15
2.1. INTRODUCCIÓN	15
2.2. SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD (SDF)	16
2.3. ECUACIÓN DE MOVIMIENTO Y EQUILIBRIO DINÁMICO EN SDF AMORTIGUADO SOMETIDO A CARGA LATERAL	17
2.4. SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD AMORTIGUADO EN VIBRACIÓN LIBRE .	18
2.5. SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD AMORTIGUADO EN VIBRACIÓN FORZADA ARMÓNICA	20
2.6. SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD SOMETIDO A FUERZAS EN FORMA DE PULSOS.....	25
2.7. SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD SOMETIDO A UNA EXCITACIÓN SÍSMICA	25
2.8. RESPUESTA INELÁSTICA DE UN SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD.....	28
2.9. SISTEMAS DE VARIOS GRADOS DE LIBERTAD (MDF).....	29
CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE PROTECCION SISMICA	31
3.1. INTRODUCCIÓN	31
3.2. BALANCE ENERGÉTICO DE SISTEMAS ESTRUCTURALES	32
3.3. SISTEMAS DE CONTROL ACTIVO Y SEMI-ACTIVO	40
3.4. SISTEMAS DE AISLAMIENTO DE BASE	42
3.5. DISIPADORES PASIVOS DE ENERGÍA	44
3.5.1. DISIPADORES METÁLICOS POR FLUENCIA DE METALES.....	45

3.5.2. DISIPADORES DE FRICCIÓN	48
3.5.3. DISIPADORES VISCOELÁSTICOS	49
3.5.4. DISIPADORES VISCOSOS	50
CAPÍTULO 4: TEORIA Y COMPORTAMIENTO DE DISIPADORES DE FRICCIÓN.....	51
4.1. INTRODUCCIÓN	51
4.2. PRINCIPIOS BÁSICOS DE FUNCIONAMIENTO	54
4.2.1. COMPONENTES DE FRICCIÓN	55
4.2.1.1. COMPONENTE DE ADHESIÓN.....	56
4.2.1.2. COMPONENTE DE TRABAZÓN	57
4.2.1.3. CONTAMINANTES Y PARTÍCULAS AMBIENTALES.....	57
4.2.2. EFECTOS QUE INFLUENCIAN EL COMPORTAMIENTO DE LA FUERZA DE FRICCIÓN.....	58
4.2.2.1. PRESIÓN APARENTE	58
4.2.2.2. VELOCIDAD DE DESLIZAMIENTO	58
4.2.2.3. TEMPERATURA.....	59
4.2.2.4. CORROSIÓN Y PARTÍCULAS CONTAMINANTES.....	59
4.3. DISIPADORES DE FRICCIÓN EXISTENTES	60
4.3.1. SLOTTED BOLTED CONNECTIONS (SBC)	61
4.3.2. DISIPADOR DE FRICCIÓN SUMITOMO.....	62
4.3.3. DISIPADOR DE FRICCIÓN PALL.	62
4.4. MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE LOS DISIPADORES DE FRICCIÓN.....	65
4.5. EJEMPLO DE APLICACIÓN	69
4.5.1. RESPUESTA DEL SISTEMA SIN DISIPADOR.....	74
4.5.2. RESPUESTA DEL SISTEMA CON DISIPADOR	78
4.5.3. COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA DEL SISTEMA SIN DISIPADOR Y CON DISIPADOR	83
CAPÍTULO 5: ANALISIS NO LINEAL HISTORIA TIEMPO DE LOS PORTICOS SIN DISIPADORES Y CON DISIPADORES.....	85
5.1. INTRODUCCIÓN	85
5.2. PÓRTICOS DE HORMIGÓN ARMADO.....	86
5.3. REGISTROS SÍSMICOS APLICADOS.....	89
5.4. ANÁLISIS HISTORIA TIEMPO DE PÓRTICOS.....	92
5.4.1. HIPÓTESIS DE MODELOS SIN DISIPADORES	92
5.4.2. HIPÓTESIS DE MODELOS CON DISIPADORES	96
5.5. RESULTADOS DE ANÁLISIS DE PÓRTICOS	100
5.5.1. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE PÓRTICO DE 4 PISOS.....	101
5.5.1.1. DERIVAS DE PISO	101
5.5.1.2. RESPUESTA ENERGÉTICA	104
5.5.1.3. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO ESTRUCTURAL.....	107
5.5.2. RESULTADOS PÓRTICO DE 8 PISOS	111
5.5.2.1. DERIVAS DE PISO	111

5.5.2.2. RESPUESTA ENERGÉTICA	114
5.5.2.3. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO ESTRUCTURAL	116
5.5.3. RESULTADOS PÓRTICO DE 12 PISOS	122
5.5.3.1. DERIVAS DE PISO	122
5.5.3.2. RESPUESTA ENERGÉTICA	125
5.5.3.3. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO ESTRUCTURAL	127
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	133
6.1. CONCLUSIONES	133
6.2. RECOMENDACIONES	135
BIBLIOGRAFÍA	136
ANEXOS	140

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1: SISMOS SENTIDOS EN GUAYAQUIL EN EL PERIODO 1653-1998 CON INTENSIDADES MERCALLI MAYORES O IGUALES A VI GRADOS (IIFIUC, PROYECTO RADIUS).....	7
TABLA 1.2: “AMENAZA SÍSMICA” QUE REPRESENTA CADA ÁREA DE PELIGRO PARA GUAYAQUIL (IIFUIC, RADIUS 1999).....	8
TABLA 3.1: TIPO DE USO, DESTINO E IMPORTANCIA DE LA ESTRUCTURA (NEC, 2014).....	32
TABLA 3.2: CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN SÍSMICA (SOONG Y DARGUSH, 1997).....	40
TABLA 3.3: CATEGORÍAS DE DISIPADORES PASIVOS DE ENERGÍA (CHRISTOPOULOS ET AL, 2006).....	44
TABLA 4.1: RESPUESTA DEL SISTEMA SIN DISIPADORES.....	74
TABLA 4.2: RESPUESTA DEL SISTEMA CON DISIPADOR.....	78
TABLA 4.3: COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE RESPUESTA DEL SISTEMA SIN DISIPADOR Y CON DISIPADOR.....	83
TABLA 5.1: DIMENSIONES Y ARMADO DE COLUMNAS DE PÓRTICO DE 4 PISOS (SÁNCHEZ, 2014).....	87
TABLA 5.2: DIMENSIONES Y ARMADO DE VIGAS DE PÓRTICO DE 4 PISOS (SÁNCHEZ, 2014).....	87
TABLA 5.3: DIMENSIONES Y ARMADO DE COLUMNAS DE PÓRTICO DE 8 PISOS (SÁNCHEZ, 2014).....	88
TABLA 5.4: DIMENSIONES Y ARMADO DE VIGAS DE PÓRTICO DE 8 PISOS (SÁNCHEZ, 2014).....	88
TABLA 5.5: DIMENSIONES Y ARMADO DE COLUMNAS DE PÓRTICO DE 12 PISOS (SÁNCHEZ, 2014).....	88
TABLA 5.6: DIMENSIONES Y ARMADO DE VIGAS DE PÓRTICO DE 12 PISOS (SÁNCHEZ, 2014).....	89
TABLA 5.7: PROPIEDADES DE DISIPADORES DE FRICCIÓN INCORPORADOS A PÓRTICO DE 4 PISOS.....	99
TABLA 5.8: PROPIEDADES DE DISIPADORES DE FRICCIÓN INCORPORADOS A PÓRTICO DE 8 PISOS.....	99
TABLA 5.9: PROPIEDADES DE DISIPADORES DE FRICCIÓN INCORPORADOS A PÓRTICO DE 12 PISOS.....	99
TABLA 5.10: OBJETIVOS DE DESEMPEÑO ESTRUCTURAL PARA PÓRTICOS DE HORMIGÓN (FEMA 356, 2000).....	100
TABLA 5.11: COMPARACIÓN DERIVAS DE PISO PÓRTICO DE 4 PISOS – SISMO EL CENTENARIO.....	101
TABLA 5.12: COMPARACIÓN DERIVAS DE PISO PÓRTICO DE 4 PISOS – SISMO SG.....	101
TABLA 5.13: COMPARACIÓN DERIVAS DE PISO PÓRTICO DE 4 PISOS – SISMO SQ.....	101

TABLA 5.14: COMPARACIÓN DE RESPUESTA ENERGÉTICA DE PÓRTICO DE 4 PISOS.	104
TABLA 5.15: NIVEL DE DESEMPEÑO SÍSMICO DE PÓRTICO DE 4 PISOS.....	107
TABLA 5.16: COMPARACIÓN DERIVAS DE PISO PÓRTICO DE 8 PISOS – SISMO EL CENTENARIO.....	111
TABLA 5.17: COMPARACIÓN DERIVAS DE PISO PÓRTICO DE 8 PISOS – SISMO SG.	111
TABLA 5.18: COMPARACIÓN DERIVAS DE PISO PÓRTICO DE 8 PISOS – SISMO SQ.	112
TABLA 5.19: COMPARACIÓN DE RESPUESTA ENERGÉTICA DE PÓRTICO DE 8 PISOS.	114
TABLA 5.20: NIVEL DE DESEMPEÑO SÍSMICO DE PÓRTICO DE 8 PISOS.....	117
TABLA 5.21: COMPARACIÓN DERIVAS DE PISO PÓRTICO DE 12 PISOS – SISMO EL CENTENARIO.....	122
TABLA 5.22: COMPARACIÓN DERIVAS DE PISO PÓRTICO DE 12 PISOS – SISMO SG.	122
TABLA 5.23: COMPARACIÓN DERIVAS DE PISO PÓRTICO DE 12 PISOS – SISMO SQ.	123
TABLA 5.24: COMPARACIÓN DE RESPUESTA ENERGÉTICA DE PÓRTICO DE 12 PISOS.	125
TABLA 5.25: NIVEL DE DESEMPEÑO SÍSMICO DE PÓRTICO DE 12 PISOS.....	128

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1: IMAGEN SATELITAL DE LA CIUDAD DE GUAYAQUIL (IMAGEN DE GOOGLE EARTH).	6
FIGURA 1.2: MAPA DE ZONIFICACIÓN SÍSMICA DEL ECUADOR (NEC).....	12
FIGURA 1.3: MAPA DE ZONIFICACIÓN GEOLÓGICA DE LA CIUDAD DE GUAYAQUIL (VERA ET AL.).	14
FIGURA 2.1: ELEMENTOS COMPONENTES DE UN SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD.....	16
FIGURA 2.2: DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE PARA SDF. (CHOPRA, 2012)	18
FIGURA 2.3: VIBRACIÓN LIBRE DE SISTEMAS CON AMORTIGUAMIENTO VISCOZO MENOR, IGUAL Y MAYOR AL CRÍTICO (CHOPRA, 2012).....	19
FIGURA 2.4: RESPUESTA DE UN SISTEMA AMORTIGUADO A UNA EXCITACIÓN ARMÓNICA SINUSOIDAL - $z=0.05$ (SÁNCHEZ, 2014).	22
FIGURA 2.5: FACTOR DE AMPLIFICACIÓN DE RESPUESTA DE DESPLAZAMIENTOS Y ÁNGULO DE FASE DE SISTEMAS AMORTIGUADOS SOMETIDOS A EXCITACIONES ARMÓNICAS (SÁNCHEZ, 2014).....	23
FIGURA 2.6: SUPERPOSICIÓN DE PULSOS PARA OBTENER LA RESPUESTA DE UNA ESTRUCTURA ANTE UNA EXCITACIÓN ARBITRARIA (CHOPRA, 2012).....	26
FIGURA 2.7: ANÁLISIS DE SDF SOMETIDO A UNA EXCITACIÓN SÍSMICA (CHOPRA, 2012).	26
FIGURA 2.8: CURVA HISTERÉTICO FORMADA EN RANGO INELÁSTICO (IZQ.) Y ELÁSTICO (DERECHA) (CHOPRA, 2012).	29
FIGURA 3.1: ANALOGÍA DE FLUJO DE AGUA LLUVIA (CHRISTOPOULOS ET AL 2006); A: BALANCE DURANTE EL SISMO, B: BALANCE AL FINAL DEL SISMO.	33
FIGURA 3.2: VARIACIÓN DE LA ENERGÍA CON EL TIEMPO; (A) SISTEMA LINEAL; (B) SISTEMA ELASTOPLÁSTICO	37
FIGURA 3.3: ANALOGÍA DE FLUJO DE AGUA LLUVIA CON DISIPADOR DE ENERGÍA (CHRISTOPOULOS ET AL 2006).....	38
FIGURA 3.4: ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE CONTROL ACTIVO (VILLAREAL ET AL, 2009)	41
FIGURA 3.5: EFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE UN SISTEMA DE AISLAMIENTO DE BASE EN LA ESTRUCTURA (SÁNCHEZ, 2014)	43
FIGURA 3.6: AISLADORES DE BASE; IZQUIERDA: AISLADOR ELASTOMÉRICO CON NÚCLEO DE PLOMO (SÁNCHEZ, 2014); DERECHA: AISLADOR FRICCIONAL DESLIZANTE (HTTP://WWW.REDPAVIA.COM/PROJECTS/PROJECT4/2.JPG).	43
FIGURA 3.7: DISIPADOR TIPO ADAS (AIKEN, I; NIMS, D; WHITTAKER, A & KELLY, J, 2003)	47
FIGURA 3.8: DISIPADOR TIPO TADAS (WWW.SCIELO.BR/IMG/REVISTAS/LAJSS/V8N4/A04FIG01.JP	47
FIGURA 3.9: DISIPADOR DE FRICCIÓN (AIKEN, 1996).	48
FIGURA 3.10: TIPOS DE DISIPADORES VISCOELÁSTICOS (LAMA, 2103).	49
FIGURA 3.11: ESQUEMA DE DISIPADOR TAYLOR DE FLUIDO VISCOZO.	50

FIGURA 4.1: DISIPADORES DE FRICCIÓN. A) LIMITED SLIP BOLT JOINT, B) DISIPADOR DE FRICCIÓN EN X (SOONG ET AL., 1997).....	52
FIGURA 4.2: DISIPADORES DE FRICCIÓN. C) DISIPADOR DE FRICCIÓN SUMITOMO, D) ENERGY DISIPATING RESTRAINT, E) SLOTTED BOLTED CONNECTION (SOONG ET AL., 1997).....	53
FIGURA 4.3: CURVA FUERZA-DESPLAZAMIENTO IDEALIZADA PARA UN DISIPADOR DE FRICCIÓN (CHRISTOPOULOS ET AL, 2006).	54
FIGURA 4.4: IRREGULARIDADES (ASPERITY) Y ZONAS DE PRESIÓN (JUNCTION) ENTRE SUPERFICIES DE DESLIZAMIENTO (CHRISTOPOULOS ET AL, 2006).....	56
FIGURA 4.5: PENDIENTES DE RUGOSIDADES Y PUNTOS DE CONTACTOS ENTRE CUERPOS (CHRISTOPOULOS ET AL, 2006).....	57
FIGURA 4.6: RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DE DESLIZAMIENTO, PRESIÓN APARENTE Y COEFICIENTE DE FRICCIÓN (CHRISTOPOULOS ET AL, 2006).	59
FIGURA 4.7: INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN EL COEFICIENTE DE FRICCIÓN (CHRISTOPOULOS ET AL, 2006).....	60
FIGURA 4.8: SLOTTED BOLTED CONNECTION PARA UN EDIFICIO DE ACERO (CHRISTOPOULOS ET AL, 2006).....	61
FIGURA 4.9: DISIPADOR DE FRICCIÓN SUMITOMO (CHRISTOPOULOS ET AL, 2006).	61
FIGURA 4.10: RESPUESTA DE DISIPADORES DE FRICCIÓN SUMITOMO ANTE CICLOS DE CARGA Y DESCARGA (CHRISTOPOULOS ET AL, 2006).....	62
FIGURA 4.11: DISIPADOR DE FRICCIÓN DE PALL (CHRISTOPOULOS ET AL, 2006).	63
FIGURA 4.12: COMPORTAMIENTO HISTERÉTICO DE UN PÓRTICO RESISTENTE A MOMENTO CON DISIPADORES DE FRICCIÓN DE PALL (CHRISTOPOULOS ET AL, 2006).	64
FIGURA 4.13: MODELO MATEMÁTICO IDEAL DE LA RESPUESTA HISTERÉTICA DE UN DISIPADOR DE FRICCIÓN (CHRISTOPOULOS ET AL, 2006).	65
FIGURA 4.14: EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA CARGA DE DESLIZAMIENTO EN EL DESPLAZAMIENTO DE RESPUESTA DE ESTRUCTURAS (CHRISTOPOULOS ET AL, 2006).	68
FIGURA 4.15: EJEMPLO DE APLICACIÓN. PÓRTICO SIMPLE SIN DISIPADOR.....	69
FIGURA 4.16: SECCIÓN TRANSVERSAL DE COLUMNAS Y DIAGRAMA DE MOMENTO-CURVATURA.....	70
FIGURA 4.17: EJEMPLO DE APLICACIÓN. PÓRTICO SIMPLE CON DISIPADOR.	70
FIGURA 4.18: REGISTRO ACELEROGRÁFICO DEL SISMO DE EL CENTRO, CALIFORNIA – 18 DE MAYO DE 1940 (CHOPRA, 2012).	73
FIGURA 4.19: RESPUESTA DEL SISTEMA SIN DISIPADOR. (A) DESPLAZAMIENTO VS. TIEMPO, (B) VELOCIDAD VS. TIEMPO, (C) ACELERACIÓN VS. TIEMPO.....	75
FIGURA 4.20: RESPUESTA DEL SISTEMA SIN DISIPADOR. RELACIÓN FUERZA-DESPLAZAMIENTO DE LOS COMPONENTES ESTRUCTURALES DE (A) DEFORMACIÓN INELÁSTICA, (B) AMORTIGUAMIENTO VISCOSO, (C) INERCIAL.	76
FIGURA 4.21: RESPUESTA DEL SISTEMA SIN DISIPADOR. (A) RESPUESTA ENERGÉTICA DEL SISTEMA, (B) BALANCE ENERGÉTICO DEL SISTEMA.....	77
FIGURA 4.22: RESPUESTA DEL SISTEMA CON DISIPADOR. (A) DESPLAZAMIENTO VS. TIEMPO, (B) VELOCIDAD VS. TIEMPO, (C) ACELERACIÓN VS. TIEMPO.....	79

FIGURA 4.23: RESPUESTA DEL SISTEMA CON DISIPADOR. RELACIÓN FUERZA-DESPLAZAMIENTO DE LOS COMPONENTES ESTRUCTURALES DE (A) DEFORMACIÓN INELÁSTICA, (B) AMORTIGUAMIENTO VISCOSO.....	80
FIGURA 4.24: RESPUESTA DEL SISTEMA CON DISIPADOR. RELACIÓN FUERZA-DESPLAZAMIENTO DE LOS COMPONENTES ESTRUCTURALES DE (A) FUERZA INERCIAL, (B) FUERZA DESLIZAMIENTO DISPOSITIVO DE FRICCIÓN.	81
FIGURA 4.25: RESPUESTA DEL SISTEMA CON DISIPADOR. (A) RESPUESTA ENERGÉTICA DEL SISTEMA, (B) BALANCE ENERGÉTICO DEL SISTEMA.....	82
FIGURA 4.26: COMPARACIÓN DE RESPUESTAS DEL SISTEMA SIN DISIPADOR Y CON DISIPADOR. (A) DESPLAZAMIENTO VS. TIEMPO, (B) VELOCIDAD VS. TIEMPO, (C) ACCELERACIÓN VS. TIEMPO.	84
FIGURA 5.1: ESPECTRO ELÁSTICO E INELÁSTICO DE RESPUESTA SEGÚN EL NEC-14 PARA ZONA V, TIPO DE SUELO E Y COEFICIENTE DE REDUCCIÓN INELÁSTICA 5 (SÁNCHEZ, 2014).....	87
FIGURA 5.2: REGISTRO SÍSMICO DEL CENTENARIO GUAYAQUIL 26 DE ABRIL DE 1993 (SÁNCHEZ, 2014).....	90
FIGURA 5.3: REGISTRO SÍSMICO SINTÉTICO SG (SÁNCHEZ, 2014).....	90
FIGURA 5.4: REGISTRO SÍSMICO SINTÉTICO SQ (SÁNCHEZ, 2014).....	91
FIGURA 5.5: ESPECTRO DE RESPUESTA PARA 5% AMORTIGUAMIENTO.....	91
FIGURA 5.6: PÓRTICO DE 4 PISOS SIN DISIPADORES MODELADO EN SAP 2000 V17.1.0	93
FIGURA 5.7: PÓRTICO DE 8 PISOS SIN DISIPADORES MODELADO EN SAP 2000 V17.1.0	93
FIGURA 5.8: PÓRTICO DE 12 PISOS SIN DISIPADORES MODELADO EN SAP 2000 V17.1.0	94
FIGURA 5.9: MODELO DE CONCRETO SEGÚN MANDER. IZQ. CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN CONCRETO NO CONFINADO (RECUBRIMIENTO); DER. CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN CONCRETO CONFINADO (NÚCLEO).	95
FIGURA 5.10: CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN ACERO ASTM A706 GRADO 60.	95
FIGURA 5.11: PÓRTICO DE 4 PISOS CON DISIPADORES MODELADO EN SAP 2000 V17.1.0	97
FIGURA 5.12: PÓRTICO DE 8 PISOS CON DISIPADORES MODELADO EN SAP 2000 V17.1.0	97
FIGURA 5.13: PÓRTICO DE 12 PISOS CON DISIPADORES MODELADO EN SAP 2000 V17.1.0	98
FIGURA 5.14: DIAGRAMA DE DERIVAS DE ENTREPISO PÓRTICO DE 4 PISOS - SISMO EL CENTENARIO.	102
FIGURA 5.15: DIAGRAMA DE DERIVAS DE ENTREPISO PÓRTICO DE 4 PISOS - SISMO SG.	102
FIGURA 5.16: DIAGRAMA DE DERIVAS DE ENTREPISO PÓRTICO DE 4 PISOS - SISMO SQ.	102
FIGURA 5.17: BALANCE ENERGÉTICO DE PÓRTICO DE 4 PISOS – SISMO CENTENARIO. SUP.: PÓRTICO SIN DISIPADORES. INF.: PÓRTICO CON DISIPADORES.	105

FIGURA 5.18: BALANCE ENERGÉTICO DE PÓRTICO DE 4 PISOS – SISMO SG. SUP.: PÓRTICO SIN DISIPADORES. INF.: PÓRTICO CON DISIPADORES.....	105
FIGURA 5.19: BALANCE ENERGÉTICO DE PÓRTICO DE 4 PISOS – SISMO SQ. SUP.: PÓRTICO SIN DISIPADORES. INF.: PÓRTICO CON DISIPADORES.....	106
FIGURA 5.20: NIVELES DE DESEMPEÑO SEGÚN FEMA (MOEHLE, 2015).	107
FIGURA 5.21: DISTRIBUCIÓN DE RÓTULAS PLÁSTICAS EN PÓRTICO DE 4 PISOS – SISMO CENTENARIO. SUP.: PÓRTICO SIN DISIPADORES; INF.: PÓRTICO CON DISIPADORES	108
FIGURA 5.22: DISTRIBUCIÓN DE RÓTULAS PLÁSTICAS EN PÓRTICO DE 4 PISOS – SISMO SG. SUP.: PÓRTICO SIN DISIPADORES; INF.: PÓRTICO CON DISIPADORES	108
FIGURA 5.23: DISTRIBUCIÓN DE RÓTULAS PLÁSTICAS EN PÓRTICO DE 4 PISOS – SISMO SQ. SUP.: PÓRTICO SIN DISIPADORES; INF.: PÓRTICO CON DISIPADORES	109
FIGURA 5.24: DIAGRAMA DE HISTÉRESIS DE NUDO BASE EN EJE B – SISMO CENTENARIO. SUP.: PÓRTICO SIN DISIPADOR; INF.: PÓRTICO CON DISIPADOR.	109
FIGURA 5.25: DIAGRAMA DE HISTÉRESIS DE NUDO BASE EN EJE B – SISMO SG. SUP.: PÓRTICO SIN DISIPADOR; INF.: PÓRTICO CON DISIPADOR.	110
FIGURA 5.26: DIAGRAMA DE HISTÉRESIS DE NUDO BASE EN EJE B – SISMO SQ. SUP.: PÓRTICO SIN DISIPADOR; INF.: PÓRTICO CON DISIPADOR.	110
FIGURA 5.27: DIAGRAMA DE DERIVAS DE ENTREPISO PÓRTICO DE 8 PISOS - SISMO EL CENTENARIO.....	112
FIGURA 5.28: DIAGRAMA DE DERIVAS DE ENTREPISO PÓRTICO DE 8 PISOS - SISMO SG.	113
FIGURA 5.29: DIAGRAMA DE DERIVAS DE ENTREPISO PÓRTICO DE 8 PISOS - SISMO SQ.	113
FIGURA 5.30: BALANCE ENERGÉTICO DE PÓRTICO DE 8 PISOS – SISMO CENTENARIO. SUP.: PÓRTICO SIN DISIPADORES. INF.: PÓRTICO CON DISIPADORES.	115
FIGURA 5.31: BALANCE ENERGÉTICO DE PÓRTICO DE 8 PISOS – SISMO SG. SUP.: PÓRTICO SIN DISIPADORES. INF.: PÓRTICO CON DISIPADORES.....	115
FIGURA 5.32: BALANCE ENERGÉTICO DE PÓRTICO DE 8 PISOS – SISMO SQ. SUP.: PÓRTICO SIN DISIPADORES. INF.: PÓRTICO CON DISIPADORES.....	116
FIGURA 5.33: DISTRIBUCIÓN DE RÓTULAS PLÁSTICAS EN PÓRTICO DE 8 PISOS – SISMO CENTENARIO. SUP.: PÓRTICO SIN DISIPADORES; INF.: PÓRTICO CON DISIPADORES	117
FIGURA 5.34: DISTRIBUCIÓN DE RÓTULAS PLÁSTICAS EN PÓRTICO DE 8 PISOS – SISMO SG. SUP.: PÓRTICO SIN DISIPADORES; INF.: PÓRTICO CON DISIPADORES	118
FIGURA 5.35: DISTRIBUCIÓN DE RÓTULAS PLÁSTICAS EN PÓRTICO DE 8 PISOS – SISMO SQ. SUP.: PÓRTICO SIN DISIPADORES; INF.: PÓRTICO CON DISIPADORES	119

FIGURA 5.36: DIAGRAMA DE HISTÉRESIS DE NUDO BASE EN EJE B – SISMO CENTENARIO. SUP.: PÓRTICO SIN DISIPADOR; INF.: PÓRTICO CON DISIPADOR.	120
FIGURA 5.37: DIAGRAMA DE HISTÉRESIS DE NUDO BASE EN EJE B – SISMO SG. SUP.: PÓRTICO SIN DISIPADOR; INF.: PÓRTICO CON DISIPADOR.	120
FIGURA 5.38: DIAGRAMA DE HISTÉRESIS DE NUDO BASE EN EJE B – SISMO SQ. SUP.: PÓRTICO SIN DISIPADOR; INF.: PÓRTICO CON DISIPADOR.	121
FIGURA 5.39: DIAGRAMA DE DERIVAS DE ENTREPISO PÓRTICO DE 12 PISOS - SISMO EL CENTENARIO.	123
FIGURA 5.40: DIAGRAMA DE DERIVAS DE ENTREPISO PÓRTICO DE 12 PISOS - SISMO SG.	124
FIGURA 5.41: DIAGRAMA DE DERIVAS DE ENTREPISO PÓRTICO DE 12 PISOS - SISMO SQ.	124
FIGURA 5.42: BALANCE ENERGÉTICO DE PÓRTICO DE 12 PISOS – SISMO CENTENARIO. SUP.: PÓRTICO SIN DISIPADORES. INF.: PÓRTICO CON DISIPADORES.	126
FIGURA 5.43: BALANCE ENERGÉTICO DE PÓRTICO DE 12 PISOS – SISMO SG. SUP.: PÓRTICO SIN DISIPADORES. INF.: PÓRTICO CON DISIPADORES.	126
FIGURA 5.44: BALANCE ENERGÉTICO DE PÓRTICO DE 12 PISOS – SISMO SQ. SUP.: PÓRTICO SIN DISIPADORES. INF.: PÓRTICO CON DISIPADORES.	127
FIGURA 5.45: DISTRIBUCIÓN DE RÓTULAS PLÁSTICAS EN PÓRTICO DE 12 PISOS – SISMO CENTENARIO. SUP.: PÓRTICO SIN DISIPADORES; INF.: PÓRTICO CON DISIPADORES	128
FIGURA 5.46: DISTRIBUCIÓN DE RÓTULAS PLÁSTICAS EN PÓRTICO DE 12 PISOS – SISMO SG. SUP.: PÓRTICO SIN DISIPADORES; INF.: PÓRTICO CON DISIPADORES	129
FIGURA 5.47: DISTRIBUCIÓN DE RÓTULAS PLÁSTICAS EN PÓRTICO DE 12 PISOS – SISMO SQ. SUP.: PÓRTICO SIN DISIPADORES; INF.: PÓRTICO CON DISIPADORES	130
FIGURA 5.48: DIAGRAMA DE HISTÉRESIS DE NUDO BASE EN EJE B – SISMO CENTENARIO. SUP.: PÓRTICO SIN DISIPADOR; INF.: PÓRTICO CON DISIPADOR.	131
FIGURA 5.49: DIAGRAMA DE HISTÉRESIS DE NUDO BASE EN EJE B – SISMO SG. SUP.: PÓRTICO SIN DISIPADOR; INF.: PÓRTICO CON DISIPADOR.	131
FIGURA 5.50: DIAGRAMA DE HISTÉRESIS DE NUDO BASE EN EJE B – SISMO SQ. SUP.: PÓRTICO SIN DISIPADOR; INF.: PÓRTICO CON DISIPADOR.	132

RESUMEN

Ciertas zonas del mundo son catalogadas de alta actividad sísmica por diversos factores geológicos que las vuelven únicas; entre estas zonas, el Ecuador se encuentran en una de alta actividad.

Por estos motivos, las estructuras deben de diseñarse de acuerdo a ciertas regulaciones especiales para reducir los daños que sufre la estructura ante la acción de un sismo, evitando las pérdidas de vidas humanas. Actualmente, se han desarrollado técnicas para disminuir la demanda sísmica, entre las cuales se ha encontrado que los sistemas de disipación pasiva de energía son muy eficientes y económicamente viables.

El objetivo de este trabajo es analizar las ventajas que brindan en el desempeño sísmico de estructuras de hormigón armado en la ciudad de Guayaquil el uso de disipadores pasivos de fricción mediante la elaboración de un modelo matemático para realizar un análisis dinámico no lineal historia tiempo de pórticos convencionales sin y con disipadores de fricción, utilizando registros sísmicos que caractericen las propiedades del tipo de suelo para el centro de Guayaquil, para realizar la comparación de los resultados obtenidos.

Palabras Claves: Disipador, sismos, hormigón, estructuras, fricción, desempeño, Guayaquil, Ecuador.

ABSTRACT

Different world wide zones are catalogue as prone earthquake regions because of diverse geological factors that make them unique; among them, Ecuador is located in a zone of high seismic hazard.

For that reason, structures constructed in these zones have to be design according some special regulations and details, in order to minimize structural damage during design earthquakes and avoiding human life loss. Alternative techniques to reduce seismic demand have been developed, such as the introduction of damping friction devices, which are very efficient and economical for this purpose.

The main objective of this work is to evaluate the benefits of reinforced concrete frames incorporating damping friction devices; to achieve this purpose; an analytical model of the frame will be run through a non-lineal time history analysis with and without friction dampers using characteristics earthquake seismic record according Guayaquil's site condition in order to compare results.

Key Words: Damper, earthquake, concrete, structures, friction, performance, Guayaquil, Ecuador.

INTRODUCCIÓN

I.1 Generalidades

Los criterios y lineamientos principales del diseño sismorresistente según lo expresado en los diversos códigos de diseño vigentes se han derivado o están relacionados estrechamente con la teoría de la dinámica estructural (Chopra, 2012) y por lo tanto, para comprender su utilidad y alcance es necesario entender cuáles son los principios de esta teoría.

En general, los códigos incluyen especificaciones en donde las estructuras son diseñadas para resistir satisfactoriamente determinadas fuerzas laterales (estáticas o dinámicas) dentro del rango elástico lineal, que son asociadas a las propiedades de la estructura y sismicidad propia de cada región (Chopra, 2012), para lo cual se proponen fórmulas y métodos empíricos característicos de cada sitio para la determinación de estas fuerzas.

En el caso del Ecuador, mediante la implementación obligatoria de la NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN (NEC) expresada en el documento oficial NEC-SE-DS – Cargas sísmicas – Diseño sismorresistente, se busca evitar la pérdida de vidas a través de impedir el colapso de todo tipo de estructura. Añadiendo el objetivo de protección y garantía de funcionalidad luego de un evento sísmico extremo para las estructuras de ocupación especial y esencial.

En el presente documento se analizará el uso de disipadores pasivos de energía y de forma particular, los de fricción, con la finalidad de explicar las ventajas que brinda su incorporación en el diseño sismorresistente de edificaciones en la ciudad de Guayaquil.

I.2 Antecedentes

Ciertas zonas del mundo son catalogadas de alta actividad sísmica por diversos factores geológicos que las vuelven únicas respecto a sus semejantes. Entre estas zonas, varias del Ecuador se encuentran en una de alta actividad, en donde para el diseño de estructuras deben de tomarse consideraciones especiales, siendo el caso crítico de diseño, un evento sísmico.

Por tal motivo, la constitución de la República del Ecuador en su artículo 375 establece que el Estado ejercerá la rectoría para la planificación, control, financiamiento y elaboración de políticas de habitad y vivienda, existiendo en la actualidad un código de construcción de aplicación obligatoria (NEC hasta el capítulo 6), cuyo objeto principal es la de establecer un conjunto de especificaciones básicas adecuadas para el diseño de estructuras que están sujetas a los efectos de terremotos que podría presentarse en algún momento de su vida útil (NEC, 2014), que fue aprobado mediante acuerdo ministerial N.0028 del 19 de agosto del 2014 y publicado en el registro oficial del 26 de agosto del 2014.

Según el mapa de zonificación sísmica implementado por el NEC, la ciudad de Guayaquil se encuentra ubicada en una zona de peligro sísmico ALTO (Zona V), y por lo tanto, sus edificaciones deben de poder desarrollar la suficiente resistencia y ductilidad para que no colapsen ante un evento sísmico aunque puedan resultar con daños estructurales importantes.

Por las razones antes expuestas, en diversos países del mundo se están desarrollando mecanismos de protección de estructuras o medidas de mejoras de desempeño ante eventos sísmicos, que en conjunto con las regulaciones especiales obligatorias o códigos de diseño, reduzcan los daños que sufre la estructura ante la acción de un sismo y eviten pérdidas de vidas humanas.

Entre las medidas alternas que permiten mejorar el desempeño de la respuesta sísmica de una estructura, se ha encontrado que los sistemas de aislamiento sísmico, control activo o de disipación pasiva de energía son muy eficientes y económicamente viables. Estos últimos, los pasivos, se basan en la incorporación de dispositivos mecánicos en el pórtico de la estructura para disipar energía durante movimientos laterales indeseados, mediante la fluencia de metales, fricción por deslizamiento de dos placas, movimiento de un pistón a través de un agujero.

Sánchez (2014) informa que el estudio y uso de tecnologías en estructuras sismorresistentes tiene área abierta para nuevos desarrollos, existiendo limitado conocimiento sobre el tema en ciertos países como México, Chile y Perú; pero en el Ecuador, la aplicación de estos elementos aún está lejos de ser incorporada a los sistemas estructurales convencionales.

I.3 Alcance

Este trabajo de titulación consiste en modelar, analizar y comparar las ventajas que brinda el uso de los disipadores de fricción desde el punto de vista del desempeño sísmico de un pórtico convencional de hormigón armado sin disipadores y otro con disipadores.

I.4 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo de titulación es analizar las ventajas que brindan en el desempeño sísmico de estructuras de hormigón armado en la ciudad de Guayaquil el uso de disipadores de fricción mediante la elaboración de un modelo matemático para realizar un análisis mediante el método de los elementos finitos en un programa de análisis y diseño estructural como el SAP 2000 y el OPENSEES, en donde se introducirán las características geométricas, propiedades de los materiales y las cargas para una estructura de uso convencional en la ciudad de Guayaquil según los

lineamientos mínimos recomendados por el NEC para posteriormente realizar un análisis tiempo historia con sismos que simulen el comportamiento del suelo para el centro de Guayaquil y luego incorporar al modelo elementos que asimilen el comportamiento de los disipadores de fricción para realizar la comparación de los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 1

CARACTERIZACIÓN SÍSMICA DE GUAYAQUIL

1.1. Introducción

Ecuador es un país que se encuentra ubicado en la región noroccidente de América del Sur y cuenta con una superficie aproximada de 283.500 Km², incluyendo las Islas Galápagos y una población de 14'483.499 habitantes según el último censo nacional del 2010 (Ortiz, 2013).

Guayaquil es la ciudad más poblada del Ecuador con una población de 2'350.915 habitantes. Se encuentra localizada al suroeste del Ecuador, específicamente en el extremo sur de la cuenca del río Guayas (ver Figura 1.1), limitada al este por la cordillera de Los Andes y al oeste por la Cordillera Chongón Colonche (IIFIUC, 1999) y está catalogada como una de las ciudades más grandes de Latinoamérica, ya que representa un centro de intercambio para negocios y comercio, industrias, finanzas, entretenimiento y turismo.

Según Cuntó (2014), entre los años desde la fundación de la ciudad hasta la aparición de los medios de comunicación escritos (1532-1821), debido a que no se habían reportado sismos con intensidades Mercalli mayores de VII Guayaquil no se consideraba como una ciudad de alta vulnerabilidad a sismos, siendo los desastres de mayor importancia para dicha época los incendios, invasiones de piratas y problemas de salud como la peste.

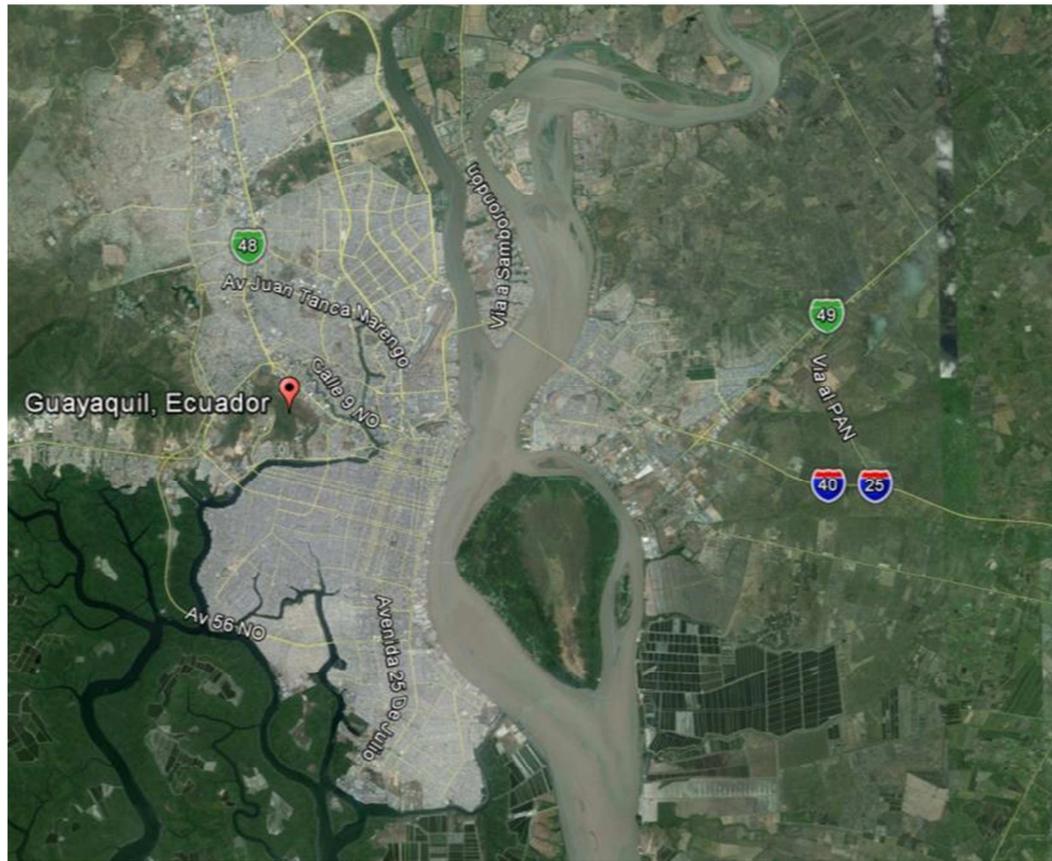


Figura 1.1: Imagen satelital de la ciudad de Guayaquil (Imagen de Google Earth).

Sin embargo, conforme se va ampliando el uso del hormigón armado como material de construcción en reemplazo de la tradicionales construcciones con caña para dar solución a los recurrentes incendios, se devela que la ciudad queda vulnerable ante eventos sísmicos debido a que las nuevas construcciones de hormigón tienen mayor masa y comportamiento dinámico diferente al de estructuras livianas de madera, crecimiento poblacional descontrolado y falta de diseños adecuados para zonas de estas características sísmicas.

Adicionalmente, cabe indicar que Guayaquil está asentada en la margen oeste del río Guayas, sobre depósitos de suelo aluviales y roca sedimentaria (IIFIUC, 1999), cuyas características dinámicas son las de amplificar la onda sísmica, haciendo de la ciudad vulnerable ante eventos sísmicos.

1.2. Sismicidad Histórica de Guayaquil

1.2.1. Antecedentes

Los terremotos no estuvieron entre los desastres más temidos por los guayaquileños en los siglos de la Colonia, aunque numerosas crónicas nos hablan de las previsiones que se tomaban en la construcción de las casas para reducir sus efectos, con notable éxito. Los factores de vulnerabilidad por terremotos fueron por ello bajos, aunque el factor de peligro fue siempre considerable. En el presente siglo; y una vez que la construcción en madera ha dejado de ser predominante, han aparecido numerosos factores de vulnerabilidad a los terremotos como son la pobre construcción de edificaciones informales, alto número de pisos, debilidad de las paredes en casas mixtas, etc. Esto ha llevado a un incremento notable en la vulnerabilidad por terremotos y consecuentemente en el Riesgo Sísmico (IIFIUC, 1999).

Según los estudios expuestos en el proyecto RADIUS (1999), en su volumen II y III, los sismos que más han afectado a la ciudad de Guayaquil se resumen en la Tabla 1.1.

Año	Mes	Día	Latitud	Longitud	Profundidad (km.)	Magnitud	Intensidad máxima
1653	7	9	?	?	?	?	VII
1787	6	11	?	?	?	?	VI
1906	1	31	1.00	-81.50	25	8.6 Ms	VI
1914	5	31	-0.50	-78.48	?	6.3 Ms	VII
1924	7	22	-2.00	-80.00	250	6.5 Ms	VI
1933	10	2	-2.00	-81.00	?	6.9 Ms	VII
1942	5	14	-0.75	-81.50	25	8.0 Ms	IX
1943	1	30	-2.00	-80.50	100	6.9 Ms	VII
1946	3	29	-1.70	-80.90	?	5.7 Ms	VI
1956	1	16	-0.50	-80.50	?	6.9 Ms	VI
1971	7	27	-2.79	-77.35	88	7.5 Ms	VII
1980	8	18	-1.98	-80.03	74	6.1 Ms	VIII
1995	10	3	-2.77	-77.88	27	7.0 Ms	VI
1998	8	4	-0.54	-80.49	37	7.1 Ms	VI

Tabla 1.1: Sismos sentidos en Guayaquil en el periodo 1653-1998 con intensidades Mercalli mayores o iguales a VI grados (IIFIUC, Proyecto RADIUS).

1.2.2. Peligro sísmico de Guayaquil

La definición y entendimiento de las fuentes de sismos es con frecuencia la mayor parte del análisis de peligrosidad sísmica y requiere conocimiento de la geología regional, local, sismicidad y tectónica (Reiter, 1990).

Para el caso de Guayaquil, se han identificado tres fuentes que son capaces de producir intensidades Mercalli mayores o iguales a VII y se resumen en la Tabla 1.2.

Fuente Sísmica	Magnitud máxima esperada	Probabilidad de exceder la Magnitud máxima dentro de los próximos 10 años	Período de retorno de la Magnitud máxima	Intensidad observada	Período de retorno de la Intensidad observada
Zona costera Noroeste	8.0 Ms	14.0%	67 años	VIII	379*
Zona Sur – Oriental	7.2 Ms	31.0%	28 años	VII	155*
Zona Local	6.5 Ms	13.0%	72 años	VII	159

* El período de retorno de las intensidades resulta muy alto para sismos de estas fuentes. Se debe a que antes del siglo XX Guayaquil era una ciudad con baja vulnerabilidad, con edificaciones livianas de poca altura.

Tabla 1.2: “Amenaza Sísmica” que representa cada área de peligro para Guayaquil (IIFUIC, RADIUS 1999).

1.2.2.1. Fuente 1: Costa Noroeste de Ecuador

La primera fuente corresponde a la costa noroeste del Ecuador, que comprenden una serie de cuencas de edad Cretácica a Cenozoica, soportada por rocas de corteza Oceanía Cretácica, incluye formaciones sedimentarias de areniscas, lutitas, secuencias turbidíticas, conglomeradas, arcillas marinas de estuario, de edades Eocénicas a cuaternarias (Ortiz, 2013).

Los sismos se generan por la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana y afectan de forma directa a las provincias de Esmeraldas, Manabí y el norte del Guayas (IIFIUC, 1999).

La zona es capaz de producir sismos de magnitud mayor o igual a 8.0 Ms frente a la costa norte del Ecuador con una probabilidad del 53% en un período de 50 años. La última vez que se verificó un evento de este tipo fue en 1942 (IIFIUC, 1999).

1.2.2.1.1. Sismo del 13 de Mayo de 1942

Una descripción amplia y detallada de los efectos que tuvo este sismo en la ciudad se indica en el Proyecto RADIUS VOL III, IIFIUC 1999.

A continuación un extracto del texto:

“... Características Generales

Día: Miércoles

Hora: 21:06

Magnitud: 7.9 Ms, 7.0 mb

Epicentro: -0.75, -81.50. Océano Pacífico, frente a Jama, en la costa norte de la provincia de Manabí.

Profundidad: 25 Km

Intensidad máxima observada: IX MM en el centro de la ciudad

Intensidad general: VIII MM en el centro de la ciudad; VII MM en el sur y el oeste; VI MM en los cerros.

Se sintió un fuerte movimiento terráqueo de oscilación que en un principio se insinuó con poca fuerza pero en muy breve tiempo tomó inusitada intensidad. Ocurrieron después dos temblores menores.

Los teatros y cines fueron abandonados precipitadamente, sin más daño a las personas que magullones y empellones. Los habitantes de la ciudad

salieron a las calles y muchos pasaron la noche a la intemperie. Familias enteras durmieron en los parques del Centenario, Seminario, Montalvo, Calderón, Chile y España; así como en el interior de sus autos.

Todas las luces de la ciudad se apagaron.

Hubo pérdida de numerosas vidas. Muchos cadáveres fueron extraídos de las ruinas de los edificios derrumbados. El mayor número de víctimas mortales se dio en el edificio de cinco pisos de la clínica Arreaga, que se derrumbó...

... La principal causa de muerte fue el aplastamiento por colapso de los tres edificios altos de hormigón derrumbados. Hubo 40 muertes por esta causa y se extrajeron 43 personas con vida de entre las ruinas, 21 de ellas heridas de gravedad. Hubo además 11 reportes de personas gravemente heridas en otros sectores del centro, la mayoría por caída de paredes o techos.”

1.2.2.2. Fuente 2: Zona Sur-Oriental de Ecuador

Según el proyecto RADIUS VOL III, IIFIUC (1999), corresponde al sistema de fallas inversas del Trans-Cutucú, al pie de la cordillera del mismo nombre (Provincias de Morona-Santiago y Zamora-Chinchipe).

Consiste en una zona de pliegues y cabalgamientos con tendencia NNE buzando hacia el oeste que se constituye por el contacto tectónico entre la cordillera Real y la Cuenca Oriente.

La zona es capaz de producir sismos de magnitud mayor o igual a 7.2 Ms con una probabilidad del 84% en un período de 50 años. La última vez que se verificó un evento de este tipo fue en 1971.

1.2.2.3. Fuente 3: Zona local próxima a Guayaquil

Corresponde a la zona de influencia de la megacizalla Guayaquil-Dolores que corta al Ecuador en dirección NNE y se compone de un sistema de fallas de desgarre dextral (Ortiz, 2013).

La zona es capaz de producir sismos de magnitud mayor o igual a 6.1 Ms con una probabilidad del 70% en un período de 50 años. La última vez que se verificó un evento de este tipo fue en 1980 (IIFUIC, 1999).

1.2.3. Zonificación Sísmica de Guayaquil

Actualmente en el Ecuador está en vigencia un código de construcción de aplicación obligatoria (NEC hasta el capítulo 6), cuyo objeto es dictar normas básicas que aseguren el buen comportamiento de las estructuras ante los efectos de terremotos que podría presentarse a lo largo de su vida, que fue aprobado mediante acuerdo ministerial N.0028 del 19 de agosto del 2014 y publicado en el registro oficial del 26 de agosto del 2014.

Dicho código establece un mapa de zonificación sísmica (ver Figura 1.2) que proviene del resultado de un estudio de peligro sísmico para un 10% de excedencia en 50 años (período de retorno 475 años), que incluye una saturación a 0.50 g de los valores de aceleración sísmica en roca en el litoral ecuatoriano que caracteriza la zona VI (NEC, 2014).

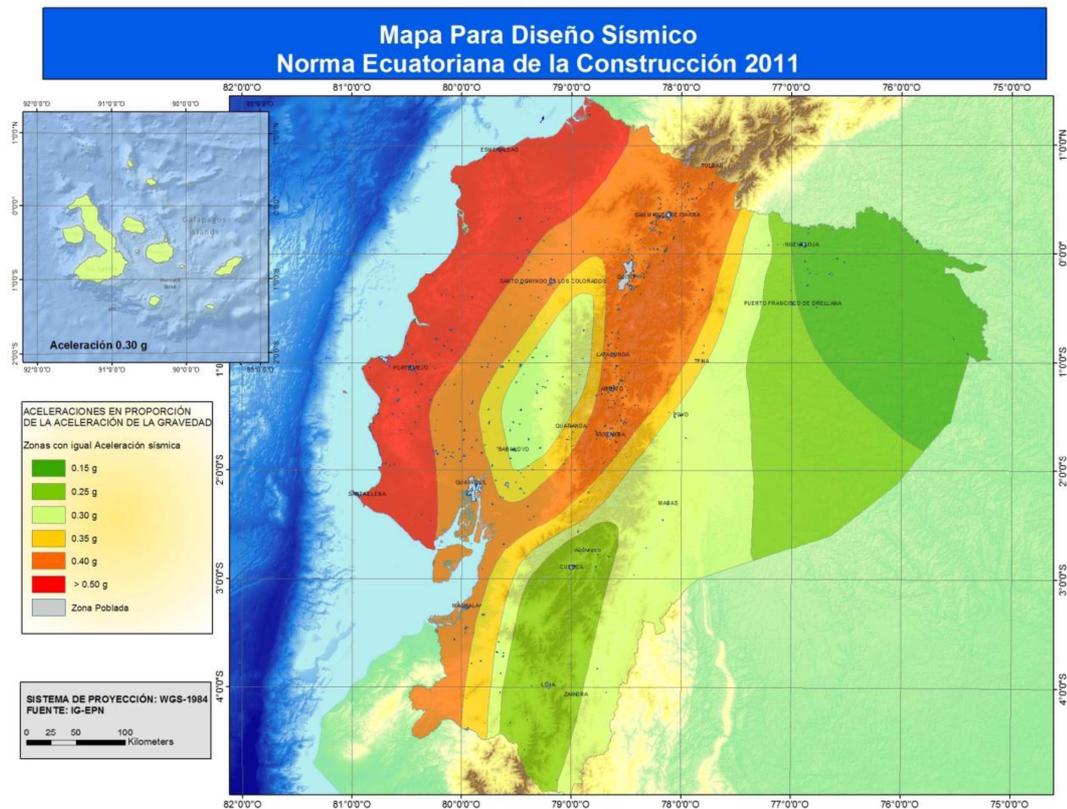


Figura 1.2: Mapa de zonificación sísmica del Ecuador (NEC).

Según este mapa, la ciudad de Guayaquil se encuentra ubicada en una zona de peligro sísmico ALTO (Zona V), y por lo tanto, sus edificaciones deben de poder desarrollar la suficiente resistencia y ductilidad para que no colapsen ante un evento sísmico aunque puedan resultar con daños estructurales importantes.

La denominada “Zona Centro de Guayaquil”, es una zona medular de la ciudad situada junto a la ribera occidental del río Guayas, siendo la de mayor actividad comercial y financiera, existiendo la mayor densidad de avalúos de edificaciones. Sin embargo, es esta zona en donde para algunos sismos se ha podido asociar un incremento de la intensidad de los daños y el riesgo sísmico, debido a la presencia de suelos y arcillas blandas.

1.3. Características de Suelos de Guayaquil

Diversos estudios se han realizado con el fin de proporcionar un mapa geológico de la ciudad de Guayaquil considerando las propiedades geomorfológicas y geotectónicas de los suelos que la componen, todos ellos concluyen en mayor o menor grado de detalle que la ciudad de Guayaquil se compone básicamente de tres tipos de suelo: (a) formaciones rocosas concentradas en la zona occidental, (b) una llanura aluvial en la zona noreste y (c) depósitos deltaico-estuarinos a nivel del río Guayas y el Estero Salado en la zona centro-sur (Sánchez, 2014).

Vera et al. (2006) realiza una descripción específica (ver Figura 1.3), subdividiendo los suelos de acuerdo a su ubicación.

En la sectorización ejecutada, el mapa geológico de Guayaquil posee siete zonas claramente identificadas (Vera et al., 2006):

- Zona 1: Depósitos Deltaico-Estuarinos (Este-Centro)
- Zona 2: Depósitos Deltaico-Estuarinos (Sur)
- Zona 3: Depósitos Deltaico-Estuarinos (Oeste-Norte-Isla Trinitaria)
- Zona 4: Depósitos Aluviales (Norte)
- Zona 5: Depósitos Aluvio-Lacustres (Norte)
- Zona 6: Depósitos Coluviales
- Zona 7: Formaciones Rocosas

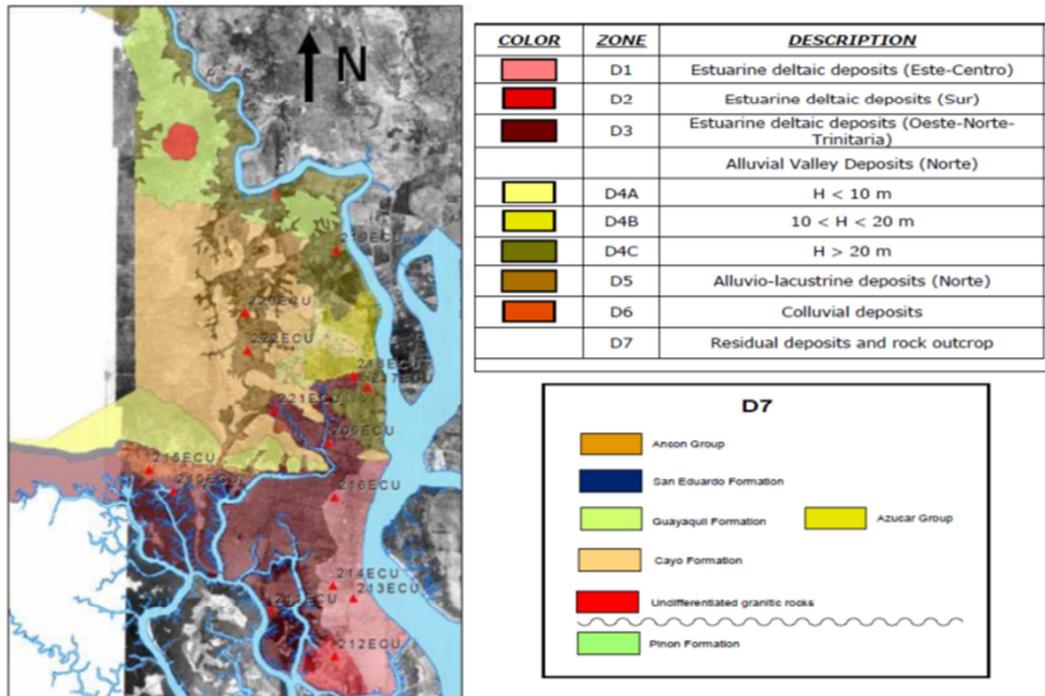


Figura 1.3: Mapa de Zonificación geológica de la ciudad de Guayaquil (Vera et al.).

De la figura antes mostrada, se puede verificar que la llamada “Zona Centro de Guayaquil” esta sobre un depósito deltaico-estuarino de origen sedimentario formado especialmente por partículas de arcilla blandas y limos sueltos.

Estudios de dinámica de suelos han demostrado que los suelos blandos tienen como característica filtrar las ondas sísmicas de período corto, amplificando las de período largo que coincidentemente son similares a la respuesta estructural de edificios de altura mediana y alta, generándose un efecto de amplificación de la energía transmitida y en ciertos casos críticos, la resonancia.

CAPÍTULO 2

COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE ESTRUCTURAS AMORTIGUADAS

2.1. Introducción

El análisis y diseño de estructuras para resistir los efectos producidos por cargas cíclicas o movimientos del suelo requieren idealizaciones conceptuales y simplificaciones a través de las cuales un sistema físico pueda ser representado por un sistema ideal, comúnmente conocido como modelo analítico o matemático.

Según Paz (2004), estas simplificaciones generalmente se clasifican en tres tipos:

Simplificaciones del material.- Corresponde a asunciones respecto a las propiedades del material tales como su homogeneidad, isotropía, linealidad o elasticidad.

Simplificaciones de Carga.- Corresponden a las consideraciones simplificadas para la distribución y punto de aplicación de las cargas reales asumiéndolas ubicadas en un punto determinado o distribuidas uniformemente, constantes o periódicas.

Simplificaciones Geométricas.- Corresponde a las simplificaciones de la forma y características geométricas de las vigas, pórticos, cerchas, etc... considerándolos como sistemas discretos más sencillos de caracterizar, con nodos y grados de libertad determinados.

2.2. Sistema de un grado de libertad (SDF)

Este sistema puede ser considerado como una idealización de una estructura de un piso. Cada miembro estructural (vigas, columnas, paredes, etc.) de la estructura real contribuye a las propiedades inerciales (masa), elásticas (rigidez o flexibilidad) y de amortiguamiento (disipación de energía) de la estructura; siendo que en el sistema ideal, cada una de estas propiedades se encuentran concentradas en tres componentes independientes: matrices de masa, de rigidez y de amortiguamiento.

El sistema se presenta esquemáticamente en la Figura 2.1 y consiste de una masa m concentrada en la parte superior del pórtico, columnas sin masa que proporcionan únicamente rigidez al sistema y un amortiguador viscoso que disipa energía del sistema. Las vigas y columnas del pórtico se consideran axialmente indeformables (Chopra, 2012).

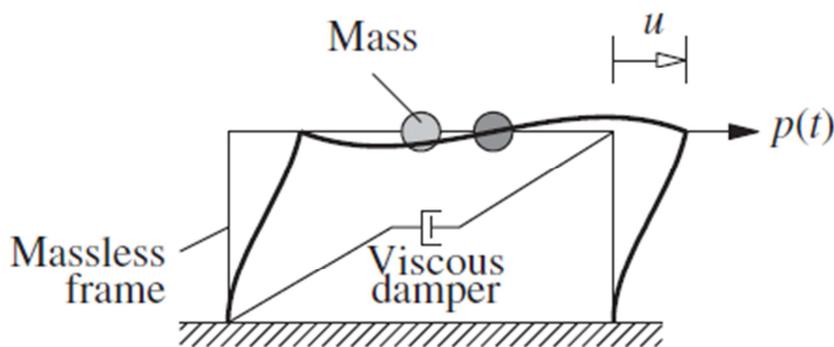


Figura 2.1: Elementos componentes de un sistema de un grado de libertad

Para el análisis estático de este sistema sometido a cargas laterales es necesario determinar tres grados de libertad – el desplazamiento lateral y la rotación de los dos nodos – sin embargo, para el análisis dinámico de la estructura solo es suficiente considerar uno – desplazamiento lateral.

2.3. Ecuación de Movimiento y equilibrio dinámico en SDF amortiguado sometido a carga lateral

Según Sánchez (2014), ante la acción de una fuerza externa o la imposición de condiciones iniciales, el SDF responde con fuerzas resistentes relacionadas con cada uno de sus propiedades. La fuerza inercial f_I es igual al producto de la masa m del sistema por la aceleración de la misma. La fuerza f_S para un sistema lineal elástico se considera como el producto de la rigidez de la estructura k por el desplazamiento de la misma. Finalmente la fuerza de amortiguamiento f_D se considera proporcional a la velocidad del sistema, cuyo coeficiente de proporcionalidad c se denomina coeficiente de amortiguamiento viscoso.

Si bien las propiedades m y k del sistema pueden ser obtenidas a partir de los elementos que componen el sistema, el coeficiente c se estima, ya que resulta casi imposible determinar matemáticamente cada mecanismos de disipación de energía de la estructura (Chopra, 2012). Se pretende, por simplicidad, tomar el coeficiente de amortiguamiento viscoso de manera que la energía que se disipa sea igual a la energía disipada por todos estos mecanismos, llamándolo coeficiente de amortiguamiento viscoso equivalente (Sánchez, 2014).

Analizando el SDF mediante la aplicación de la segunda ley de Newton al diagrama de cuerpo libre (ver Figura 2.2) para las fuerzas arriba mencionadas, se puede determinar que la ecuación de equilibrio para este sistema es:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad (2.3.1)$$

La ec. (2.3.1) es la que gobierna la deformación lateral o desplazamiento $u(t)$ de la estructura simplificada de la Figura 2.1, asumiendo que presenta

un comportamiento elástico lineal cuando es sometida a una fuerza dinámica externa $p(t)$.

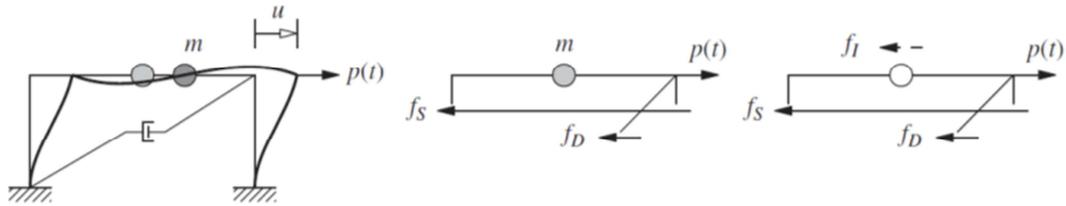


Figura 2.2: Diagrama de cuerpo libre para SDF. (Chopra, 2012)

Esta ecuación puede extenderse fácilmente para sistemas inelásticos, simplemente reemplazando el término lineal de rigidez de la ec. (2.3.1) por la relación esfuerzo-deformación del material constituyente de las columnas.

Por lo tanto, para sistemas inelásticos la ecuación de movimiento es:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_s(u) = p(t) \quad (2.3.2)$$

2.4. Sistema de un grado de libertad amortiguado en vibración libre

Según Lama (2013), la ecuación que describe las vibraciones libres amortiguadas de un modelo con un solo grado de libertad es:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0 \quad (2.4.1)$$

De donde dividiendo para m resulta

$$\ddot{u} + 2\zeta\omega_n\dot{u} + \omega_n^2u = 0 \quad (2.4.2)$$

Siendo $\omega_n = \sqrt{k/m}$ que representa la frecuencia natural del sistema, y

$$\zeta = \frac{c}{2m\omega_n} = \frac{c}{c_{cr}} \quad (2.4.3)$$

Donde c_{cr} es el coeficiente de amortiguamiento crítico y ζ se lo conoce como factor de amortiguamiento crítico. Y al ser el movimiento amortiguado, se debe de considerar un período de vibración amortiguada que se define como

$$T_D = \frac{T_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (2.4.4)$$

De donde se obtiene una frecuencia de vibración amortiguada cuya expresión es

$$\omega_D = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2.4.5)$$

Según Chopra (2012), a partir de la fracción de amortiguamiento crítico se pueden definir tres tipos de movimiento (ver Figura 2.3):

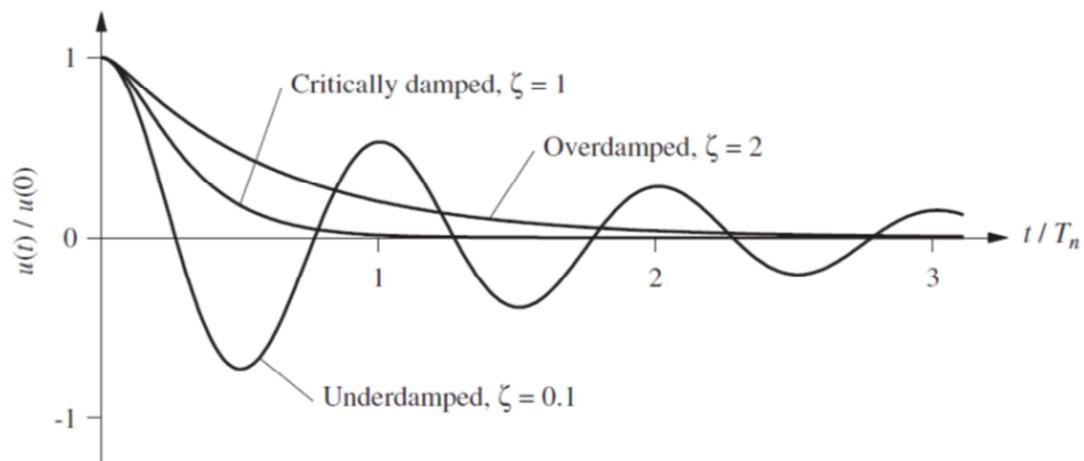


Figura 2.3: Vibración libre de sistemas con amortiguamiento viscoso menor, igual y mayor al crítico (Chopra, 2012).

$c = c_{cr}$ o $\zeta = 1$: El sistema regresa a su posición de equilibrio sin oscilar. El coeficiente de amortiguamiento crítico c_{cr} toma este nombre porque es el mínimo valor que debe tener c para que no ocurra la oscilación del sistema.

$c > c_{cr}$ o $\zeta > 1$: El sistema regresa a su posición de equilibrio sin oscilar, como en el primer caso pero a un ritmo más lento. Este caso no se presenta de forma usual en la ingeniería civil.

$c < c_{cr}$ o $\zeta < 1$: El sistema oscila sobre su posición de equilibrio con una disminución progresiva de su amplitud. Este es el comportamiento habitual en estructuras de ingeniería civil sometidas a acciones dinámicas, que tienen un factor de amortiguamiento crítico menor al 10%.

La solución de la ec. (2.4.1) asumiendo un desplazamiento inicial $u(0)$ y velocidad inicial $\dot{u}(0)$ diferente de cero, en un sistema con $c < c_{cr}$ o $\zeta < 1$ es

$$u(t) = e^{-\zeta\omega_n t} \left[u(0) \cos \omega_D t + \frac{\dot{u}(0) + \zeta\omega_n u(0)}{\omega_D} \sin \omega_D t \right] \quad (2.4.6)$$

2.5. Sistema de un grado de libertad amortiguado en vibración forzada armónica

Un SDF se encuentra sometido a vibración forzada cuando el término de la derecha de la ec. (2.3.1) no es nulo. La aplicación de una fuerza armónica con amplitud p_o y frecuencia excitadora ω es un caso ingenieril muy usual.

Para este caso particular, la ec. (2.3.1) toma la forma

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p_o \sin \omega t \quad (2.5.1)$$

Según Sánchez (2014), la solución matemática de esta ecuación diferencial consta de dos partes, una solución complementaria, que es la ecuación diferencial igualada a cero (vibración libre), y la solución particular que depende de las características de la excitación externa. Desde el punto de vista físico, éstas representan dos componentes de respuesta dinámica de la estructura: la primera representa la respuesta transitoria, mientras que la

segunda representa la respuesta estacionaria. La razón de estos nombres es que, ante la presencia de amortiguamiento, la respuesta transitoria decae con el tiempo siendo eventualmente imperceptible, mientras que la respuesta estacionaria, que depende de la fuerza excitadora, permanece a lo largo del período de aplicación de la carga y tiende a caracterizar el comportamiento dinámico de la estructura luego de cierto tiempo (ver Figura 2.4).

La solución de la ec. (2.5.1) es

$$u(t) = e^{-\zeta\omega_n t} [A \cos \omega_D t + B \sin \omega_D t] + \frac{p_0}{k} R_d \sin(\omega t - \phi) \quad (2.5.2)$$

Donde

$$R_d = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)^2 + \left(2\zeta\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right)^2}} \quad (2.5.3)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{2\zeta\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad (2.5.4)$$

Los términos A y B se pueden obtener a partir de las condiciones iniciales de desplazamiento y velocidad. El término R_d es el factor de amplificación de respuesta de desplazamiento y ϕ es el ángulo de fase, ambos dependen del amortiguamiento del sistema y de la razón entre las frecuencias de la excitación y la frecuencia natural del sistema (Sánchez, 2014).

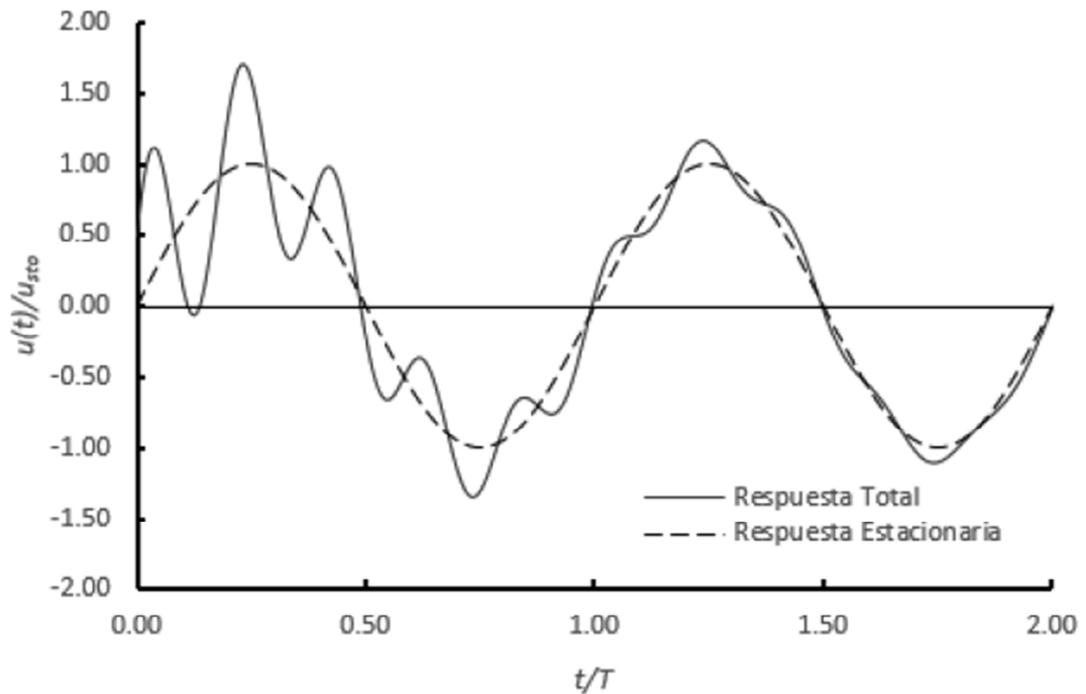


Figura 2.4: Respuesta de un sistema amortiguado a una excitación armónica sinusoidal - $\zeta=0.05$ (Sánchez, 2014).

El factor de amplificación representa el cociente entre la amplitud de la respuesta dinámica estacionaria y la amplitud estática (ignorando los efectos dinámicos) (Chopra, 2012), que se define por la ecuación

$$u_{sto}(t) = \frac{p_0}{k} \quad (2.5.5)$$

El ángulo de fase representa una magnitud del tiempo de atraso de la respuesta dinámica con respecto a la respuesta estática (Sánchez, 2014).

A continuación se presenta un análisis comparativo realizado por Chopra (2012) y mencionado por Sánchez (2014), donde se aprecia la influencia que tiene la relación de frecuencias $\frac{\omega}{\omega_n}$ y el factor de amortiguamiento, en el factor de amplificación y el ángulo de fase (ver Figura 2.5).

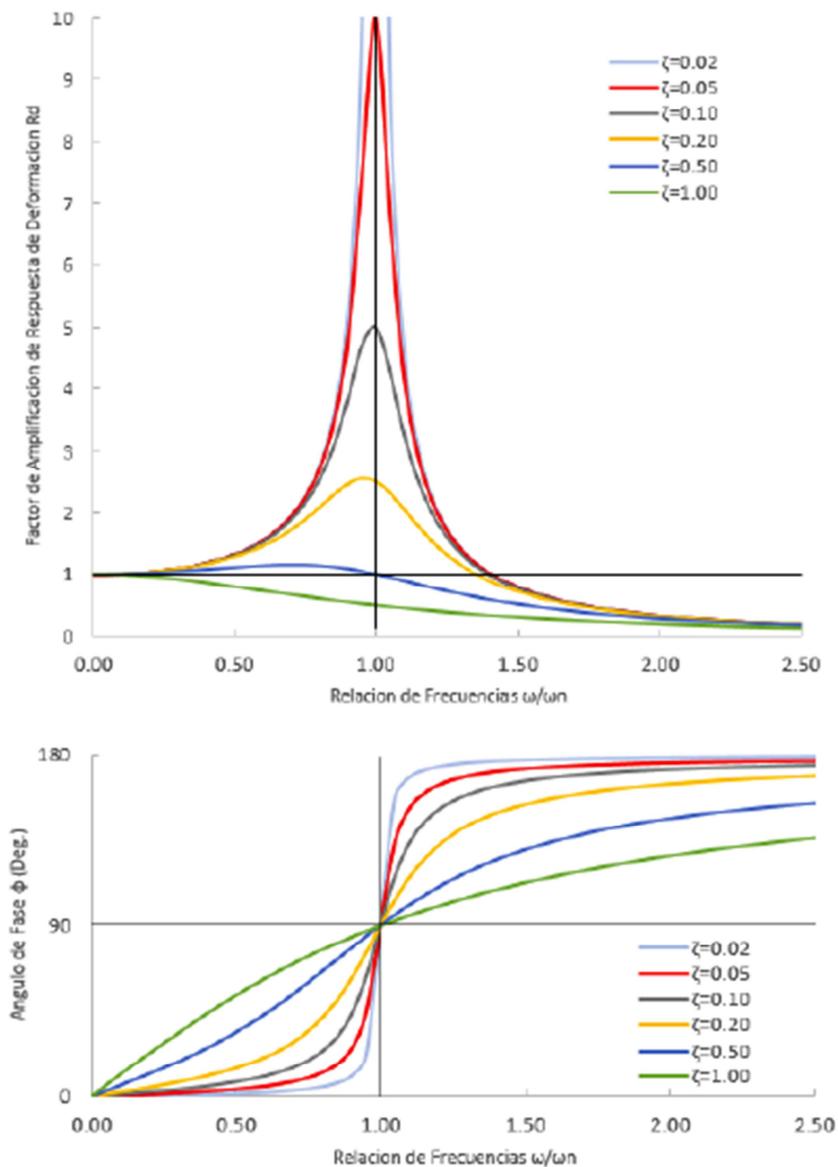


Figura 2.5: Factor de amplificación de respuesta de desplazamientos y ángulo de fase de sistemas amortiguados sometidos a excitaciones armónicas (Sánchez, 2014).

Chopra (2012) mencionado por Sánchez (2014), concluye a partir del análisis de la Figura 2.5, con respecto a la variación del factor de amplificación lo siguiente:

- “Para razones de frecuencia pequeñas $\frac{\omega}{\omega_n} \ll 1$, es decir, la fuerza excitadora varía muy lentamente, el valor de R_d es muy cercano a la unidad, por lo tanto se puede considerar que la respuesta es

independiente del amortiguamiento”. En este caso, la respuesta está controlada por la rigidez del sistema:

$$u_o \cong u_{sto} = \frac{p_o}{k} \quad (2.5.6)$$

- “Para razones de frecuencia altas $\frac{\omega}{\omega_n} \gg 1$, es decir, la fuerza excitadora varía rápidamente, el valor de R_d tiende a cero, y la respuesta se considera también no afectada por el amortiguamiento”. En este caso, la respuesta está controlada por la masa del sistema:

$$u_o \cong u_{sto} \left(\frac{\omega_n}{\omega} \right)^2 = \frac{p_o}{m\omega^2} \quad (2.5.7)$$

- “Para razones de frecuencia cercanas a la unidad $\frac{\omega}{\omega_n} \cong 1$, es decir, la frecuencia excitadora es cercana a la frecuencia natural del sistema, el valor de R_d es muy sensible al amortiguamiento, para valores pequeños de amortiguamiento, puede llegar a ser muy grande”. En este caso, la respuesta está controlada por el amortiguamiento del sistema:

$$u_o \cong \frac{u_{sto}}{2\zeta} = \frac{p_o}{c\omega_n} \quad (2.5.7)$$

Chopra (2012) mencionado por Sánchez (2014), también concluye a partir del análisis de la Figura 2.5, con respecto a la variación del ángulo de fase lo siguiente:

- “Para razones de frecuencia pequeñas $\frac{\omega}{\omega_n} \ll 1$, ϕ tiende a cero, lo cual significa que la respuesta se encuentra en fase con la excitación (si la fuerza se ejerce en una dirección, el sistema se desplaza en esa misma dirección)”.

- “Para razones de frecuencia altas $\frac{\omega}{\omega_n} \gg 1$, ϕ tiende a 180° , por lo que el sistema se encuentra desfasado en sentido opuesto a la excitación externa (si la fuerza actúa en una dirección, el sistema se desplaza en la dirección contraria)”.
- “Para razones de frecuencia cercanas a la unidad $\frac{\omega}{\omega_n} \cong 1$, ϕ tiende a 90° , por lo que el sistema alcanza los picos de desplazamiento cuando la fuerza excitadora es cero y viceversa”.

2.6. Sistema de un grado de libertad sometido a fuerzas en forma de pulsos

En la vida práctica las excitaciones a las que se someten las estructuras no son del tipo armónica ni periódica, de tal forma que para obtener una respuesta aproximada del comportamiento de la estructura, es necesario discretizar la excitación en pulsos, que son pequeñas porciones de corta duración, para posteriormente calcular la respuesta de la estructura ante cada pulso de forma independiente y luego, superponer todas las respuestas (ver Figura 2.6).

2.7. Sistema de un grado de libertad sometido a una excitación sísmica

Para el análisis del sistema sometido a una excitación de este tipo (ver Figura 2.7), es necesario considerar el desplazamiento del suelo respecto a un marco de referencia fijo $u_g(t)$ y el desplazamiento relativo de la masa con respecto al suelo $u(t)$, definiendo de esta forma al desplazamiento total como

$$u^t(t) = u_g(t) + u(t) \quad (2.7.1)$$

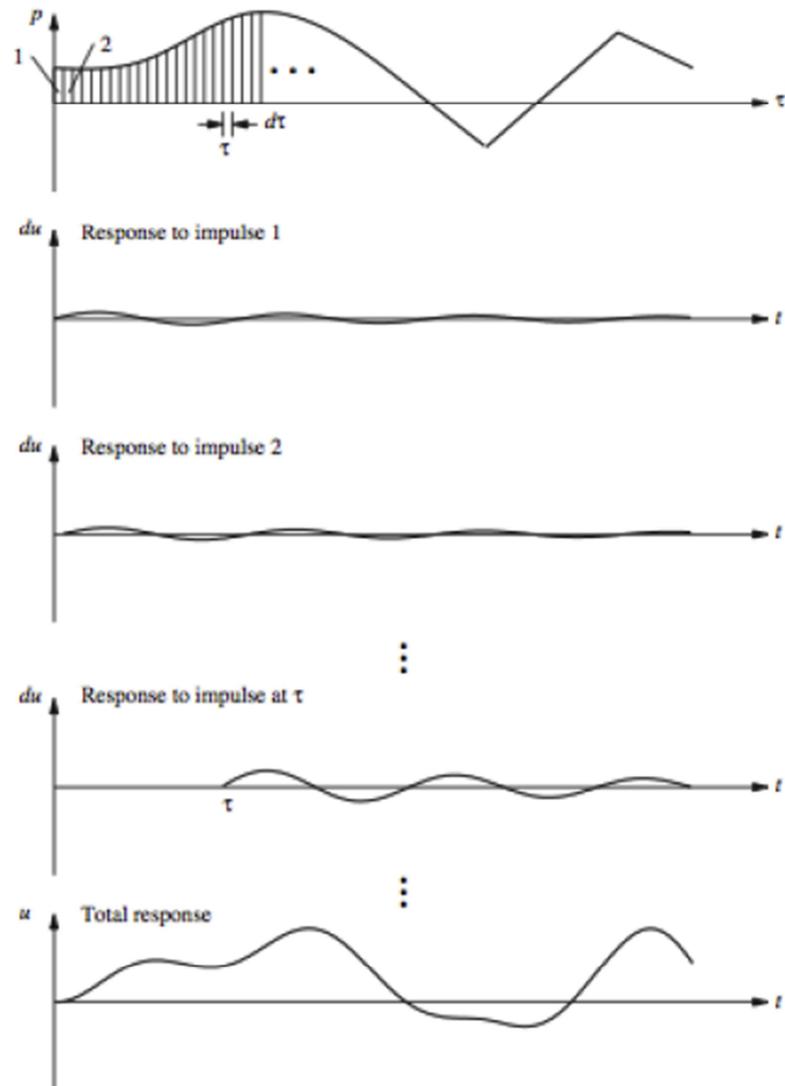


Figura 2.6: Superposición de pulsos para obtener la respuesta de una estructura ante una excitación arbitraria (Chopra, 2012).

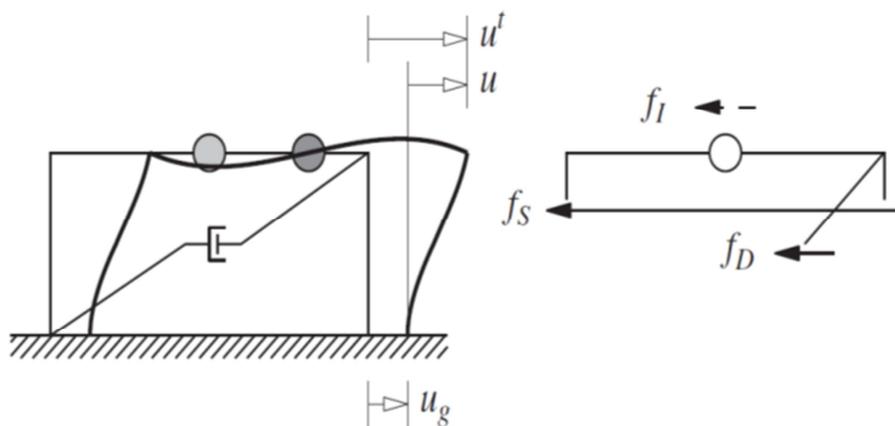


Figura 2.7: Análisis de SDF sometido a una excitación sísmica (Chopra, 2012).

Si se consideran las tres componentes del sistema estructural definidas en la sección 2.2, tendremos como conclusión que la aceleración absoluta se relacionará a la componente inercial únicamente y que la rigidez y el amortiguamiento, al desplazamiento relativo. Por lo tanto, si se deriva dos veces la ecuación (2.7.1) se obtendrá

$$\ddot{u}^t(t) = \ddot{u}_g(t) + \ddot{u}(t) \quad (2.7.2)$$

Si se reemplaza la ec. (2.7.2) en (2.4.1) y reordena la ecuación, se obtiene la expresión para el movimiento de un sistema de un grado de libertad para sollicitaciones sísmicas

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t) \quad (2.7.3)$$

Por lo tanto, se puede asemejar el efecto de un sismo en la estructura a la acción de una fuerza externa $p(t) = -m\ddot{u}_g(t)$. Siendo posible de caracterizar completamente la respuesta del sistema al resolver la ec. (2.7.3) para las condiciones iniciales dadas, utilizando diversas herramientas como métodos analíticos o numéricos específicos (Sánchez, 2014).

Según lo arriba expresado, conociendo las propiedades dinámicas del sistema (masa, amortiguamiento y rigidez) nos bastaría conocer el valor de $\ddot{u}_g(t)$ para que el problema quede completamente resuelto. Sin embargo, las aceleraciones producidas por los terremotos no siguen ley conocida, y por lo tanto, tratar de calcular el valor de respuesta para cada punto de manera analítica es una pérdida de tiempo.

Es así que a lo largo de la historia, se han desarrollado un gran cantidad de dispositivos de medición muy avanzados alrededor del mundo, y existe un número considerable de registros acelerográficos obtenidos, lo cual ha permitido la caracterización y zonificación sísmica en muchos países,

reflejado en sus códigos sismorresistentes (Sánchez, 2014). De tal forma, que se puede discretizar la excitación sísmica como pulsos de duración muy pequeña y obtener la respuesta total del sistema mediante métodos numéricos, tal como se presentó en la sección 2.6.

2.8. Respuesta inelástica de un sistema de un grado de libertad

Las ecuaciones de movimiento explicadas hasta ahora corresponden a un sistema elástico-lineal, donde la rigidez del sistema k es constante. Según lo explicado en la sección 2.3, la ecuación de movimiento de un sistema de un grado libertad puede extenderse fácilmente para sistemas inelásticos simplemente reemplazando el término lineal de rigidez de la ec. (2.3.1) por la relación esfuerzo-deformación del material constituyente; teniendo como resultado la ec. (2.3.2) que a continuación se repite por facilidad

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + fs(u) = p(t) \quad (2.8.1)$$

La curva histerética de un sistema elástico es una línea recta, sin embargo, si la estructura entra en el rango plástico, exhibirá un comportamiento no-lineal con la forma de lazos histeréticos (ver Figura 2.8), que representan la relación esfuerzo deformación del material constituyente. Si la estructura deja de ser excitada por una carga cíclica, ésta no volverá a su posición original, sino que tendrá como secuela una deformación permanente; siendo la energía disipada por este medio el área encerrada por cada lazo histerético (Sánchez, 2014).

El proceso de solución de la ecuación de movimiento es no-lineal e iterativo, ya que la fuerza $fs(u)$ depende el historial de deformaciones del sistema a lo largo del tiempo. Sin embargo, los métodos numéricos utilizados para resolver la ecuación de movimiento para el caso de una estructura elástica sometida a un sismo pueden adaptarse también para resolver la ecuación de

movimiento en este caso si se conoce el modelo que gobierna el comportamiento inelástico del sistema.

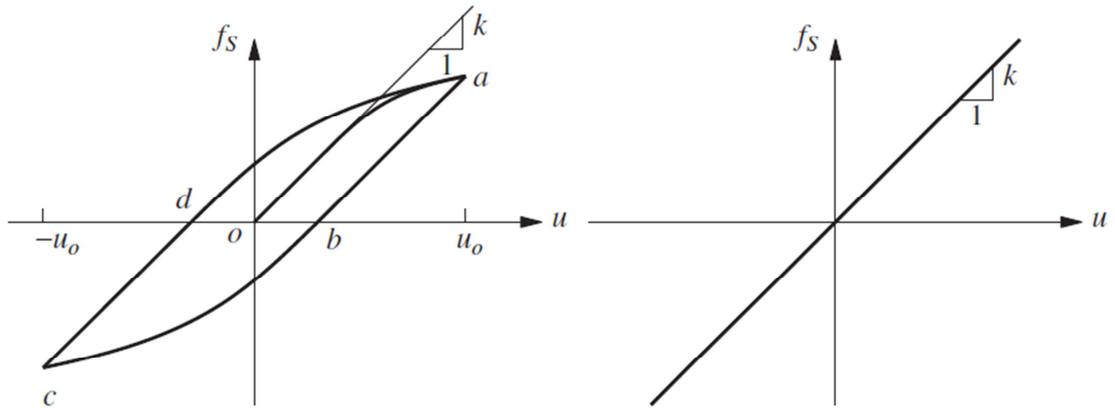


Figura 2.8: Curva histerético formada en rango inelástico (Izq.) y elástico (derecha) (Chopra, 2012).

2.9. Sistemas de Varios Grados de Libertad (MDF)

En la práctica de ingeniería y la vida cotidiana las estructuras civiles son más complejas que los sistemas de un grado de libertad (SDF) presentados en la sección 2.2; por lo tanto, para el análisis de estas estructuras más generales se hace necesario realizar una discretización a través de modelos matemáticos analíticos con un número finito de grados de libertad llamados también sistemas de varios grados de libertad (MDF).

Mientras las ecuaciones para el análisis de sistemas de un grado de libertad se desarrollaron de manera intuitiva identificando cada componente de respuesta del sistema, esta forma de solución no es práctica para el análisis de un sistema MDF y por lo tanto, es necesario realizarlo mediante métodos más generales como el método directo de las rigideces que ya vienen incorporados en paquetes de software dedicados para el análisis de estructuras complejas.

Para el posterior análisis y evaluación de estos sistemas MDF, se utilizarán software de amplio uso en el campo de la ingeniería como podrá ser el software de elementos finitos OpenSees versión 2.4.5, un programa de código abierto de la Universidad de Berkeley, California o el programa comercial SAP2000 v17.1.0 en su versión de evaluación, que es distribuido por la compañía Computers and Structures y fue desarrollado por el Dr. Edward L. Wilson, en la universidad de Berkeley, California.

De forma general, la solución de un sistema MDF no es más que una extensión del análisis dinámico de sistemas de un grado de libertad, que ya fue introducido y formulado en las secciones anteriores, y que se expresa en la siguiente ecuación

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + fs(u) = p(t) \quad (2.9.1)$$

Donde esta expresión corresponde a un sistema de N ecuaciones diferenciales ordinarias, siendo el equivalente a la ecuación para un sistema de un grado de libertad donde los valores escalares de m, c y fs (u) se han reemplazado por matrices de orden N correspondientes a los N grados de libertad de la estructura.

CAPÍTULO 3

SISTEMAS DE PROTECCIÓN SÍSMICA

3.1. Introducción

“En el diseño sismorresistente convencional, el desempeño aceptable de una estructura durante un evento sísmico está basado en que el sistema resistente de fuerza lateral sea capaz de absorber y disipar energía de una manera estable por un largo número de ciclos. La disipación de energía ocurre en regiones de rótulas plásticas dúctiles espacialmente detalladas en las vigas y en las columnas, las cuales también forman parte del sistema de carga por gravedad. Las rótulas plásticas son regiones de daño concentrado del pórtico de gravedad, el cual frecuentemente es irreparable. Estas características de diseño son aceptables por sus consideraciones económicas, por supuesto, que el colapso estructural es prevenido y que la seguridad de la vida de las personas está asegurada” (Villareal y Oviedo, 2009).

Hay casos particulares donde los principios que envuelven al diseño convencional no son aplicables ya que se debe asegurar que la estructura permanezca funcional después del sismo esperado por razones de servicio o su capacidad para albergar personas, denominando a este tipo de estructuras como edificaciones esenciales o estructuras de ocupación especial y por lo tanto, asignándoles un factor de importancia para el diseño (ver Tabla 3.1).

Para los casos arriba mencionados, la estructura tiene que poseer suficiente resistencia para que la acción inelástica sea prevenida o se minimice; lo que generalmente resulta en estructuras con altos costos de construcción (Villareal et al, 2009).

Categoría	Tipo de uso, destino e importancia	Coefficiente I
Edificaciones esenciales	Hospitales, clínicas, Centros de salud o de emergencia sanitaria. Instalaciones militares, de policía, bomberos, defensa civil. Garajes o estacionamientos para vehículos y aviones que atienden emergencias. Torres de control aéreo. Estructuras de centros de telecomunicaciones u otros centros de atención de emergencias. Estructuras que albergan equipos de generación y distribución eléctrica. Tanques u otras estructuras utilizadas para depósito de agua u otras sustancias anti-incendio. Estructuras que albergan depósitos tóxicos, explosivos, químicos u otras sustancias peligrosas.	1.5
Estructuras de ocupación especial	Museos, iglesias, escuelas y centros de educación o deportivos que albergan más de trescientas personas. Todas las estructuras que albergan más de cinco mil personas. Edificios públicos que requieren operar continuamente	1.3
Otras estructuras	Todas las estructuras de edificación y otras que no clasifican dentro de las categorías anteriores	1.0

Tabla 3.1: Tipo de uso, destino e importancia de la estructura (NEC, 2014).

Procedimientos alternos han sido evaluados con incorporación de sistemas de protección sismorresistente en la estructura principal de soporte de carga gravitacional, estos sistemas pueden ser de aislamiento de base o dispositivos de disipación de energía (Villareal et al, 2009). Ante la finalidad principal de estos mecanismos, que es el de absorber o minimizar la energía de entrada al sistema, un análisis al comportamiento y efectos de estos mecanismos en el desempeño global de una estructura ante un sismo puede comenzar con el cálculo del balance energético en la misma.

3.2. Balance energético de sistemas estructurales

Según Christopoulos Constantin y Filiatrault André (2006), es necesario realizar el seguimiento del flujo de energía de una estructura durante un sismo mediante un balance energético que fácilmente se puede explicar con ayuda de la analogía de flujo de agua lluvia. La Figura 3.1a ilustra un galpón ficticio con un techo movible que soporta una lluvia. La lluvia simboliza al sismo de entrada, mientras que la cantidad de agua que ingresa al galpón representa el total de energía sísmica de ingreso a la estructura. La cantidad de agua que ingresa al galpón depende de que tan abierto este el techo del mismo y por lo tanto simboliza que la cantidad de energía de

entrada a la estructura depende de las propiedades dinámicas de la misma y que para un determinado sismo, la energía de entrada en diversas estructuras no es la misma.

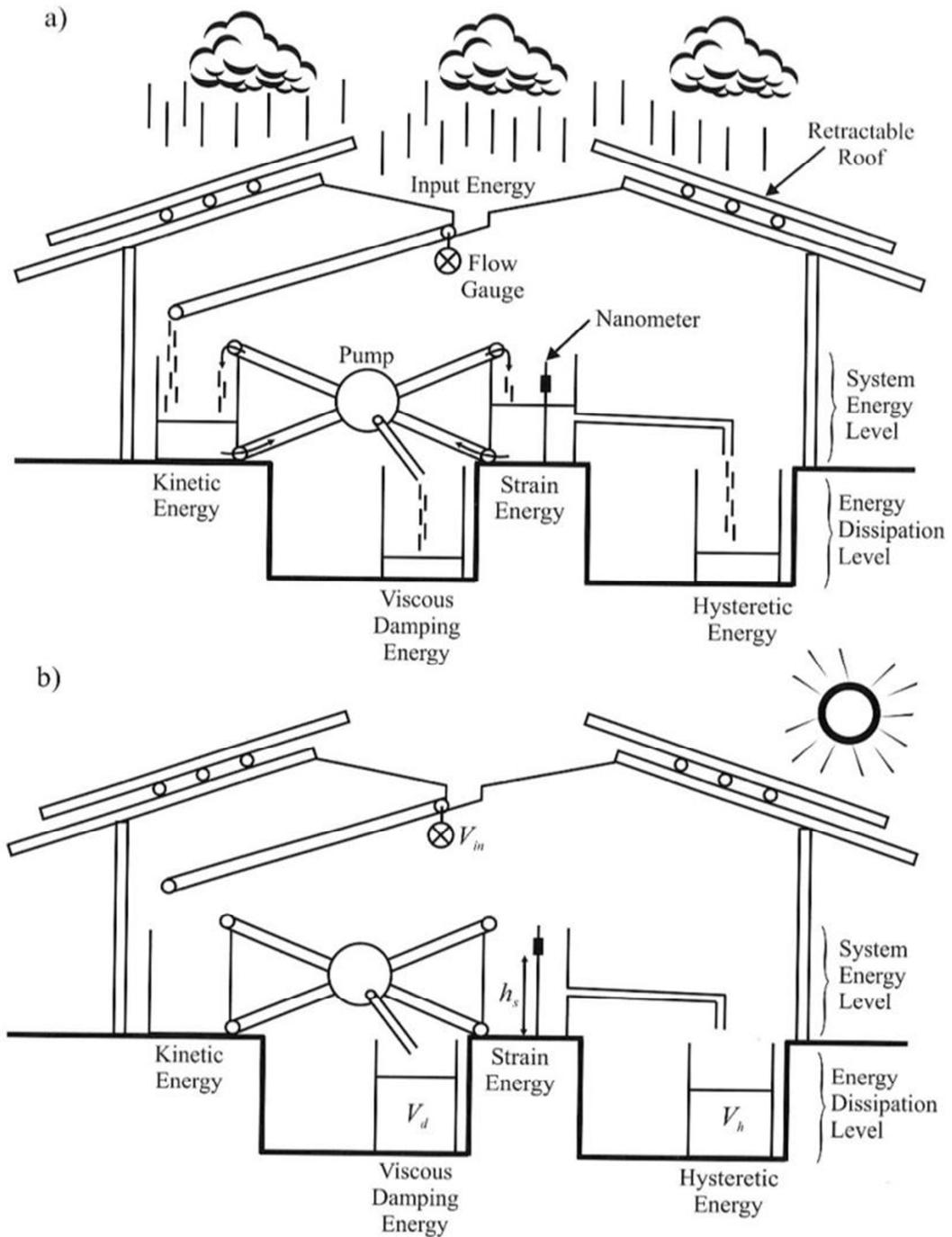


Figura 3.1: Analogía de flujo de agua lluvia (Christopoulos et al 2006); a: Balance durante el sismo, b: Balance al final del sismo.

El agua lluvia que ingresa al galpón se recoge luego en un recipiente de energía cinética, que representa la energía cinética generada en la estructura debido a la respuesta inercial de las masas presentes en la misma.

Durante el ciclo de vibración de las masas en la estructura, los elementos se deforman y absorben energía de deformación, siendo posteriormente transformada la totalidad de la energía cinética en energía de deformación; este fenómeno se representa en la Figura 3.1a mediante una bomba de dos vías que conecta el fondo del recipiente de energía cinética con la parte superior del recipiente de energía de deformación y viceversa. El caudal que se bombea está asociado con los periodos de vibración de la estructura, siendo la bomba activada mientras exista agua en estos dos recipientes. De esta forma, se puede resumir que la vibración de una estructura no es más que una transferencia constante de energía cinética en energía de deformación y lo contrario.

El amortiguamiento viscoso equivalente de la estructura se simboliza como una pérdida de caudal en el sistema de bombeo entre el recipiente de energía cinética y de deformación, siendo esta pérdida proporcional al flujo a través de la bomba de forma análoga a la dependencia del amortiguamiento viscoso respecto a la velocidad del sistema. La cantidad total de agua que se almacena en recipiente de amortiguamiento viscoso simboliza la cantidad de energía absorbida por el amortiguamiento viscoso equivalente de la estructura.

Cuando el nivel de agua en el recipiente de energía de deformación llega a cierto nivel determinado, un porcentaje del agua se transmite de forma permanente al recipiente de energía histerética. Este nivel de agua determinado simboliza la cantidad de energía de deformación que la estructura absorbe antes de que las deformaciones de los elementos entren al rango inelástico.

El estado final del balance energético de la estructura se representa en la Figura 3.1b; en esta, los recipientes de energía cinética y de deformación recuperable están vacíos una vez que la estructura ha llegado al reposo. Si la estructura se mantuvo en el rango elástico durante el terremoto, toda la energía de entrada se almacenará en el recipiente de amortiguamiento viscoso, sin embargo, si algunos elementos estructurales han sufrido deformaciones inelásticas, una porción de la energía de entrada se almacenará en el recipiente de energía histerética.

Por lo tanto, la suma de los volúmenes de agua de entrada será igual al volumen de agua almacenada en el recipiente de energía de amortiguamiento viscoso y de energía histerética (Figura 3.1b).

A partir de esta analogía arriba presentada, se pueden indicar claramente la función principal de los sistemas de aislamiento sísmico y los mecanismos de disipación de energía para un sistema estructural; el primero, consiste en “reducir” la abertura del techo del galpón para así minimizar la cantidad de energía que ingresa al sistema; el segundo, consiste en minimizar (si es posible eliminar), la cantidad de energía almacenada en el recipiente histerético minimizando el daño en los elementos del sistema estructural.

La analogía del flujo de agua lluvia para el balance energético de una estructura sometida a un sismo puede también formularse de forma matemática para la determinación cuantitativa de las cantidades energéticas durante la respuesta de un sistema estructural ante la acción de un sismo.

Para el caso en que no existan mecanismos alternativos de disipación de energía, toda la energía de entrada al sistema estructural por parte de un sismo es disipada a través del amortiguamiento viscoso y las deformaciones inelásticas como se ve en la ecuación de la conservación de la energía

$$E_I(t) = E_K(t) + E_D(t) + E_S(t) + E_Y(t) \quad (3.1.1)$$

Donde

El término de la izquierda, E_I , es la energía de entrada al sistema desde el inicio del movimiento sísmico y se puede definir como

$$E_I(t) = - \int_0^u m \ddot{u}_g(t) du \quad (3.1.2)$$

El primer término de la derecha, E_K , es la energía cinética del sistema debido a su masa y se define como

$$E_K(t) = \frac{m \dot{u}^2}{2} \quad (3.1.3)$$

El segundo término de la derecha, E_D , es la energía disipada por la acción del amortiguamiento viscoso inherente de la estructura y se define como

$$E_D(t) = \int_0^t c [\dot{u}(t)]^2 dt \quad (3.1.4)$$

Y el tercer y cuarto término de la derecha, E_S y E_Y , corresponden a la energía elástica recuperable de deformación y la energía irre recuperable disipada por el sistema estructural a través de la inelasticidad, respectivamente; y que se definen como

$$E_S(t) = \frac{[f_S(t)]^2}{2k} \quad (3.1.5)$$

$$E_Y(t) = \int_0^u f_S(u) du - E_S(t) \quad (3.1.6)$$

A continuación se presenta un ejemplo de la variación de energía para dos sistemas SDF ante la excitación debida al sismo de El Centro, California, tomado de Chopra (2012). Los resultados corresponden a un sistema elástico lineal con período natural de 0.50 seg y amortiguamiento viscoso de 0.05 y para un sistema elastoplástico, con las mismas propiedades del anterior sistema en el rango elástico pero con un coeficiente de reducción inelástica de 4 (ver Figura 3.2).

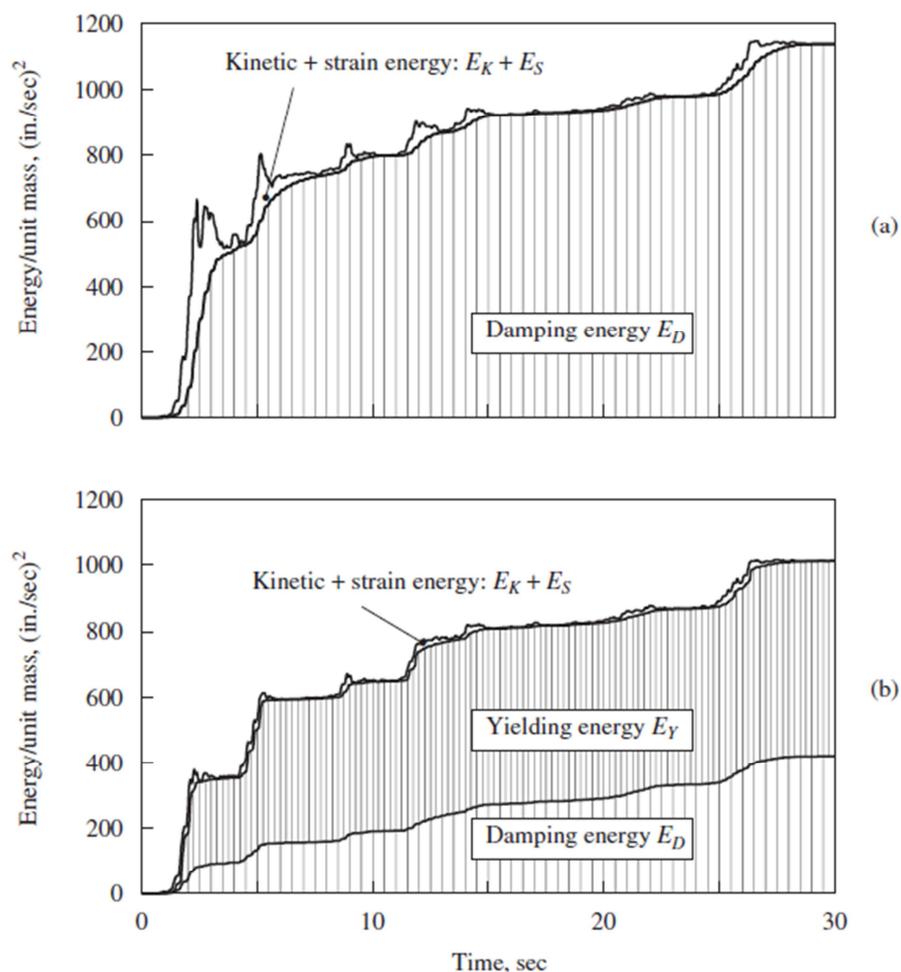


Figura 3.2: Variación de la energía con el tiempo; (a) sistema lineal; (b) sistema elastoplástico

A partir del análisis de los resultados presentados en la Figura 3.2, se puede visualizar que eventualmente la estructura disipa la energía de entrada a través del amortiguamiento viscoso y sobretodo el comportamiento inelástico

del sistema estructural, siendo esta última energía disipada la que causa el daño en las estructuras debido a que origina deformaciones permanentes en los elementos del sistema estructural.

El desempeño estructural de las edificaciones puede ser mejorado si parte de la energía de entrada al sistema se absorbe por algún tipo de dispositivo suplementario de disipación en vez de la estructura per se. Haciendo referencia a la analogía del flujo de agua arriba presentado (ver Figura 3.3), el disipador se puede considerar como un segundo recipiente de agua conectado al recipiente de energía de deformación, cuyo nivel crítico es menor al nivel del recipiente de energía histerético. Este segundo nivel crítico de agua representa el nivel de energía de deformación necesaria para que se activen los dispositivos de disipación suplementarios; y una vez alcanzado, los dispositivos absorberán parte de la energía sísmica de deformación, reduciendo el flujo de energía en la estructura.

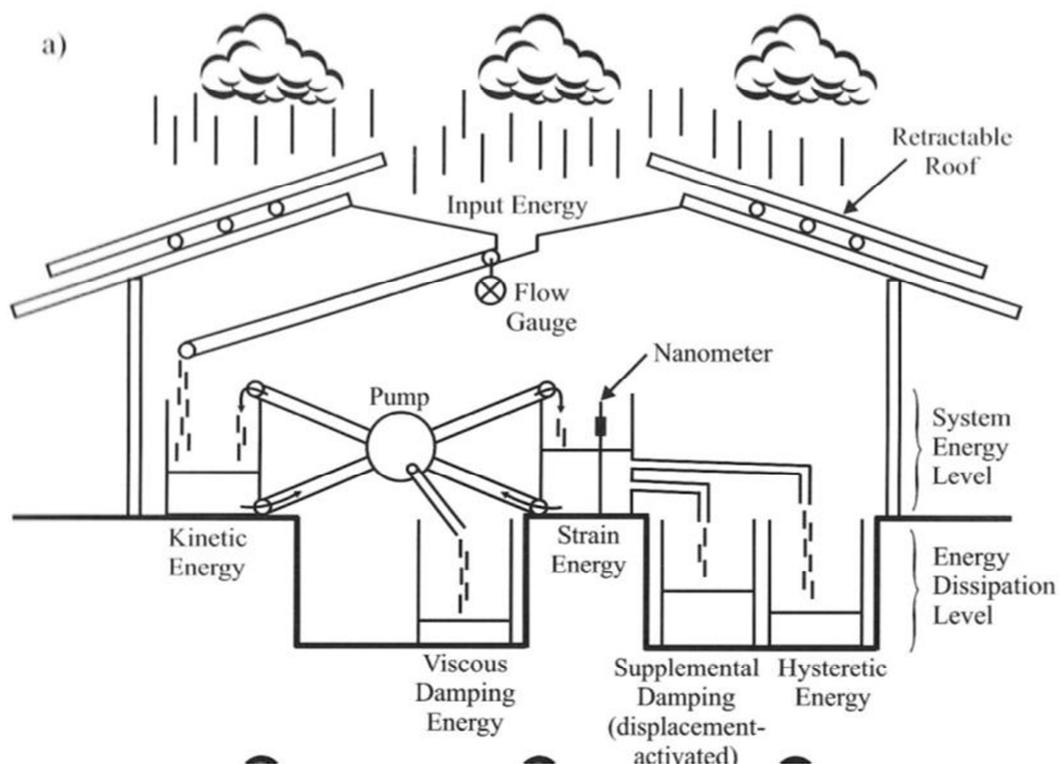


Figura 3.3: Analogía de flujo de agua lluvia con disipador de energía (Christopoulos et al 2006).

Para expresar de forma analítica lo mostrado en la Figura 3.3, se realiza una pequeña modificación en la relación de la conservación de la energía antes presentada

$$E_I(t) = E_K(t) + E_D(t) + E_S(t) + E_Y(t) + E_{fr}(t) \quad (3.1.2)$$

Donde E_{fr} es la energía disipada por los dispositivos de amortiguamiento suplementario o de protección sísmica, que son elementos que buscan reducir la demanda de las fuerzas externas en el sistema resistente principal.

Lo antes expresado puede lograrse con diversas formas, por ejemplo, reduciendo la cantidad de energía que ingresa al sistema estructural (sistemas de aislamiento de base), modificando las propiedades dinámicas de la estructura como amortiguamiento, rigidez, distribución modal, etc., concentrando gran parte de la acción inelástica en dispositivos que no afecten la integridad del sistema principal (disipadores histeréticos o de fricción) o inyectando energía al sistema de manera que contrarreste parcial o totalmente la energía de la excitación externa como los mecanismos de control activo (Sánchez, 2014).

Según Soong y Dargush (1997), se pueden clasificar a los sistemas de disipación de energía de acuerdo a la Tabla 3.2. A continuación se hará un breve recuento de las propiedades de cada uno de estos sistemas indicando sus ventajas y desventajas.

Sistemas de Aislamiento de Base	Disipadores Pasivos de Energía	Sistemas de Control Activos y Semi-Activos
Aisladores Elastoméricos	Disipadores Metálicos	Sistema de Arriostamiento Activo
Aisladores Elastoméricos con Núcleo de Plomo	Disipadores de Fricción	Sistema de Masa Activa (AMD)
Aisladores de Péndulo Friccionante	Disipadores Viscoelásticos	Sistemas de Rigidez o Amortiguamiento Variables
	Disipadores de Fluido Viscoso	Materiales Inteligentes
	Sistemas de Masa Sintonizada o Fluido Sintonizado (TMD) o (TLD)	

Tabla 3.2: Clasificación de los Sistemas de Protección Sísmica (Soong y Dargush, 1997)

3.3. Sistemas de control activo y semi-activo

“Los sistemas de control activo y semi-activo son producto de un gran avance tecnológico. Estos sistemas basan su funcionamiento en la instrumentación de la estructura considerada, lo cual permite observar, medir y procesar en tiempo real datos sobre la respuesta producida en el sistema ante variaciones en su entorno. Durante un evento de características determinadas (fuertes vientos o un sismo) medidas por los sensores, el sistema responde con mecanismos destinados a contrarrestar el efecto del evento sobre la estructura, ya sea por inyección de energía de fuentes externas u otro tipo de mecanismo. Todo el proceso es computarizado y la respuesta del sistema de control se define en tiempo real, siendo muy conveniente ante solicitaciones rápidamente cambiantes y no predecibles como los sismos” (Sánchez, 2014).



Figura 3.4: Esquema de funcionamiento de un sistema de control activo (Villareal et al, 2009)

En la Figura 3.4 se presenta un esquema de un sistema de control activo, el cual consiste de:

1. Sensores situados en la propia estructura empleados para medir variables correspondientes a la excitación externa, o variables de la respuesta estructural, o de ambos tipos.
2. Sistemas controladores que se basan en las medidas de los sensores y calculan la fuerza a aplicar por los actuadores para contrarrestar los efectos sísmicos.
3. Actuadores que habitualmente son alimentados por fuentes de energía externa para ejercer fuerzas.

Según Villareal et al (2009), en comparación con otros sistemas de protección, los sistemas activos y semiactivos presentan numerosas ventajas como por ejemplo:

- Mayor efectividad en control de respuesta estructural.
- Afectividad menos sensible a las condiciones locales del suelo y a las características del sismo.

- Aplicación ante diversos eventos: viento o sismos.
- Selección de los objetos de control.

Sin embargo, presenta también serias desventajas e inconvenientes, tales como:

- Elevado costo de mantenimiento.
- Dependencia respecto a las fuentes de alimentación
- La respuesta dinámica de edificios con muchos grados de libertad y un posible comportamiento lineal resulta imprevisible.
- Su control a partir de un número limitado de sensores y actuadores plantea un problema dinámico complejo.

3.4. Sistemas de aislamiento de base

El principio del sistema de aislamiento de base es el desacoplamiento de la estructura del movimiento del suelo a partir de la inserción de elementos flexibles al movimiento lateral y rígido al desplazamiento vertical que se ubican entre la cimentación y la superestructura.

Según Sánchez (2014), el sistema de aislamiento de base busca alargar el período fundamental de vibración de la estructura y aumentar el porcentaje de amortiguamiento, siendo que el primer objetivo se traduce en una disminución de las aceleraciones en el sistema estructural, sin embargo, esto viene acompañado por un incremento en su desplazamiento, el cual se encuentra mayormente concentrado en el plano de ubicación del aislamiento (ver Figura 3.5).

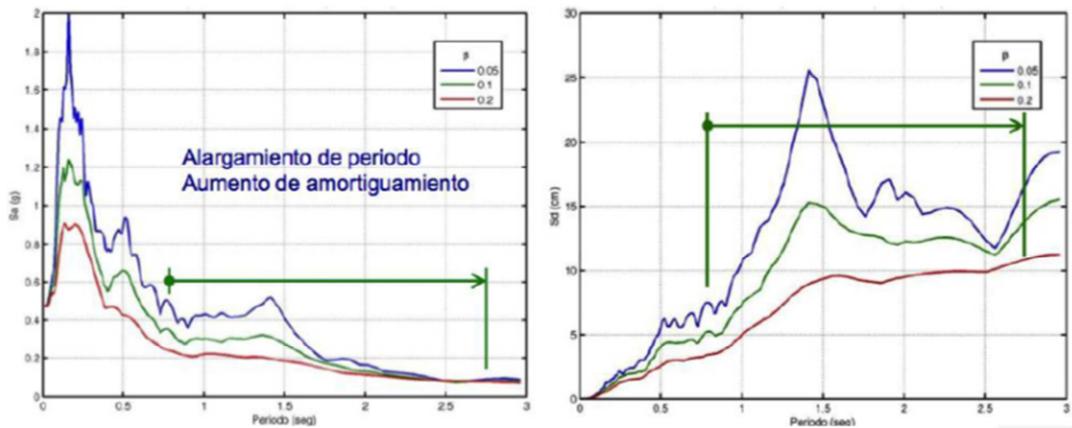


Figura 3.5: Efecto de la incorporación de un sistema de Aislamiento de Base en la Estructura (Sánchez, 2014)

Por lo tanto, su uso es más eficiente en estructuras con períodos cortos pero no en suelos blandos, ya que podrían generarse aceleraciones relativamente grandes. Sin embargo, su aplicación no está solamente limitada a estructuras, sino también para puentes, donde su función fundamental es la de separar el tablero de la cimentación, protegiendo a esta última de los efectos de cargas laterales durante un evento sísmico.



Figura 3.6: Aisladores de base; Izquierda: aislador elastomérico con núcleo de plomo (Sánchez, 2014); Derecha: aislador friccional deslizante (<http://www.redpavia.com/projects/project4/2.jpg>).

Existen diversos tipos de sistemas de aislamiento sísmico, dividiéndose principalmente en dos tipos: elastoméricos (con o sin núcleo de plomo) conformados por capas de elastómeros intercaladas con capas de acero, y

fricciónales deslizantes que consisten en una superficie de deslizamiento, generalmente de acero, sobre la cual se asienta una superficie recubierta de teflón (PTFE) sobre la cual se soporta la estructura (Sánchez, 2014).

3.5. Disipadores pasivos de energía

Los sistemas de control pasivo consisten en dispositivos que reaccionan ante la acción sísmica, alteran el comportamiento dinámico de la estructura y reducen su respuesta estructural; y no necesitan de una fuente de energía para funcionar (Lama, 2013 citando a Soong & Dargush, 1997)

Según Christopoulos et al (2006), estos sistemas se pueden dividir en tres categorías diferentes: dispositivos activados por desplazamiento, dispositivos activados por velocidad y dispositivos activados por movimiento, siendo los disipadores viscoelásticos catalogados como dispositivos de desplazamiento y velocidad.

Table 4-1: Categories of Passive Energy Dissipating Systems

Displacement-Activated	Velocity-Activated	Motion-Activated
Metallic Dampers	Viscous Dampers	Tuned-Mass Dampers
Friction Dampers		
Self-Centering Dampers		
Viscoelastic Dampers		

Tabla 3.3: Categorías de disipadores pasivos de energía (Christopoulos et al, 2006).

Los dispositivos activados por desplazamiento disipan energía a través el desplazamiento relativo que ocurre entre sus puntos de conexión con la estructura principal. Generalmente su comportamiento es independiente a la frecuencia de vibración de la excitación. Adicionalmente, las fuerzas generadas por estos dispositivos en los elementos de la estructura principal están en fase con las fuerzas internas generadas durante la excitación, es

decir, que las máximas fuerzas que ocurren en los disipadores ocurren simultáneamente con las máximas fuerzas que ocurren durante el sismo en la estructura principal. Ejemplos típicos de este tipo de dispositivos son los disipadores metálicos y los disipadores de fricción.

Los dispositivos activados por velocidad disipan energía a través de las velocidades relativas que ocurren entre sus puntos de conexión. La respuesta fuerza-desplazamiento de estos disipadores depende de la frecuencia de excitación, siendo que las fuerzas generadas por estos dispositivos están fuera de fase con las fuerzas internas generadas en la estructura durante la excitación. Ejemplos típicos de estos dispositivos son los disipadores puramente viscosos y los viscoelásticos.

Los dispositivos activados por movimiento interrumpen el flujo de energía en la estructura a través de la vibración de un sistema secundario. Un ejemplo típico de este sistema son los sistemas de masa sintonizada (Tuned Mass Dampers - TMD), que son sistemas masa resorte secundarios adheridos a la estructura principal. Durante una excitación dinámica el TMD vibra a la misma frecuencia de la estructura principal pero fuera de fase, de tal forma que limita la energía sísmica de entrada.

3.5.1. Disipadores metálicos por fluencia de metales

Los disipadores metálicos basan sus principios de disipación de energía en el comportamiento histerético de los metales al ser deformados más allá de su límite elástico; las características que se buscan en estos tipos de disipadores son un comportamiento histerético estable, poca variabilidad de sus características en el tiempo y resistencia a factores ambientales y variaciones de temperatura dentro de los rangos de operación para los cuales se diseñan (Sánchez, 2014).

Según Villareal et al (2009), la plastificación de metales en disipadores se puede producir a partir de esfuerzos estructurales o bien a partir del proceso de extrusión. Cualquier esfuerzo, sea de torsión, flexión, cortante o axial puede conducir a procesos de plastificación en metales, siendo el acero el metal más empleado en disipadores ya que presenta variadas posibilidades constructivas, bajo costo y elevada ductilidad. Sin embargo, la principal desventaja del uso de este tipo de disipadores radica en que el principio de disipación de energía de los dispositivos implica daño en los mismos ante un sismo severo, por lo que es probable que luego de un evento extremo tengan que ser reemplazados.

Ejemplos típicos de este tipo de disipadores son los Added Daming and Added Stiffness (ADAS) y Triangular Added Daming and Added Stiffness (TADAS), según lo expuesto por Lama (2013):

- Disipador ADAS, es un disipador de placas en paralelo que se plastifican a flexión. Las placas se encuentran empernadas en ambos extremos impidiendo la rotación, de forma que un desplazamiento relativo entre estos en dirección perpendicular al plano de la placa produce una distribución de momentos flectores lineales, simétricos y con doble curvatura.
- Disipador TADAS, está formado por placas en paralelo con la diferencia que un extremo de las placas esta empotrado y el otro articulado, de tal manera que con un desplazamiento relativo entre extremos de la placa perpendicular a su plano, se consigue la plastificación por flexión por curvatura simple.

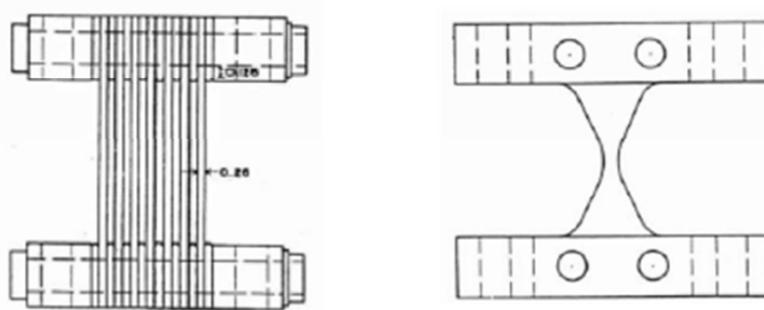
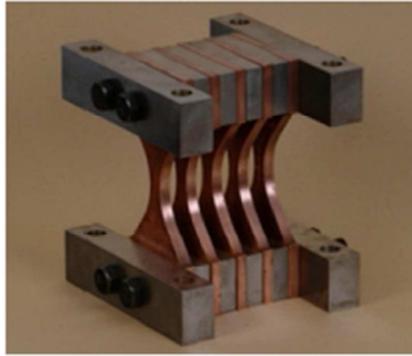


Figura 3.7: Disipador tipo ADAS (Aiken, I; Nims, D; Whittaker, A & Kelly, J, 2003)

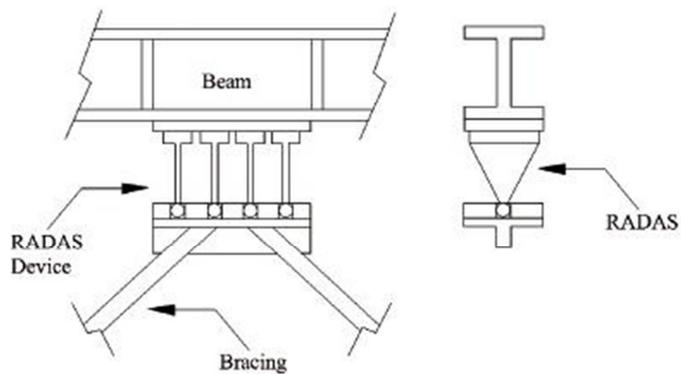
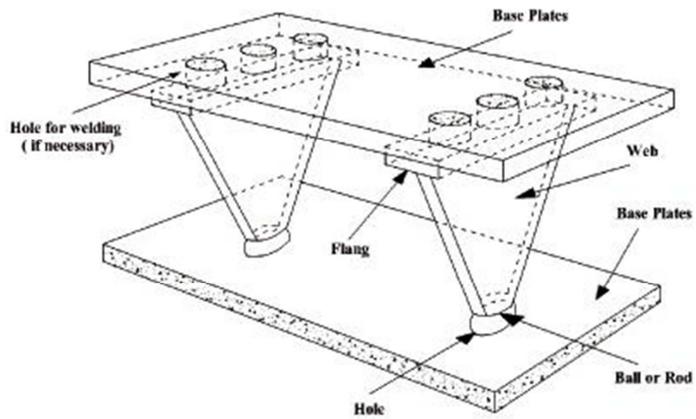


Figura 3.8: Disipador tipo TADAS (www.scielo.br/img/revistas/lajss/v8n4/a04fig01.jp)

3.5.2. Disipadores de fricción

Los disipadores de fricción, al igual que los disipadores metálicos, basan su principio de disipación de energía en el comportamiento histerético de los metales al ser deformados más allá de su límite elástico, pero en este caso particular utilizando la fricción como medio para la disipación de la energía. Estos dispositivos incrementan la capacidad de la estructura para disipar energía, sin embargo no afectan considerablemente el período natural de vibración de la estructura (Chopra, 2012).

Es naturalmente importante que una consistente y predecible respuesta friccional sea mantenida a lo largo de la vida del disipador. Esta respuesta depende de considerables condiciones de su superficie, la cual puede verse afectada por factores ambientales, siendo un inconveniente en el uso de estos dispositivos el hecho de no poder garantizar de forma precisa que el coeficiente de fricción sea el adecuado al momento de un sismo (Sánchez, 2014).

Ejemplos de estos disipadores son los Limited Slip Bolted Joint, Slotted Bolted Connection (SBC), disipadores uniaxiales, que se verán con mayor detalle en el capítulo siguiente.

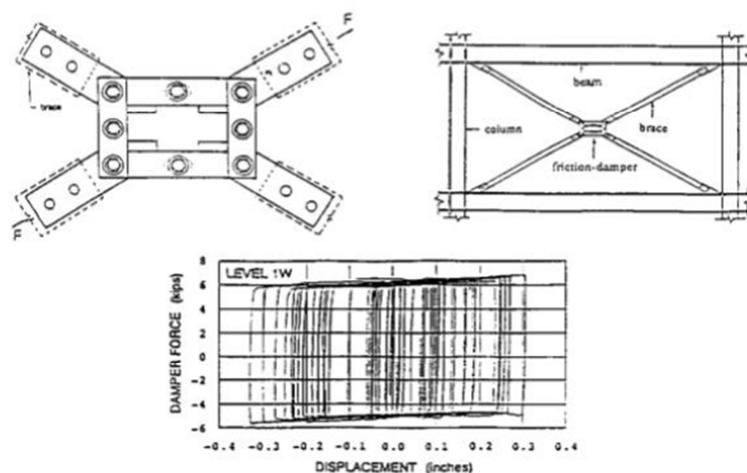


Figura 3.9: Disipador de fricción (Aiken, 1996).

3.5.3. Disipadores Viscoelásticos

Según Lama (2013), los disipadores viscoelásticos son formados generalmente con polímeros sólidos que disipan energía por deformación al corte. Estos polímeros tienen una rigidez elástica que hace que el esfuerzo al que trabajan sea dependiente del desplazamiento al que son sometidos; pero también tienen características viscosas que hacen que dicho esfuerzo dependa de la velocidad de variación de las deformaciones.

Estos disipadores consisten en placas de acero unidas con capas de material viscoelástico en una configuración tipo sándwich, presentando curvas de histéresis casi elípticas y disipando la energía por medio del desplazamiento relativo entre las placas metálicas exteriores y la placa metálica central del disipador.

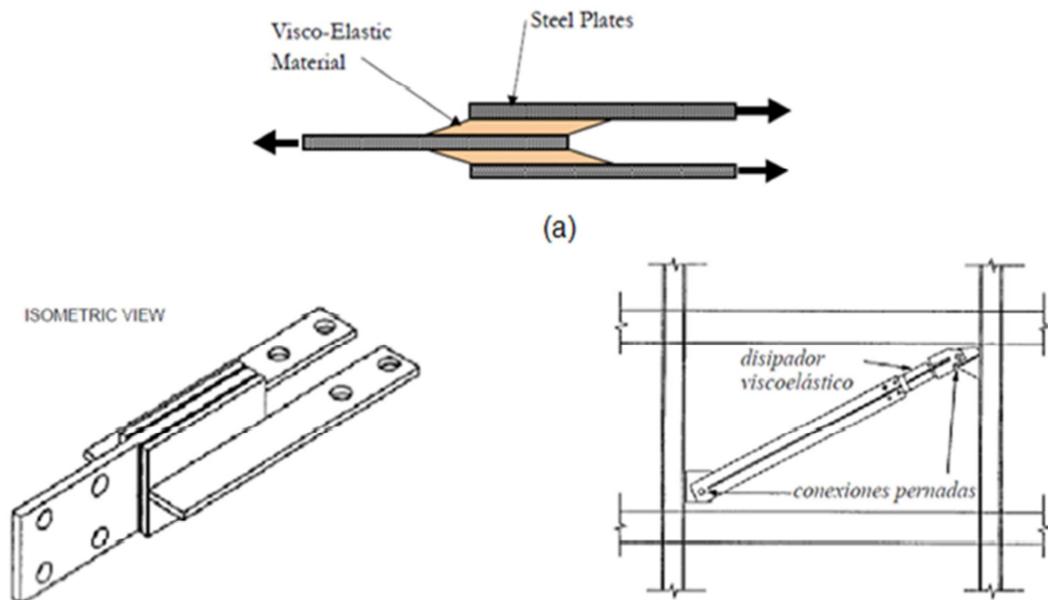


Figura 3.10: Tipos de disipadores viscoelásticos (Lama, 2103).

3.5.4. Disipadores Viscosos

“Los disipadores de fluido viscoso son aquellos en donde la disipación de energía ocurre, cuando dentro de un cilindro cerrado, un pistón obliga a un fluido altamente viscoso a pasar por un orificio pequeño generando fricción entre las paredes del orificio y el fluido. estos dispositivos se componen de un cilindro resistente de acero inoxidable que en su interior contiene un fluido como las siliconas, debido a que presentan características adecuadas como alta viscosidad, resistentes al fuego, estables frente a los cambios de temperatura y largos periodos de tiempo” (Cuntó, 2014).

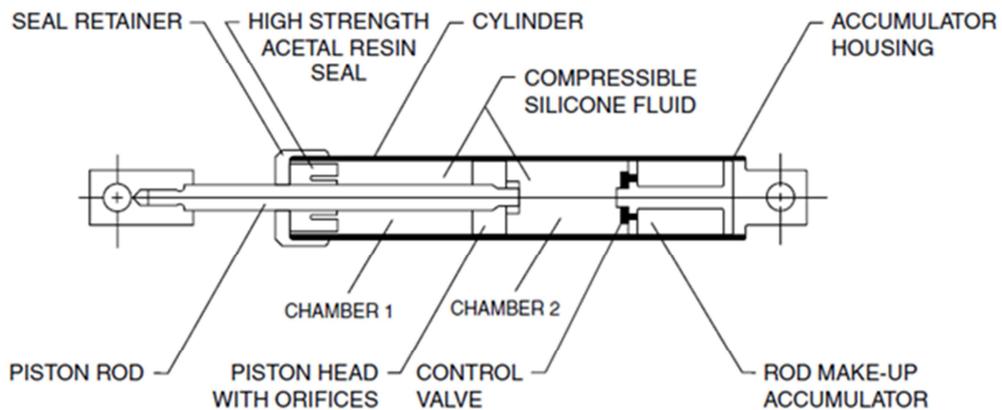


Figura 3.11: Esquema de disipador Taylor de fluido viscoso.

CAPÍTULO 4

TEORÍA Y COMPORTAMIENTO DE DISIPADORES DE FRICCIÓN

4.1. Introducción

Los disipadores de fricción pertenecen a la categoría de disipadores activados por desplazamiento y se encargan de disipar la energía sísmica a través de la fricción que se desarrolla en la interfase entre dos cuerpos rígidos deslizándose uno relativo al otro (Christopoulos et al, 2006).

Ejemplos de aplicación de este principio están presentes de forma frecuente en la naturaleza y de forma más específica en muchos sistemas cotidianos, por ejemplo, la fricción es la fuerza principal usada para disipar la energía cinética en los frenos de los vehículos. Basado en este simple principio, Pall, A.S. & Marsh, C (1980), iniciaron el desarrollo de disipadores pasivos de fricción para mejorar el desempeño sísmico de diversos tipos de estructura, siendo su objetivo principal disminuir el movimiento de los edificios “by braking rather than breaking”, es decir, “frenándolos en vez de rompiéndolos” (Pall, A.S. & Marsh, C, 1982).

Soong et al (1997) informa que a lo largo de la historia se han desarrollado diferentes tipos de disipadores de fricción, que se muestran en la Figura 4.1. El Limited Slip Bolted Joint fue originalmente diseñado por Pall et al. (1980) y se muestra en la Figura 4.1a. Este dispositivo se diseñó con la finalidad de controlar estructuras formadas por grandes paneles sometidos a excitaciones sísmicas, incorporando pastillas de frenos entre dos placas de acero con la finalidad de proveer una respuesta esfuerzo deformación consistente. La Figura 4.1b muestra un disipador alternativo diseñado por Pall et al. (1982), también incorporando pastillas de frenos, para su

aplicación en estructuras con arriostramientos en X. La Figura 4.1c y d muestran dos disipadores uniaxiales y la Figura 4.1e muestra una Slotted Bolted Connection (SBC) utilizada en estructuras con arriostramiento concéntrico.

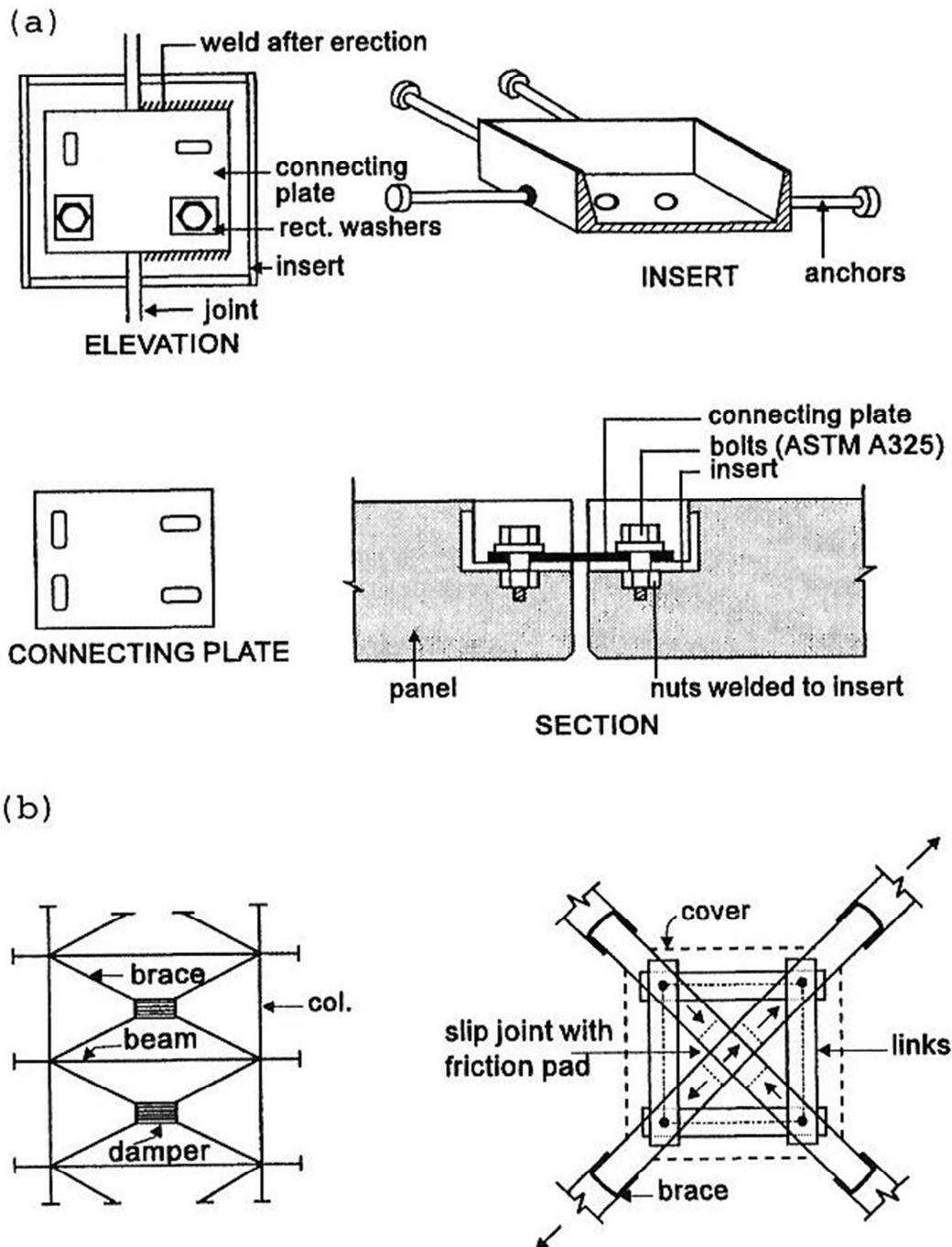


Figura 4.1: Disipadores de fricción. a) Limited Slip Bolt Joint, b) Disipador de fricción en X (Soong et al., 1997).

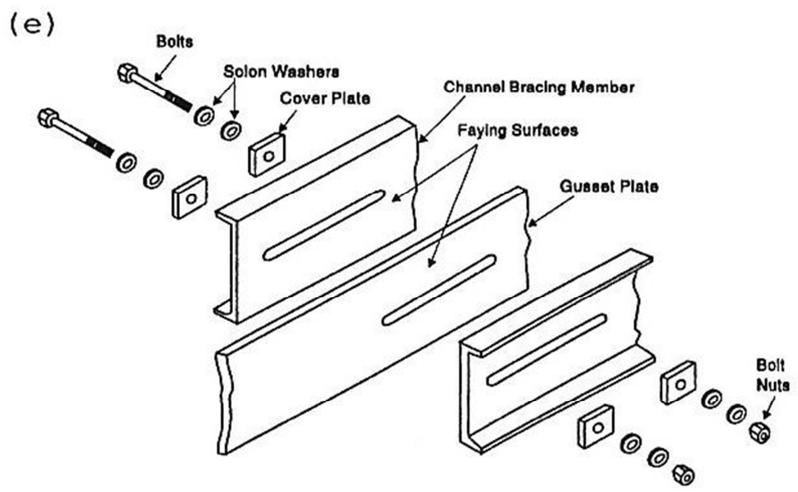
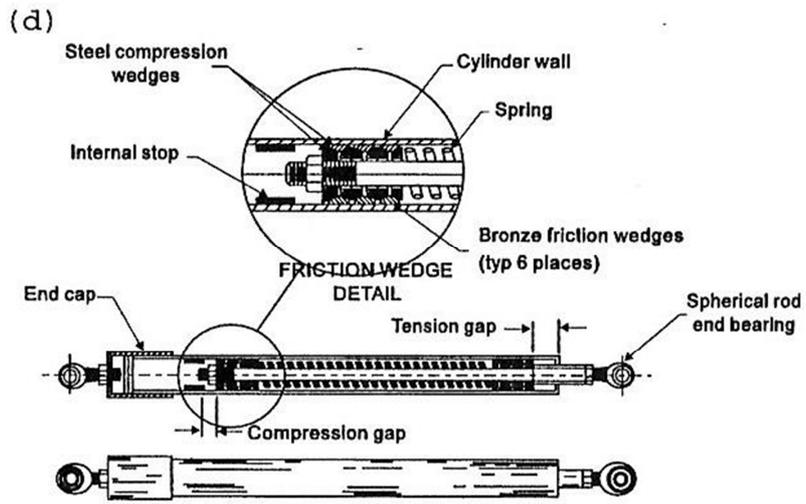
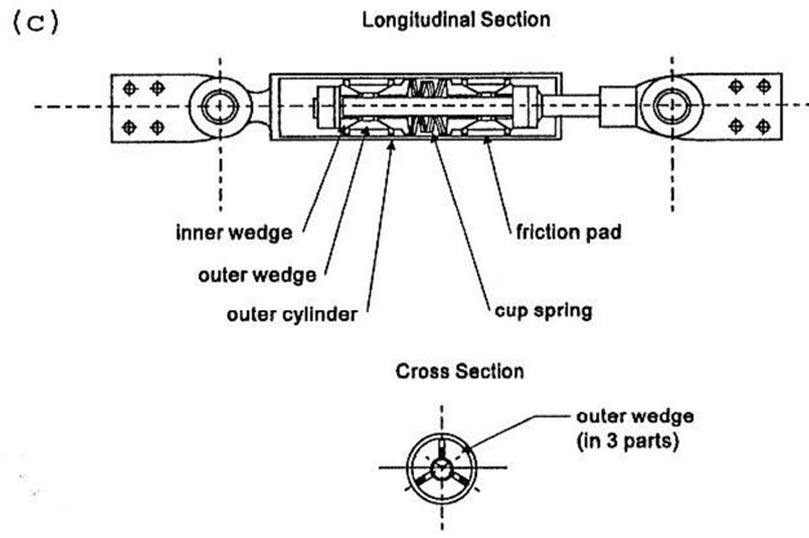


Figura 4.2: Disipadores de fricción. c) Disipador de fricción Sumitomo, d) Energy Dissipating Restraint, e) Slotted Bolted Connection (Soong et al., 1997).

Su comportamiento histerético se puede idealizar por un comportamiento elástico perfectamente plástico como se muestra en la Figura 4.3, siendo F_a la carga de deslizamiento del disipador. Muchos de los disipadores de fricción usados para reforzamiento y rehabilitación de estructuras ante sismos se utilizan en arriostramientos, estando por lo tanto asociada su rigidez elástica a la rigidez de los elementos de arriostramientos.

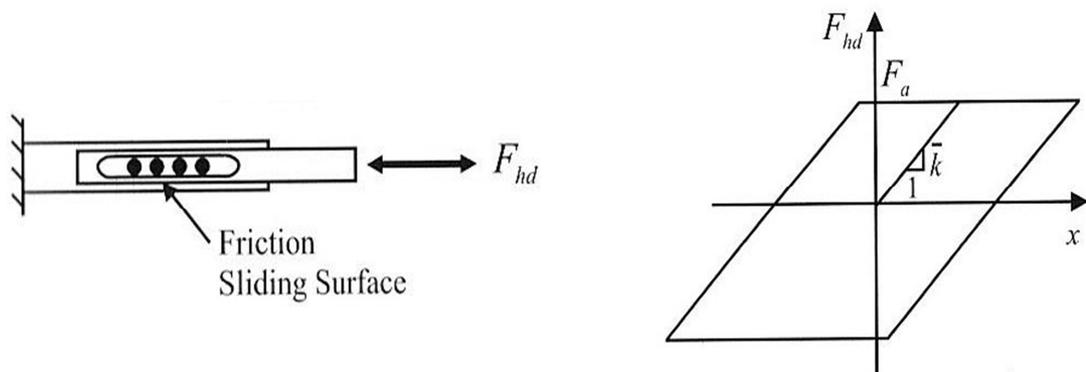


Figura 4.3: Curva fuerza-desplazamiento idealizada para un disipador de fricción (Christopoulos et al, 2006).

Con la finalidad de obtener una mejor apreciación del comportamiento de los disipadores antes presentados, a continuación se hará una exposición de los principios básicos de su funcionamiento para posteriormente definir una forma adecuada de modelarlos para su análisis diseño en estructuras.

4.2. Principios básicos de funcionamiento

El fenómeno de la fricción ha sido ampliamente estudiado por prominentes científicos a lo largo de la historia. La teoría básica de fricción entre dos cuerpos sólidos que se deslizan está basada en tres principios, que según Christopoulos et al. (2006) han podido ser válidas experimentalmente bajo condiciones específicas:

- La fuerza de fricción total que puede ser desarrollada es independiente del área de contacto aparente.

- La fuerza de fricción total es proporcional a la fuerza normal total que actúa en la superficie de deslizamiento.
- Para el caso de deslizamiento a bajas velocidades, la fuerza total de fricción es independiente de la velocidad de deslizamiento.

Por lo tanto, durante el deslizamiento de dos superficies la relación entre la fuerza de fricción F_f , que actúa tangencialmente al plano de interfase y opuesta a la dirección del desplazamiento, y la fuerza normal N se puede expresar como:

$$F_f = \mu N \quad (4.2.1)$$

Donde μ es el coeficiente de fricción y a esta relación se la conoce como fricción de Coulomb.

Cabe indicar, que aunque el concepto de fricción de Coulomb y sus fuerzas asociadas son simples de medir o calcular basados en la ec. (4.2.1), en la práctica esta teoría es solamente aproximada ya que la asunción de que el coeficiente de fricción es constante para una determinada interfase de materiales deslizándose no siempre es verdad y varía en función no solo de los tipos de materiales deslizándose sino también de sus condiciones físicas (Soong et al., 1997).

4.2.1. Componentes de fricción

Christopoulos et al. (2006) basado en el trabajo de Bowden, F. P. y Tabor, D., (1973) indica que existen tres componentes principales que contribuyen al trabajo realizado en la interfase entre dos superficies deslizándose: i) el componente de adhesión a lo largo de la interfase, ii) el componente de trabazón y iii) la presencia de contaminantes y partículas ambientales; siendo esta zona de interfase una región de alta disipación de energía que

ocurre mediante la transformación de la energía cinética de deslizamiento en calor.

4.2.1.1. Componente de Adhesión

Antes que la carga normal sea aplicada, dos cuerpos se encuentran en contacto a través de sus irregularidades (ver Figura 4.4). Luego de aplicada la carga, estas irregularidades se deforman plásticamente hasta llegar al equilibrio formándose zonas de presiones que son el área real de contacto entre los cuerpos.

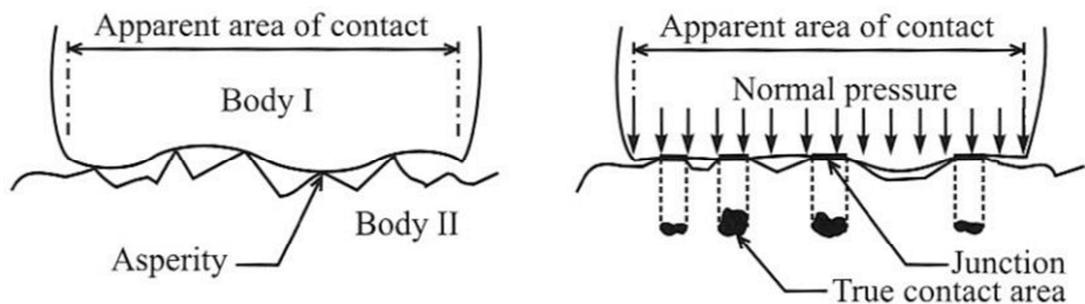


Figura 4.4: Irregularidades (Asperity) y zonas de presión (junction) entre superficies de deslizamiento (Christopoulos et al, 2006).

La carga tangencial aplicada a la superficie de contacto aumenta el área de estas zonas de presiones con un incremento de esfuerzos cortantes y disminuyendo los esfuerzos normales, siendo la fuerza de fricción dependiente de las propiedades de la superficie de contacto como la área de contacto real y la resistencia de los cuerpos deslizándose. Este fenómeno arriba explicado, es la idea central del componente de adhesión en la fricción, siendo posible expresar la fuerza debido a la adhesión F_{fa} en términos del área real de contacto y la resistencia a cortante del material:

$$F_{fa} = \tau A_r \quad (4.2.2)$$

Donde τ es la resistencia a cortante del material y A_r es el área real de contacto. Se puede verificar a partir de la ec. (4.2.2) que la fuerza de fricción aumenta proporcionalmente al área de contacto y la resistencia del material.

4.2.1.2. Componente de Trabazón

El componente de trabazón es explicado en términos de la rugosidad entre las superficies de contacto. Esta rugosidad afecta las características friccionantes entre dos cuerpos, debido a que durante el deslizamiento un cuerpo debe desplazarse sobre la rugosidad del otro; sin embargo, como se muestra en la Figura 4.5, de forma general las pendientes positivas y negativas de las rugosidades de los cuerpos coexisten y se acoplan de manera macro, haciendo que aproximadamente solo el 5% del total de la fuerza de fricción se deba a este fenómeno.

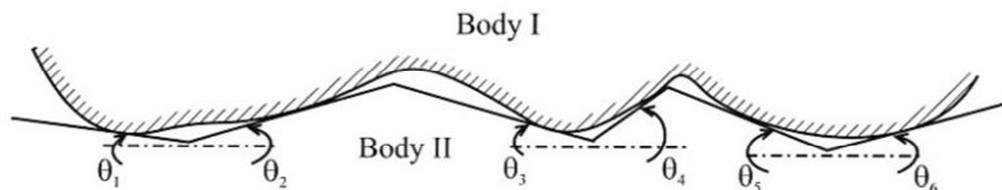


Figura 4.5: Pendientes de rugosidades y puntos de contactos entre cuerpos (Christopoulos et al, 2006).

4.2.1.3. Contaminantes y partículas ambientales

Partículas en el ambiente como restos metálicos, polvo, gases, entre otros, afectan las propiedades friccionantes entre las superficies de contacto. Predecir el efecto que causan estos elementos así como determinar su contribución en la fuerza total de fricción debido a que dependerá de la forma, composición y resistencia de estos elementos así como de la rugosidad de la superficie de deslizamiento haciendo difícil la predicción del comportamiento.

4.2.2. Efectos que influyen en el comportamiento de la fuerza de fricción

4.2.2.1. Presión aparente

Según Christopoulos et al (2006), el coeficiente de fricción μ es proporcional al inverso de la presión normal. El coeficiente de fricción decrece con el incremento de la presión normal, teniendo como caso límite una presión muy grande, de tal forma que las irregularidades microscópicas se deformen plásticamente y el coeficiente permanezca constante. Debe de recalarse, que el coeficiente de fricción para deslizamiento se obtiene para el primer ciclo, siendo que a medida que las repeticiones aumentan, las características friccionales de la interfase varían, cambiando también el coeficiente de fricción.

4.2.2.2. Velocidad de deslizamiento

Antes de iniciar el deslizamiento, la superficie de contacto está cubierta por una fina película de óxido generada por la reacción química del contacto de los materiales de las placas y el oxígeno del aire. Luego que se vence la resistencia por fricción estática, la capa de óxido se cizalla durante el deslizamiento debido a que tiene menos resistencia que el material de las placas de la interfase, de tal forma que a bajas velocidades de deslizamiento una pequeña fuerza es suficiente para eliminar esta capa e iniciar el desplazamiento de las capas. A medida que la velocidad aumenta, el coeficiente de fricción también lo hace, debido a que se genera contacto entre los materiales deslizantes propiamente y no la capa de óxido, generándose en la interfase de deslizamiento residuos del cizallamiento de esta capa. Sin embargo, a muy altas velocidad de deslizamiento, comienza a ocurrir fusión de los materiales de las placas, causando una reducción del coeficiente de fricción (Figura 4.6).

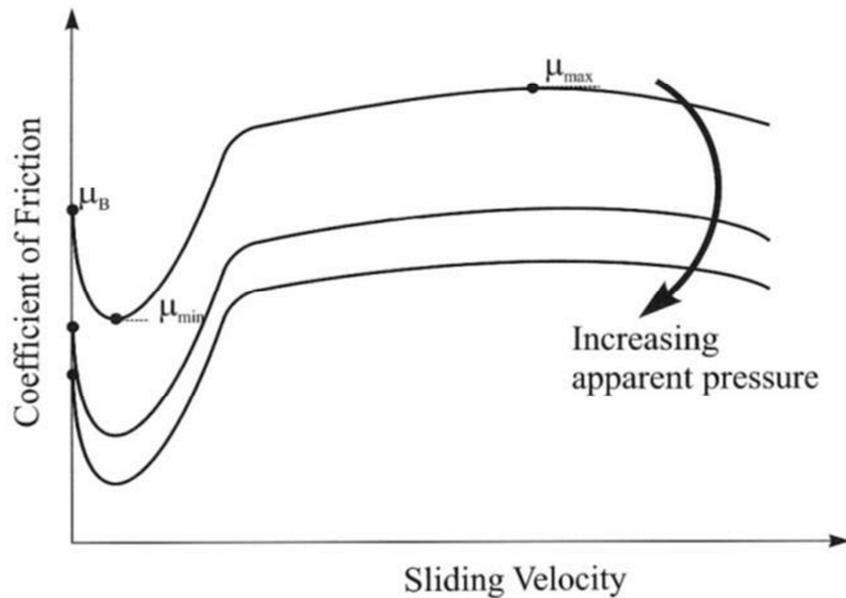


Figura 4.6: Relación entre la velocidad de deslizamiento, presión aparente y coeficiente de fricción (Christopoulos et al, 2006).

4.2.2.3. Temperatura

Según Christopoulos et al (2006), después que se inicia el deslizamiento, la temperatura en la interfase se incrementa debido a la transformación de la energía en calor. La transformación de calor aumenta a medida que aumenta la velocidad de deslizamiento y la presión aparente, haciendo que el coeficiente de fricción μ disminuya. Sin embargo, para velocidades de deslizamiento bajas, la cantidad de calor es pequeña y el coeficiente de fricción se incrementa con el aumento en la velocidad de deslizamiento (ver Figura 4.7).

4.2.2.4. Corrosión y partículas contaminantes

La rugosidad de las superficies está estrechamente relacionada a la corrosión, que es la que controla la durabilidad de la superficie de deslizamiento. El óxido y las partículas contaminantes pueden ser consideradas como un incremento en la rugosidad del material, por lo tanto,

de forma general incrementan el coeficiente de fricción de la interfase exceptuando los casos antes mencionados.

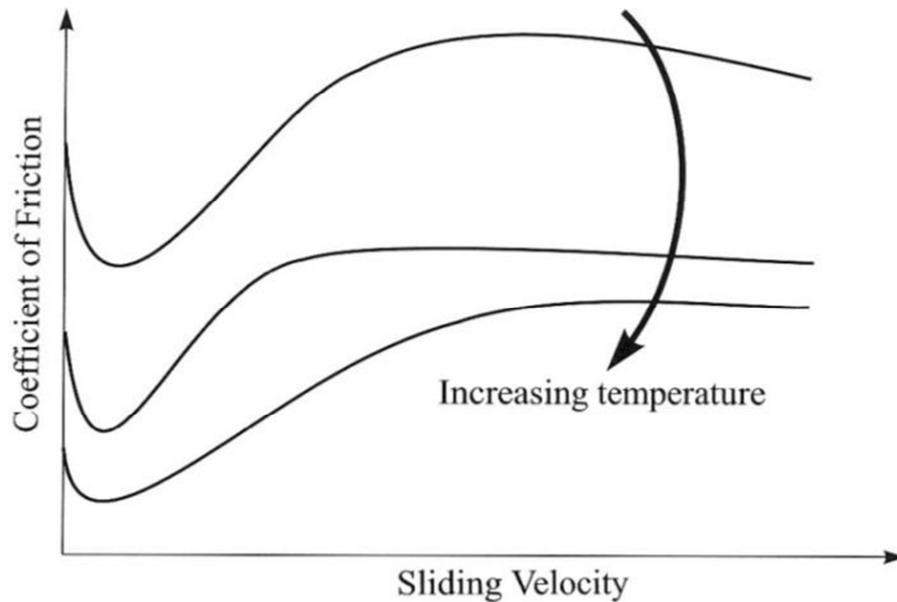


Figura 4.7: Influencia de la temperatura en el coeficiente de fricción (Christopoulos et al, 2006).

4.3. Disipadores de fricción existentes

Actualmente existen una gran variedad de disipadores de fricción propuestos y patentados. De forma general todos presentan características de comportamiento histerético similar (lazos de histéresis rectangulares), sin embargo difieren en su complejidad mecánica, costo y los materiales usados para su fabricación.

A continuación se presentará una breve reseña y explicación de los diversos tipos de disipadores de fricción disponibles en el mercado y que se han utilizado para rehabilitación de estructuras reales.

4.3.1. Slotted Bolted Connections (SBC)

Es la forma más sencilla de un disipador de fricción ubicado como conexión entre arriostramientos y la estructura principal de edificios. Se diseña la conexión para se deslice antes de la fluencia o pandeo del arriostramiento.

Este disipador consiste en de dos placas simétricas de conexión con orificios estándar y una placa de gusset de llegada a la estructura principal con orificios de ojo chino (Figura 4.8), utilizando arandelas de presión entre las placas para mantener constante la fuerza de presión. La longitud del orificio de ojo debe de ser la suficiente de tal forma que permita el deslizamiento de la deformación máxima prevista para el sismo de diseño.

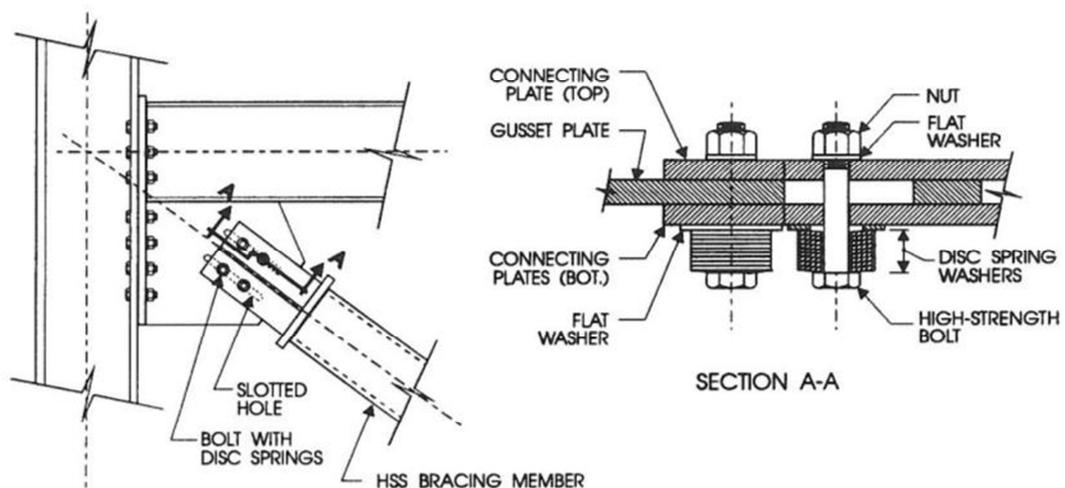


Figura 4.8: Slotted Bolted Connection para un edificio de acero (Christopoulos et al, 2006).

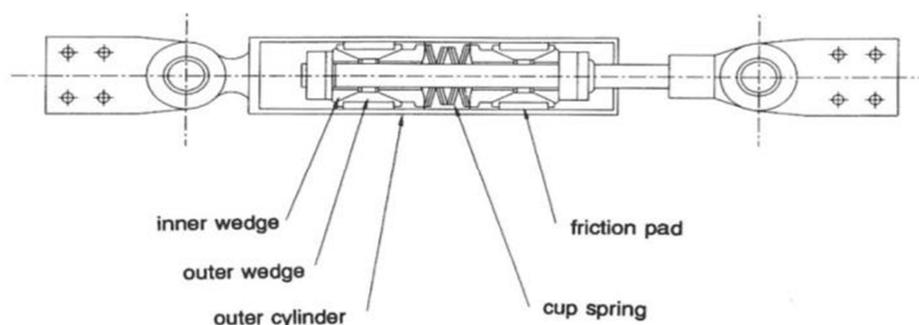


Figura 4.9: Disipador de fricción Sumitomo (Christopoulos et al, 2006).

4.3.2. Disipador de fricción Sumitomo

La Figura 4.9 es un disipador de fricción más sofisticado fabricado por Sumitomo Metal Industries Ltd., de Japón. El dispositivo tiene dentro un resorte pre comprimido que induce fuerzas que son convertidas a través de la acción de cuñas internas en una fuerza normal aplicada a unas placas de fricción, con placas de fricción de cobre con insertos de grafito que proveen lubricación ante el deslizamiento.

De acuerdo a ensayos y estudios realizados al comportamiento del disipador (ver Figura 4.10), se puede verificar como el disipador Sumitomo tiene una respuesta bastante regular y estable con lazos histeréticos rectangulares.

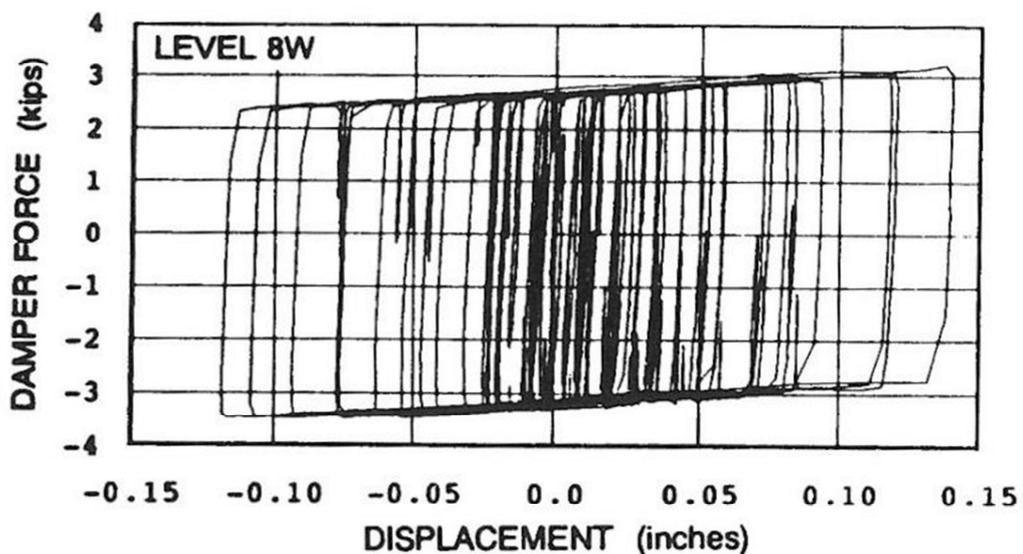


Figura 4.10: Respuesta de disipadores de fricción Sumitomo ante ciclos de carga y descarga (Christopoulos et al, 2006).

4.3.3. Disipador de fricción Pall.

El sistema de Pall (ver Figura 4.11) es un sistema pasivo de disipación de energía diseñado para ser instalado en estructuras de pórticos resistentes a momento. El sistema consiste en un mecanismo de SBC introducidas en arriostramientos en X. El disipador está diseñado para que no se deslice

frente a cargas de servicio y terremotos moderados. En cambio, para el sismo de diseño, el dispositivo se desliza para una carga determinada antes que cualquier elemento de la estructura principal fluya. El deslizamiento del disipador cambia el período natural de la estructura y le permite alterar su modo de vibración principal. Este fenómeno le permite prevenir la quasi resonancia entre la estructura y el período de la excitación sísmica.

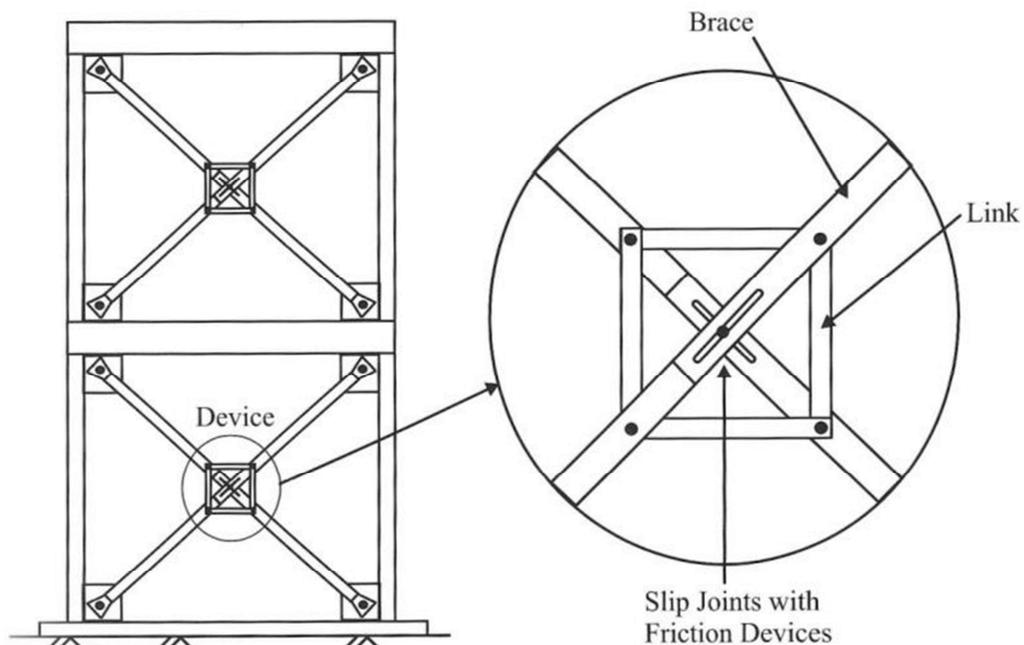


Figura 4.11: Disipador de fricción de Pall (Christopoulos et al, 2006).

La principal característica del sistema de Pall es su capacidad para absorber energía en las dos juntas de deslizamiento, independientemente de la capacidad a pandeo de los elementos de arriostramiento. A continuación, y según lo explicado por Christopoulos et al (2006), cinco pasos se pueden identificar durante un ciclo de una estructura con disipadores Pall:

- 1.- Para cargas menores a las de deslizamiento, los dos arriostramientos están activos y se comportan de forma elástica a compresión y tracción.
- 2.- A cierto nivel de cargas laterales, el arriostramiento a compresión se pandea mientras el de tracción aún se comporta de forma elástica.

3.- El arriostramiento a tensión comienza a deslizarse antes que la carga de fluencia sea alcanzada. Como resultado, los 4 vértices del dissipador se activan y se deforman como romboide, lo que elimina el pandeo del arriostramiento en compresión. Cuando la máxima deformación lateral se alcanza, el arriostramiento a compresión se alinea y regresa a su posición inicial.

4.- Cuando la carga se aplica en reversa, el arriostramiento que se encontraba en compresión puede absorber energía en tensión de forma inmediata debido a que regresa a su posición inicial.

5.- Después que se completa un ciclo, el área resultante de histéresis son idénticas para los dos arriostramiento. De esta forma, la disipación de energía se compara a una de una SBC cuando se diseñan para que los arriostramientos a compresión no pandeen.

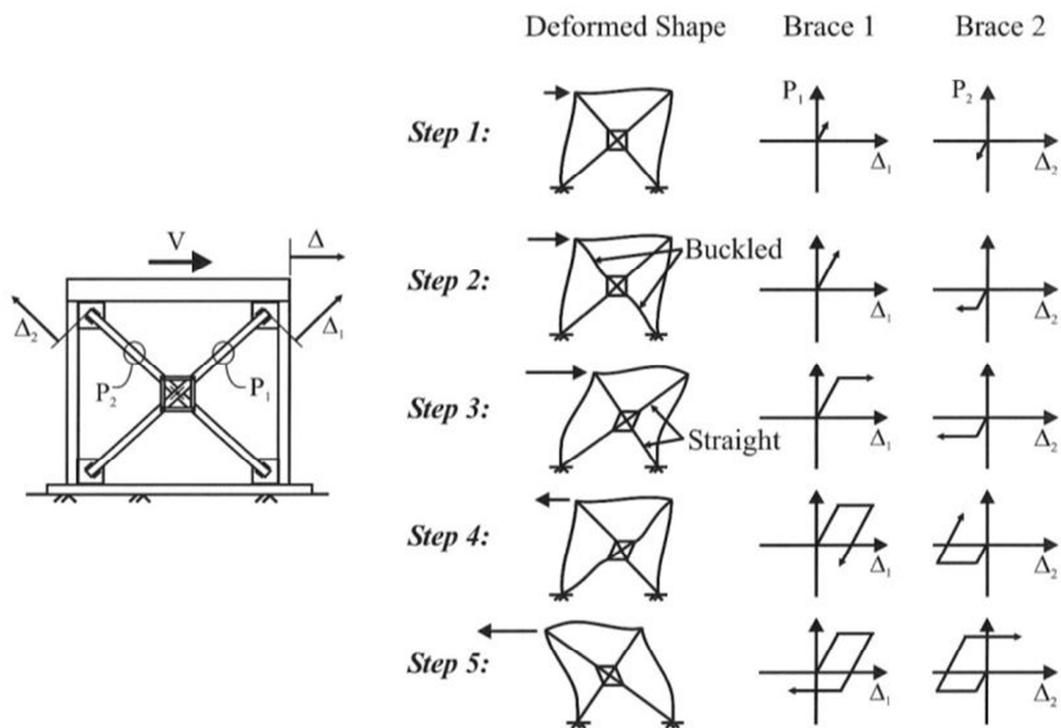


Figura 4.12: Comportamiento histérico de un pórtico resistente a momento con dissipadores de fricción de Pall (Christopoulos et al, 2006).

4.4. Modelamiento matemático de los disipadores de fricción

A partir de los ejemplos arriba presentados, está claro que pueden ser muchos los materiales y sistemas que se empleen para la fabricación del disipador de fricción, teniendo que ser comprobado mediante ensayos y pruebas la estabilidad de su comportamiento ante cargas cíclicas; sin embargo, indiferentemente del sistema utilizado, todos los disipadores teniendo en común la característica de que su comportamiento histerético se asemeja a la de un material elastoplástico (ver Figura 4.17 y Figura 4.13), siendo la fuerza necesaria para tener el comportamiento plástico la carga de deslizamiento F_a del sistema de fricción.

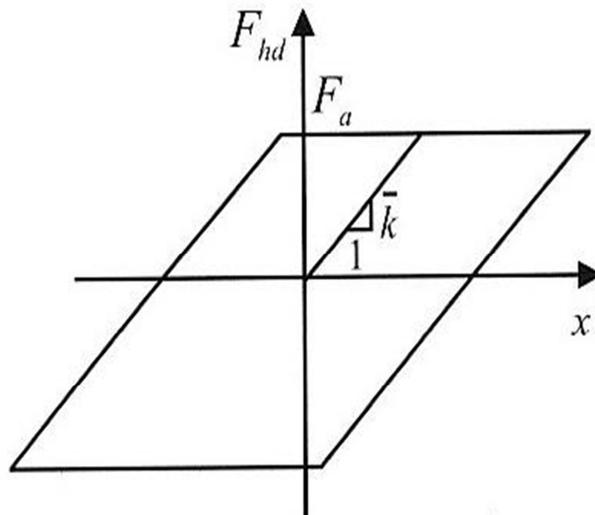


Figura 4.13: Modelo matemático ideal de la respuesta histerética de un disipador de fricción (Christopoulos et al, 2006).

Según lo expresado por Christopoulos et al (2006), para el diseño de una estructura equipada con disipadores de fricción es necesario seguir cuatro pasos:

- 1.- Estimar los parámetros óptimos para el disipador y los elementos del sistema estructural.

2.- El diseño del disipador y los elementos estructurales en función de los parámetros óptimos antes determinados.

3.- La verificación de la capacidad adecuada de los elementos estructurales del sistema principal para las cargas inducidas por el disipador durante su deslizamiento.

4.- La verificación del desempeño del diseño, a través de análisis no lineales historia tiempo para sismos de diseño representativos.

De forma general, se han propuesto varias metodologías para el diseño de estructuras equipadas con disipadores de fricción, especialmente dirigidas a la determinación la carga óptima de deslizamiento, que es el parámetro de respuesta más importante. Para efectos de la ejecución de esta tesis, se utilizará el método propuesto por Filiatrault y Cherry (1988), en donde se utilizan las derivas de entrepiso debido a la vibración de la estructura en su primer modo para la determinación de las cargas de deslizamiento necesarias para activar todos los disipadores de fricción.

Para una estructura equipada con disipadores de fricción en X, la fuerza necesaria para activar los disipadores de fricción será igual a

$$V_{ai} = 2F_{ai} \cos \gamma_i \quad (4.4.1)$$

Donde γ_i es el ángulo de inclinación de los arriostramiento respecto a la horizontal.

Los autores recomiendan que la selección de la rigidez de las diagonales sea tal, que permita cumplir

$$\frac{T_b}{T_u} < 0.40 \quad (4.4.2)$$

Donde T_u es el período fundamental de la estructura sin arriostramientos y T_b es el período fundamental de la estructura arriostrada, encontrándose que las respuestas más deseables para estructuras con amortiguadores de fricción se encuentran para pequeños valores de $\frac{T_b}{T_u}$, y por lo tanto se recomienda que los mismos sean lo más rígido posible dentro de los límites de costo y disponibilidad de material local.

Este procedimiento requiere la estimación de la aceleración máxima en roca (PGA) y el período predominante del sismo de diseño T_g para el sitio.

Utilizando las recomendaciones arriba indicadas, se propone la siguiente ecuación

$$\frac{V_o}{W} = \frac{PGA}{g} Q \left(\frac{T_b}{T_g}, \frac{T_b}{T_u}, N_f \right) \quad (4.4.3)$$

Donde Q es una función desconocida y N_f el número de pisos de la estructura.

Un estudio paramétrico comparativo desarrollado por los autores del procedimiento, les permitió estimar la función Q que minimiza la respuesta energética de la estructura y que se expresa como

$$Q = \frac{T_g}{T_u} \left[(-1.24N_f - 0.31) \frac{T_b}{T_u} + 1.04N_f + 0.43 \right] \text{ para } 0 < \frac{T_g}{T_u} \leq 1$$

$$Q = \frac{T_b}{T_u} \left[(0.01N_f + 0.02) \frac{T_g}{T_u} - 1.25N_f - 0.32 \right] + \frac{T_g}{T_u} (0.002 - 0.002N_f) + 1.04N_f + 0.43 \text{ para } \frac{T_g}{T_u} > 1$$

(4.4.4)

Las ec. (4.4.3) y (4.4.4) puedan ser utilizadas para estimar el cortante óptimo de activación V_o y posteriormente, la fuerza óptima de deslizamiento para cada disipador de fricción.

Según Filiatrault et al (1988), otras de las razones para tratar de utilizar y determinar la carga óptima de deslizamiento para un sistema de disipadores de fricción, es que la respuesta sísmica de la estructura amortiguada es menos sensible a variaciones en la carga de deslizamiento cuando se diseña para la carga óptima de deslizamiento. Esta aseveración se muestra esquemáticamente, en la figura tal, donde se muestra que para la carga óptima de deslizamiento, variaciones del orden del +/-20% no afectan significativamente la respuesta.

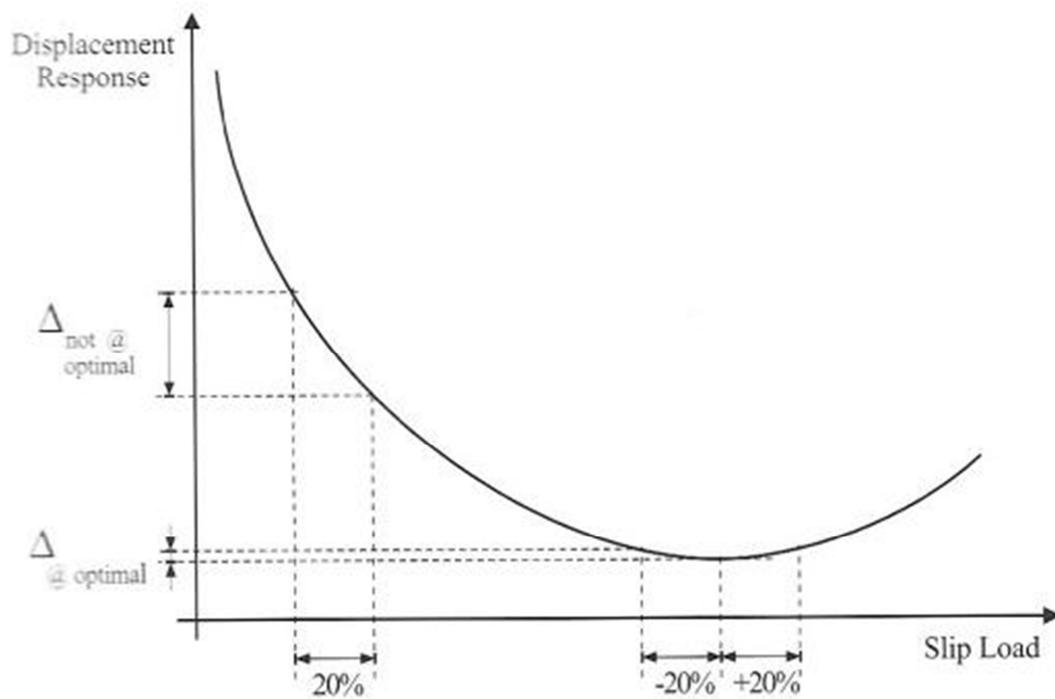


Figura 4.14: Efecto de la variación de la carga de deslizamiento en el desplazamiento de respuesta de estructuras (Christopoulos et al, 2006).

4.5. Ejemplo de aplicación

A continuación se presenta un ejemplo que permite visualizar el efecto de la incorporación de los disipadores de fricción en un modelo estructural básico a partir de la comparación de la respuesta energética del mismo sin y con disipadores.

El sistema principal consiste en un pórtico de hormigón armado de un nivel con una luz de 6.00 m y una altura de 3.00 m que soporta una carga linealmente distribuida de 4.00 Ton/m, tal como se muestra en la Figura 4.15, el cual se idealiza como un sistema SDF con su masa concentrada en la parte superior del mismo.

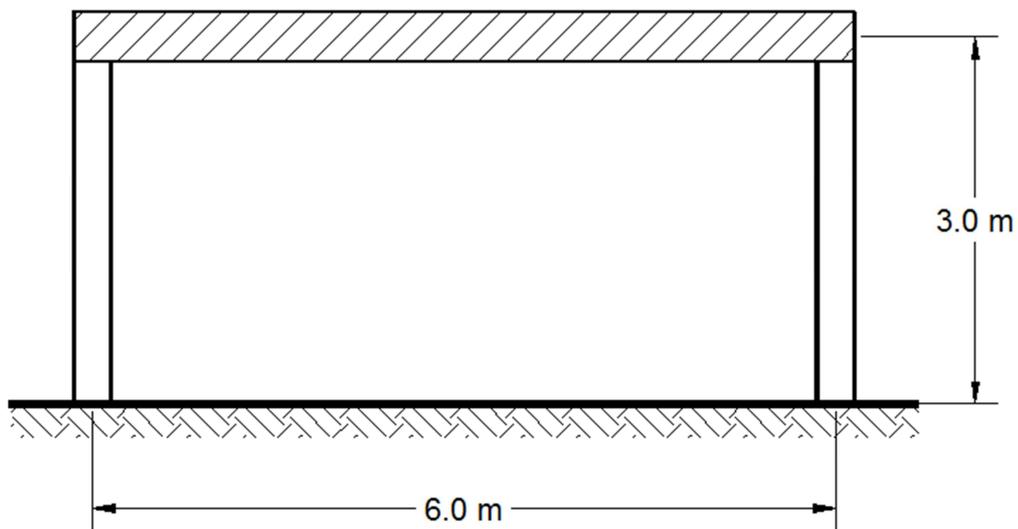


Figura 4.15: Ejemplo de aplicación. Pórtico simple sin disipador.

La rigidez del sistema se obtiene a partir de las propiedades de las columnas de hormigón que se consideran elementos con una respuesta no lineal utilizando un modelo elasto-plástico perfecto de fuerza-desplazamiento, determinado a partir de la curva momento-curvatura para la sección en estudio (ver Figura 4.16), considerando como momento de fluencia el valor de 6.25 Ton-m.

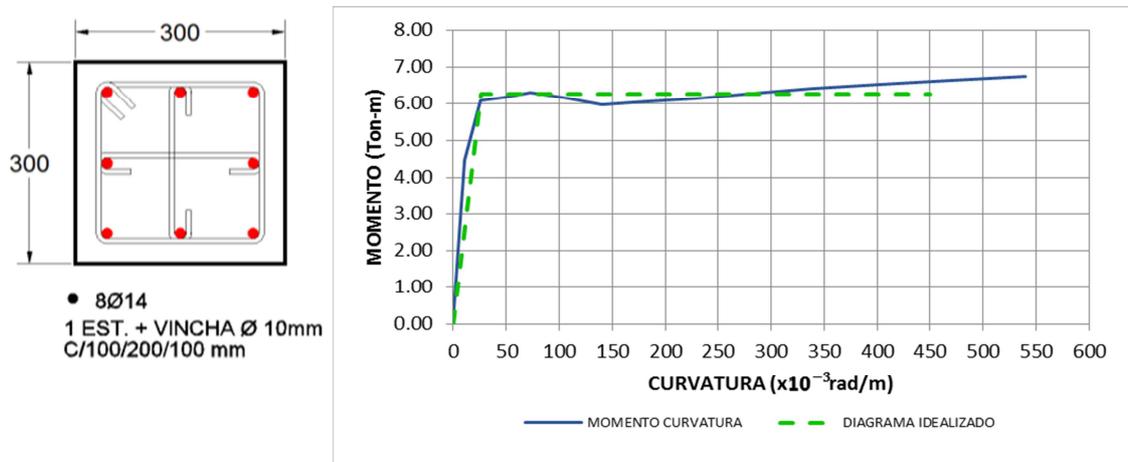


Figura 4.16: Sección transversal de columnas y diagrama de Momento-Curvatura.

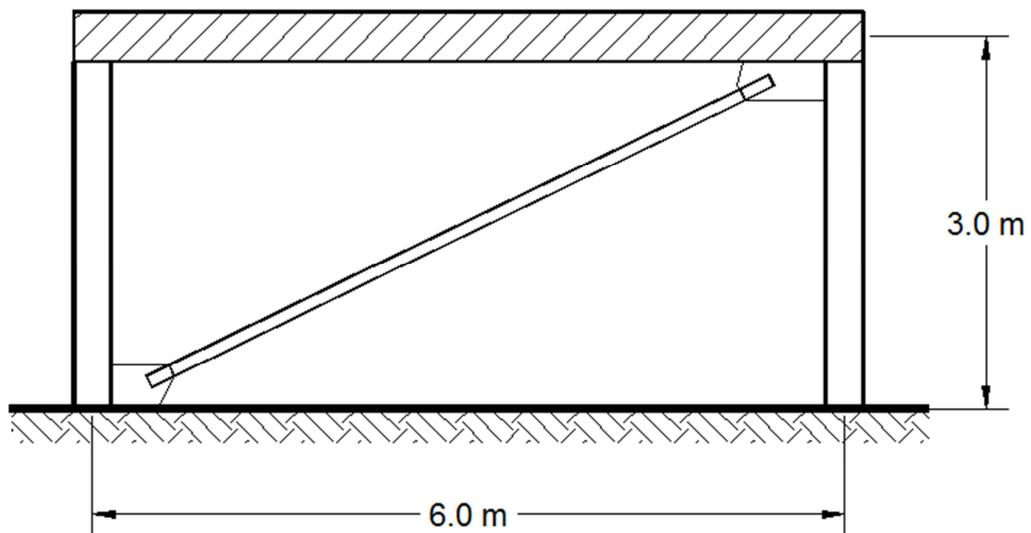


Figura 4.17: Ejemplo de aplicación. Pórtico simple con disipador.

La fuerza de cedencia del sistema se define en función de los resultados obtenidos mediante un análisis del pórtico estudiado, en donde la fuerza lateral necesaria para que se genere un mecanismo de colapso mediante la formación de rotulas plásticas en todos los extremos de las columnas es de $P_y = 8.33 \text{ Ton}$.

Posteriormente el pórtico será reforzado mediante la incorporación de un arriostramiento diagonal con un disipador de fricción del tipo SBC (ver Figura 4.17), con una geometría y propiedades dadas y cuyo comportamiento histerético ha sido definido mediante un modelo elasto-plástico perfecto con una carga de deslizamiento de 2.40 Ton, que es equivalente al 10% del peso de la carga que toma el pórtico.

Las características del pórtico y del disipador a incorporar se detallan a continuación:

a. Generales:

$w = 4.00 \text{ Ton/m}$ Carga uniformemente distribuida

$W = 24.00 \text{ Ton}$ Peso total del sistema

b. Propiedades de las columnas:

$b = 30.00 \text{ cm}$ Dimensión de sección transversal

$I = 67500.00 \text{ cm}^4$ Inercia de la sección

$E = 250000.00 \text{ Kg/cm}^2$ Módulo de elasticidad del material

c. Propiedades dinámica del Sistema:

$m = 2.45 \text{ Ton s}^2/m$ Masa del sistema estructural

$k = 1500 \text{ Ton/m}$ Rigidez del sistema

$c = 6.06 \text{ Ton s/m}$ Amortiguamiento del sistema

$\omega_n = 24.76 \text{ rad/s}$ Frecuencia natural del sistema

$T_n = 0.254 \text{ s}$ Período natural del sistema

$P_y = 8.33 \text{ Ton}$ Carga de cedencia del sistema

d. Propiedades del disipador de fricción

d.1 Arriostramiento:

Se asume que el arriostramiento tendrá un comportamiento elástico durante todo el intervalo de análisis.

$A = 15.00 \text{ cm}^2$ Área de sección transversal de arriostramiento

$E = 2030000.00 \text{ Kg/cm}^2$ Módulo de elasticidad del material

$L = 4.24 \text{ m}$ Longitud del arriostramiento

$k_b = 3718.53 \text{ Ton/m}$ Rigidez lateral de arriostramiento

d.2 Disipador de fricción SBC:

$f_y = 2520 \text{ Kg/cm}^2$ Esfuerzo de fluencia de material de disipador

$E = 2030000.00 \text{ Kg/cm}^2$ Módulo de elasticidad del material de disipador

$k_d = 4648.16 \text{ Ton/m}$ Rigidez elástica de disipador

$F_y = 2.40 \text{ Ton}$ Fuerza de deslizamiento de disipador

$\Delta_y = 0.0005 \text{ m}$ Desplazamiento de fluencia de disipador

d.3 Sistema Arriostramiento – Disipador:

$K_{ae} = 5218.53 \text{ Ton/m}$ Rigidez elástica de sistema Arriostramiento - Disipador

$P_{ya} = 2.15 \text{ Ton}$ Fuerza de deslizamiento de sistema Arriostramiento - Disipador

$\Delta_y = 0.0006 \text{ m}$ Desplazamiento de fluencia de sistema Arriostramiento - Disipador

El ejemplo busca ejecutar un análisis no lineal historia tiempo de los sistemas arriba presentados, sometidos al registro acelerográfico de El centro, California durante el terremoto de Imperial Valley, California del 18 de Mayo de 1940. Los valores numéricos usados fueron tomados del apéndice 6 de Chopra (2012), y que son valores de aceleración normalizadas respecto a g, la aceleración debido a la gravedad; el registro incluye 1559 puntos a intervalos de tiempo iguales de 0.02 seg (ver Figura 4.18).

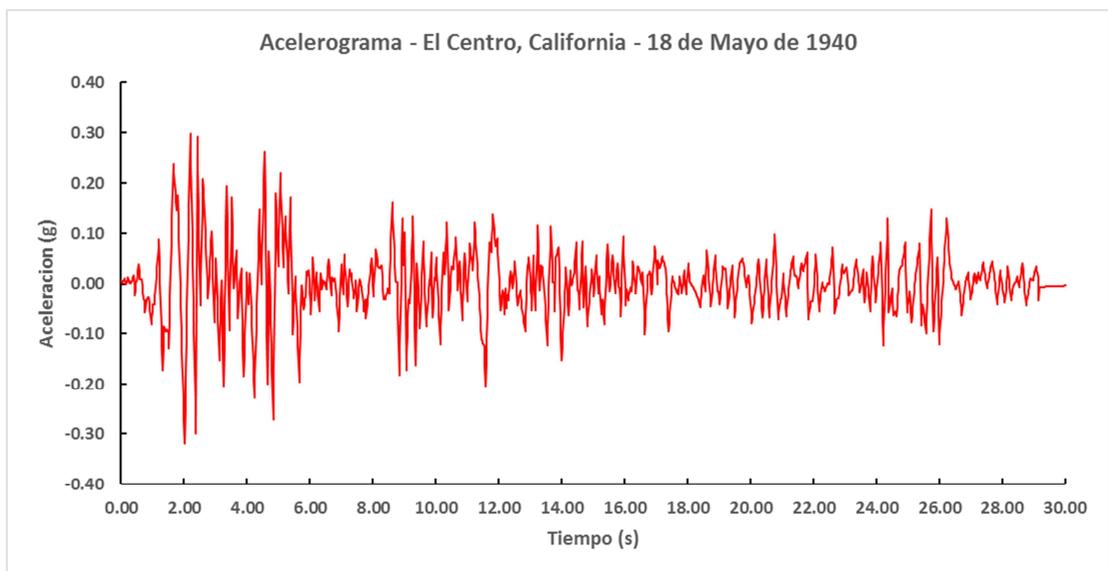


Figura 4.18: Registro acelerográfico del sismo de El Centro, California – 18 de Mayo de 1940 (Chopra, 2012).

Para la ejecución del análisis no lineal historia tiempo se evaluó la respuesta de los sistemas utilizando el método de la diferencia central aplicado a una hoja de cálculo de Excel base proporcionada por el Ingeniero Alfredo Sánchez y modificada por el autor para obtener la respuesta dinámica de los sistemas ante la excitación de El Centro y poder realizar el correspondiente balance energético.

El proceso de ejecución del ejemplo de aplicación consiste en:

1. Analizar el modelo estructural del pórtico sin disipadores

2. Analizar el modelo estructural del pórtico con la incorporación de los disipadores
3. Presentar los resultados de las respuestas para los casos de los numerales 1 y 2.
4. Realizar un análisis comparativo de las respuestas para los casos de los numerales 1 y 2.

4.5.1. Respuesta del sistema sin disipador

En la Tabla 4.1 se presentan los resultados obtenidos en el análisis no lineal historia tiempo del sistema sin disipador.

Parámetro	Sin Disipador
Desplazamiento Máximo	1.58 cm
Velocidad Máxima	17.98 cm/s
Aceleración Máxima	6.23 m/s ²
Deformación Permanente	0.28 cm
$E_{y\max}$	0.2244 Ton-m
E_Y/E_I	31.76%

Tabla 4.1: Respuesta del sistema sin disipadores.

Se puede observar que del total de la energía de ingreso del sistema, el 31.76% se disipó a través del comportamiento inelástico de las columnas, de forma específica formando rotulas plásticas en los extremos de las mismas, causando que al final de la excitación se obtenga una deformación plástica permanente de 0.28 cm.

A continuación se presentan gráficas que describen la respuesta de desplazamiento, velocidad y aceleración en el tiempo así como la relación fuerza desplazamiento de cada componente estructural del sistema, se incluyen también los diagramas que representan la respuesta del sistema desde el punto de vista energético.

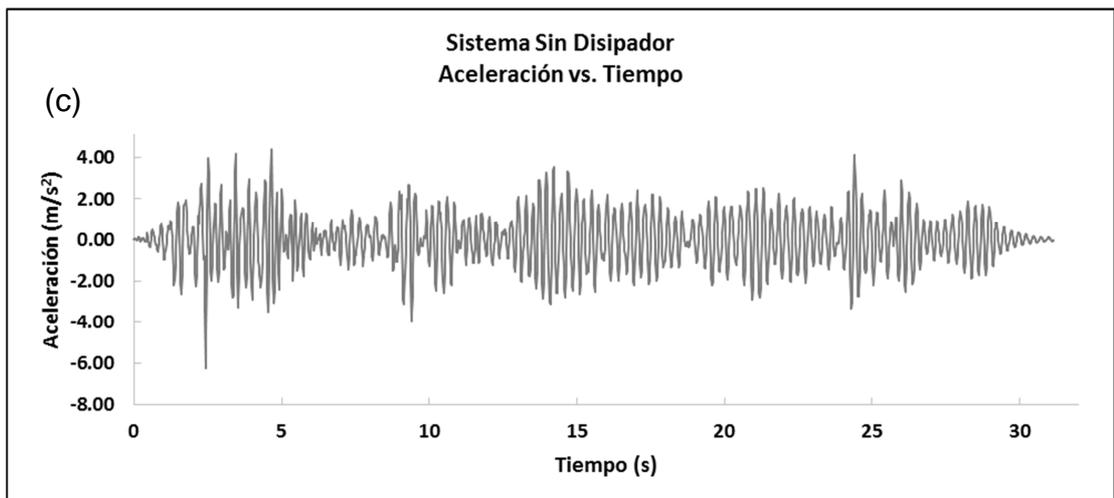
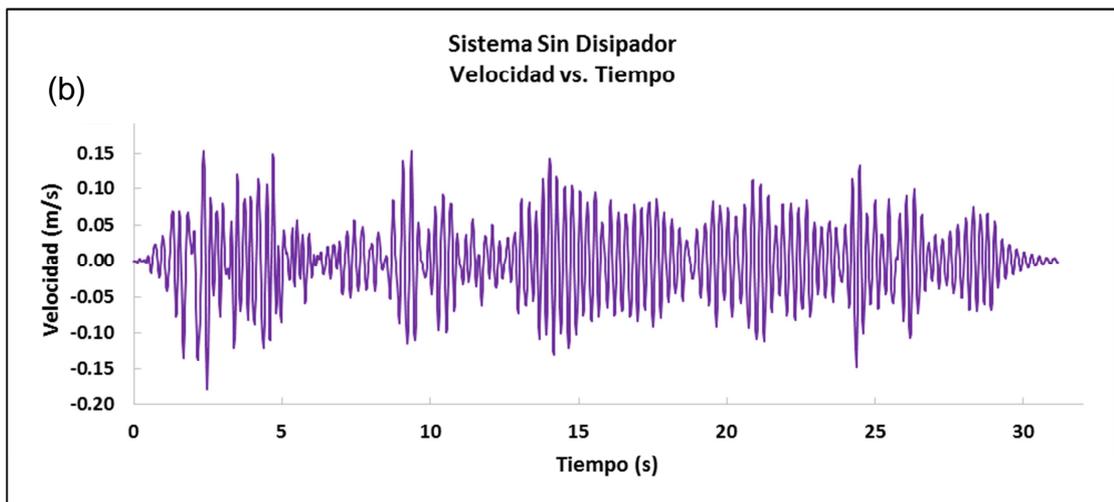
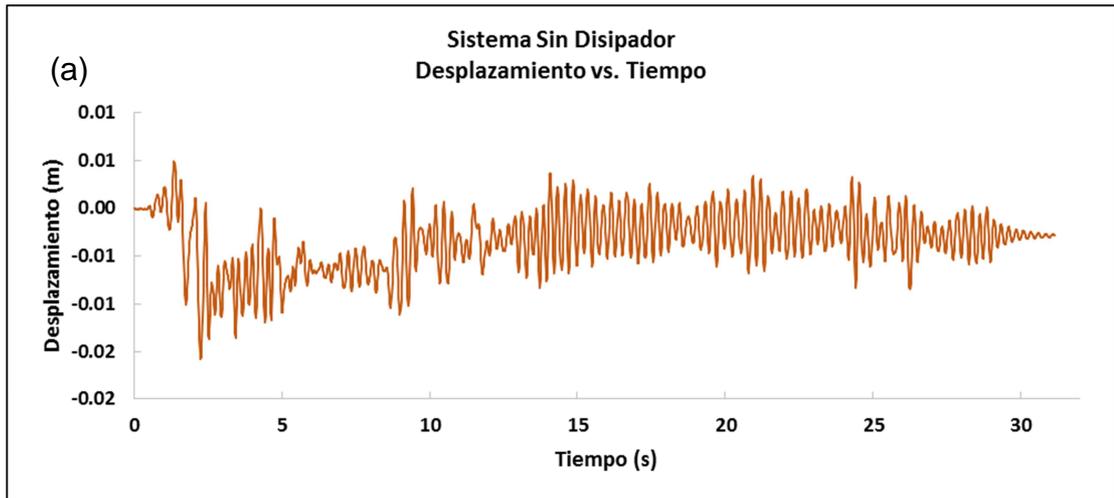


Figura 4.19: Respuesta del sistema sin disipador. (a) Desplazamiento vs. Tiempo, (b) Velocidad vs. Tiempo, (c) Aceleración vs. Tiempo.

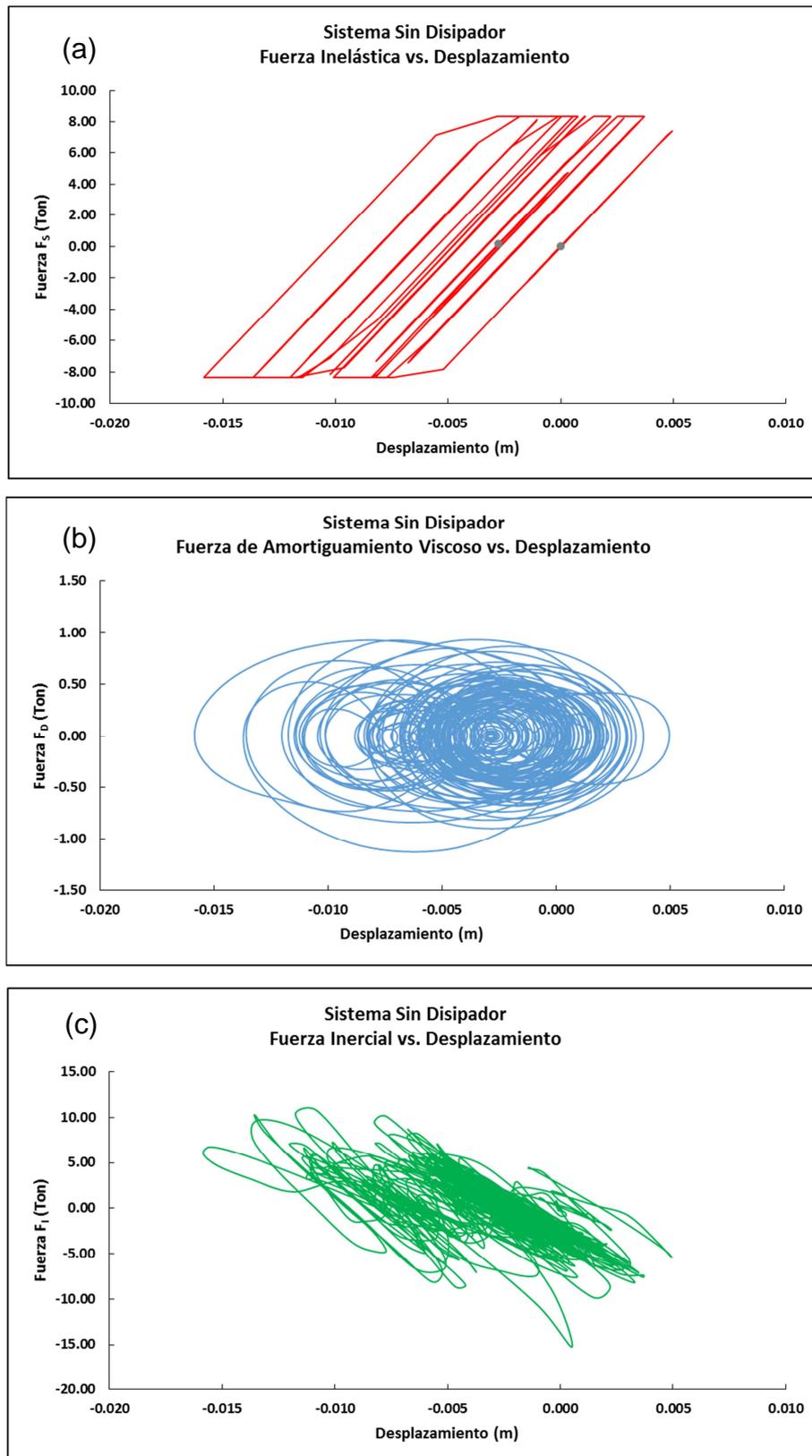


Figura 4.20: Respuesta del sistema sin disipador. Relación fuerza-desplazamiento de los componentes estructurales de (a) Deformación inelástica, (b) Amortiguamiento viscoso, (c) Inercial.

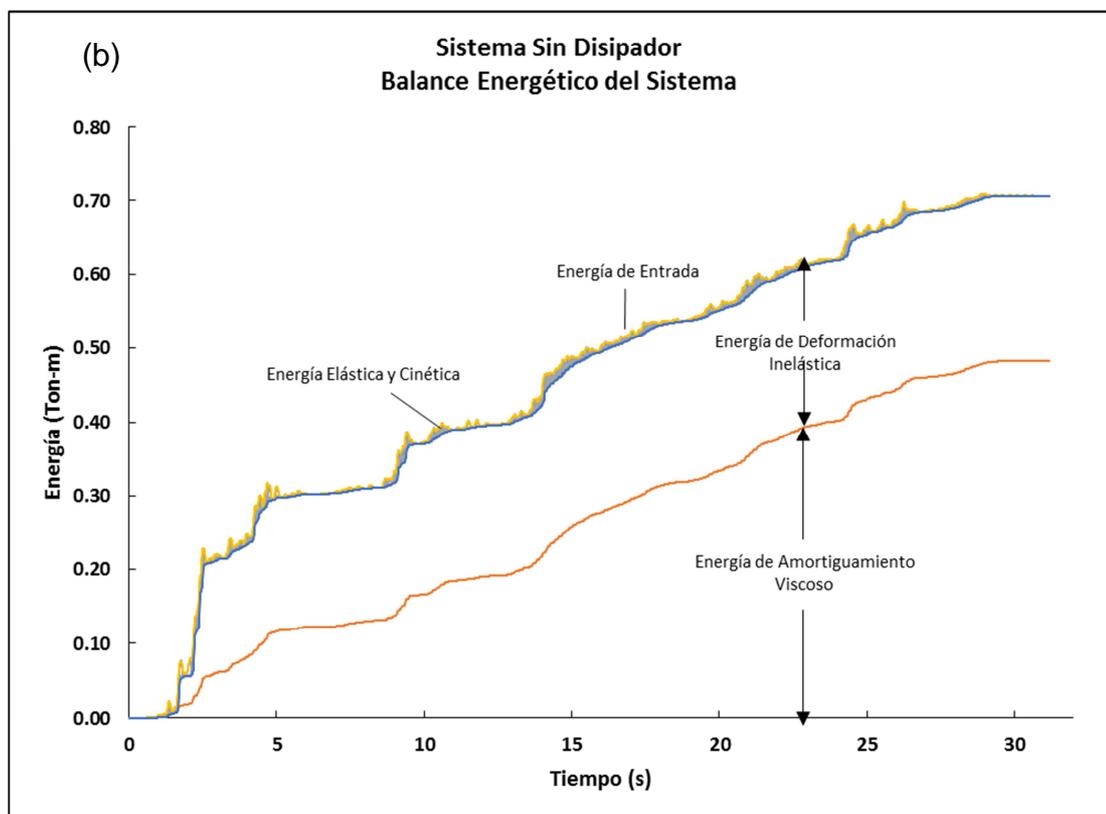
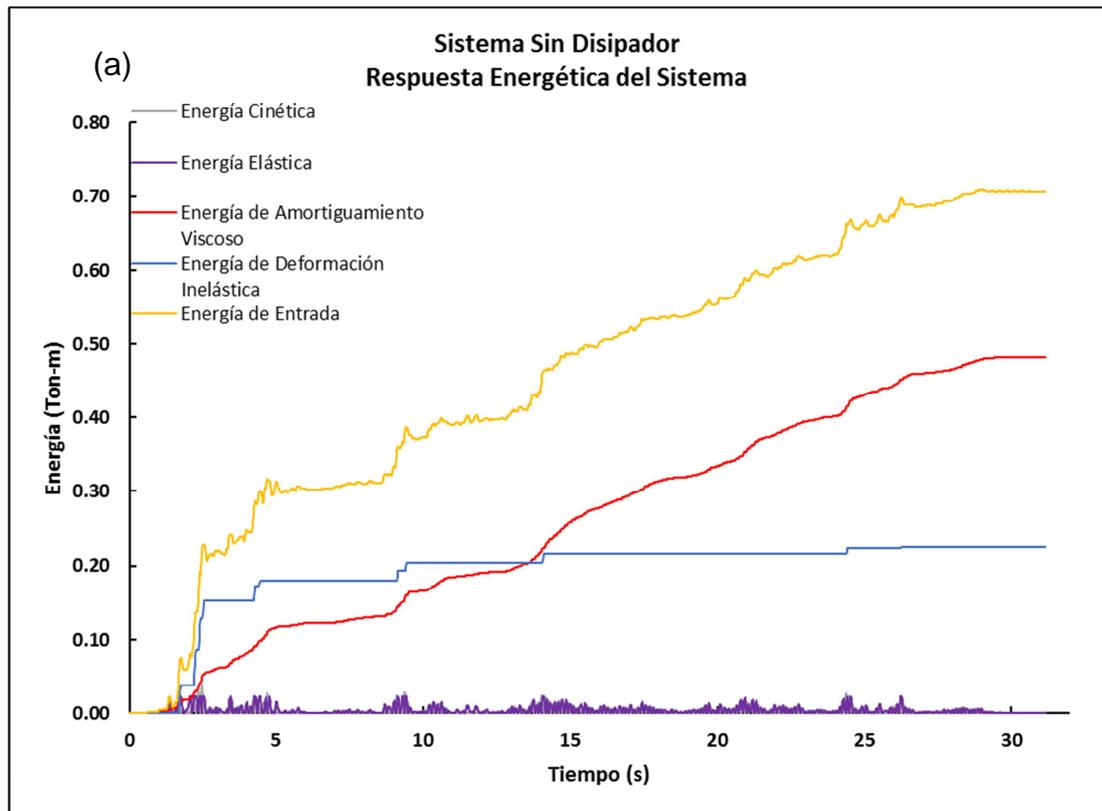


Figura 4.21: Respuesta del sistema sin disipador. (a) Respuesta energética del sistema, (b) Balance energético del sistema.

4.5.2. Respuesta del sistema con disipador

En la Tabla 4.2 se presentan los resultados obtenidos en el análisis no lineal historia tiempo del sistema con disipador.

Parámetro	C/D
Desplazamiento Máximo	0.71 cm
Velocidad Máxima	17.43 cm/s
Aceleración Máxima	5.13 m/s ²
Deformación Permanente	0.19 cm
Eymax	0.0136 Ton-m
EFrmax	0.3342 Ton-m
EY/EI	3.28%
EFr/EI	80.58%

Tabla 4.2: Respuesta del sistema con disipador.

Se puede observar que del total de la energía de ingreso del sistema, apenas el 3.28% se disipó a través del comportamiento inelástico de las columnas siendo la mayor cantidad, 80.58%, disipada por el deslizamiento del disipador de fricción incorporado al sistema, limitando que la deformación plástica permanente al final de la excitación sísmica sea de 0.19 cm.

A continuación se presentan graficas que describen la respuesta de desplazamiento, velocidad y aceleración en el tiempo así como la relación fuerza desplazamiento de cada componente estructural del sistema, se incluyen también los diagramas que representan la respuesta del sistema desde el punto de vista energético.

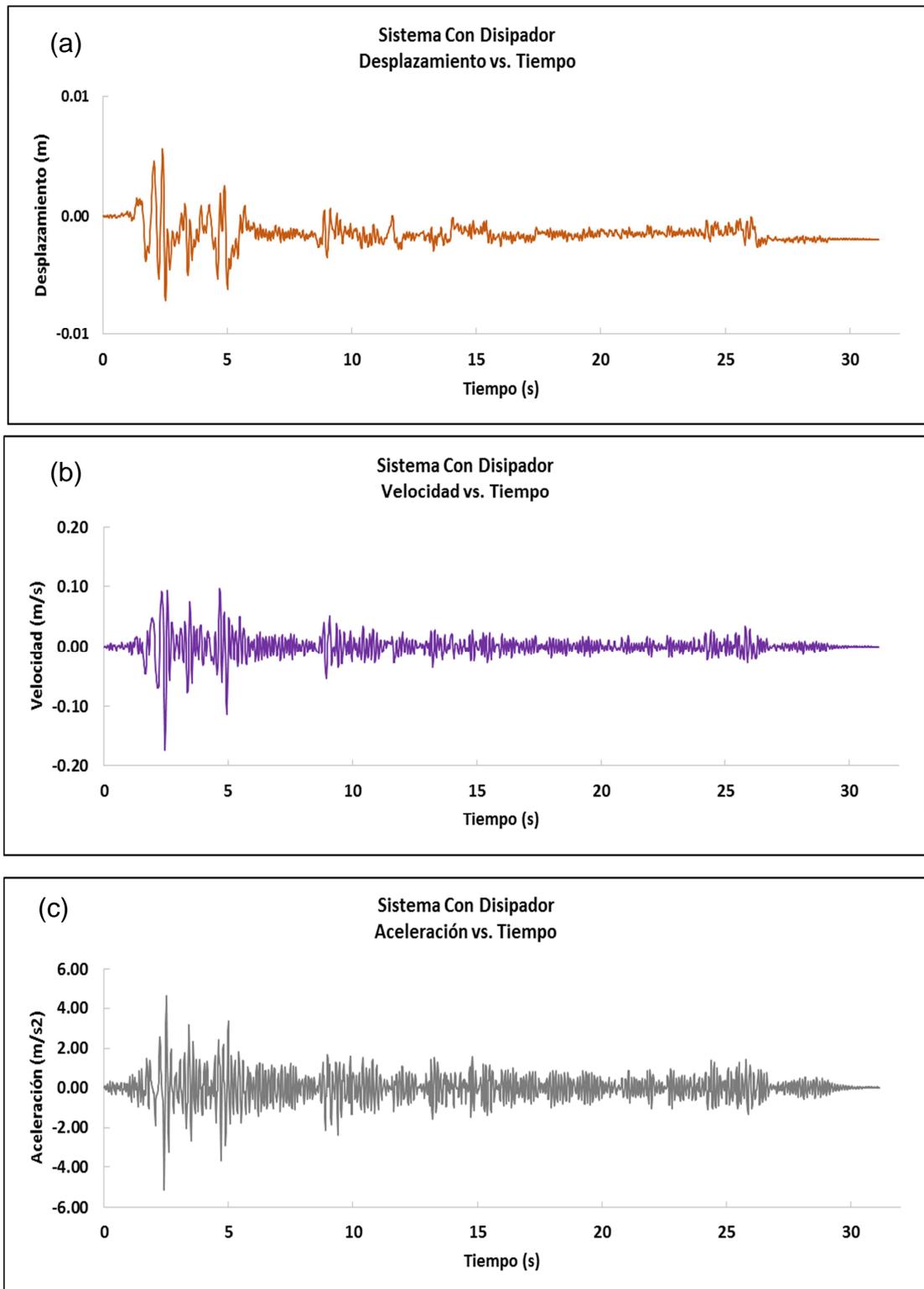


Figura 4.22: Respuesta del sistema con disipador. (a) Desplazamiento vs. Tiempo, (b) Velocidad vs. Tiempo, (c) Aceleración vs. Tiempo.

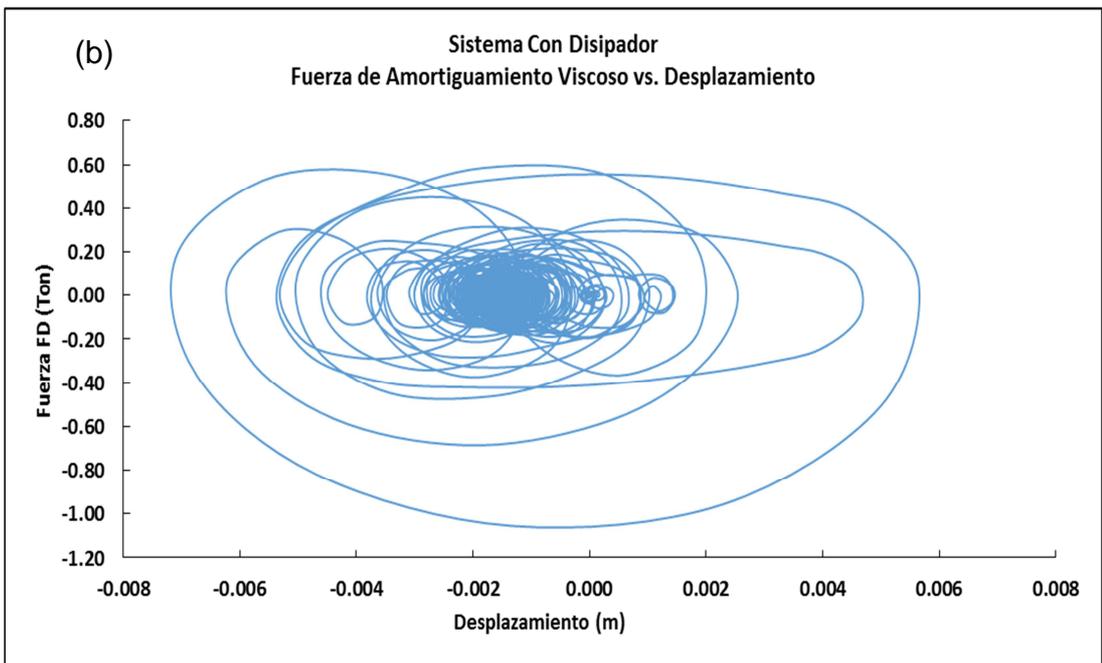
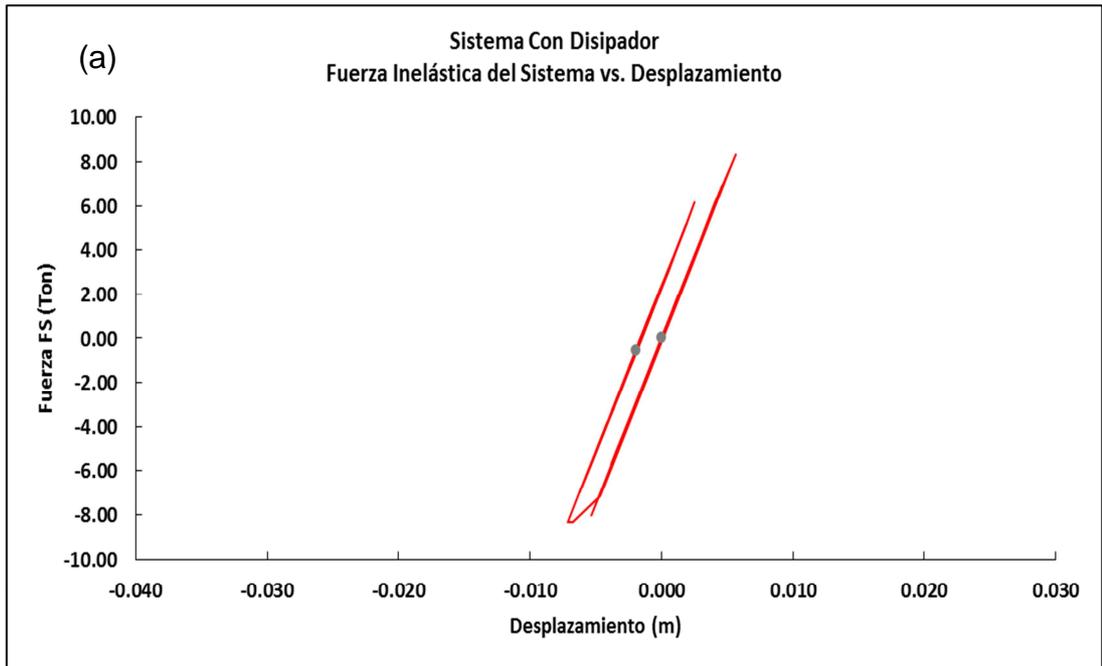


Figura 4.23: Respuesta del sistema con disipador. Relación fuerza-desplazamiento de los componentes estructurales de (a) Deformación inelástica, (b) Amortiguamiento viscoso.

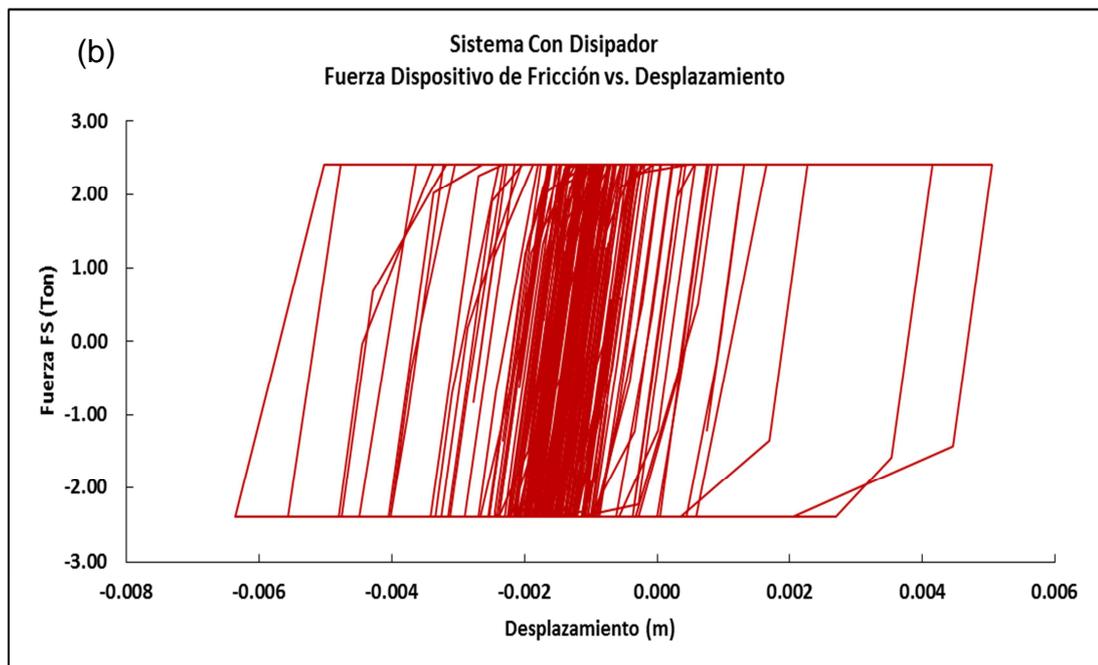
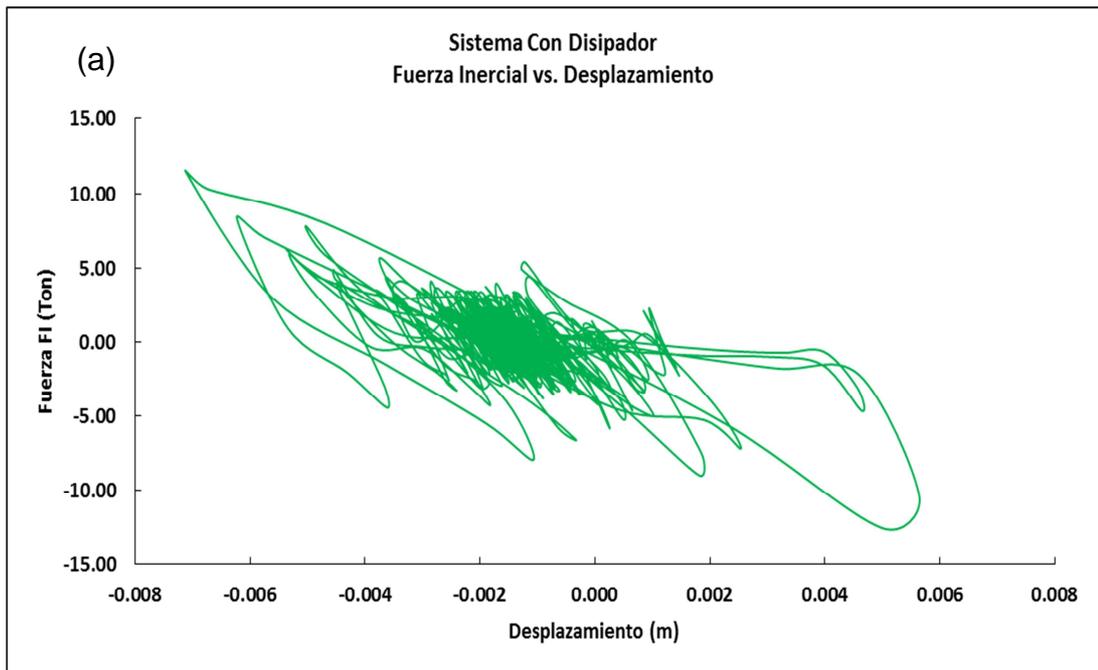


Figura 4.24: Respuesta del sistema con disipador. Relación fuerza-desplazamiento de los componentes estructurales de (a) Fuerza inercial, (b) Fuerza deslizamiento dispositivo de Fricción.

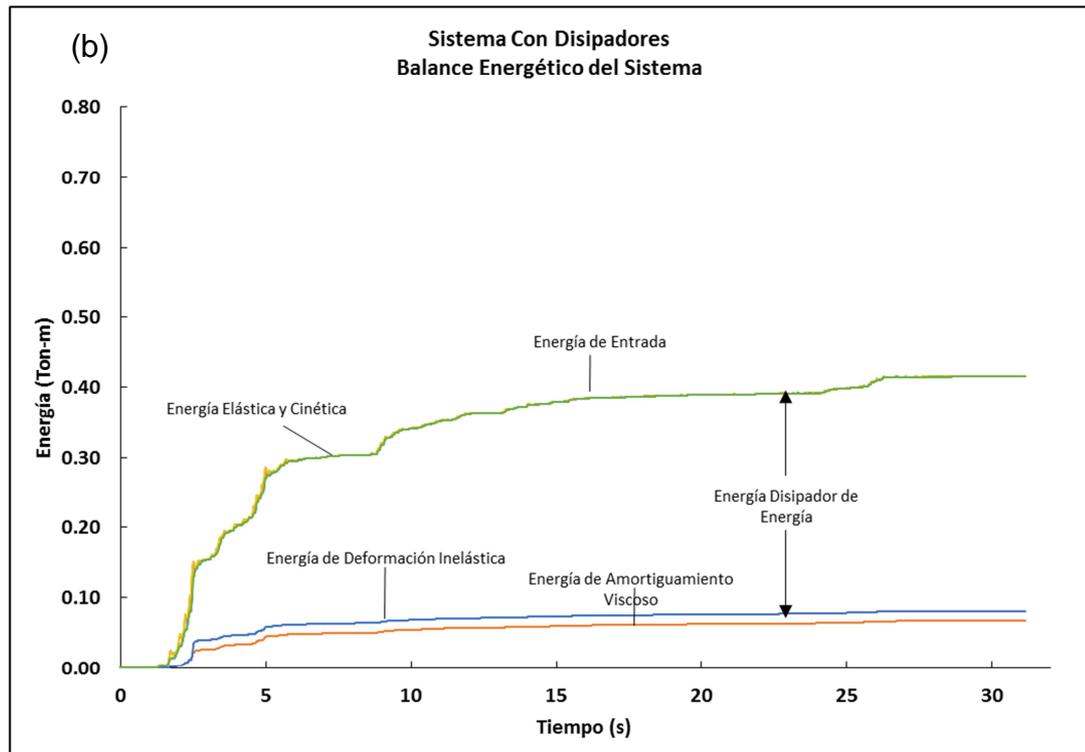
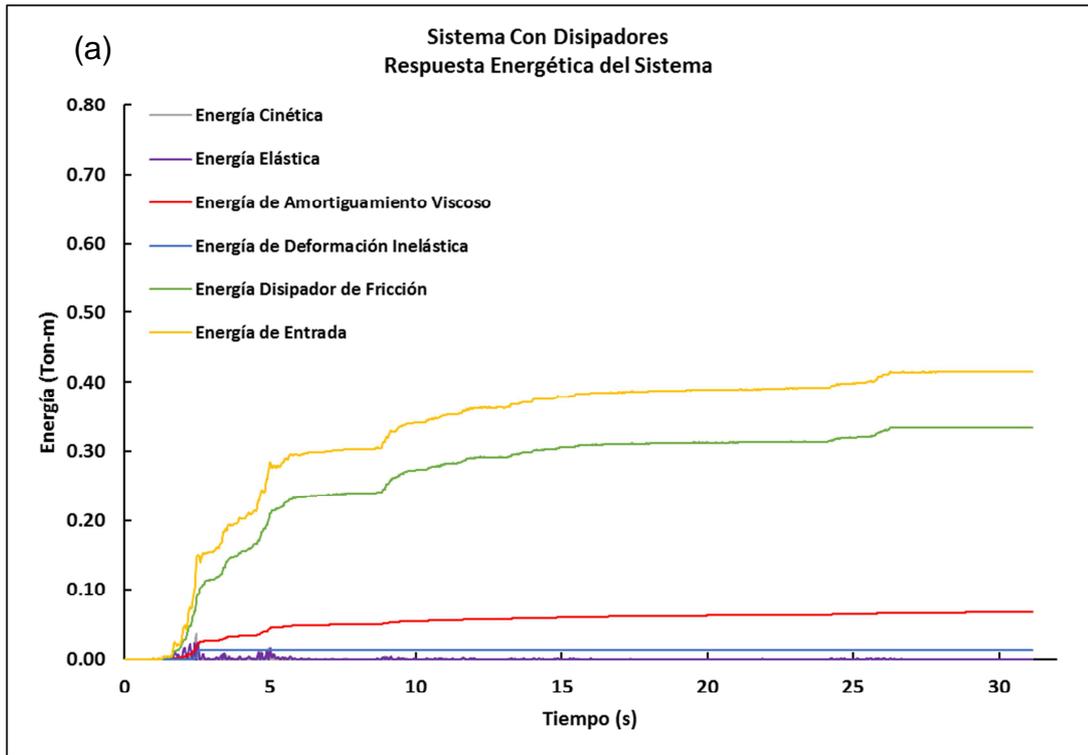


Figura 4.25: Respuesta del sistema con disipador. (a) Respuesta energética del sistema, (b) Balance energético del sistema.

4.5.3. Comparación de la respuesta del sistema sin disipador y con disipador

En la Tabla 4.3 se presenta la comparación de los resultados obtenidos en el análisis no lineal historia tiempo del sistema sin disipador y con disipador, respectivamente.

Parámetro	S/D	C/D	% Reducción
Desplazamiento Máximo	1.58 cm	0.71 cm	55.15%
Velocidad Máxima	17.98 cm/s	17.43 cm/s	3.08%
Aceleración Máxima	6.23 m/s ²	5.13 m/s ²	17.67%
Deformación Permanente	0.28 cm	0.19 cm	31.59%
E_ymax	0.2244 Ton-m	0.0136 Ton-m	93.93%
E_{Fr}max	-	0.3342 Ton-m	-
E_γ/E_l	31.76%	3.28%	89.66%
E_{Fr}/E_l	-	80.58%	-

Tabla 4.3: Comparación de resultados de respuesta del sistema sin disipador y con disipador.

Se puede observar que debido a la incorporación del disipador de fricción se presenta una notable reducción del desplazamiento máximo y deformación final permanente, del orden del 50 y 30%, respectivamente sin alterar significativamente las respuestas de velocidad y aceleración, que en todo caso igualmente disminuyen.

Adicionalmente, se produce una alta reducción en la cantidad de energía que el sistema disipa mediante deformación inelástica ($E_{y\max}$), limitando de esta forma la incursión de las columnas dentro del rango plástico y la formación de rotulas plásticas que pudiesen causar el colapso del sistema, transmitiendo esta diferencia de energía hacia el dispositivo de fricción que la disipa mediante la fuerza de fricción generada durante su deslizamiento, no comprometiendo la integridad del sistema resistente principal.

A continuación se presentan graficas de comparación de la respuesta de desplazamiento, velocidad y aceleración en el tiempo del sistema sin disipador y con disipador.

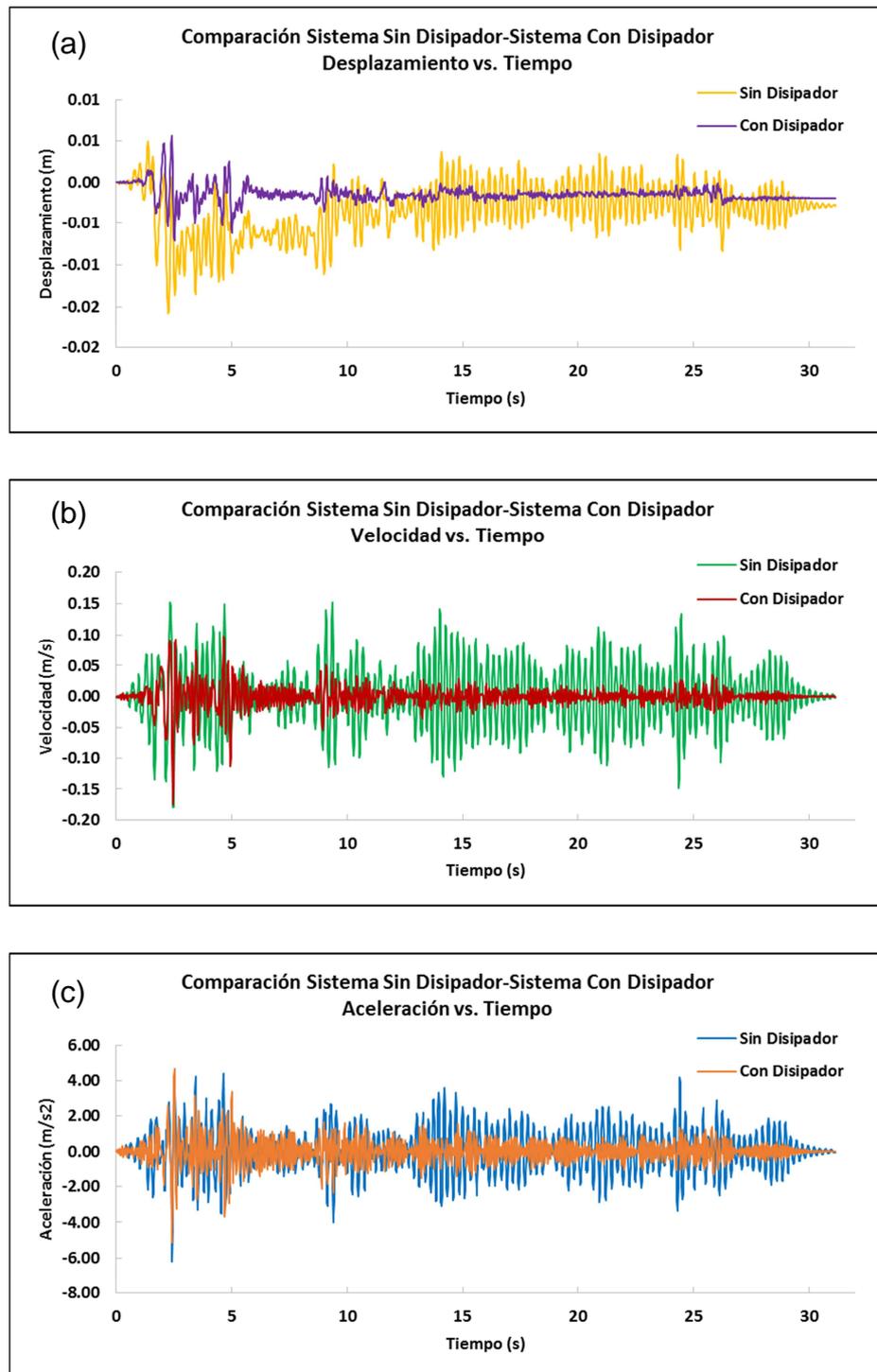


Figura 4.26: Comparación de respuestas del sistema sin disipador y con disipador. (a) Desplazamiento vs. Tiempo, (b) Velocidad vs. Tiempo, (c) Aceleración vs. Tiempo.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS NO LINEAL HISTORIA TIEMPO DE LOS PÓRTICOS SIN DISIPADORES Y CON DISIPADORES

5.1. Introducción

Con la finalidad de poder evaluar los beneficios de la incorporación de los disipadores de fricción en estructuras de hormigón armado para la ciudad de Guayaquil y cuantificar las variaciones que generan en su respuesta de desplazamiento, velocidad y aceleraciones, se ejecutaron análisis no lineales historia tiempo para registro sísmicos escalados que representen de alguna forma la amenaza sísmica característica para la ciudad de Guayaquil.

Para tal efecto, se analizarán tres pórticos de hormigón armado tipo, cuyas propiedades de materiales y secciones transversales de los elementos serán aquellas determinadas partir de un análisis lineal dinámico de espectro de respuesta, tomando en consideración las recomendaciones y requerimientos mínimos señalados por la normativa ecuatoriana vigente y el estado de arte actual, cumpliendo con los requisitos de detallamiento sísmico recomendados por el ACI 318-11 capítulo 21 para pórticos resistentes a momento intermedios; y que serán tomados del capítulo 6 del trabajo de graduación del ingeniero Alfredo Sánchez.

Posteriormente, se analizarán los mismos pórticos con la incorporación de disipadores de fricción diseñados específicamente para cada caso, con la finalidad de minimizar la respuesta energética del pórtico, y luego comparar y evaluar los beneficios que brindan la incorporación de estos disipadores.

5.2. Pórticos de hormigón armado

Según lo detallado por Sánchez (2014), los pórticos seleccionados para el análisis corresponden a estructuras planas de hormigón armado de 4, 8 y 12 pisos, con 5 vanos de luz de 6.00 m y alturas constantes de 3.60 m excepto en el primer nivel donde la altura de entrepiso es 4.50 m, asemejando arquitecturas típicas de edificios para la ciudad de Guayaquil.

Los materiales seleccionados corresponden a los típicamente utilizados en el medio como son hormigón de $f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$, para vigas y columnas; y acero de refuerzo en barras corrugadas de especificaciones ASTM A707 Gr. 60 con un límite de fluencia mínimo $f_y = 4200 \text{ Kg/cm}^2$, para las varillas longitudinales y transversales.

Para el análisis se consideró una carga muerta de 562 Kg/m^2 aplicada para un ancho de influencia de 6.00 m, dando como resultado la aplicación de una carga linealmente distribuida en las vigas de 3.37 Ton/m. Para el caso de carga viva se consideró la sobrecarga mínima según lo recomendado por el código NEC-2014 en su tabla 4, que para el uso de oficinas corresponde a 240 Kg/m^2 , que resulta en la aplicación de una carga linealmente distribuida de 1.44 Ton/m. Para la carga sísmica se definió un espectro de respuesta de aceleraciones, construido según lo recomendado por el código NEC-14 (ver Figura 5.1), usando como parámetros de diseño una zona sísmica V y suelo tipo E, característicos de Guayaquil.

Como resultado de dicho análisis, a continuación se mostrarán las dimensiones de las secciones de viga y columnas con sus armados respectivos, que satisfacen los requerimientos del código NEC-14, determinados a partir del análisis de espectro de respuesta recomendado (ver Tabla 5.1, Tabla 5.2, Tabla 5.3, Tabla 5.4, Tabla 5.5 y Tabla 5.6).

Espectro de Aceleraciones - NEC11

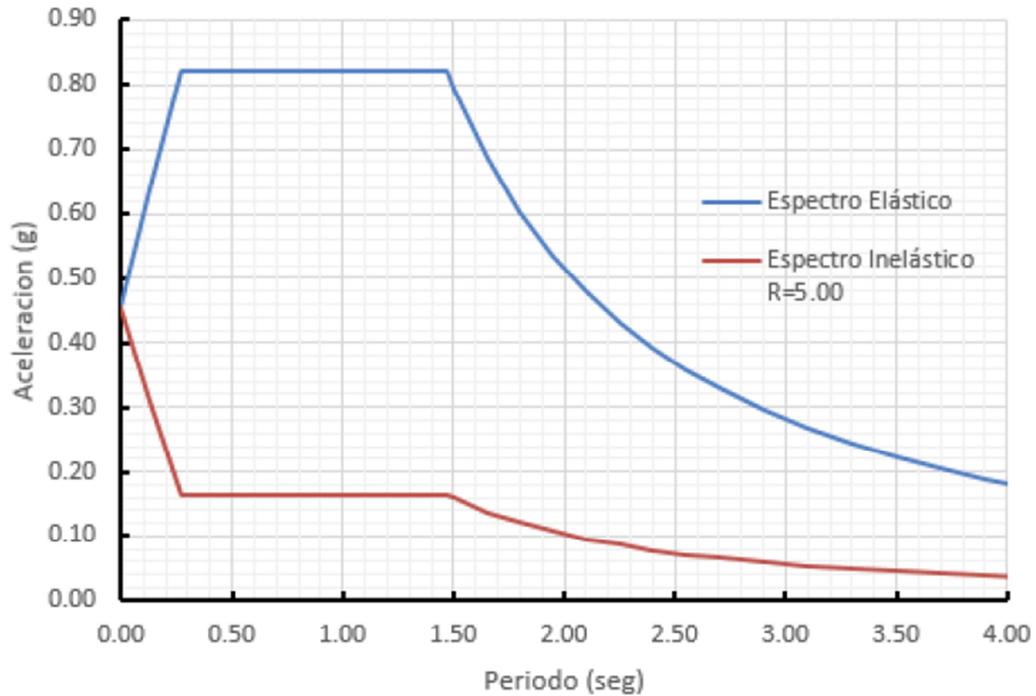


Figura 5.1: Espectro Elástico e inelástico de respuesta según el NEC-14 para zona V, tipo de suelo E y coeficiente de reducción inelástica 5 (Sánchez, 2014).

Pisos	Exteriores		Interiores	
	Dimensiones	Armado	Dimensiones	Armado
1-2	40x40	8φ18mm (ρ=1.27%)	50x50	16φ16mm (ρ=1.29%)
		2 Est. φ10mm c./100-150-100mm		3 Est. φ10mm c./100-150-100mm
3-4	35x35	8φ16mm (ρ=1.31%)	45x45	12φ16mm (ρ=1.19%)
		2 Est. φ10mm c./100-150-100mm		3 Est. φ10mm c./100-150-100mm

Tabla 5.1: Dimensiones y armado de columnas de pórtico de 4 pisos (Sánchez, 2014).

Pisos	Dimensiones	Armado
1-2	35x60	Sup. 3φ22mm (Ref.2φ25mm)
		Inf. 3φ22mm
		1 Est. φ10mm c./100-150-100mm
3-4	25x60	Sup. 3φ18mm (Ref.2φ22mm)
		Inf. 3φ18mm
		1 Est. φ10mm c./100-150-100mm

Tabla 5.2: Dimensiones y armado de vigas de pórtico de 4 pisos (Sánchez, 2014).

Pisos	Exteriores		Interiores	
	Dimensiones	Armado	Dimensiones	Armado
1-2-3	55x55	16 ϕ 18mm ($\rho=1.35\%$)	65x65	20 ϕ 18mm ($\rho=1.20\%$)
		3 Est. ϕ 10mm c./100-150-100mm		5 Est. ϕ 10mm c./100-150-100mm
4-5-6	50x50	12 ϕ 18mm ($\rho=1.22\%$)	60x60	16 ϕ 18mm ($\rho=1.13\%$)
		3 Est. ϕ 10mm c./100-150-100mm		3 Est. ϕ 10mm c./100-150-100mm
7-8	45x45	12 ϕ 16mm ($\rho=1.19\%$)	55x55	16 ϕ 16mm ($\rho=1.06\%$)
		3 Est. ϕ 10mm c./100-150-100mm		3 Est. ϕ 10mm c./100-150-100mm

Tabla 5.3: Dimensiones y armado de columnas de pórtico de 8 pisos (Sánchez, 2014).

Pisos	Dimensiones	Armado
1-2-3	35x70	Sup. 4 ϕ 25mm (Ref.2 ϕ 25)
		Inf. 4 ϕ 25mm
		2 Est. ϕ 10mm c./100-150-100mm
4-5-6	35x65	Sup. 3 ϕ 22mm (Ref.3 ϕ 25mm)
		Inf. 2 ϕ 22mm+1 ϕ 18mm (Ref.2 ϕ 18mm)
		1 Est. ϕ 10mm c./100-150-100mm
7-8	25x60	Sup. 3 ϕ 18mm (Ref.2 ϕ 22mm)
		Inf. 3 ϕ 18mm
		1 Est. ϕ 10mm c./100-150-100mm

Tabla 5.4: Dimensiones y armado de vigas de pórtico de 8 pisos (Sánchez, 2014).

Pisos	Exteriores		Interiores	
	Dimensiones	Armado	Dimensiones	Armado
1-2-3-4	65x65	20 ϕ 20mm ($\rho=1.49\%$)	80x80	24 ϕ 20mm ($\rho=1.18\%$)
		5 Est. ϕ 10mm c./100-150-100mm		6 Est. ϕ 10mm c./100-150-100mm
5-6-7	55x55	16 ϕ 18mm ($\rho=1.35\%$)	70x70	20 ϕ 20mm ($\rho=1.28\%$)
		3 Est. ϕ 10mm c./100-150-100mm		5 Est. ϕ 10mm c./100-150-100mm
8-9-10	50x50	12 ϕ 18mm ($\rho=1.22\%$)	60x60	16 ϕ 18mm ($\rho=1.13\%$)
		3 Est. ϕ 10mm c./100-150-100mm		3 Est. ϕ 10mm c./100-150-100mm
11-12	45x45	12 ϕ 16mm ($\rho=1.19\%$)	55x55	16 ϕ 16mm ($\rho=1.06\%$)
		3 Est. ϕ 10mm c./100-150-100mm		3 Est. ϕ 10mm c./100-150-100mm

Tabla 5.5: Dimensiones y armado de columnas de pórtico de 12 pisos (Sánchez, 2014).

Pisos	Dimensiones	Armado
1-2-3-4	50x70	Sup. 2 ϕ 28+2 ϕ 25mm (Ref.2 ϕ 28mm+1 ϕ 25mm)
		Inf. 2 ϕ 25+2 ϕ 22mm (Ref.3 ϕ 25mm)
		2 Est. ϕ 10mm c./100-150-100mm
5-6-7	45x70	Sup. 2 ϕ 28+2 ϕ 25mm (Ref.3 ϕ 25mm)
		Inf. 4 ϕ 22mm (Ref.2 ϕ 25mm)
		2 Est. ϕ 10mm c./100-150-100mm
8-9-10	35x65	Sup. 3 ϕ 25mm (Ref.2 ϕ 28mm)
		Inf. 3 ϕ 22mm (Ref.2 ϕ 20mm)
		1 Est. ϕ 10mm c./100-150-100mm
11-12	25x60	Sup. 2 ϕ 20+1 ϕ 18mm (Ref.2 ϕ 22mm)
		Inf. 2 ϕ 20+1 ϕ 18mm
		1 Est. ϕ 10mm c./100-150-100mm

Tabla 5.6: Dimensiones y armado de vigas de pórtico de 12 pisos (Sánchez, 2014).

5.3. Registros sísmicos aplicados

Para llevar a cabo el análisis no lineal historia tiempo se utilizaron tres registros sísmicos escalados, que buscan asemejar la amenaza sísmica características de Guayaquil y que fueron facilitados por el ingeniero Alfredo Sánchez.

El primer registro, Centenario (ver Figura 5.2), corresponde a un acelerograma grabado en la Estación Centenario el 26 de abril de 1993 (Sánchez, 2014), posee 3024 lecturas espaciados a intervalos de 0.01 segundos, siendo considerada una duración total de 34.25 segundos para llevar a cabo el análisis. Dicho registro sísmico se escalos de 0.1099 g a un PGA de 0.456 g para caracterizar la amenaza sísmica del 10% de excedencia en 50 años (Sánchez, 2014).

El segundo acelerograma (ver Figura 5.3) corresponde a un sismo sintético con un PGA de 0.456 g y una duración de 30.00 segundos con intervalos de tempo de 0.01 segundos.

El tercer registro sísmico (ver Figura 5.4) corresponde al sismo de México del 19 de septiembre de 1985 de la estación SCT, escalándolo a una PGA de 0.20 g y una duración de 50.00 segundos a intervalos de 0.02 segundos.

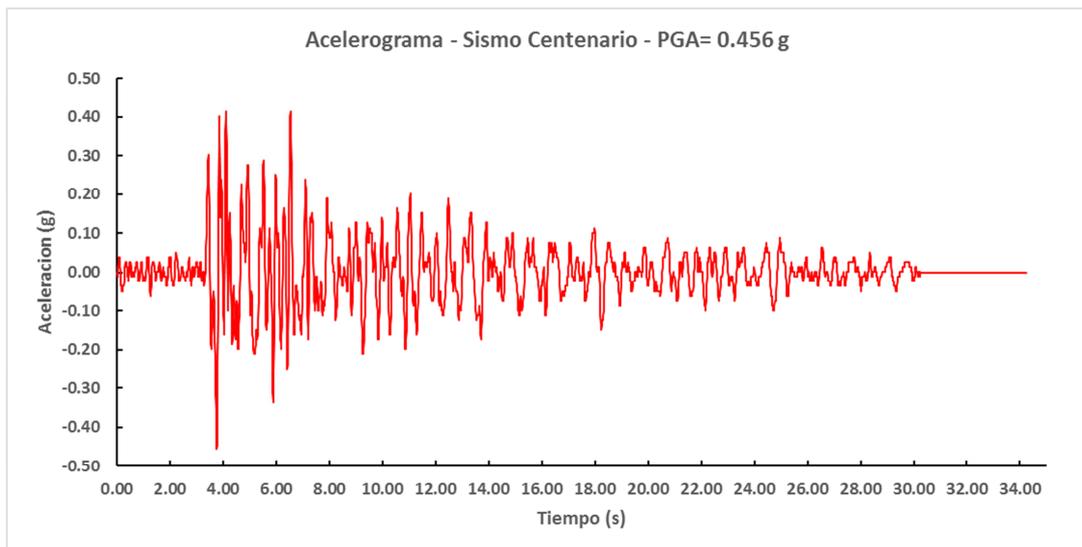


Figura 5.2: Registro sísmico del Centenario Guayaquil 26 de abril de 1993 (Sánchez, 2014).

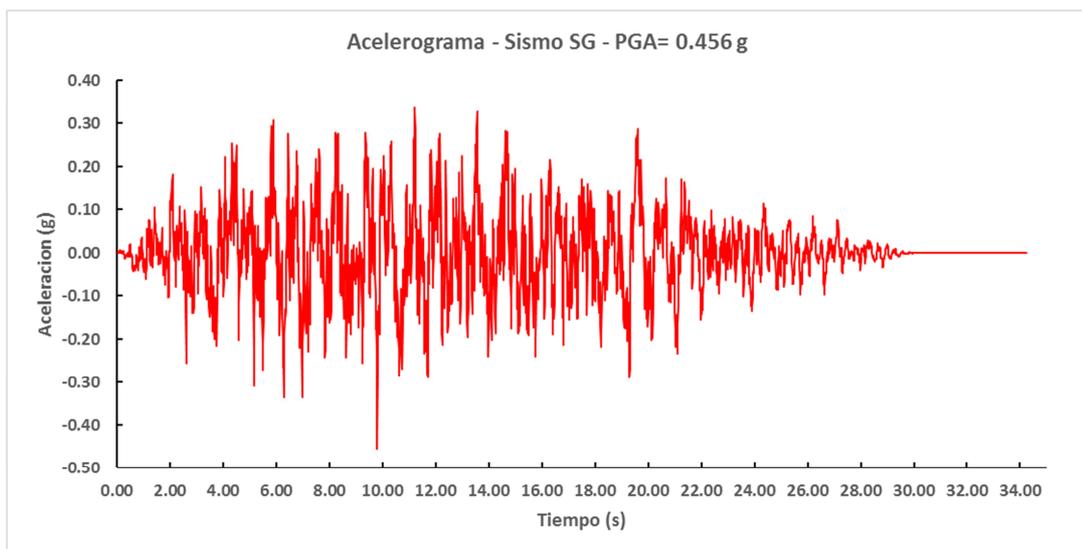


Figura 5.3: Registro sísmico Sintético SG (Sánchez, 2014).

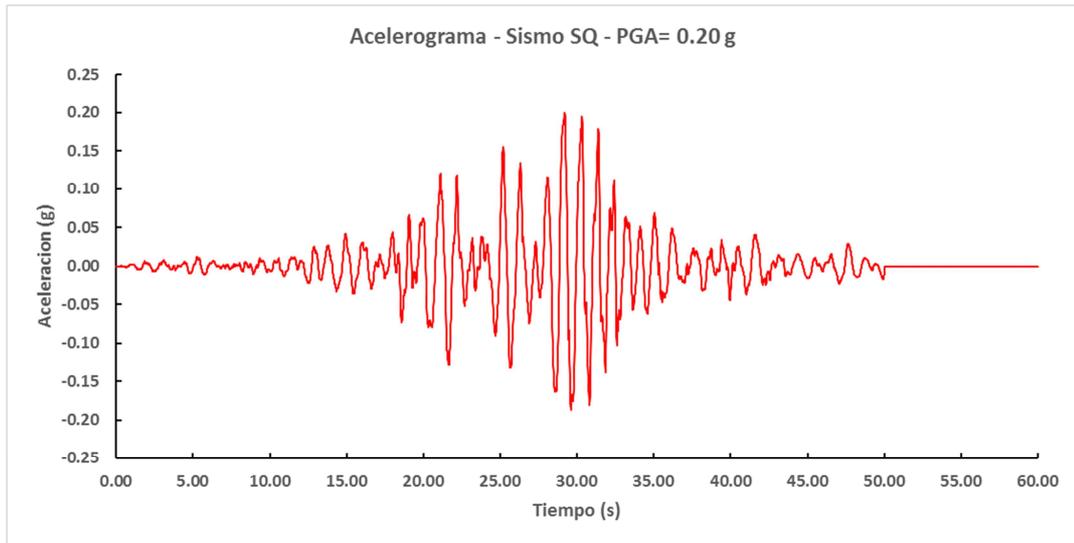


Figura 5.4: Registro sísmico Sintético SQ (Sánchez, 2014).

Para poder visualizar y estimar el tipo de respuesta que se obtendrá del análisis de los pórticos ante los registros sísmicos arriba presentados, en la Figura 5.5 se puede observar los espectros de respuesta de aceleración para dichos registros, utilizando un amortiguamiento del 5% (valor usual para estructuras de este tipo).

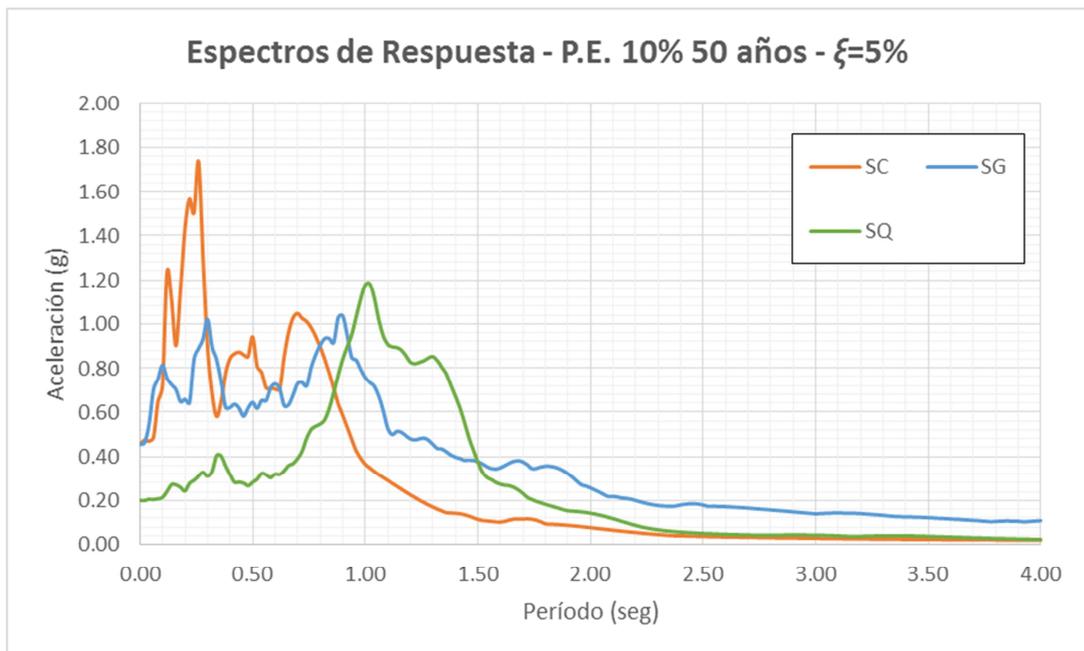


Figura 5.5: Espectro de Respuesta para 5% amortiguamiento.

5.4. Análisis Historia Tiempo de Pórticos

5.4.1. Hipótesis de modelos sin disipadores

Para llevar a cabo la ejecución de los análisis no lineales historia tiempo, se modelaron los diversos pórticos en estudio en el software de elementos finitos SAP 2000 V17.1.0 en su versión de prueba, facilitado por el Ingeniero Xavier Casal a través de Computers and Structures Inc. (ver Figura 5.6, Figura 5.7 y Figura 5.8).

Las columnas y vigas se modelaron según las dimensiones y alturas definidas en la sección 5.2 con elementos del tipo “Frame”, ya que su longitud es mucho mayor respecto a su sección transversal. A estos elementos “Frame” se le asignaron nudos rígidos determinados por el programa a partir de la conectividad y secciones transversales de los elementos que lleguen al nudo.

Para modelar el comportamiento que se generaría dentro de las regiones inelásticas de los elementos se asignaron rotulas plásticas en los extremos de los mismos, siendo estas últimas definidas a partir del diagrama de momento curvatura de cada sección transversal utilizando las propiedades de los materiales y características de armado de cada elemento. Para el cómputo del diagrama momento curvatura se utilizó el módulo del programa SAP 2000 llamado “Section Designer”, donde se modelaron las secciones transversales en estudio a través de la definición de concreto confinado y no confinado de acuerdo al modelo de Mander y el acero de refuerzo, de acuerdo a la curva esfuerzo deformación del material (ver Figura 5.9 y Figura 5.10).

Sobre los elementos vigas se aplicaron las cargas definidas anteriormente como linealmente distribuidas en dos casos de análisis no lineal estático “DEAD” y “LIVE”.

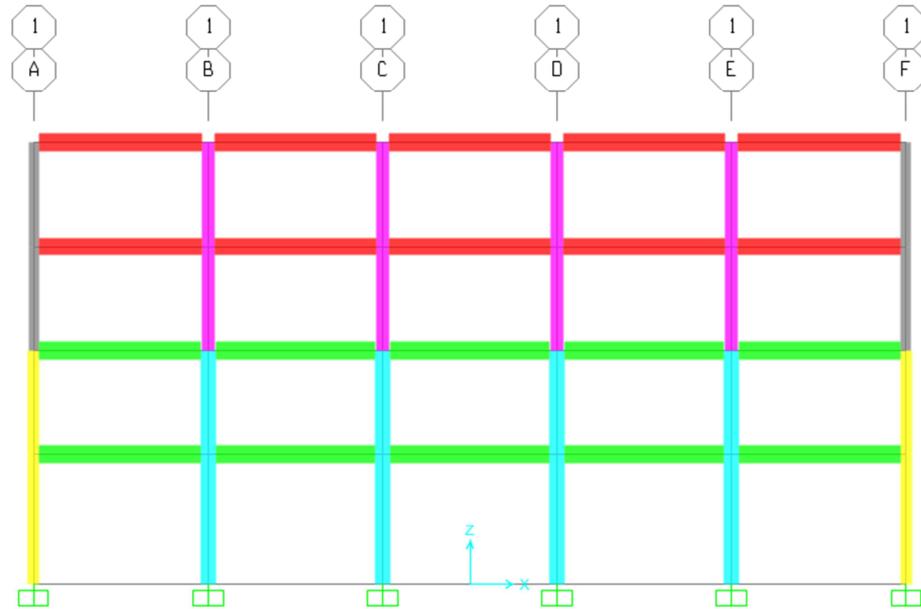


Figura 5.6: Pórtico de 4 pisos sin disipadores modelado en SAP 2000 V17.1.0

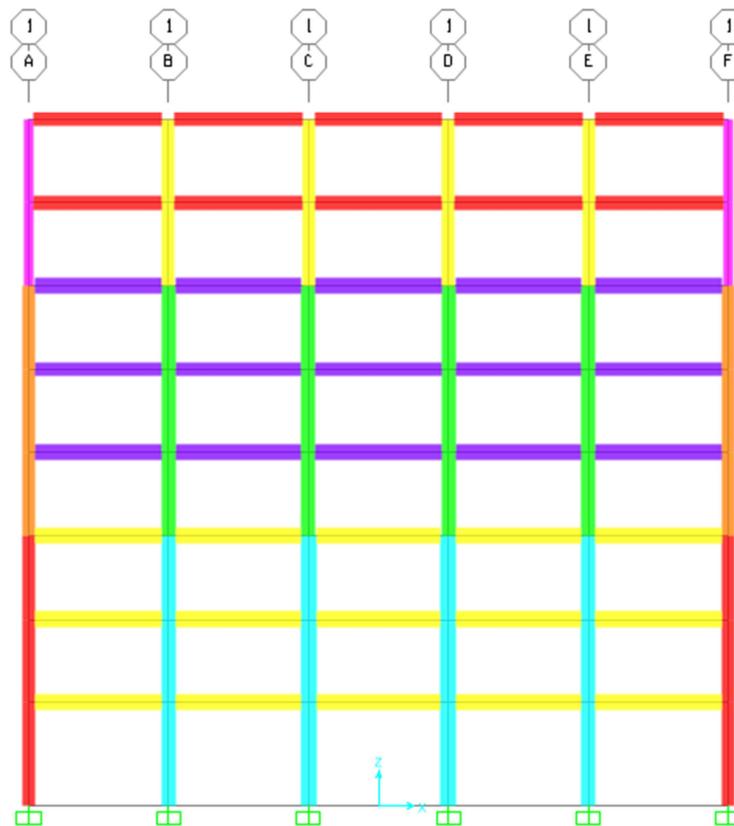


Figura 5.7: Pórtico de 8 pisos sin disipadores modelado en SAP 2000 V17.1.0

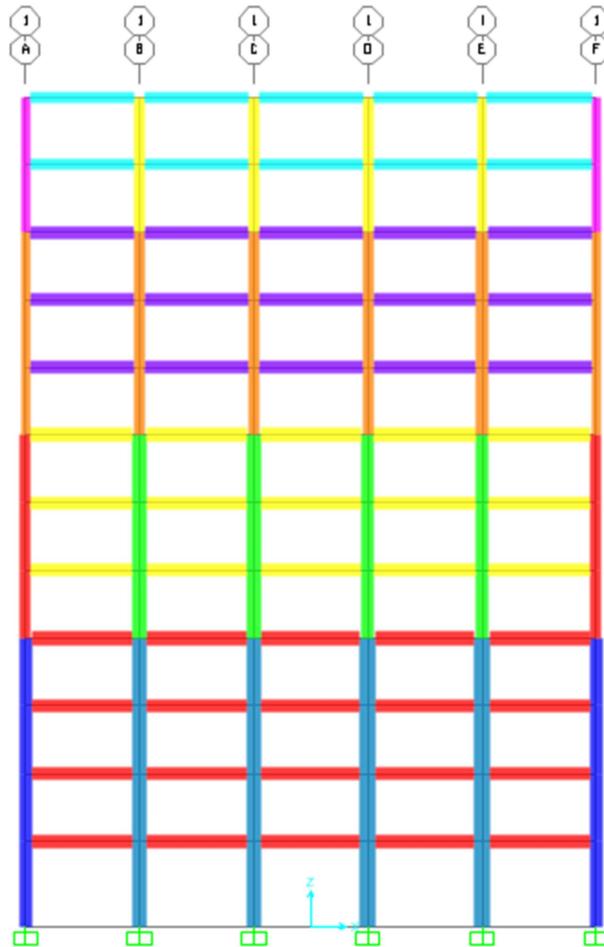


Figura 5.8: Pórtico de 12 pisos sin disipadores modelado en SAP 2000 V17.1.0

Se colocaron apoyos empotrados en los extremos inferiores de las columnas de los primeros pisos y se asignaron masas nodales en la dirección horizontal en los puntos de unión de vigas y columnas, en función del área de influencia de carga sobre el nodo.

Para el análisis no lineal historia tiempo se definió como masa participativa el peso propio de los elementos más la masa generada por el peso muerto y el 25% de la carga viva.

Se definieron también “constraints” horizontales en cada piso de los pórticos para simular el comportamiento de diafragma rígido que ocurre por la presencia de la losa de piso.



Figura 5.9: Modelo de Concreto según Mander. Izq. Curva esfuerzo deformación Concreto no Confinado (recubrimiento); Der. Curva esfuerzo deformación Concreto Confinado (núcleo).

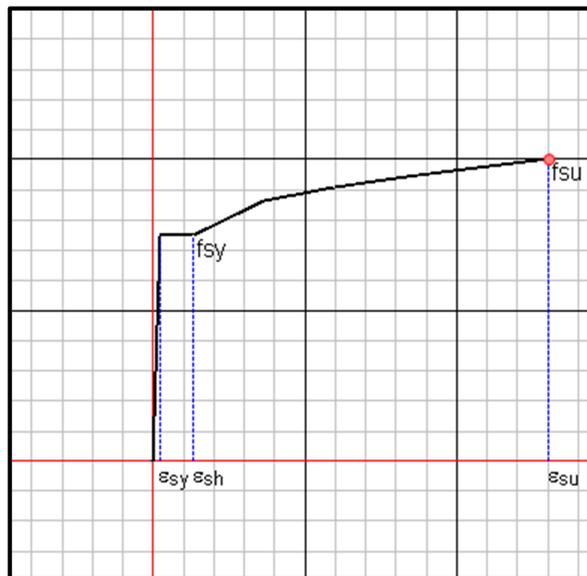


Figura 5.10: Curva esfuerzo deformación acero ASTM A706 Grado 60.

5.4.2. Hipótesis de modelos con disipadores

Para la construcción de los modelos de los pórticos en estudio con disipadores, se aplicaron inicialmente los mismos principios y criterios definidos en la sección anterior, con lo cual se obtuvo el modelo de análisis base.

Posteriormente, se adicionaron elementos no lineales del tipo “LINK” en forma de “X” ubicados en el segundo y cuarto vano de los pórticos (ver Figura 5.11, Figura 5.12 y Figura 5.13). Estos elementos modelan el comportamiento de arriostramientos elásticos restringidos a pandeo con disipadores de fricción incorporados.

Para el cálculo de las fuerzas en los disipadores y las rigideces de los arriostramientos se utilizó el método propuesto por Filiatrault y Cherry que fue presentado en la sección 4.4, en donde se utilizan las derivas de entrepiso debido a la vibración de la estructura en su primer modo para la determinación de las cargas de deslizamiento necesarias para activar todos los disipadores de fricción.

Adicionalmente, se consideró la recomendación de los autores para la selección de la rigidez de las diagonales, donde se indica que deberán ser tales que permitan cumplir con la relación $\frac{T_b}{T_u} < 0.40$, asegurando que sean lo más rígido posible pero dentro de los límites de costo y disponibilidad de material local.

Las propiedades de los elementos seleccionados como arriostramientos y las cargas de deslizamiento de activación de los disipadores de fricción se presentan en la Tabla 5.7, Tabla 5.8 y Tabla 5.9.

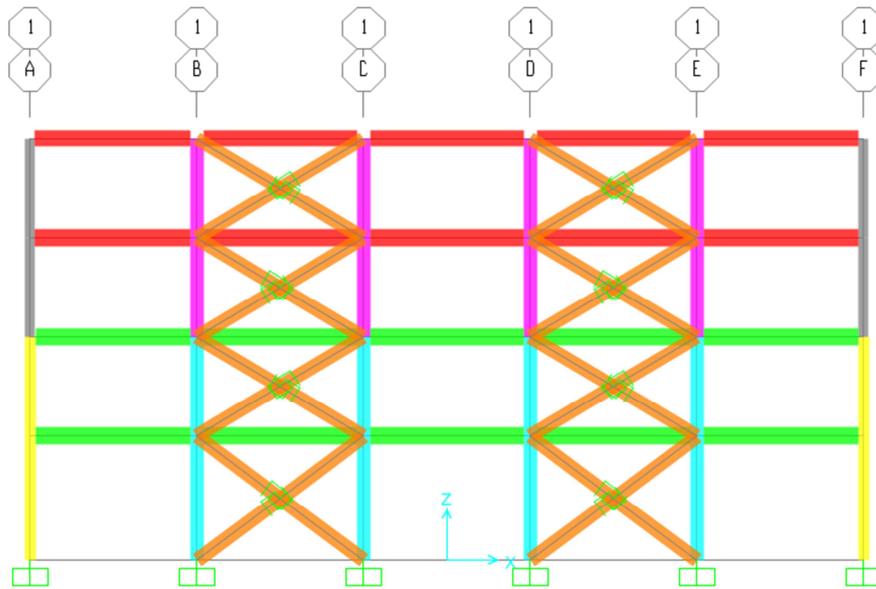


Figura 5.11: Pórtico de 4 pisos con disipadores modelado en SAP 2000 V17.1.0

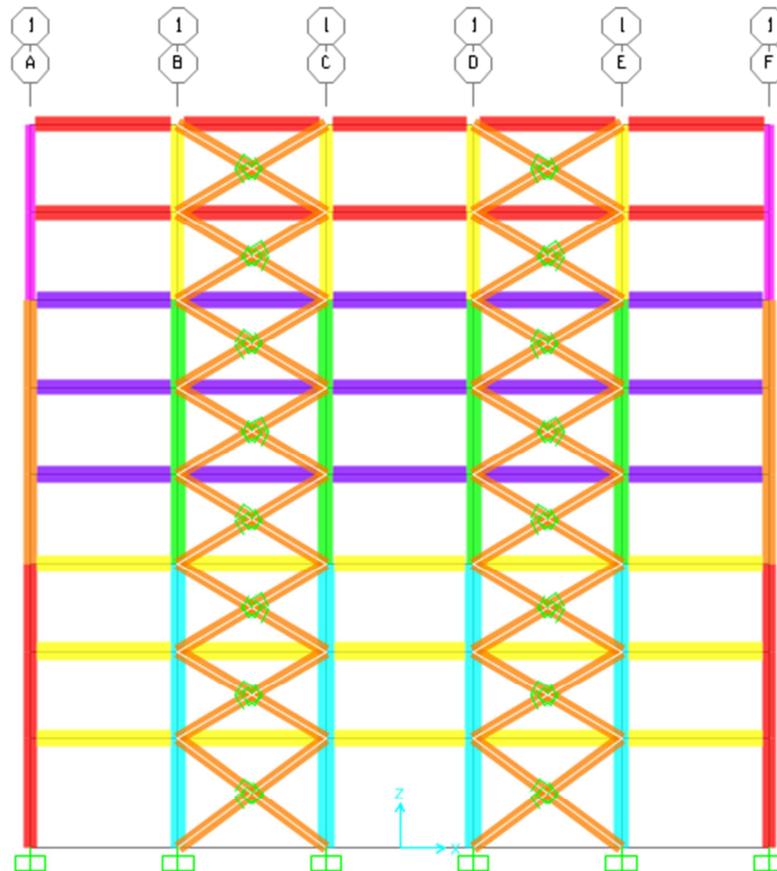


Figura 5.12: Pórtico de 8 pisos con disipadores modelado en SAP 2000 V17.1.0

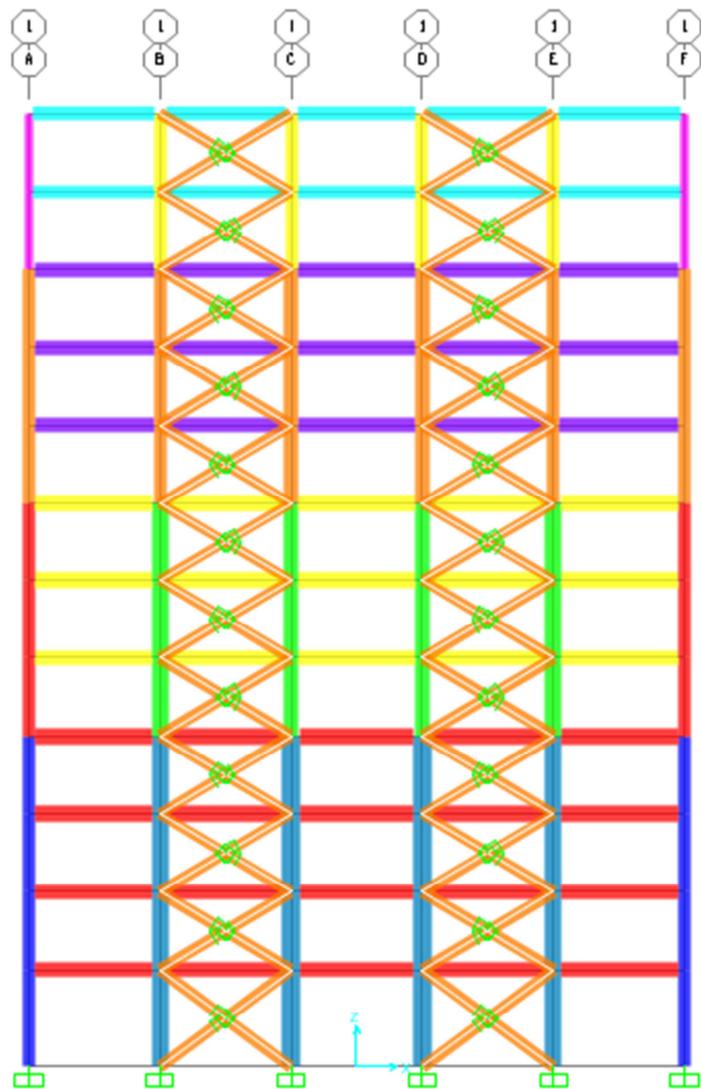


Figura 5.13: Pórtico de 12 pisos con disipadores modelado en SAP 2000 V17.1.0

PISO	PORTICO DE 4 PISOS		
	FUERZA DESLIZAMIENTO	SECCION	RIGIDEZ DISIPADOR
1	22.38 Ton	2C 200x200x12 mm	24424.96 Ton/m
2	20.89 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m
3	20.89 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m
4	20.89 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m

Tabla 5.7: Propiedades de disipadores de fricción incorporados a pórtico de 4 pisos

PISO	PORTICO DE 8 PISOS		
	FUERZA DESLIZAMIENTO	SECCION	RIGIDEZ DISIPADOR
1	22.88 Ton	2C 200x200x12 mm	24424.96 Ton/m
2	21.35 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m
3	21.35 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m
4	21.35 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m
5	21.35 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m
6	21.35 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m
7	21.35 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m
8	21.35 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m

Tabla 5.8: Propiedades de disipadores de fricción incorporados a pórtico de 8 pisos

PISO	PORTICO DE 12 PISOS		
	FUERZA DESLIZAMIENTO	SECCION	RIGIDEZ DISIPADOR
1	16.52 Ton	2C 200x200x12 mm	24424.96 Ton/m
2	15.42 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m
3	15.42 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m
4	15.42 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m
5	15.42 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m
6	15.42 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m
7	15.42 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m
8	15.42 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m
9	15.42 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m
10	15.42 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m
11	15.42 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m
12	15.42 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m

Tabla 5.9: Propiedades de disipadores de fricción incorporados a pórtico de 12 pisos

5.5. Resultados de análisis de pórticos

A continuación se presentarán los resultados del análisis no lineal historia tiempo ejecutado a cada uno de los pórticos arriba definidos, sometidos a las excitaciones sísmicas detalladas en la sección 5.3.

Para el cálculo de las respuestas se definieron casos de análisis no lineal historia tiempo en el programa SAP 2000 V 17.1.0 para cada sismo a aplicarse, utilizando tiempos de salida de 0.05 segundos.

Los parámetros que se han seleccionado para verificar el desempeño estructural de los pórticos son aquellos que recomienda la Federal Emergency Management Agency en su documento FEMA 356 (ver Tabla 5.10) y que finalmente se cuantificarán como la comparación de respuestas de derivas de piso, respuesta energética y desempeño estructural por comportamiento inelástico.

Elements	Type	Structural Performance Levels		
		Collapse Prevention S-5	Life Safety S-3	Immediate Occupancy S-1
Concrete Frames	Primary	Extensive cracking and hinge formation in ductile elements. Limited cracking and/or splice failure in some nonductile columns. Severe damage in short columns.	Extensive damage to beams. Spalling of cover and shear cracking (<1/8" width) for ductile columns. Minor spalling in nonductile columns. Joint cracks <1/8" wide.	Minor hairline cracking. Limited yielding possible at a few locations. No crushing (strains below 0.003).
	Secondary	Extensive spalling in columns (limited shortening) and beams. Severe joint damage. Some reinforcing buckled.	Extensive cracking and hinge formation in ductile elements. Limited cracking and/or splice failure in some nonductile columns. Severe damage in short columns.	Minor spalling in a few places in ductile columns and beams. Flexural cracking in beams and columns. Shear cracking in joints <1/16" width.
	Drift	4% transient or permanent	2% transient; 1% permanent	1% transient; negligible permanent

Tabla 5.10: Objetivos de desempeño estructural para pórticos de hormigón (FEMA 356, 2000).

5.5.1. Comparación de resultados de Pórtico de 4 pisos

4.5.2.1. Derivas de piso

A continuación se muestra la comparación de los resultados de derivas de piso, obtenidos de los análisis no lineales historia tiempo de los pórticos en estudio sometidos a las excitaciones sísmicas antes definidas.

PISO	DERIVA (%)		
	SISMO CENTENARIO		
	SIN DISIPADORES	CON DISIPADORES	REDUCCION
4	0.06%	0.05%	19.37%
3	0.07%	0.08%	-11.28%
2	0.19%	0.15%	21.40%
1	1.30%	0.61%	53.44%
0	0.00%	0.00%	0.00%

Tabla 5.11: Comparación derivas de piso pórtico de 4 pisos – Sismo El Centenario.

PISO	DERIVA (%)		
	SISMO SG		
	SIN DISIPADORES	CON DISIPADORES	REDUCCION
4	0.00%	0.02%	-4000.00%
3	0.13%	0.07%	43.74%
2	0.01%	0.15%	-1136.36%
1	3.26%	0.37%	88.61%
0	0.00%	0.00%	0.00%

Tabla 5.12: Comparación derivas de piso pórtico de 4 pisos – Sismo SG.

PISO	DERIVA (%)		
	SISMO SQ		
	SIN DISIPADORES	CON DISIPADORES	REDUCCION
4	0.16%	0.03%	80.58%
3	0.22%	0.05%	79.07%
2	0.19%	0.09%	55.60%
1	2.92%	0.16%	94.42%
0	0.00%	0.00%	0.00%

Tabla 5.13: Comparación derivas de piso pórtico de 4 pisos – Sismo SQ.

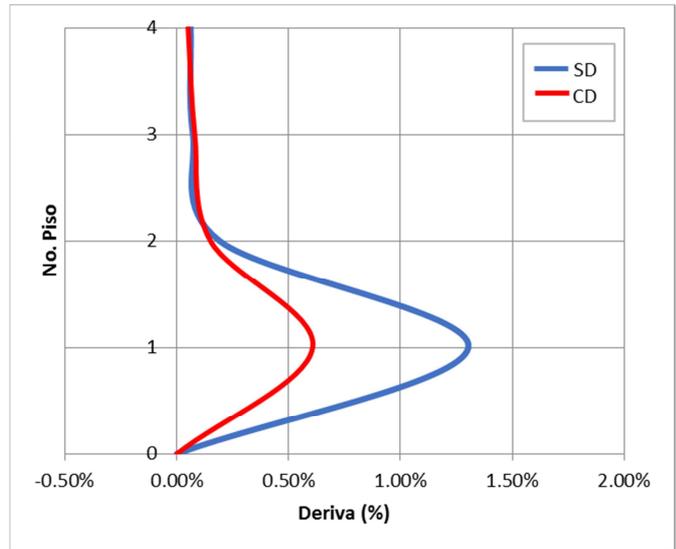


Figura 5.14: Diagrama de derivas de entrepiso pórtico de 4 pisos - Sismo El Centenario.

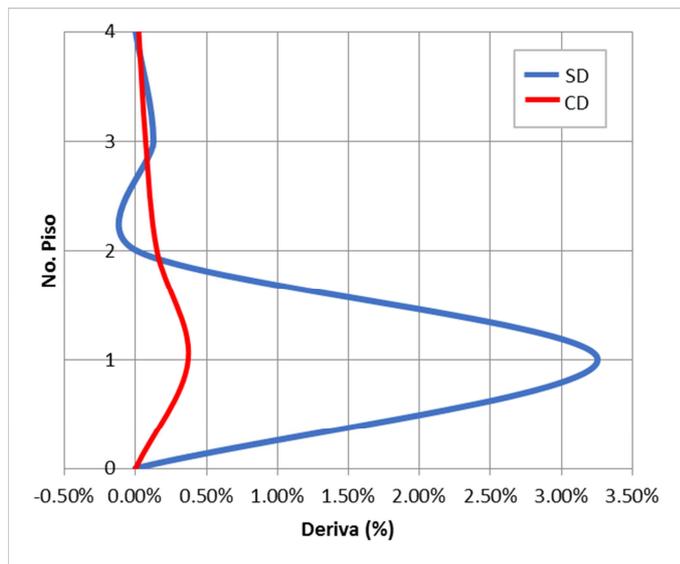


Figura 5.15: Diagrama de derivas de entrepiso pórtico de 4 pisos - Sismo SG.

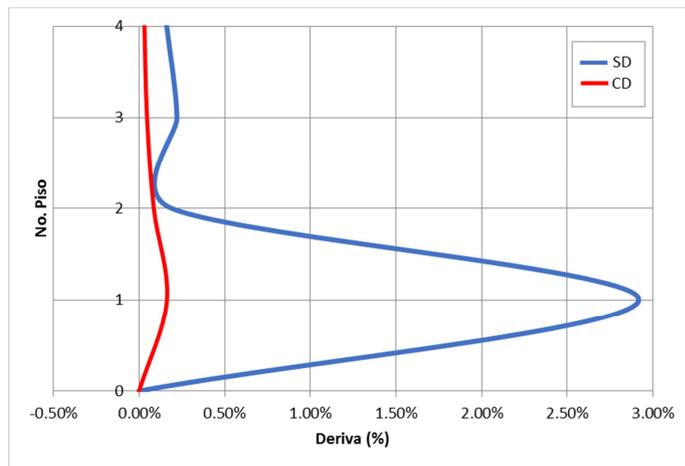


Figura 5.16: Diagrama de derivas de entrepiso pórtico de 4 pisos - Sismo SQ.

A partir del análisis de los resultados arriba presentados, se verifica que la incorporación de disipadores de fricción mejora notablemente el comportamiento inelástico del pórtico, disminuyendo considerablemente las derivas de piso, lo cual se traduce en una disminución del comportamiento inelástico de los elementos del sistema resistente principal.

Esta reducción ocurre especialmente en las columnas del primer nivel y son del orden del 95% de las derivas iniciales, lo cual nos indican que los disipadores casi restringen la incursión de estas columnas dentro del rango inelástico, evitando que se genere rotaciones plásticas excesivas que generarían un posible mecanismo de colapso.

Cabe recalcar que para ciertos niveles y de forma particular para la respuesta ante la excitación SG, la incorporación de los disipadores de fricción “incrementa excesivamente” la deriva de piso respecto al valor inicial; sin embargo, hay que tener cuidado con la interpretación de estos resultados.

Revisando las derivas calculadas para el pórtico sin disipadores se verifica que las mismas para el nivel 2 y 4 son “cero” (casi nulas debido a la excesiva rotación de las columnas del primer nivel) y aun cuando las nuevas derivas con disipadores son muy pequeñas (del orden del 0.20%), un cociente entre cero tiende a un valor muy alto que es que para efectos de comparación sería irreal considerar.

4.5.2.2. Respuesta Energética

A continuación se muestra la comparación de los resultados de la respuesta energética, obtenidos de los análisis no lineales historia tiempo de los pórticos en estudio sometidos a las excitaciones sísmicas antes definidas.

Para el cómputo de la respuesta energética punto a punto y en cada uno de los elementos del pórtico se utilizó el software especializado de análisis no lineal PERFORM 3D V 5.0 en su versión de prueba, facilitado por Computers and Structures Inc.; el cual permite el intercambio de datos con modelos de SAP 2000, importando propiedades de los materiales definidos, geometría de los elementos, asignaciones de masas y casos de análisis para su posterior procesamiento.

		ENERGIA ENTRADA	ENERGIA INELASTICA		ENERGIA DISIPADOR	
		Ton-m	Ton-m	%	Ton-m	%
CENT	SIN DISIPADOR	52.13	26.29	50.43%	0.00	0.00%
	CON DISIPADOR	34.98	1.77	5.05%	22.45	64.17%
	REDUCCION	32.90%	93.28%		-	
SG	SIN DISIPADOR	110.17	76.50	69.44%	0.00	0.00%
	CON DISIPADOR	31.84	1.91	5.99%	19.75	62.03%
	REDUCCION	71.10%	97.51%		-	
SQ	SIN DISIPADOR	101.68	72.68	71.48%	0.00	0.00%
	CON DISIPADOR	4.22	0.00	0.00%	2.67	63.28%
	REDUCCION	95.85%	100.00%		-	

Tabla 5.14: Comparación de respuesta energética de pórtico de 4 pisos.

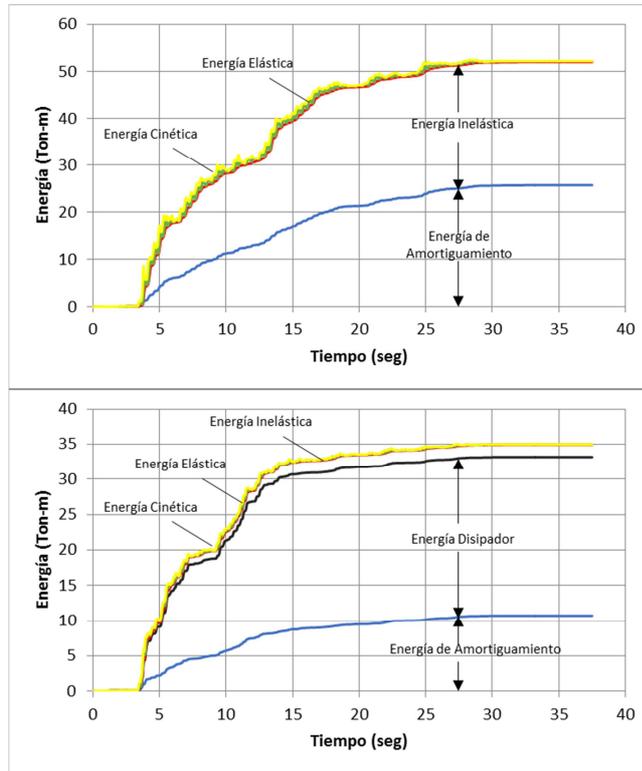


Figura 5.17: Balance Energético de pórtico de 4 pisos – Sismo Centenario. Sup.: Pórtico sin disipadores. Inf.: Pórtico con disipadores.

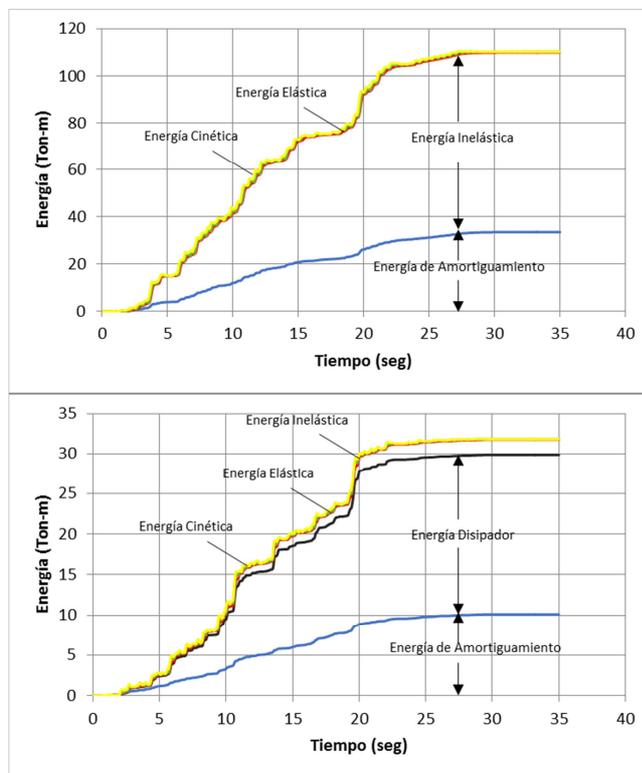


Figura 5.18: Balance Energético de pórtico de 4 pisos – Sismo SG. Sup.: Pórtico sin disipadores. Inf.: Pórtico con disipadores.

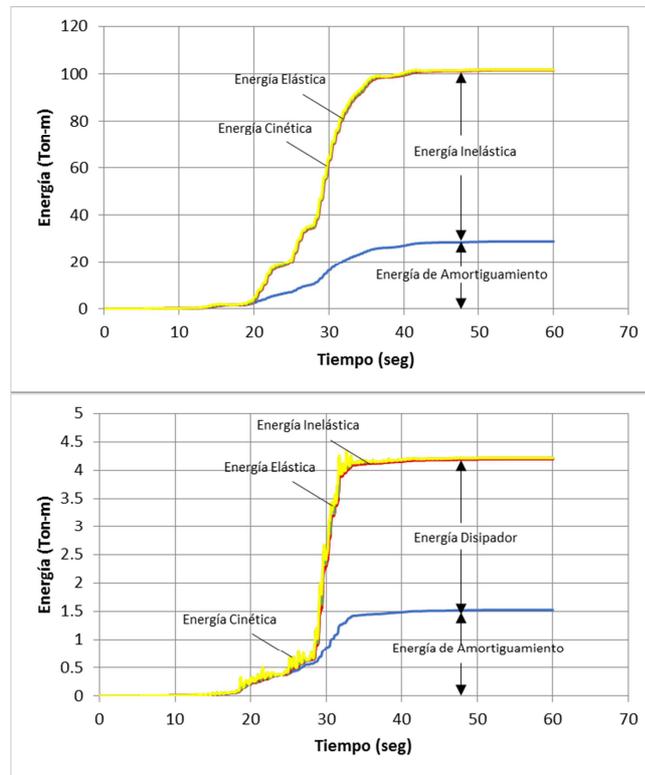


Figura 5.19: Balance Energético de pórtico de 4 pisos – Sismo SQ. Sup.: Pórtico sin disipadores. Inf.: Pórtico con disipadores.

A partir del análisis de los resultados arriba presentados, se verifica que la incorporación de disipadores de fricción mejora notablemente el comportamiento inelástico del pórtico mediante dos efectos; por un lado, disminuyendo la respuesta energética del sistema al rigidizarlo permitiendo menos deformaciones y por consiguiente menos energía de ingreso, y por el otro, desviando el flujo de energía inelástica desde los elementos del sistema estructural principal hacia los disipadores de fricción.

La reducción máxima ocurre para el pórtico sometido a la excitación SQ, en donde la energía inelástica del sistema principal se disminuye abruptamente un 95% y se desvía completamente hacia los disipadores, generando que el comportamiento de los elementos del sistema estructural principal sea netamente elástico.

4.5.2.3. Análisis de Desempeño Estructural

A continuación se muestra la comparación de los resultados del desempeño estructural, obtenidos de los análisis no lineales historia tiempo de los pórticos en estudio sometidos a las excitaciones sísmicas antes definidas.

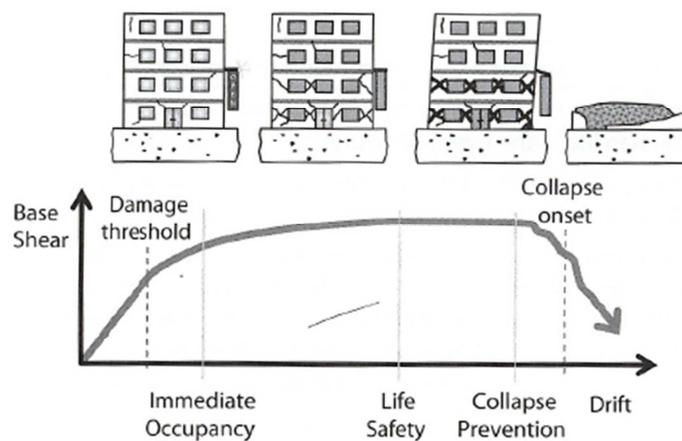


Figura 5.20: Niveles de desempeño según FEMA (Moehle, 2015).

Para el análisis del desempeño estructural de los pórticos se consideraran los límites de rotaciones plásticas para elementos de hormigón armado de pórticos resistentes a momento según lo detalla el FEMA 356 en las tablas 6-7 y 6-8, para los diferentes niveles de desempeño estructural de Operacional (B), Ocupación Inmediata (IO), Seguridad de Vida (LS) y Prevención del Colapso (CP) (ver Figura 5.20).

		NIVEL DE DESEMPEÑO SISMICO			
		B	IO	LS	CP
CENT	SIN DISIPADOR				X
	CON DISIPADOR		X		
SG	SIN DISIPADOR				X
	CON DISIPADOR		X		
SQ	SIN DISIPADOR				X
	CON DISIPADOR	X			

Tabla 5.15: Nivel de desempeño sísmico de pórtico de 4 pisos.

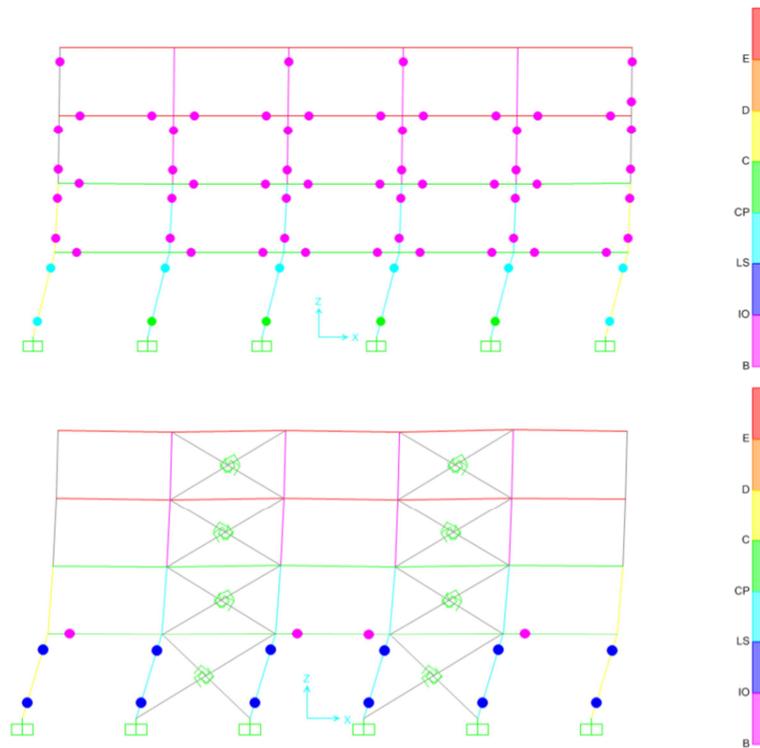


Figura 5.21: Distribución de Rótulas Plásticas en pórtico de 4 pisos – Sismo Centenario. Sup.: Pórtico sin disipadores; Inf.: Pórtico con disipadores

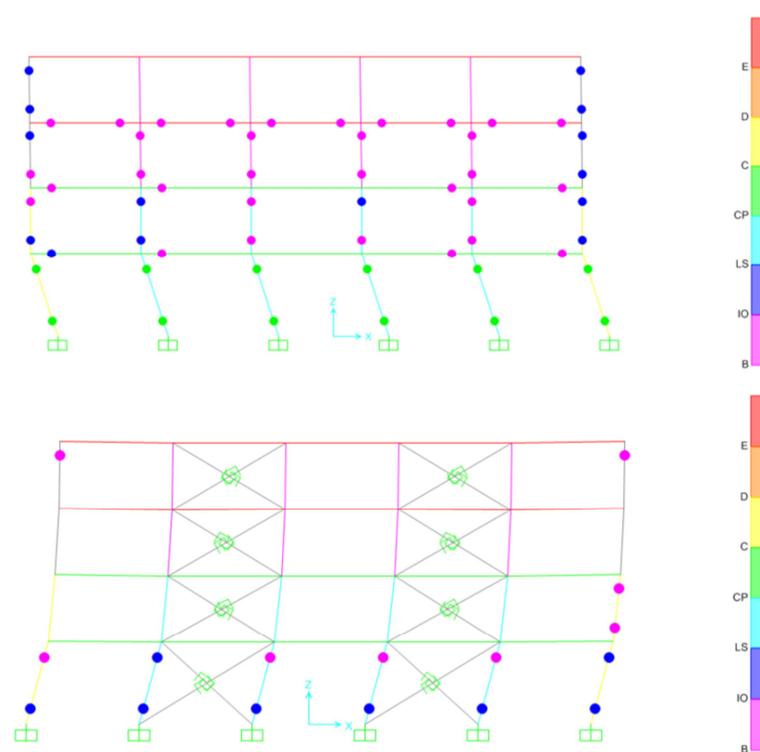


Figura 5.22: Distribución de Rótulas Plásticas en pórtico de 4 pisos – Sismo SG. Sup.: Pórtico sin disipadores; Inf.: Pórtico con disipadores

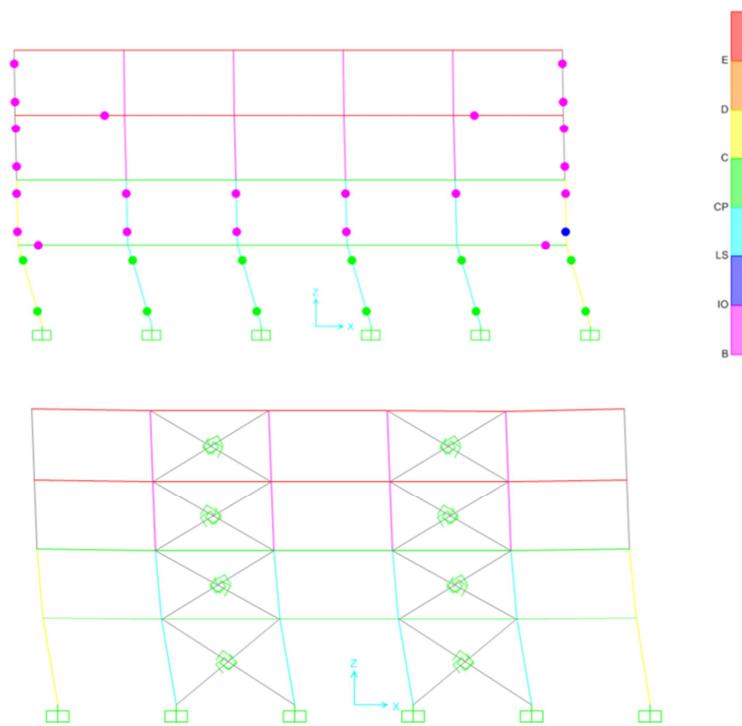


Figura 5.23: Distribución de Rótulas Plásticas en pórtico de 4 pisos – Sismo SQ. Sup.: Pórtico sin disipadores; Inf.: Pórtico con disipadores

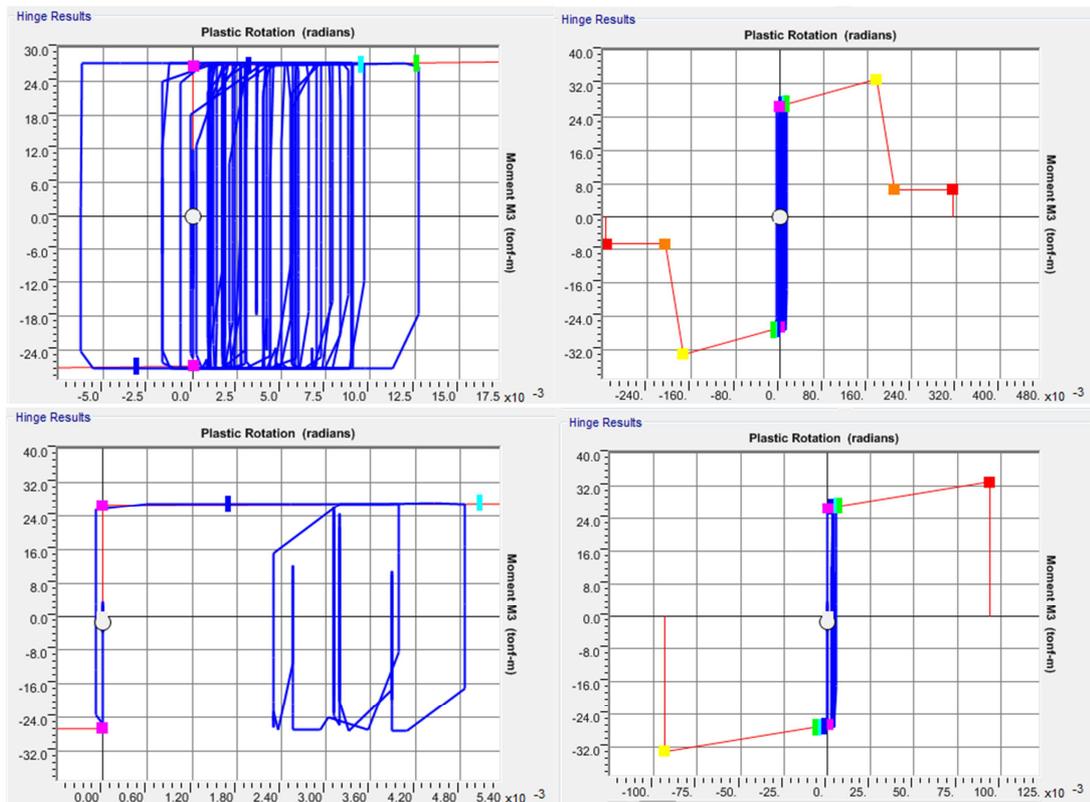


Figura 5.24: Diagrama de Histéresis de Nudo base en eje B – Sismo Centenario. Sup.: Pórtico sin disipador; Inf.: Pórtico con disipador.

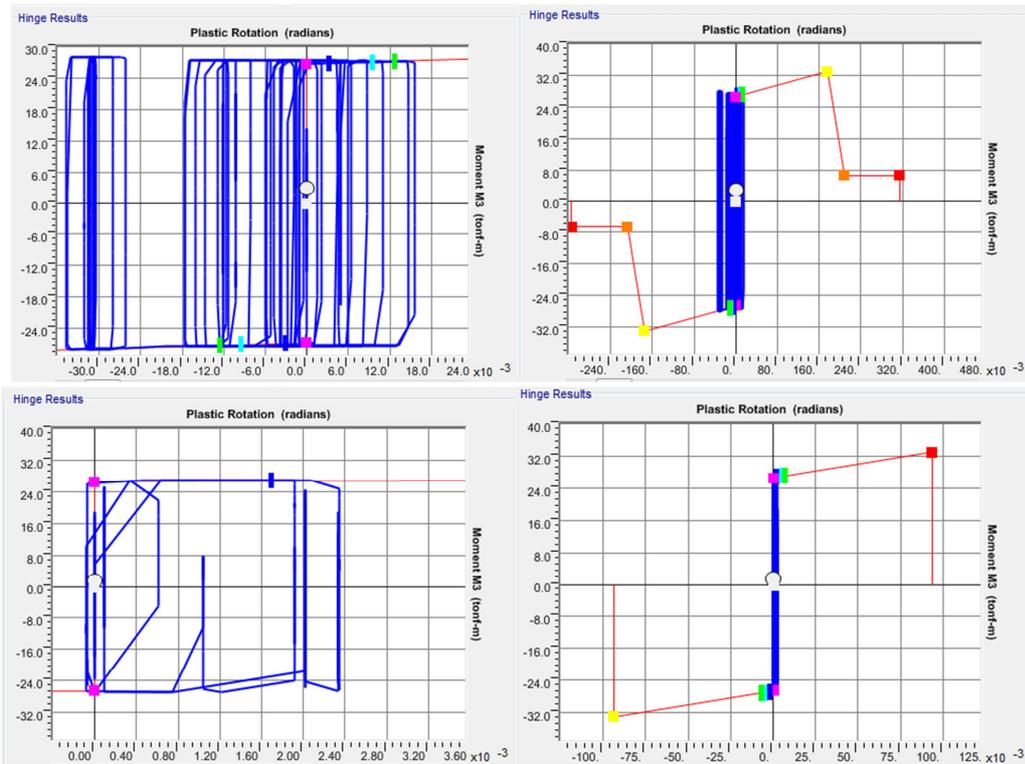


Figura 5.25: Diagrama de Histéresis de Nudo base en eje B – Sismo SG. Sup.: Pórtico sin disipador; Inf.: Pórtico con disipador.

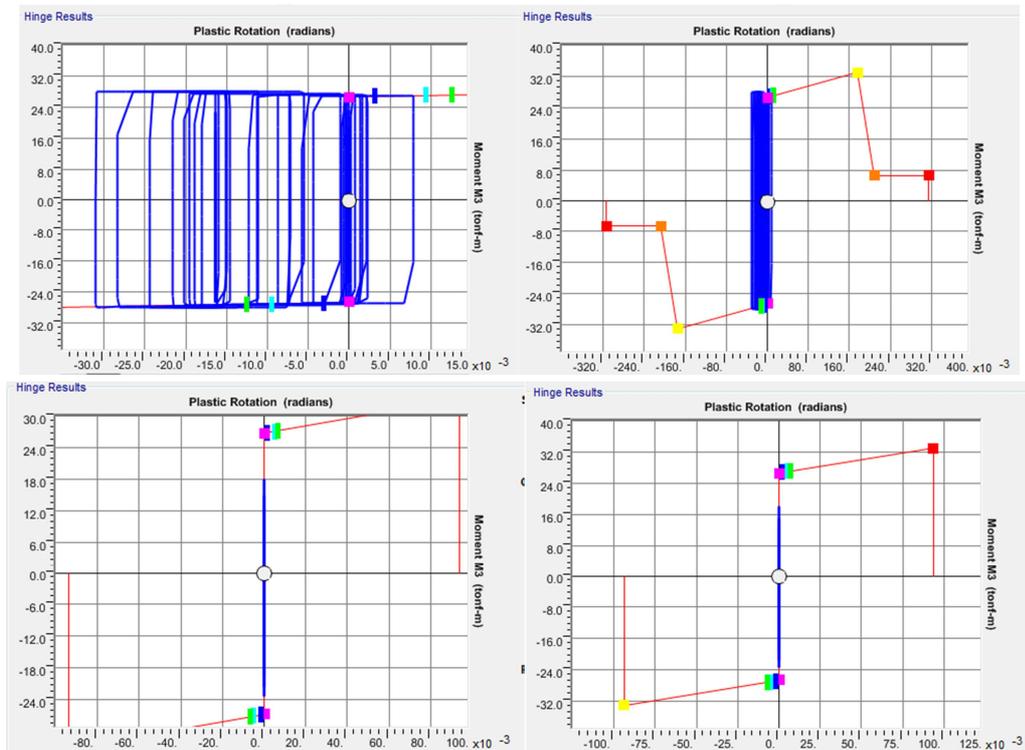


Figura 5.26: Diagrama de Histéresis de Nudo base en eje B – Sismo SQ. Sup.: Pórtico sin disipador; Inf.: Pórtico con disipador.

5.5.2. Resultados Pórtico de 8 pisos

5.5.2.1. Derivas de piso

A continuación se muestra la comparación de los resultados de derivas de piso, obtenidos de los análisis no lineales historia tiempo de los pórticos en estudio sometidos a las excitaciones sísmicas antes definidas.

PISO	DERIVA (%)		
	SISMO CENTENARIO		
	SIN DISIPADORES	CON DISIPADORES	REDUCCION
8	0.14%	0.05%	61.81%
7	0.45%	0.07%	84.32%
6	0.24%	0.11%	55.94%
5	0.30%	0.17%	43.86%
4	0.07%	0.20%	-198.38%
3	0.00%	0.14%	-
2	0.00%	0.83%	-
1	1.59%	0.22%	85.97%
0	0.00%	0.00%	0.00%

Tabla 5.16: Comparación derivas de piso pórtico de 8 pisos – Sismo El Centenario.

PISO	DERIVA (%)		
	SISMO SG		
	SIN DISIPADORES	CON DISIPADORES	REDUCCION
8	0.15%	0.06%	62.59%
7	0.37%	0.07%	81.68%
6	0.48%	0.10%	80.36%
5	0.60%	0.12%	79.21%
4	0.56%	0.13%	77.45%
3	0.16%	0.10%	41.23%
2	0.00%	0.00%	-
1	1.86%	0.99%	46.64%
0	0.00%	0.00%	0.00%

Tabla 5.17: Comparación derivas de piso pórtico de 8 pisos – Sismo SG.

PISO	DERIVA (%)		
	SISMO SQ		
	SIN DISIPADORES	CON DISIPADORES	REDUCCION
8	0.06%	0.02%	65.16%
7	0.17%	0.03%	80.91%
6	0.20%	0.07%	67.54%
5	0.27%	0.12%	56.18%
4	0.27%	0.15%	46.04%
3	0.10%	0.10%	-2.54%
2	0.00%	0.00%	-
1	2.14%	0.59%	72.20%
0	0.00%	0.00%	0.00%

Tabla 5.18: Comparación derivas de piso pórtico de 8 pisos – Sismo SQ.

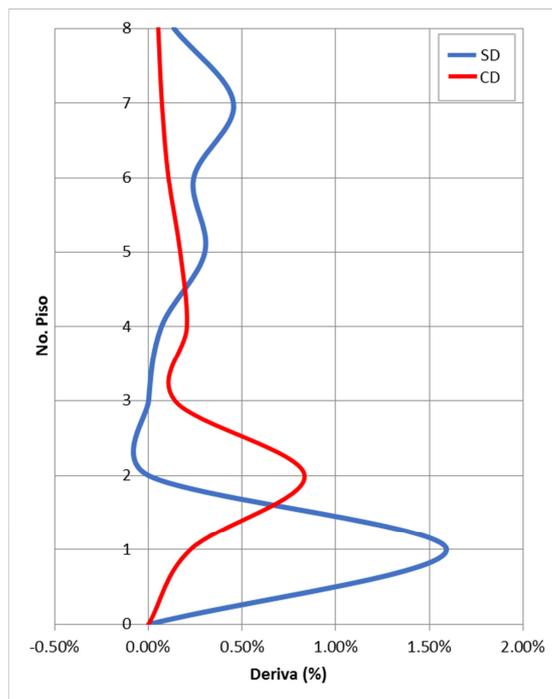


Figura 5.27: Diagrama de derivas de entrespacio pórtico de 8 pisos - Sismo El Centenario.

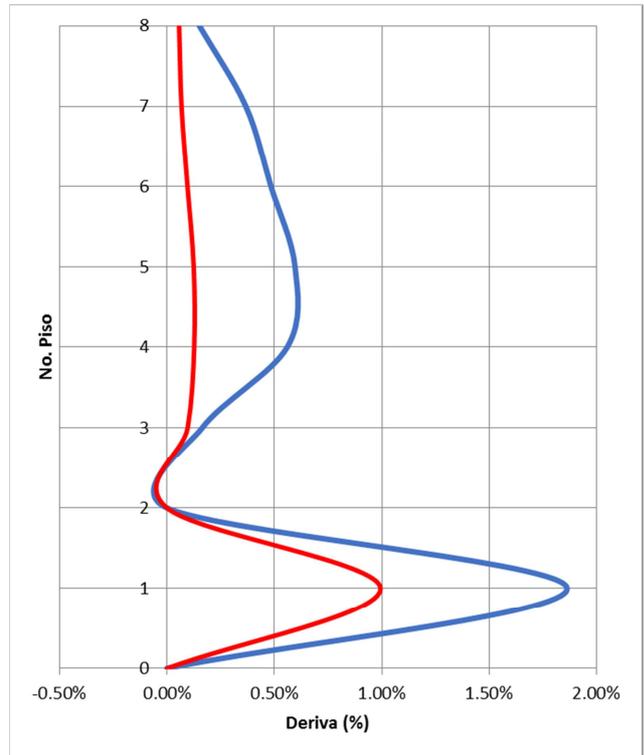


Figura 5.28: Diagrama de derivas de entrepiso pórtico de 8 pisos - Sismo SG.

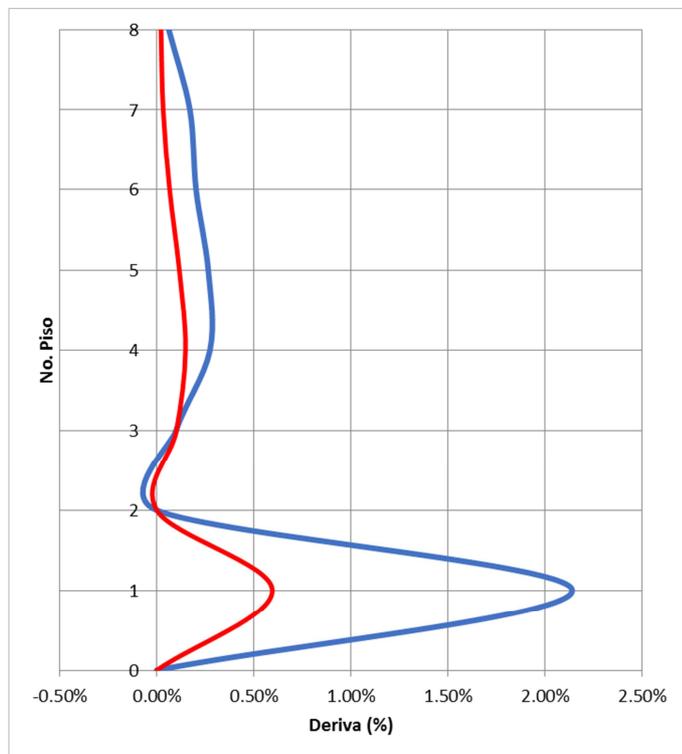


Figura 5.29: Diagrama de derivas de entrepiso pórtico de 8 pisos - Sismo SQ.

A partir del análisis de los resultados arriba presentados, se verifica que la incorporación de disipadores de fricción mejora notablemente el comportamiento inelástico del pórtico, disminuyendo considerablemente las derivas de piso, lo cual se traduce en una disminución del comportamiento inelástico de los elementos del sistema resistente principal.

Esta reducción ocurre especialmente en las columnas del primer nivel y son del orden del 85% de las derivas iniciales, lo cual nos indican que los disipadores casi restringen la incursión de estas columnas dentro del rango inelástico, evitando que se genere rotaciones plásticas excesivas que generarían un posible mecanismo de colapso.

5.5.2.2. Respuesta Energética

A continuación se muestra la comparación de los resultados de la respuesta energética, obtenidos de los análisis no lineales historia tiempo de los pórticos en estudio sometidos a las excitaciones sísmicas antes definidas.

		ENERGIA ENTRADA	ENERGIA INELASTICA		ENERGIA DISIPADOR	
		Ton-m	Ton-m	%	Ton-m	%
CENT	SIN DISIPADOR	57.45	17.70	30.80%	0.00	0.00%
	CON DISIPADOR	128.53	15.10	11.75%	65.93	51.29%
	REDUCCION	-123.70%	14.65%		-	
SG	SIN DISIPADOR	182.96	113.46	62.01%	0.00	0.00%
	CON DISIPADOR	141.54	25.15	17.77%	75.46	53.31%
	REDUCCION	22.64%	77.83%		-	
SQ	SIN DISIPADOR	219.41	143.85	65.56%	0.00	0.00%
	CON DISIPADOR	74.07	17.84	24.09%	37.74	50.95%
	REDUCCION	66.24%	87.60%		-	

Tabla 5.19: Comparación de respuesta energética de pórtico de 8 pisos.

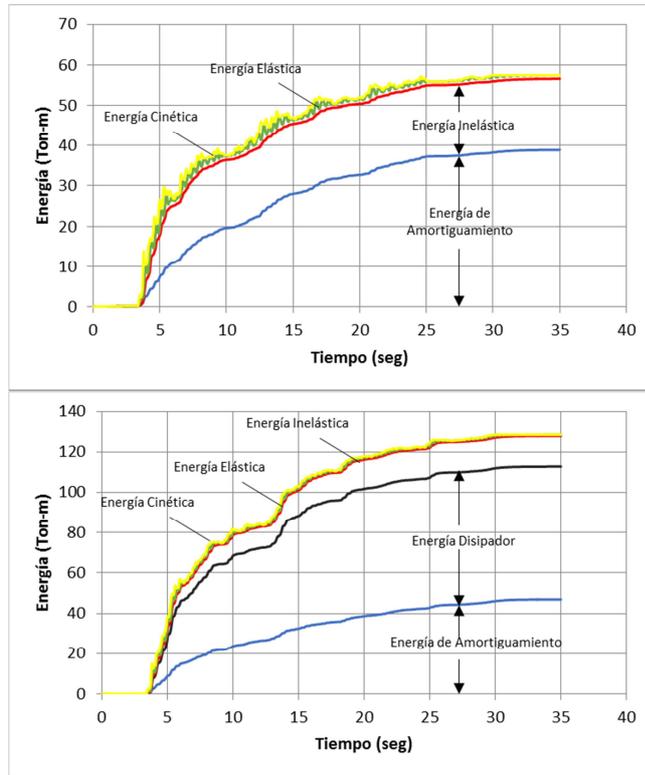


Figura 5.30: Balance Energético de pórtico de 8 pisos – Sismo Centenario. Sup.: Pórtico sin disipadores. Inf.: Pórtico con disipadores.

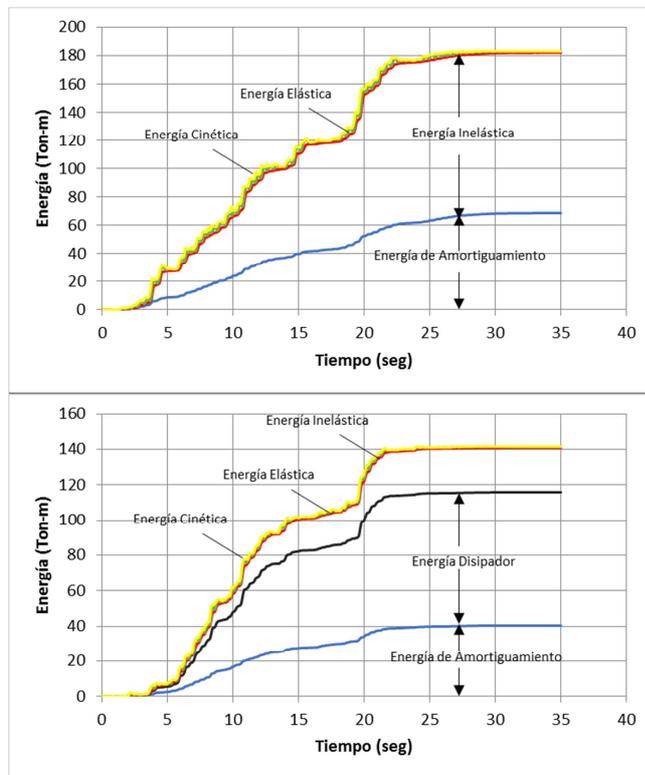


Figura 5.31: Balance Energético de pórtico de 8 pisos – Sismo SG. Sup.: Pórtico sin disipadores. Inf.: Pórtico con disipadores.

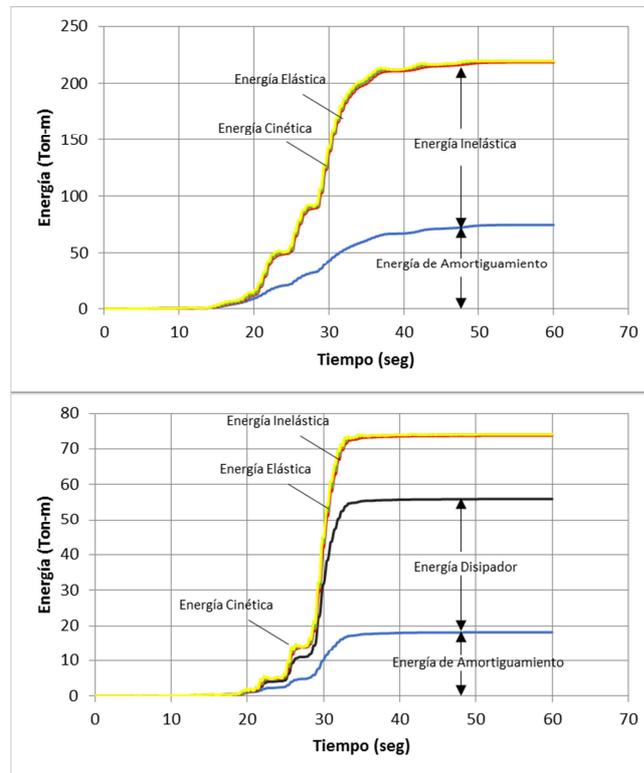


Figura 5.32: Balance Energético de pórtico de 8 pisos – Sismo SQ. Sup.: Pórtico sin disipadores. Inf.: Pórtico con disipadores.

A partir del análisis de los resultados arriba presentados, se verifica que la incorporación de disipadores de fricción mejora notablemente el comportamiento inelástico del pórtico.

5.5.2.3. Análisis de Desempeño Estructural

A continuación se muestra la comparación de los resultados del desempeño estructural, obtenidos de los análisis no lineales historia tiempo de los pórticos en estudio sometidos a las excitaciones sísmicas antes definidas.

		NIVEL DE DESEMPEÑO SISMICO			
		B	IO	LS	CP
CENT	SIN DISIPADOR				X
	CON DISIPADOR		X		
SG	SIN DISIPADOR				X
	CON DISIPADOR			X	
SQ	SIN DISIPADOR				X
	CON DISIPADOR		X		

Tabla 5.20: Nivel de desempeño sísmico de pórtico de 8 pisos.

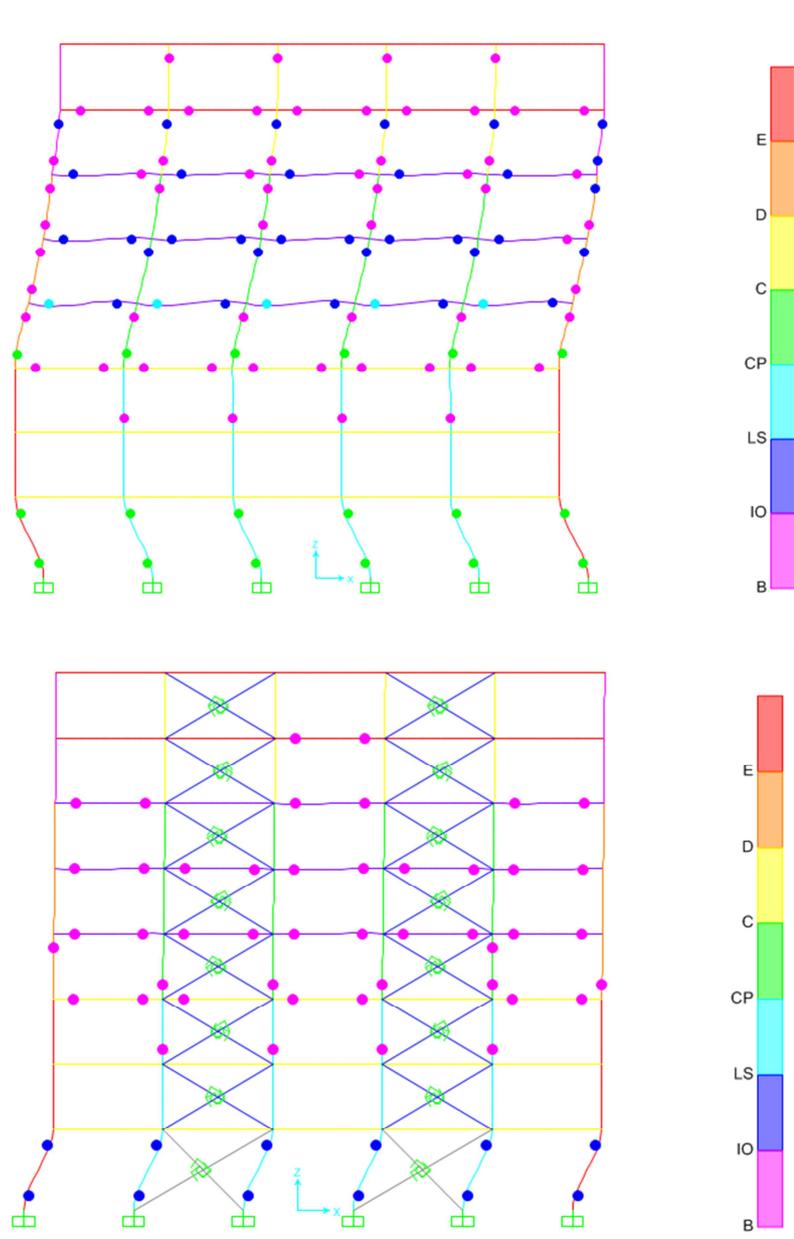


Figura 5.33: Distribución de Rótulas Plásticas en pórtico de 8 pisos – Sismo Centenario. Sup.: Pórtico sin disipadores; Inf.: Pórtico con disipadores

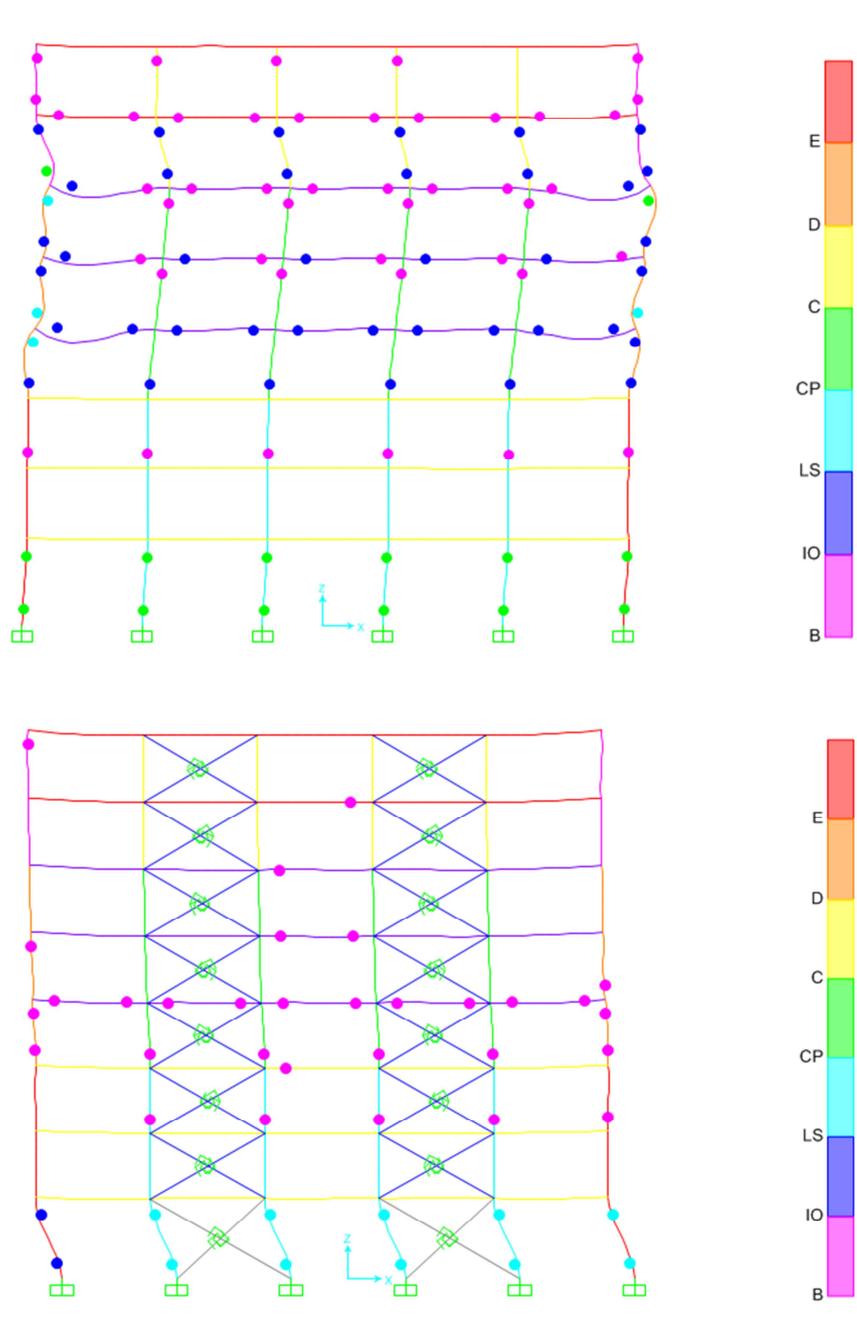


Figura 5.34: Distribución de Rótulas Plásticas en pórtico de 8 pisos – Sismo SG. Sup.: Pórtico sin disipadores; Inf.: Pórtico con disipadores

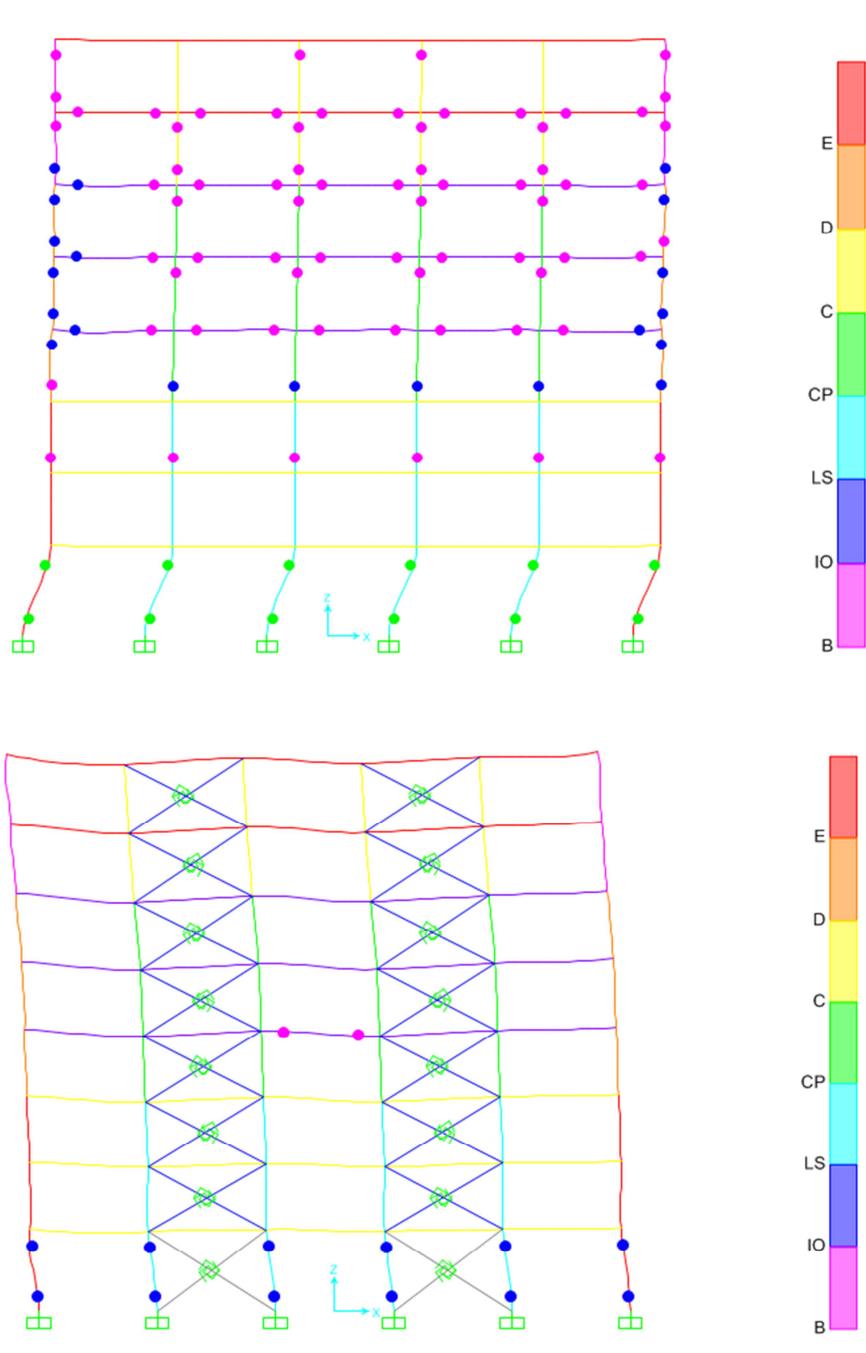


Figura 5.35: Distribución de Rótulas Plásticas en pórtico de 8 pisos – Sismo SQ. Sup.: Pórtico sin disipadores; Inf.: Pórtico con disipadores

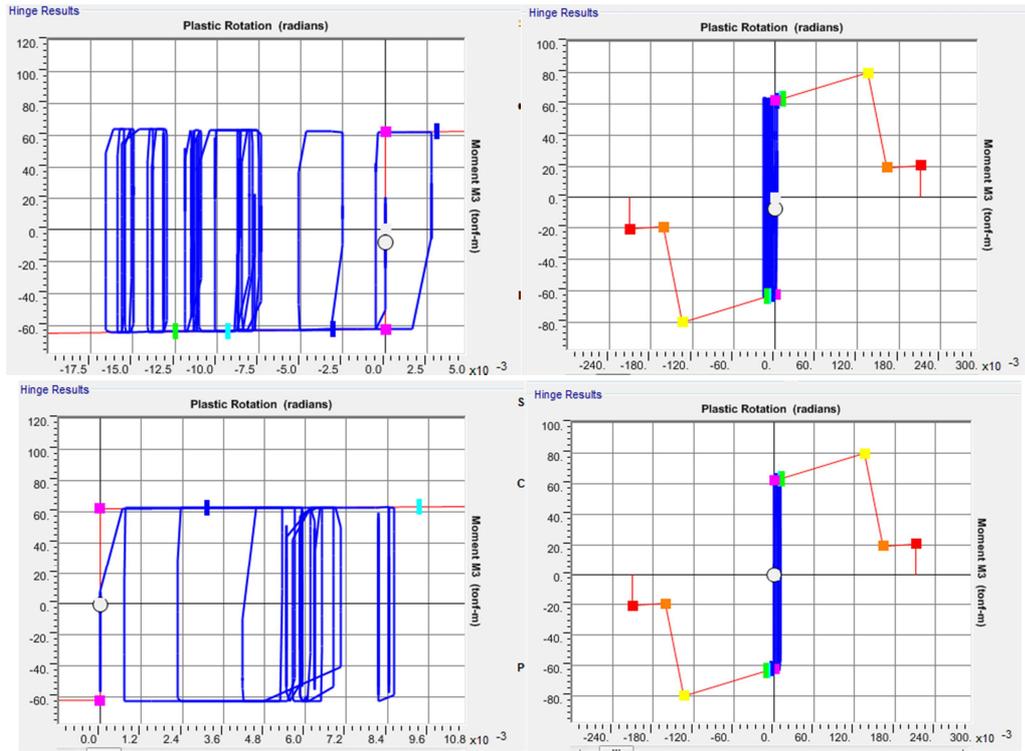


Figura 5.36: Diagrama de Histéresis de Nudo base en eje B – Sismo Centenario. Sup.: Pórtico sin disipador; Inf.: Pórtico con disipador.

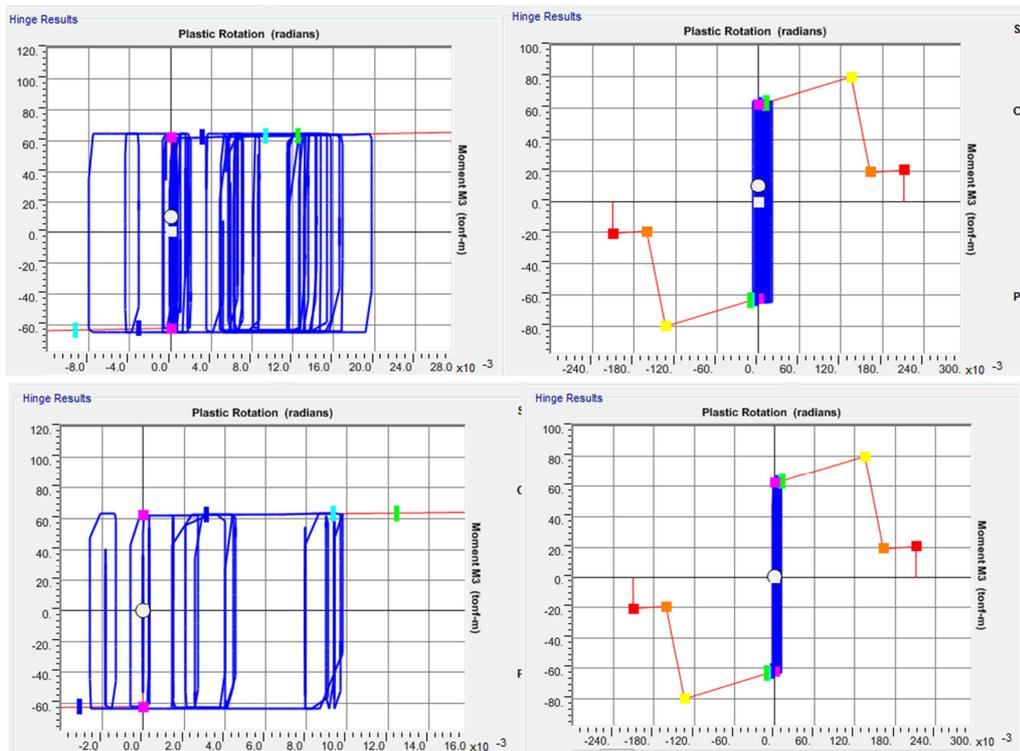


Figura 5.37: Diagrama de Histéresis de Nudo base en eje B – Sismo SG. Sup.: Pórtico sin disipador; Inf.: Pórtico con disipador.

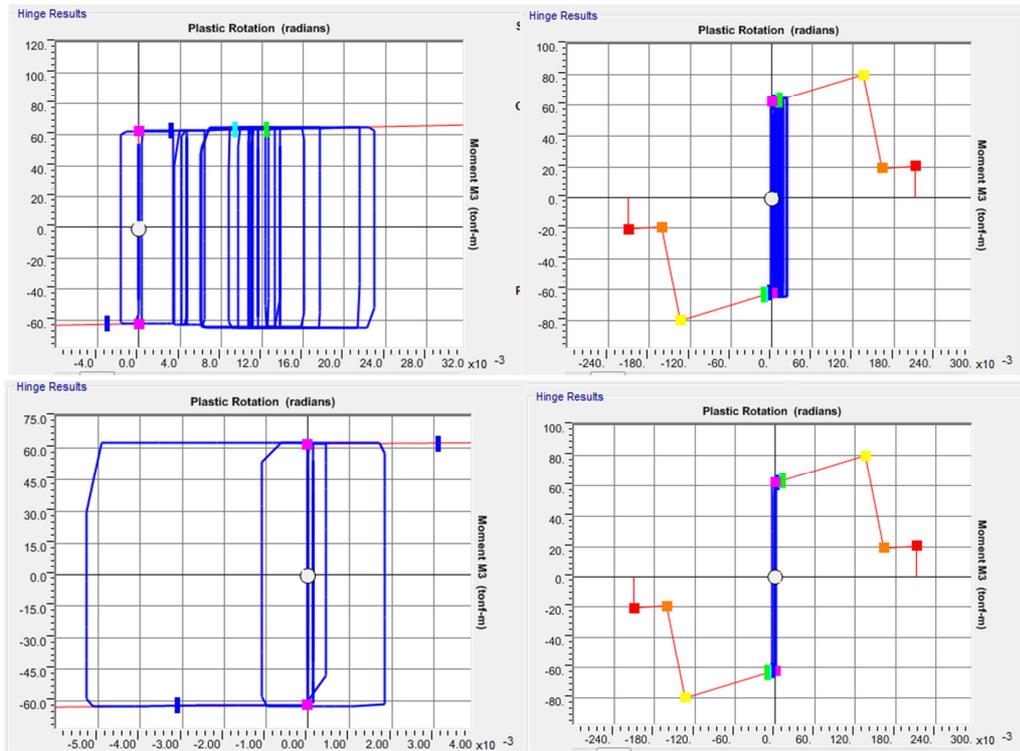


Figura 5.38: Diagrama de Histéresis de Nudo base en eje B – Sismo SQ. Sup.: Pórtico sin disipador; Inf.: Pórtico con disipador.

5.5.3. Resultados Pórtico de 12 pisos

5.5.3.1. Derivas de piso

A continuación se muestra la comparación de los resultados de derivas de piso, obtenidos de los análisis no lineales historia tiempo de los pórticos en estudio sometidos a las excitaciones sísmicas antes definidas.

PISO	DERIVA (%)		
	SISMO CENTENARIO		
	SIN DISIPADORES	CON DISIPADORES	REDUCCION
12	0.13%	0.05%	59.04%
11	-0.47%	0.06%	112.71%
10	0.47%	0.09%	81.56%
9	0.93%	0.11%	87.98%
8	0.81%	0.18%	78.37%
7	0.30%	0.15%	50.09%
6	0.20%	0.24%	-19.89%
5	0.10%	0.28%	-182.15%
4	0.14%	0.19%	-35.41%
3	0.20%	0.24%	-18.30%
2	0.23%	0.24%	-3.46%
1	0.21%	0.17%	16.63%
0	0.00%	0.00%	0.00%

Tabla 5.21: Comparación derivas de piso pórtico de 12 pisos – Sismo El Centenario.

PISO	DERIVA (%)		
	SISMO SG		
	SIN DISIPADORES	CON DISIPADORES	REDUCCION
12	0.14%	0.08%	41.38%
11	0.33%	0.15%	54.06%
10	0.31%	0.18%	41.61%
9	0.20%	0.23%	-14.19%
8	0.36%	0.24%	33.99%
7	0.71%	0.23%	67.45%
6	0.75%	0.23%	69.48%
5	0.72%	0.22%	69.63%
4	0.66%	0.30%	55.15%
3	0.69%	0.40%	41.74%
2	0.78%	0.51%	34.96%
1	0.79%	0.54%	32.29%
0	0.00%	0.00%	0.00%

Tabla 5.22: Comparación derivas de piso pórtico de 12 pisos – Sismo SG.

PISO	DERIVA (%)		
	SISMO SQ		
	SIN DISIPADORES	CON DISIPADORES	REDUCCION
12	0.10%	0.06%	43.70%
11	0.14%	0.10%	29.55%
10	0.17%	0.13%	24.59%
9	0.28%	0.17%	38.69%
8	0.32%	0.18%	43.36%
7	0.20%	0.17%	16.57%
6	0.32%	0.23%	28.77%
5	0.45%	0.32%	29.00%
4	0.45%	0.42%	7.77%
3	0.56%	0.54%	3.05%
2	0.57%	0.67%	-16.34%
1	0.56%	0.71%	-26.49%
0	0.00%	0.00%	0.00%

Tabla 5.23: Comparación derivas de piso pórtico de 12 pisos – Sismo SQ.

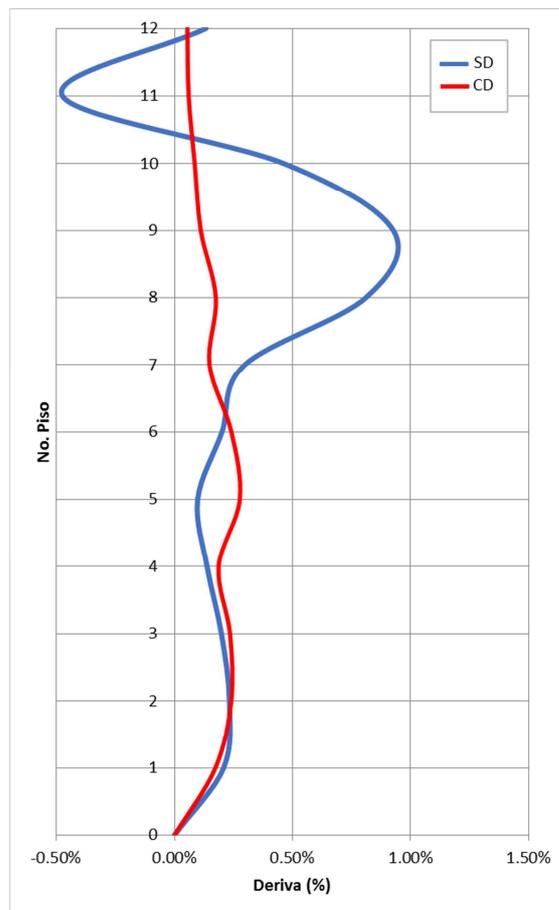


Figura 5.39: Diagrama de derivas de entrepiso pórtico de 12 pisos - Sismo El Centenario.

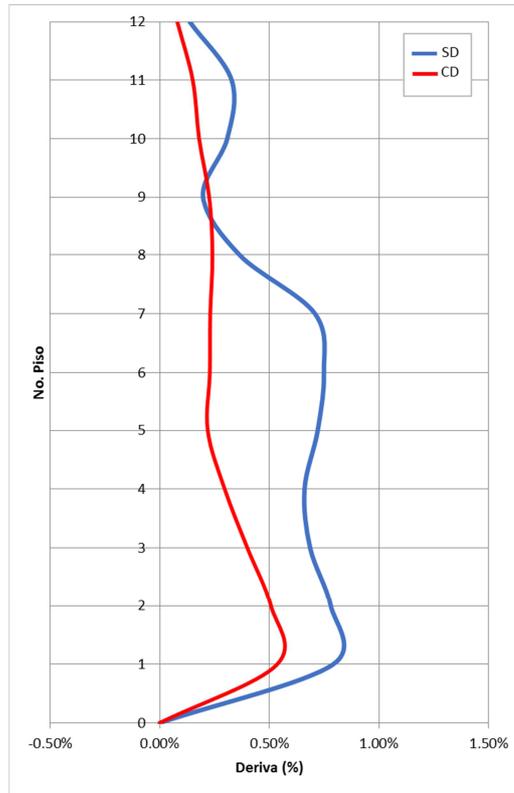


Figura 5.40: Diagrama de derivas de entrepiso pórtico de 12 pisos - Sismo SG.

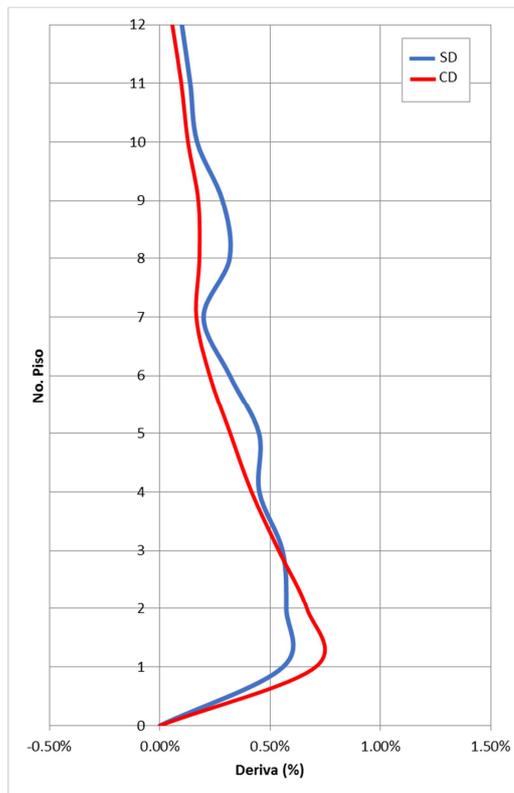


Figura 5.41: Diagrama de derivas de entrepiso pórtico de 12 pisos - Sismo SQ.

A partir del análisis de los resultados arriba presentados, se verifica que la incorporación de disipadores de fricción mejora el comportamiento inelástico del pórtico, disminuyendo las derivas de piso.

Esta reducción ocurre especialmente en las columnas de los pisos intermedios y son del orden del 80% de las derivas iniciales, lo cual nos indican que los disipadores casi restringen la incursión de estas columnas dentro del rango inelástico, evitando que se genere rotaciones plásticas excesivas que generarían un posible mecanismo de colapso.

5.5.3.2. Respuesta Energética

A continuación se muestra la comparación de los resultados de la respuesta energética, obtenidos de los análisis no lineales historia tiempo de los pórticos en estudio sometidos a las excitaciones sísmicas antes definidas.

		ENERGIA ENTRADA	ENERGIA INELASTICA		ENERGIA DISIPADOR	
		Ton-m	Ton-m	%	Ton-m	%
CENT	SIN DISIPADOR	65.15	14.96	22.96%	0.00	0.00%
	CON DISIPADOR	88.20	2.50	2.83%	43.73	49.58%
	REDUCCION	-35.38%	83.31%		-	
SG	SIN DISIPADOR	215.34	115.77	53.76%	0.00	0.00%
	CON DISIPADOR	288.38	44.66	15.49%	142.52	49.42%
	REDUCCION	-33.92%	61.42%		-	
SQ	SIN DISIPADOR	233.00	130.04	55.81%	0.00	0.00%
	CON DISIPADOR	340.34	78.06	22.94%	146.19	42.95%
	REDUCCION	-46.07%	39.97%		-	

Tabla 5.24: Comparación de respuesta energética de pórtico de 12 pisos.

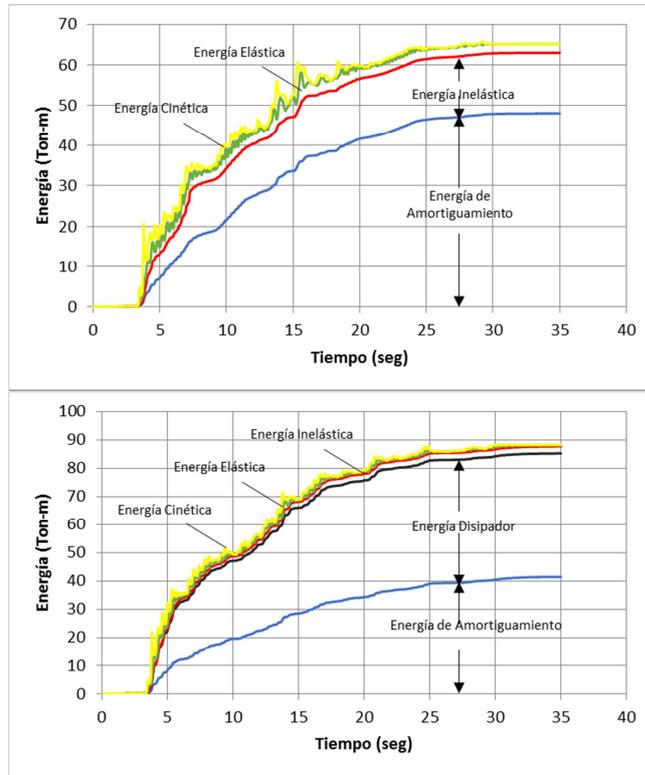


Figura 5.42: Balance Energético de pórtico de 12 pisos – Sismo Centenario. Sup.: Pórtico sin disipadores. Inf.: Pórtico con disipadores.

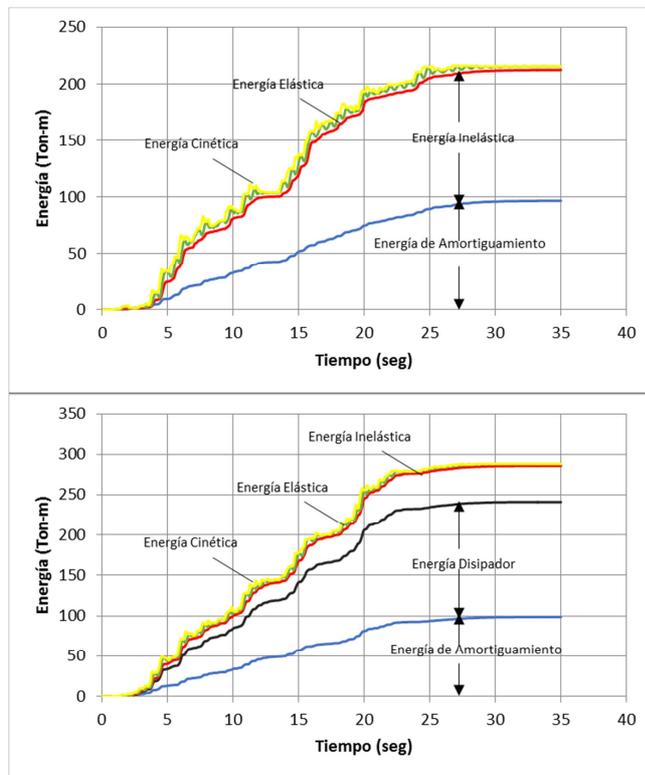


Figura 5.43: Balance Energético de pórtico de 12 pisos – Sismo SG. Sup.: Pórtico sin disipadores. Inf.: Pórtico con disipadores.

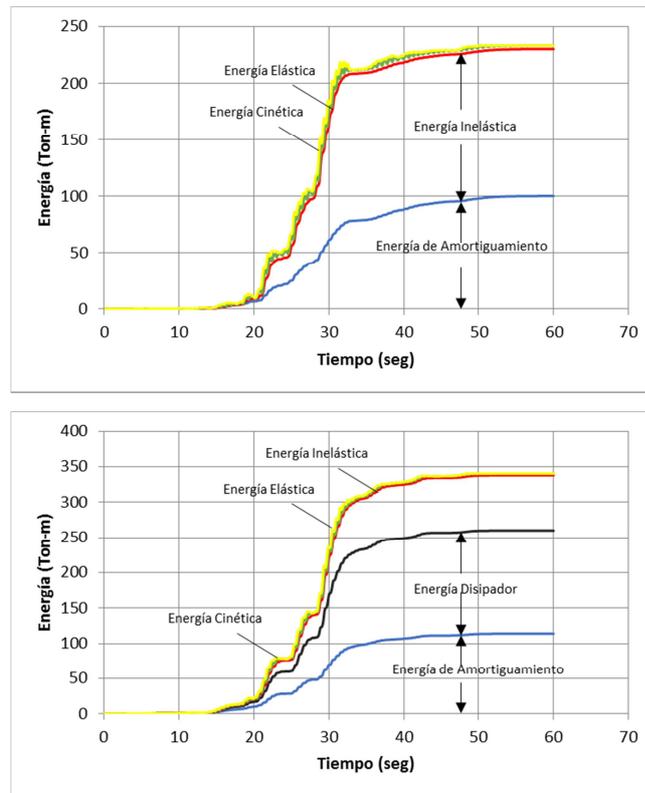


Figura 5.44: Balance Energético de pórtico de 12 pisos – Sismo SQ. Sup.: Pórtico sin disipadores. Inf.: Pórtico con disipadores.

A partir del análisis de los resultados arriba presentados, se verifica que la incorporación de disipadores de fricción mejora notablemente el comportamiento inelástico del pórtico, reduciendo el porcentaje de energía disipada mediante comportamiento inelástico del sistema resistente principal.

5.5.3.3. Análisis de Desempeño Estructural

A continuación se muestra la comparación de los resultados del desempeño estructural, obtenidos de los análisis no lineales historia tiempo de los pórticos en estudio sometidos a las excitaciones sísmicas antes definidas.

		NIVEL DE DESEMPEÑO SISMICO			
		B	IO	LS	CP
CENT	SIN DISIPADOR		X*		
	CON DISIPADOR		X		
SG	SIN DISIPADOR		X*		
	CON DISIPADOR		X		
SQ	SIN DISIPADOR		X*		
	CON DISIPADOR	X			

Tabla 5.25: Nivel de desempeño sísmico de pórtico de 12 pisos.

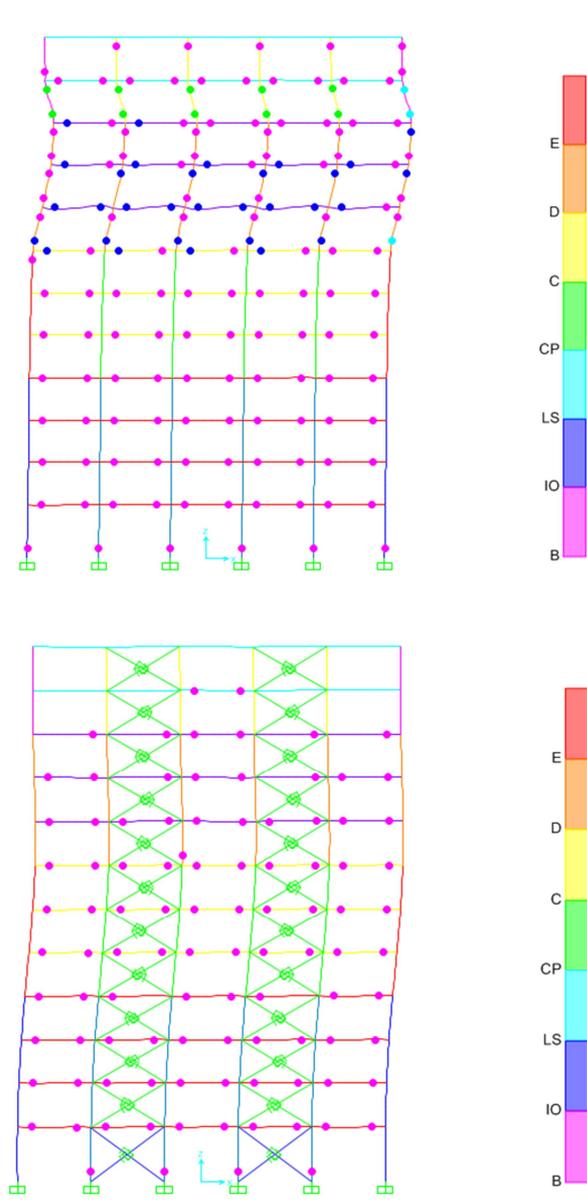


Figura 5.45: Distribución de Rótulas Plásticas en pórtico de 12 pisos – Sismo Centenario. Sup.: Pórtico sin disipadores; Inf.: Pórtico con disipadores

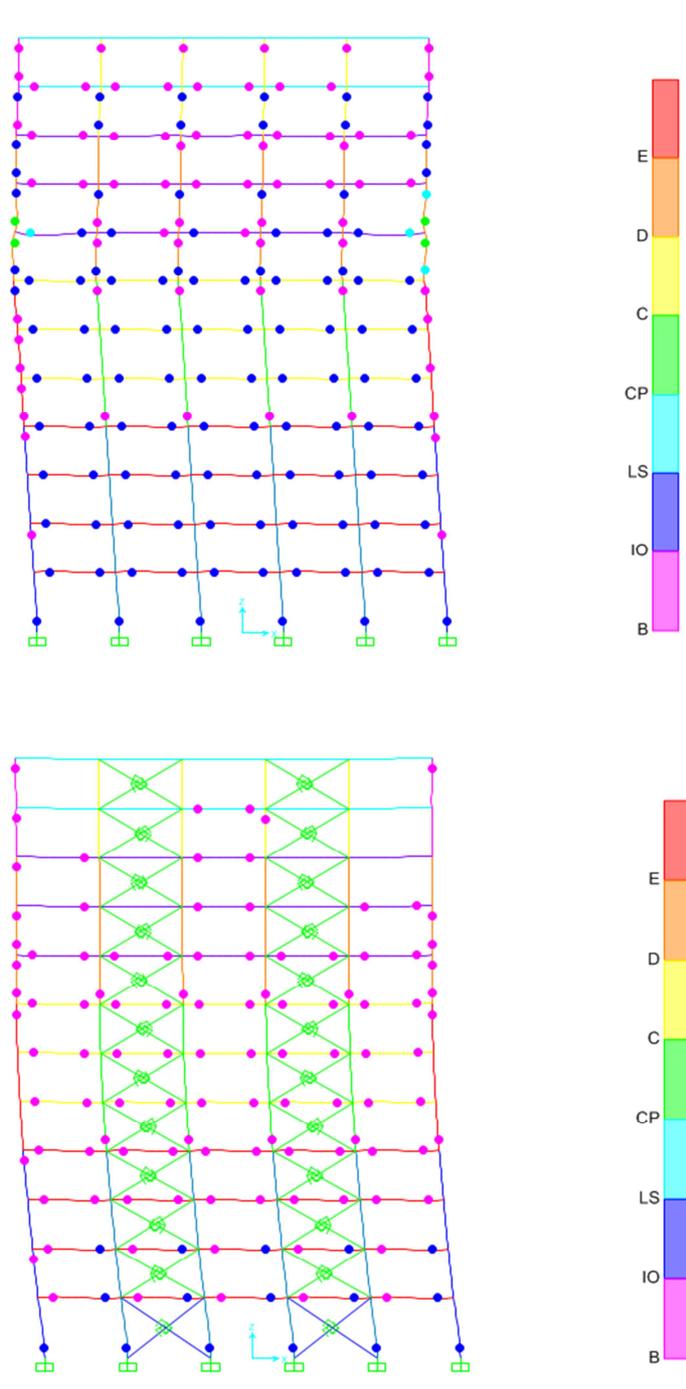


Figura 5.46: Distribución de Rótulas Plásticas en pórtico de 12 pisos – Sismo SG. Sup.: Pórtico sin disipadores; Inf.: Pórtico con disipadores

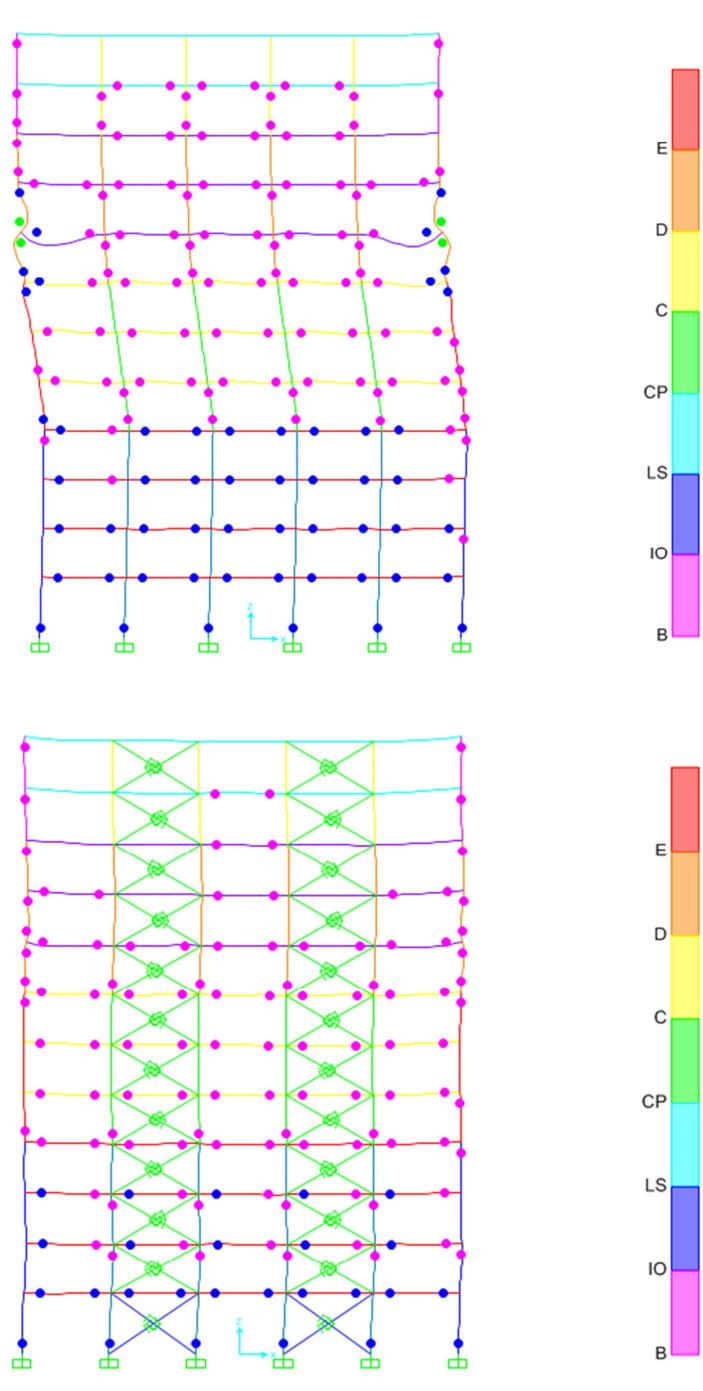


Figura 5.47: Distribución de Rótulas Plásticas en pórtico de 12 pisos – Sismo SQ. Sup.: Pórtico sin disipadores; Inf.: Pórtico con disipadores

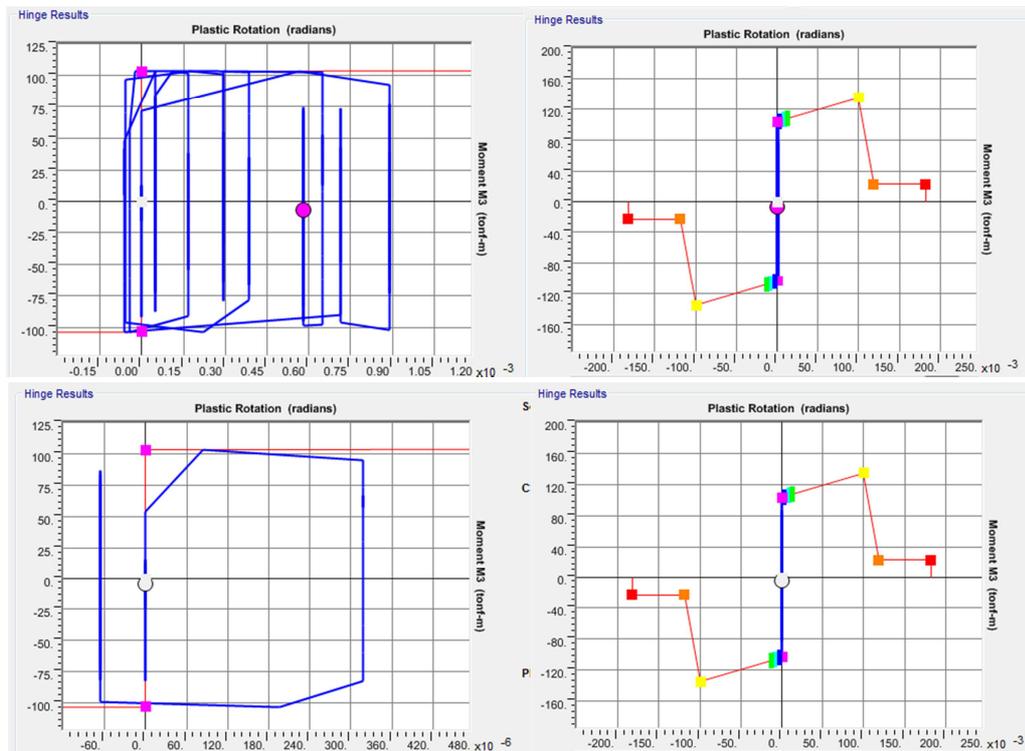


Figura 5.48: Diagrama de Histéresis de Nudo base en eje B – Sismo Centenario. Sup.: Pórtico sin dissipador; Inf.: Pórtico con dissipador.

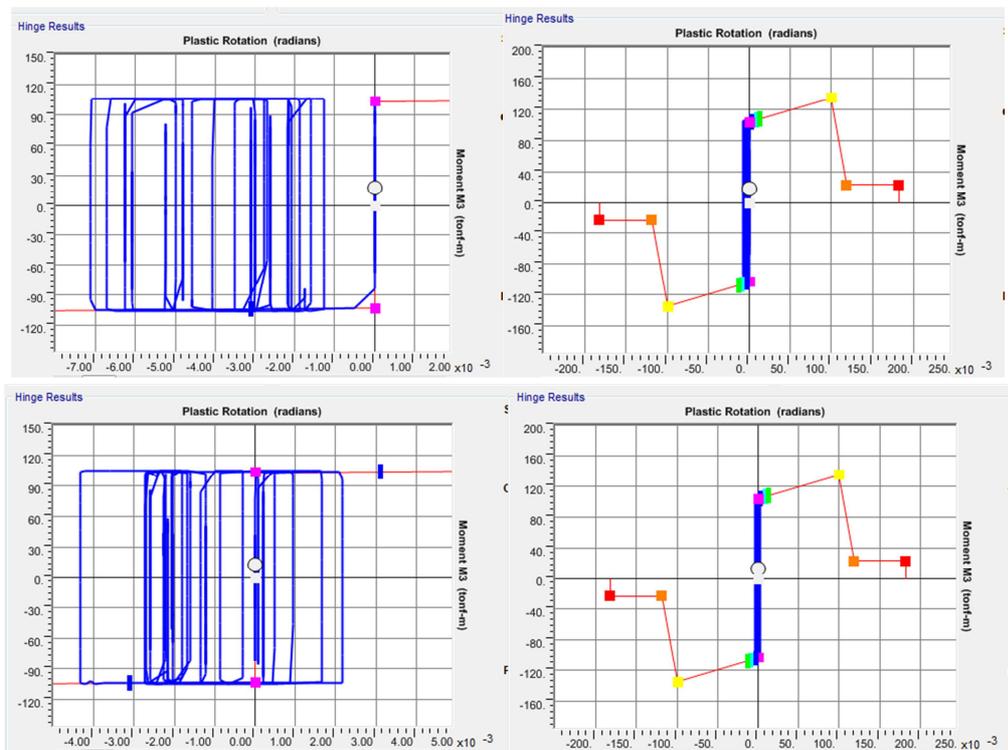


Figura 5.49: Diagrama de Histéresis de Nudo base en eje B – Sismo SG. Sup.: Pórtico sin dissipador; Inf.: Pórtico con dissipador.

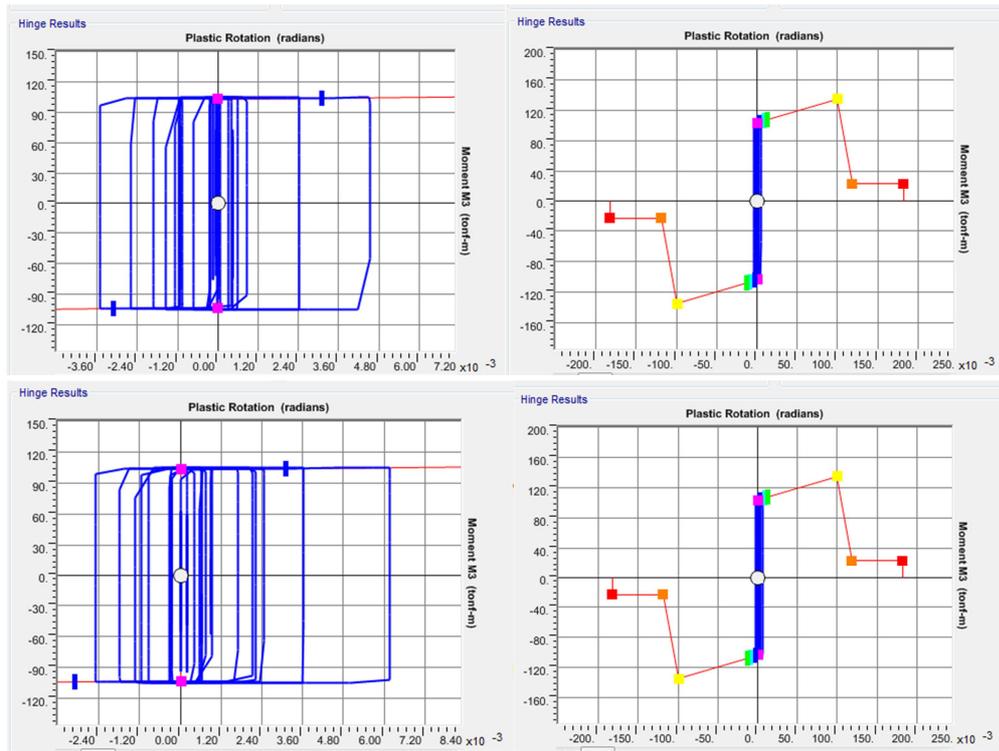


Figura 5.50: Diagrama de Histéresis de Nudo base en eje B – Sismo SQ. Sup.: Pórtico sin disipador; Inf.: Pórtico con disipador.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

A partir de los resultados de los análisis arriba realizados, se puede verificar que los disipadores de fricción mejoran sustancialmente el desempeño sísmico de las estructuras, disminuyendo el daño irreparable y evitando el colapso de las mismas ante excitaciones sísmicas de diseño, y por lo tanto, desde el punto de vista técnico científico se concluye que su aplicación en reparación de estructuras existentes o su incorporación en nuevos edificios en la ciudad de Guayaquil es factible.

El cálculo de la energía de entrada de un sistema depende tanto de la fuerza de excitación así como la rigidez del sistema estructural, no se pudo determinar un patrón de comportamiento de respuesta entre los pórticos estudiados, ya que en ciertos casos el efecto de la incorporación de los disipadores generaba un aumento en la energía de entrada al sistema y en otros caso, la disminuía. Sin embargo, para todos los casos de análisis, el objetivo principal, que era minimizar la cantidad de energía disipada mediante comportamiento inelástico del sistema resistente principal si se pudo lograr, concluyendo que los disipadores cumplen con su objetivo esperado y se comportan satisfactoriamente.

La mayor efectividad de los disipadores de fricción para minimizar la respuesta inelástica se obtuvo para el pórtico de 4 pisos y con menor facilidad en el de 12 pisos; esto debido a que en el primer pórtico fue más sencillo lograr que la incorporación de los arriostramientos de los disipadores rigidicen lo suficiente el sistema para obtener un valor de cociente de periodos de estructuras muy cercano al recomendado por Filiatrault y Cherry ($\frac{T_b}{T_u} < 0.40$), no así para los pórticos de más pisos donde para lograr este

valor de cociente sería necesario la incorporación de elementos de arriostramientos muy grandes y de limitada disponibilidad en el mercado ecuatoriano, llevando a que finalmente su aplicación se vuelva antieconómica.

Debido al alto número de variables que intervienen durante el análisis de respuesta no lineal de una estructura determinada, previo la incorporación de disipadores de fricción en cualquier proyecto estructural será necesario realizar un análisis detallado del comportamiento local y global de la estructura ante las demandas sísmicas de diseño mediante un análisis estático no lineal (Pushover) o historia tiempo, evaluando para diversos valores de carga de deslizamiento y configuraciones de disipadores de fricción en el modelo, de forma que se pueda determinar la carga óptima y configuración adecuada, que minimice las deformaciones de fluencia en el sistema resistente principal de la estructura.

La sencillez del principio de funcionamiento que gobierna el comportamiento de los disipadores de fricción y la alta disponibilidad de los materiales que lo constituyen permiten que su fabricación de forma local sea posible, al no requerir un alto grado de industrialización o una inversión exorbitante, lo cual impulsaría su incorporación en los diseños estructurales de edificaciones del medio.

6.2. Recomendaciones

A partir de este trabajo, se recomienda construir y ensayar modelos físicos de los disipadores de fricción para contrastar los resultados analíticos aquí obtenidos con respuestas experimentales para ajustar la evaluación numérica a los parámetros locales, calibrando así el comportamiento matemático de los sistemas modelados.

Se recomienda ampliar la red de acelerógrafos locales y difundir el contenido de los mismos a profesionales y universidades del medio, para ampliar el uso de los modelos y análisis historia tiempo no lineal que ayuden a evaluar y analizar de una forma más real la capacidad estructural de edificaciones del medio.

Se recomienda ejecutar un análisis económico costo-edificio de la implementación de estos disipadores en obras del Ecuador, considerando los costos de reparación y rehabilitación de las edificaciones luego del evento sísmico de diseño.

Por lo antes expuesto, en un futuro cercano y previo el uso generalizado de los disipadores como alternativas para minimizar la respuesta inelástica de los pórticos, será necesario que el comité de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) determine y establezca requerimientos estructurales básicos para la incorporación de estos elementos en estructuras así como que se realicen estudios paramétricos de respuesta para las diversas variables que intervienen en el proceso de análisis, de tal forma que con estos resultados se puedan desarrollar métodos simplificados de análisis de edificios con disipadores de fricción incorporados, que ayuden a extender el uso de este tipo de disipadores a todo el Ecuador.

BIBLIOGRAFÍA

- Argudo Rodríguez, J., Arellano Izaguirre, M. E., Peña Pozo, J., Villacrés Sánchez, A., & Mera Ortiz, W. (1999). *Proyecto RADIUS Volumen I: Reporte Final a la Secretaría del IDNDR de las Naciones Unidas*. Guayaquil.
- American Concrete Institute. (2011). *Building Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11)*. Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute.
- American Institute of Steel Construction. (2010). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 341-10)*. Chicago, Illinois: American Institute of Steel Construction.
- American Society of Civil Engineers (2007). *Seismic Rehabilitation of Existing Buildings (ASCE/SEI 41-06)*. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers.
- American Society of Civil Engineers (2010). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-10)*. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers.
- Bowden, F. P. and Tabor, D., (1973). *Friction: An introduction to Tribology*, Garden city, New York, U.S.A: Anchor Press.
- Chopra, A. K. (2012). *Dynamics of Structures-Theory and Applications to Earthquake Engineering* (4 ed). Boston, Massachusetts: Prentice Hall.
- Christopoulos, C., Filiatrault, A. (2006). *Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation*. Pavia, Italy: Iuss Press

- Cuntó, I. (2014). *Uso de disipadores viscosos en edificios de hormigón armado en la ciudad de Guayaquil para el mejoramiento del desempeño sísmico* (Trabajo de Grado Previo a la Obtención del Título de Ingeniero Civil). Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.
- Computers & Structures Inc. (2013). *CSI Analysis Reference Manual*. Berkeley, California, USA.
- Filiatrault, A., Cherry, S. (1988). *Seismic Design of Friction Damped Braced Steel Plane Frames by Energy Methods*. ASCE Journal of Structural Engineering, 116 (5), 1334-1355.
- Filiatrault, A., Cherry, S. (1990). *Seismic Design Spectra for Friction Damped Structures*. ASCE Journal of Structural Engineering, 116 (5), 1334-1355.
- Kramer, S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.
- Khashaee, P., Mohraz, B., Sadek, F., Lew, HS., Gross, J. (2003). *Distribution of Earthquake Input Energy in Structures*. United States Department of Commerce Technology Administration, National Institute of Standards and Technology.
- Lama, W. (2013). *Análisis y Diseño de Estructuras de Acero con Disipadores Viscoelásticos para la Ciudad de Guayaquil* (Trabajo de Grado Previo a la Obtención del Título de Ingeniero Civil). Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.
- Mera Ortiz, W., Villacrés Sánchez, A., Argudo Rodríguez, J., (1999). *Proyecto RADIUS Volumen III: Historia de la vulnerabilidad, estimación de pérdidas y recomendaciones para reducir el riesgo sísmico en edificaciones de Guayaquil*.

- Moehle, J., (2015). *Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings*. California, USA: Mc Graw Hill.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2014). NEC. *Capítulo 2: Peligro Sísmico y Requisitos de Diseño Sismo-resistente*, Ecuador.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2014). NEC. *Capítulo 1: Cargas y Materiales*, Ecuador.
- Ortiz, C. (2013). *Sismotectónica y peligrosidad sísmica en Ecuador*. (Trabajo de Maestría, Universidad Complutense de Madrid). Recuperado de <http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/bitstream/28000/1221/1/T-SENESCYT-000352.pdf>.
- Pall, A. S. and Marsh, C. (1980). *Friction Joints for Seismic Control of Large Panel Structures*, Journal of Prestressed Concrete Institute, 25 (6), 38-61.
- Pall, A. S. and Marsh, C. (1982). *Response of Friction Damped Braced Frames*, Journal of Structure Division, ASCE, 108(ST6), 1313-1323.
- Sánchez, A. (2014). *Análisis y Evaluación de la Aplicación de Disipadores Histerético de Fluencia para el mejoramiento del desempeño sísmico de estructuras de Hormigón Armado en la ciudad de Guayaquil* (Trabajo de Grado Previo a la Obtención del Título de Ingeniero Civil). Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.
- Soong, T., & Dargush, G. (1997). *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*. West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd.
- Villacrés Sánchez, A., Argudo Rodríguez, J., Peña Pozo, J., & Vera, S. (1999). *Proyecto RADIUS Volumen II: Evaluación del Peligro Sísmico, Definición del Sismo adoptado para el Escenario Sísmico de Radius y Evaluación de Peligros Colaterales*. Guayaquil.

- Villarreal, G., & Oviedo, R. (2009). *Edificaciones con Disipadores de Energía (Libro Premio Nacional ANR 2008)*. Recuperado a partir de <http://gennervillarrealcastro.blogspot.com/2012/07/libros-digitales-del-drgenner.html>
- Villaverde, R. (2009). *Fundamental Concepts of Earthquake Engineering*. BocaRaton, Florida: CRC Press.
- Vera, X., Bray, J., Pestana, J., Kayen, R., Tandazo, E., Vera, J., & Mera, W. (2006). *Site Characterization and Seismic Zonation of Guayaquil City, Ecuador*. Presentado en Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, California. Recuperado de <http://walrus.wr.usgs.gov/reports/reprints/8NCEE-001467.pdf>.
- Toledo Espinoza, V. (2011). *Análisis no lineal de elementos de Concreto Armado: Introducción y requerimientos de la Ingeniería Sísmica Basada en Desempeño*. Recuperado a partir de <http://civilgeeks.com/2014/05/24/manual-de-ingenieria-sismica-basada-en-desempeno/>.
- Toledo Espinoza, V. (2011). *Análisis no lineal de elementos de Concreto Armado: Cálculo de Edificios de Concreto Armado con Sap2000*. Recuperado a partir de <http://civilgeeks.com/2014/05/24/manual-de-ingenieria-sismica-basada-en-desempeno/>.
- Toledo Espinoza, V. (2011). *Análisis no lineal de elementos de Concreto Armado: Pushover – Análisis no lineal estático en edificios de Concreto Armado*. Recuperado a partir de <http://civilgeeks.com/2014/05/24/manual-de-ingenieria-sismica-basada-en-desempeno/>.

ANEXOS

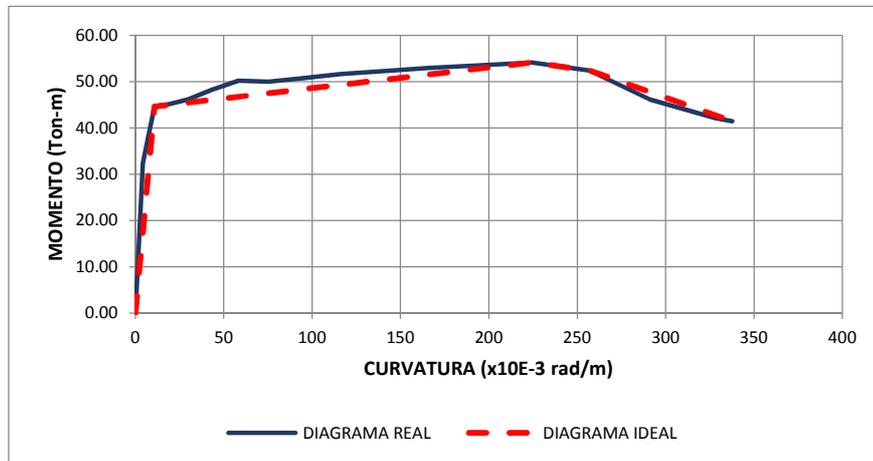
TRABAJO DE GRADO

ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DE DISIPADORES DE FRICCIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.

DIAGRAMA DE MOMENTO CURVATURA

PORTICO= 4 Pisos
 SECCION= 350 mm x 600mm
 ELEMENTO= Viga-Momento Negativo
 ARMADO= Sup. 3φ22mm + 2φ25mm
 Inf. 3φ22mm
 1Est.φ10mm C100/150/100mm

DIAGRAMA REAL			DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (rad/m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)
0.0000	0	0.00	0	0.00
0.0043	4	32.40	11	44.64
0.0108	11	44.64	224	54.10
0.0194	19	45.19	257	52.42
0.0302	30	46.21	338	41.43
0.0432	43	48.21		
0.0583	58	50.16		
0.0755	76	49.97		
0.0950	95	50.77		
0.1165	117	51.62		
0.1403	140	52.26		
0.1662	166	52.92		
0.1942	194	53.52		
0.2244	224	54.10		
0.2568	257	52.42		
0.2913	291	46.12		
0.3280	328	42.12		
0.3377	338	41.43		



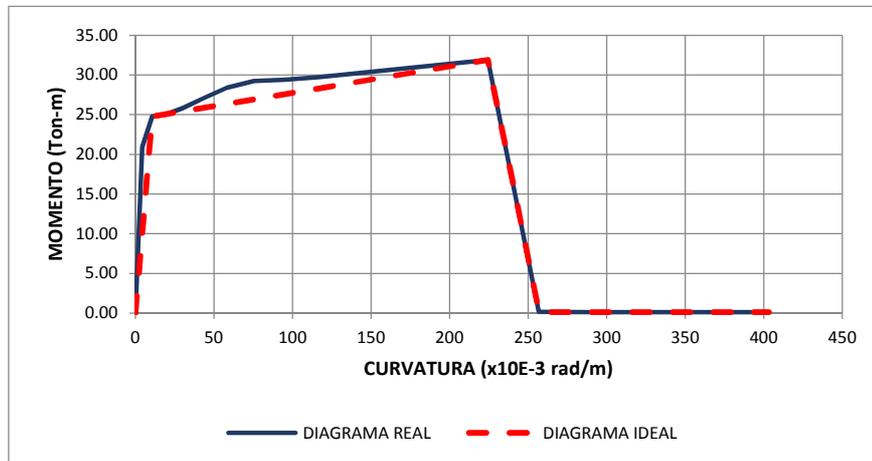
TRABAJO DE GRADO

ANALISIS DE LA APLICACIÓN DE DISIPADORES DE FRICCIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO SISMICO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGON ARMADO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.

DIAGRAMA DE MOMENTO CURVATURA

PORTICO= 4 Pisos
 SECCION= 350 mm x 600mm
 ELEMENTO= Viga-Momento Positivo
 ARMADO= Sup. 3φ22mm + 2φ25mm
 Inf. 3φ22mm
 1Est.φ10mm C100/150/100mm

DIAGRAMA REAL			DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (rad/m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)
0.0000	0	0.00	0	0.00
0.0043	4	20.90	11	24.78
0.0108	11	24.78	224	31.89
0.0194	19	25.03	257	0.12
0.0302	30	25.83	403	0.12
0.0432	43	27.07		
0.0583	58	28.41		
0.0755	76	29.25		
0.0950	95	29.39		
0.1165	117	29.73		
0.1403	140	30.19		
0.1662	166	30.72		
0.1942	194	31.29		
0.2244	224	31.89		
0.2568	257	0.16		
0.2913	291	0.14		
0.3280	328	0.14		
0.3669	367	0.14		
0.3874	387	0.12		
0.4033	403	0.14		



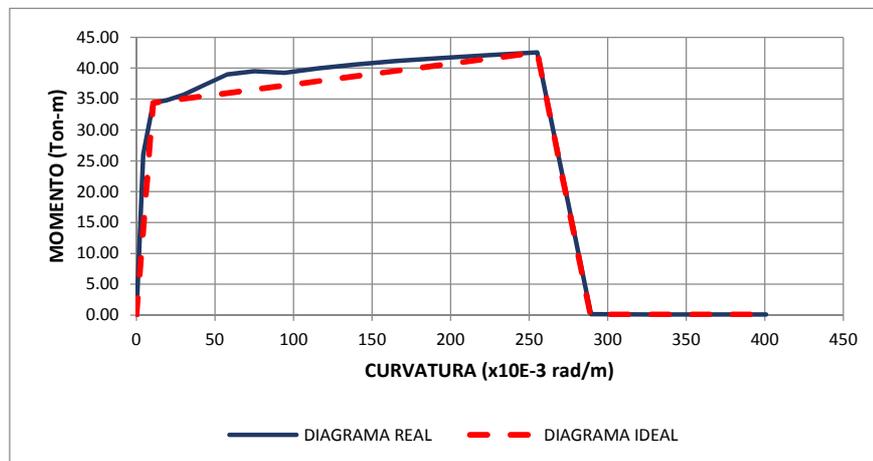
TRABAJO DE GRADO

ANALISIS DE LA APLICACIÓN DE DISIPADORES DE FRICCIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO SISMICO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGON ARMADO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.

DIAGRAMA DE MOMENTO CURVATURA

PORTICO= 4 Pisos
 SECCION= 250 mm x 600mm
 ELEMENTO= Viga-Momento Negativo
 ARMADO= Sup. 3φ18mm + 2φ22mm
 Inf. 3φ18mm
 1Est.φ10mm C100/150/100mm

DIAGRAMA REAL			DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (rad/m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)
0.0000	0	0.00	0	0.00
0.0043	4	26.01	11	34.38
0.0107	11	34.38	255	42.55
0.0193	19	34.79	289	0.10
0.0300	30	35.66	401	0.10
0.0429	43	37.24		
0.0579	58	38.97		
0.0750	75	39.53		
0.0943	94	39.25		
0.1158	116	40.00		
0.1394	139	40.57		
0.1651	165	41.14		
0.1930	193	41.62		
0.2230	223	42.11		
0.2551	255	42.55		
0.2894	289	0.16		
0.3259	326	0.12		
0.3645	365	0.10		
0.3849	385	0.11		
0.4007	401	0.10		



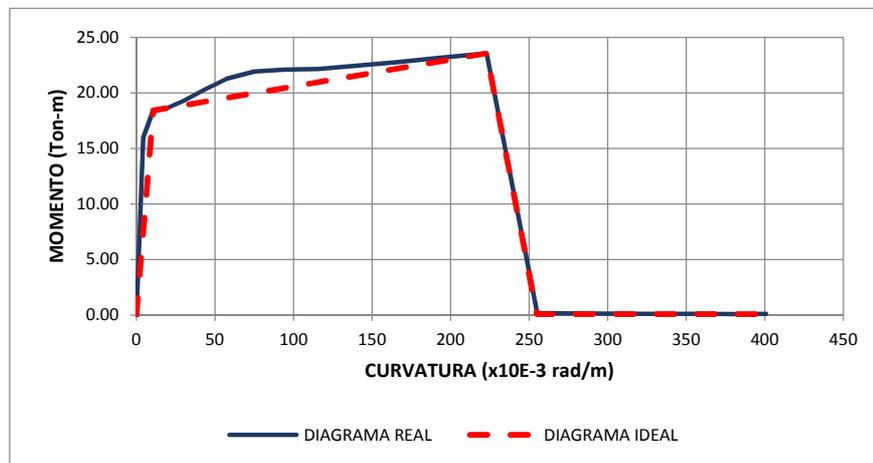
TRABAJO DE GRADO

ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DE DISIPADORES DE FRICCIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO SISMICO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.

DIAGRAMA DE MOMENTO CURVATURA

PORTICO= 4 Pisos
 SECCION= 250 mm x 600mm
 ELEMENTO= Viga-Momento Positivo
 ARMADO= Sup. 3φ18mm + 2φ22mm
 Inf. 3φ18mm
 1Est.φ10mm C100/150/100mm

DIAGRAMA REAL			DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (rad/m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)
0.0000	0	0.00	0	0.00
0.0043	4	15.98	11	18.41
0.0107	11	18.41	223	23.57
0.0193	19	18.61	255	0.10
0.0300	30	19.27	401	0.10
0.0429	43	20.24		
0.0579	58	21.29		
0.0750	75	21.91		
0.0943	94	22.09		
0.1158	116	22.16		
0.1394	139	22.43		
0.1651	165	22.76		
0.1930	193	23.15		
0.2230	223	23.57		
0.2551	255	0.18		
0.2894	289	0.14		
0.3259	326	0.12		
0.3645	365	0.11		
0.3849	385	0.10		
0.4007	401	0.12		



TRABAJO DE GRADO

ANALISIS DE LA APLICACIÓN DE DISIPADORES DE FRICCIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO SISMICO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGON ARMADO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.

DIAGRAMA DE MOMENTO CURVATURA

PORTICO= 4 Pisos

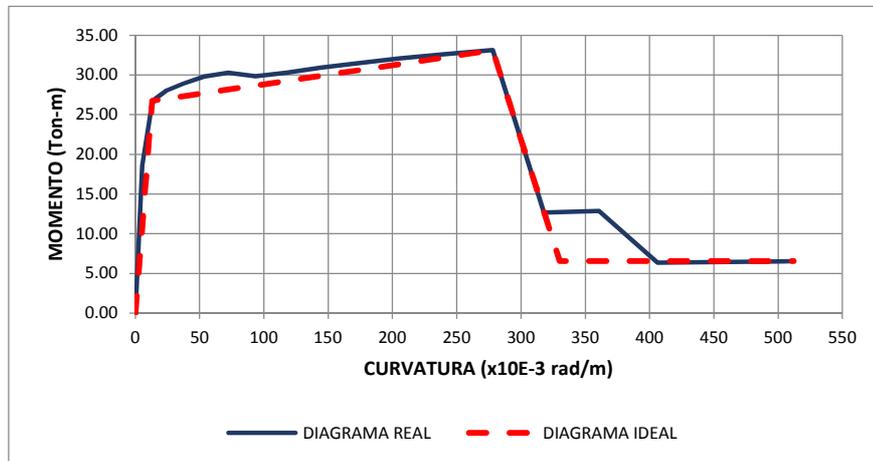
ELEMENTO= Columna

SECCION= 500 mm x 500mm

ARMADO= 16φ16mm

3Est.φ10mm C100/150/100mm

DIAGRAMA REAL			DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (rad/m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)
0.0000	0	0.00	0	0.00
0.0053	5	18.60	13	26.73
0.0134	13	26.73	278	33.12
0.0240	24	28.05	318	12.69
0.0374	37	28.93	330	6.55
0.0534	53	29.81	512	6.55
0.0721	72	30.30		
0.0935	94	29.84		
0.1176	118	30.27		
0.1443	144	30.91		
0.1737	174	31.51		
0.2057	206	32.09		
0.2404	240	32.61		
0.2779	278	33.12		
0.3179	318	12.69		
0.3607	361	12.88		
0.4061	406	6.36		
0.4542	454	6.44		
0.5049	505	6.53		
0.5116	512	6.55		



TRABAJO DE GRADO

ANALISIS DE LA APLICACIÓN DE DISIPADORES DE FRICCIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO SISMICO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGON ARMADO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.

DIAGRAMA DE MOMENTO CURVATURA

PORTICO= 4 Pisos

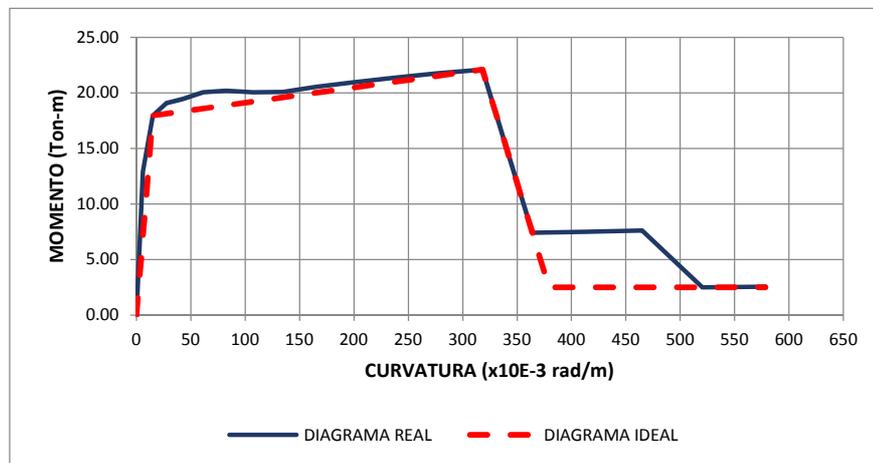
ELEMENTO= Columna

SECCION= 450 mm x 450mm

ARMADO= 12φ16mm

3Est.φ10mm C100/150/100mm

DIAGRAMA REAL			DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (rad/m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)
0.0000	0	0.00	0	0.00
0.0061	6	12.94	15	17.96
0.0153	15	17.96	318	22.11
0.0275	28	19.07	364	7.41
0.0428	43	19.45	379	2.51
0.0612	61	20.04	578	2.51
0.0826	83	20.20		
0.1071	107	20.06		
0.1346	135	20.09		
0.1652	165	20.55		
0.1989	199	20.95		
0.2356	236	21.35		
0.2754	275	21.73		
0.3182	318	22.11		
0.3641	364	7.41		
0.4131	413	7.51		
0.4651	465	7.63		
0.5202	520	2.51		
0.5783	578	2.56		



TRABAJO DE GRADO

ANALISIS DE LA APLICACIÓN DE DISIPADORES DE FRICCIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO SISMICO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGON ARMADO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.

DIAGRAMA DE MOMENTO CURVATURA

PORTICO= 4 Pisos

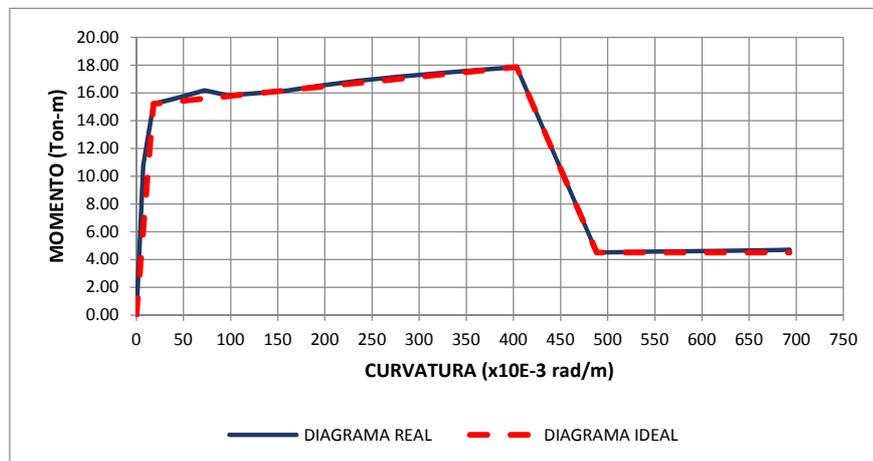
ELEMENTO= Columna

SECCION= 400 mm x 400mm

ARMADO= 12φ16mm

2Est.φ10mm C100/150/100mm

DIAGRAMA REAL			DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (rad/m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)
0.0000	0	0.00	0	0.00
0.0072	7	10.77	18	15.22
0.0181	18	15.22	403	17.85
0.0326	33	15.45	488	4.50
0.0507	51	15.76	693	4.50
0.0724	72	16.19		
0.0977	98	15.82		
0.1266	127	15.98		
0.1592	159	16.15		
0.1954	195	16.52		
0.2352	235	16.86		
0.2786	279	17.17		
0.3256	326	17.45		
0.3763	376	17.71		
0.4034	403	17.85		
0.4884	488	4.50		
0.5499	550	4.57		
0.6150	615	4.63		
0.6838	684	4.69		
0.6928	693	4.71		



TRABAJO DE GRADO

ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DE DISIPADORES DE FRICCIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.

DIAGRAMA DE MOMENTO CURVATURA

PORTICO= 4 Pisos

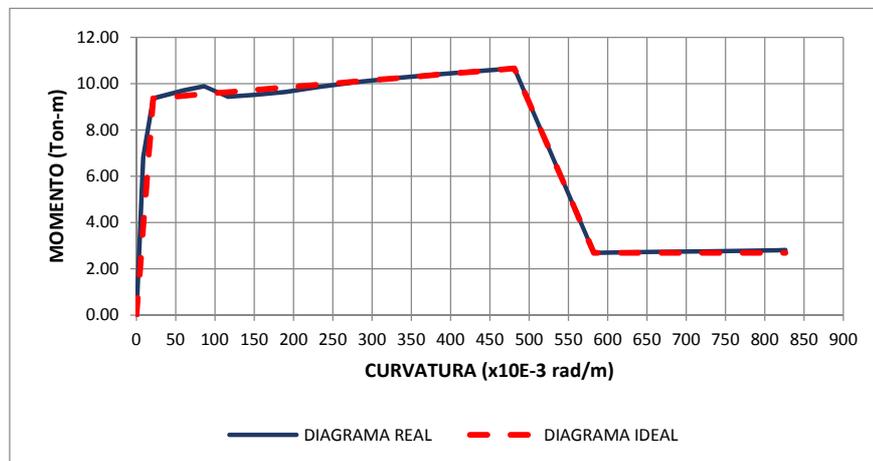
ELEMENTO= Columna

SECCION= 350 mm x 350mm

ARMADO= 8φ16mm

2Est.φ10mm C100/150/100mm

DIAGRAMA REAL			DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (rad/m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)
0.0000	0	0.00	0	0.00
0.0086	9	6.82	22	9.36
0.0216	22	9.36	481	10.66
0.0388	39	9.51	582	2.69
0.0604	60	9.71	826	2.69
0.0863	86	9.89		
0.1165	117	9.44		
0.1510	151	9.51		
0.1898	190	9.63		
0.2330	233	9.85		
0.2804	280	10.06		
0.3322	332	10.25		
0.3883	388	10.42		
0.4487	449	10.58		
0.4810	481	10.66		
0.5824	582	2.69		
0.6557	656	2.73		
0.7334	733	2.76		
0.8154	815	2.80		
0.8261	826	2.81		



TRABAJO DE GRADO

ANALISIS DE LA APLICACIÓN DE DISIPADORES DE FRICCIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.

CÁLCULO DE FUERZAS DE DESLIZAMIENTO DE DISIPADORES

1.0 PROPIEDADES DINÁMICAS SISTEMA

Nf	4 Pisos	
W	552.10 Ton	Peso sísmico considerado para el análisis*
Tu	0.75655 seg	Período Natural de la estructura sin arriostramiento*
Tb	0.30675 seg	Período Natural de la estructura con arriostramiento*
		*Datos tomados de análisis de SAP2000
Tg	0.40 seg	Período Predominante de excitación sísmica
a(g)=	0.40	PGA característico
Tb/Tu	0.405	
Tg/Tu	0.529	
Q	1.297	Factor Filiatrault and Cherry
Vo/W	0.519	
Vo	286.44 Ton	
Vsi	35.81 Ton	

2.0 PROPIEDADES DISIPADORES

PISO	PORTICO DE 4 PISOS		
	FUERZA DESLIZAMIENTO	SECCION	RIGIDEZ DISIPADOR
1	22.38 Ton	2C 200x200x12 mm	24424.96 Ton/m
2	20.89 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m
3	20.89 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m
4	20.89 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m

TRABAJO DE GRADO

ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DE DISIPADORES DE FRICCIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.

DIAGRAMA DE MOMENTO CURVATURA

PORTICO= 8 Pisos

SECCION= 350 mm x 700mm

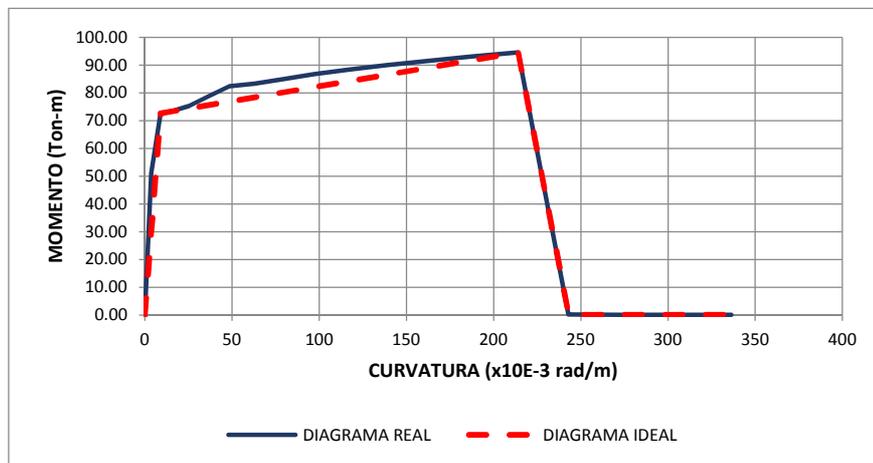
ELEMENTO= Viga-Momento Negativo

ARMADO= Sup. 4φ25mm + 2φ25mm

Inf. 4φ25mm

2Est.φ10mm C100/150/100mm

DIAGRAMA REAL			DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (rad/m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)
0.0000	0	0.00	0	0.00
0.0036	4	51.11	9	72.63
0.0090	9	72.63	214	94.63
0.0162	16	73.57	243	0.17
0.0252	25	75.22	336	0.17
0.0360	36	78.61		
0.0486	49	82.43		
0.0630	63	83.37		
0.0792	79	84.90		
0.0972	97	86.77		
0.1170	117	88.34		
0.1386	139	89.98		
0.1619	162	91.47		
0.1871	187	93.05		
0.2141	214	94.63		
0.2429	243	0.22		
0.2735	274	0.17		
0.3059	306	0.16		
0.3230	323	0.17		
0.3363	336	0.17		



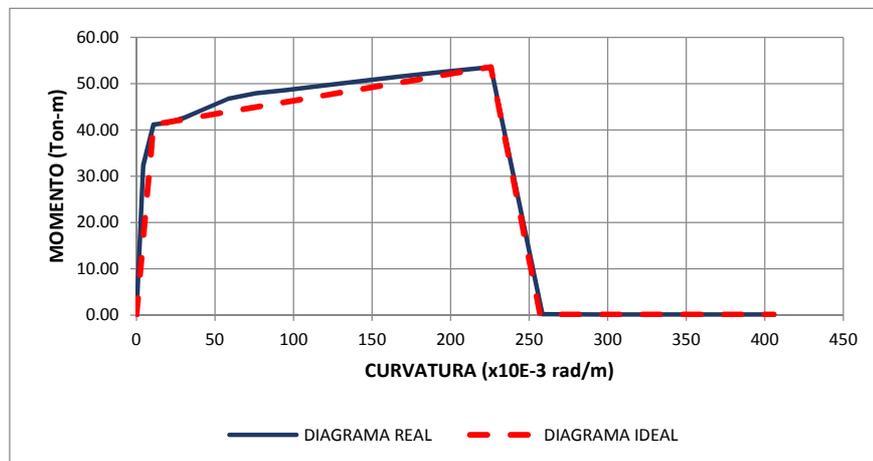
TRABAJO DE GRADO

ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DE DISIPADORES DE FRICCIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO SISMICO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.

DIAGRAMA DE MOMENTO CURVATURA

PORTICO= 8 Pisos
 SECCION= 350 mm x 700mm
 ELEMENTO= Viga-Momento Positivo
 ARMADO= Sup. 4φ25mm + 2φ25mm
 Inf. 4φ25mm
 2Est. φ10mm C100/150/100mm

DIAGRAMA REAL			DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (rad/m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)
0.0000	0	0.00	0	0.00
0.0043	4	32.35	11	41.17
0.0109	11	41.17	226	53.59
0.0195	20	41.51	257	0.15
0.0304	30	42.60	406	0.15
0.0434	43	44.56		
0.0586	59	46.72		
0.0760	76	47.93		
0.0955	96	48.60		
0.1172	117	49.52		
0.1411	141	50.50		
0.1671	167	51.49		
0.1953	195	52.54		
0.2257	226	53.59		
0.2583	258	0.20		
0.2930	293	0.15		
0.3299	330	0.17		
0.3690	369	0.16		
0.3896	390	0.15		
0.4056	406	0.17		



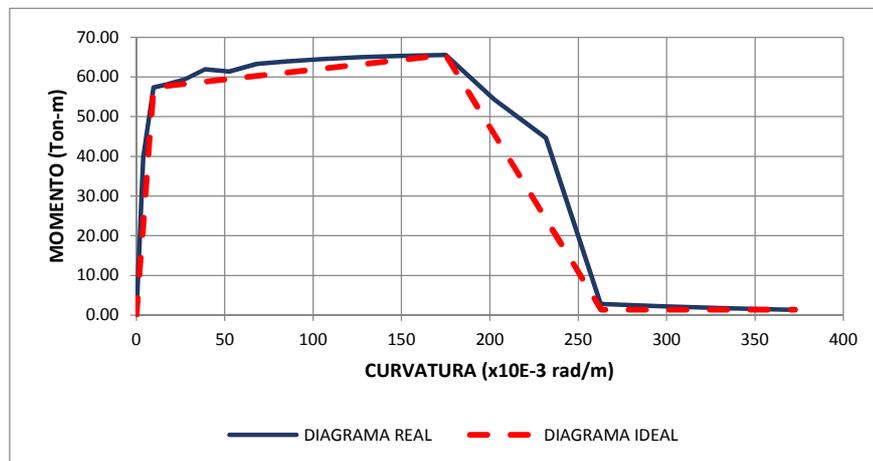
TRABAJO DE GRADO

ANALISIS DE LA APLICACIÓN DE DISIPADORES DE FRICCIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO SISMICO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGON ARMADO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.

DIAGRAMA DE MOMENTO CURVATURA

PORTICO= 8 Pisos
 SECCION= 350 mm x 650mm
 ELEMENTO= Viga-Momento Negativo
 ARMADO= Sup. 3φ22mm + 3φ25mm
 Inf. 2φ22mm + 1φ18mm
 1Est.φ10mm C100/150/100mm

DIAGRAMA REAL			DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (rad/m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)
0.0000	0	0.00	0	0.00
0.0039	4	39.85	10	57.32
0.0097	10	57.32	175	65.58
0.0175	18	58.15	263	1.41
0.0272	27	59.33	373	1.41
0.0389	39	61.91		
0.0525	53	61.34		
0.0681	68	63.29		
0.0856	86	63.94		
0.1051	105	64.50		
0.1265	127	65.02		
0.1498	150	65.33		
0.1751	175	65.58		
0.2024	202	54.37		
0.2316	232	44.64		
0.2627	263	2.86		
0.2958	296	2.24		
0.3308	331	1.78		
0.3678	368	1.42		
0.3726	373	1.41		



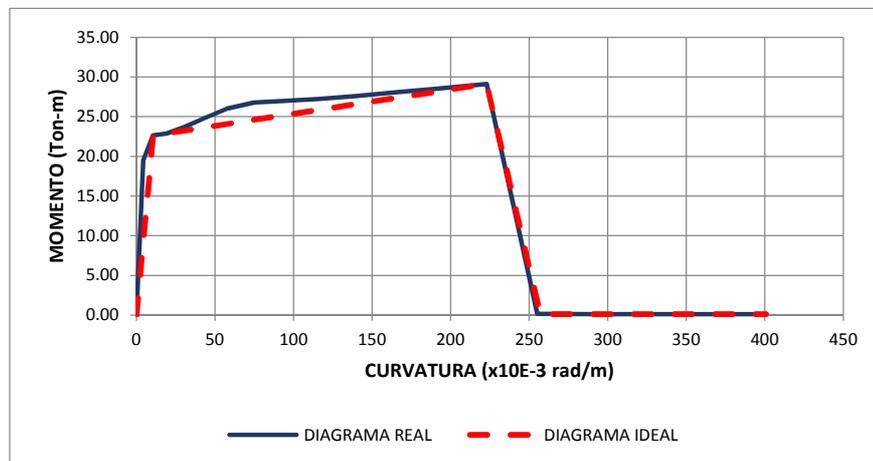
TRABAJO DE GRADO

ANALISIS DE LA APLICACIÓN DE DISIPADORES DE FRICCIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO SISMICO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGON ARMADO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.

DIAGRAMA DE MOMENTO CURVATURA

PORTICO= 8 Pisos
 SECCION= 350 mm x 650mm
 ELEMENTO= Viga-Momento Positivo
 ARMADO= Sup. 3φ22mm + 3φ25mm
 Inf. 2φ22mm + 1φ18mm
 1Est.φ10mm C100/150/100mm

DIAGRAMA REAL			DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (rad/m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)
0.0000	0	0.00	0	0.00
0.0043	4	19.42	11	22.63
0.0107	11	22.63	223	29.10
0.0193	19	22.87	257	0.12
0.0300	30	23.63	401	0.12
0.0429	43	24.79		
0.0579	58	26.02		
0.0750	75	26.80		
0.0943	94	26.97		
0.1158	116	27.21		
0.1394	139	27.61		
0.1651	165	28.06		
0.1930	193	28.57		
0.2230	223	29.10		
0.2551	255	0.17		
0.2894	289	0.14		
0.3259	326	0.14		
0.3645	365	0.14		
0.3849	385	0.12		
0.4007	401	0.14		



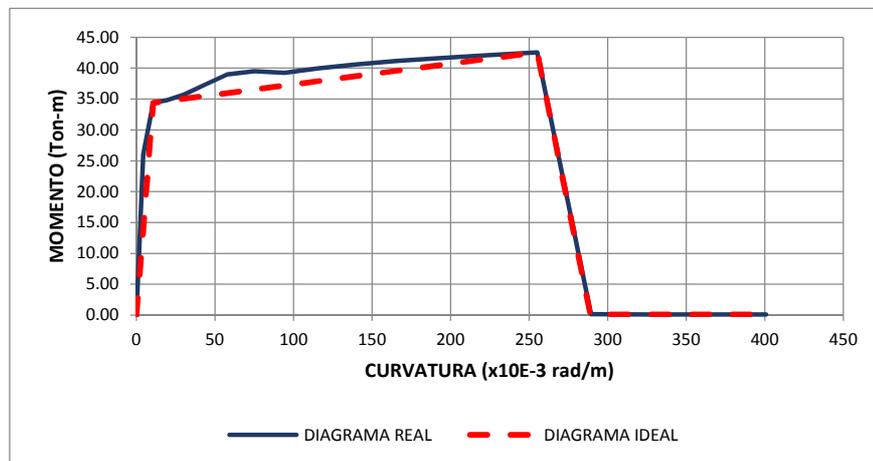
TRABAJO DE GRADO

ANALISIS DE LA APLICACIÓN DE DISIPADORES DE FRICCIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO SISMICO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGON ARMADO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.

DIAGRAMA DE MOMENTO CURVATURA

PORTICO= 4 Pisos
 SECCION= 250 mm x 600mm
 ELEMENTO= Viga-Momento Negativo
 ARMADO= Sup. 3φ18mm + 2φ22mm
 Inf. 3φ18mm
 1Est. φ10mm C100/150/100mm

DIAGRAMA REAL			DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (rad/m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)
0.0000	0	0.00	0	0.00
0.0043	4	26.01	11	34.38
0.0107	11	34.38	255	42.55
0.0193	19	34.79	289	0.10
0.0300	30	35.66	401	0.10
0.0429	43	37.24		
0.0579	58	38.97		
0.0750	75	39.53		
0.0943	94	39.25		
0.1158	116	40.00		
0.1394	139	40.57		
0.1651	165	41.14		
0.1930	193	41.62		
0.2230	223	42.11		
0.2551	255	42.55		
0.2894	289	0.16		
0.3259	326	0.12		
0.3645	365	0.10		
0.3849	385	0.11		
0.4007	401	0.10		



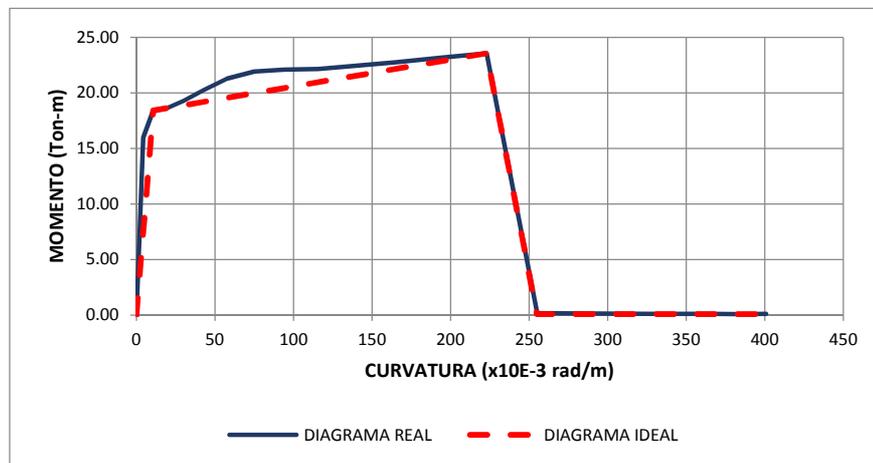
TRABAJO DE GRADO

ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DE DISIPADORES DE FRICCIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.

DIAGRAMA DE MOMENTO CURVATURA

PORTICO= 4 Pisos
 SECCION= 250 mm x 600mm
 ELEMENTO= Viga-Momento Positivo
 ARMADO= Sup. 3φ18mm + 2φ22mm
 Inf. 3φ18mm
 1Est.φ10mm C100/150/100mm

DIAGRAMA REAL			DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (rad/m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)
0.0000	0	0.00	0	0.00
0.0043	4	15.98	11	18.41
0.0107	11	18.41	223	23.57
0.0193	19	18.61	255	0.10
0.0300	30	19.27	401	0.10
0.0429	43	20.24		
0.0579	58	21.29		
0.0750	75	21.91		
0.0943	94	22.09		
0.1158	116	22.16		
0.1394	139	22.43		
0.1651	165	22.76		
0.1930	193	23.15		
0.2230	223	23.57		
0.2551	255	0.18		
0.2894	289	0.14		
0.3259	326	0.12		
0.3645	365	0.11		
0.3849	385	0.10		
0.4007	401	0.12		



TRABAJO DE GRADO

ANALISIS DE LA APLICACIÓN DE DISIPADORES DE FRICCIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO SISMICO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGON ARMADO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.

DIAGRAMA DE MOMENTO CURVATURA

PORTICO= 8 Pisos

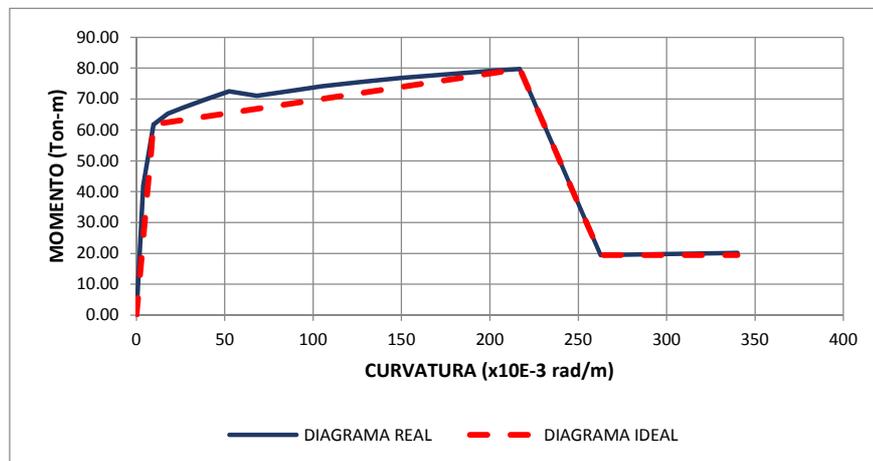
ELEMENTO= Columna

SECCION= 650 mm x 650mm

ARMADO= 20φ18mm

5Est.φ10mm C100/150/100mm

DIAGRAMA REAL			DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (rad/m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)
0.0000	0	0.00	0	0.00
0.0039	4	42.04	10	61.74
0.0097	10	61.74	217	79.79
0.0175	18	65.20	263	19.43
0.0272	27	67.30	340	19.43
0.0389	39	69.84		
0.0525	53	72.47		
0.0681	68	71.08		
0.0856	86	72.51		
0.1051	105	74.12		
0.1265	127	75.50		
0.1498	150	76.80		
0.1751	175	78.01		
0.2024	202	79.20		
0.2170	217	79.79		
0.2627	263	19.43		
0.2958	296	19.73		
0.3308	331	20.05		
0.3400	340	20.13		



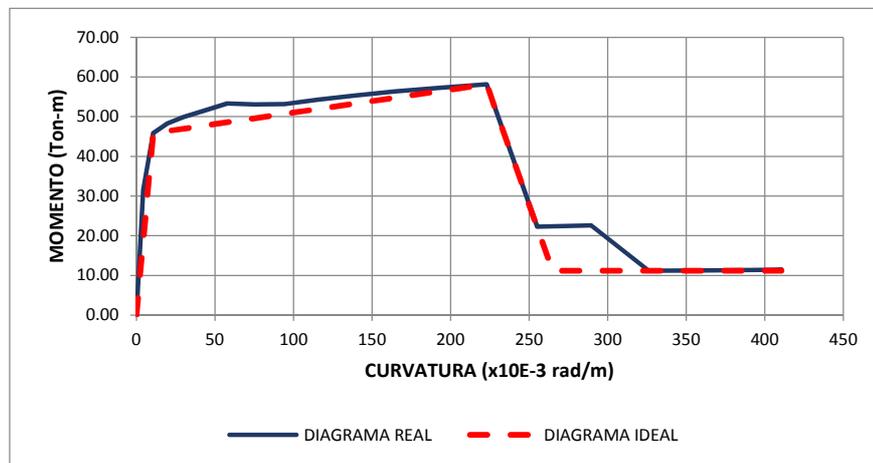
TRABAJO DE GRADO

ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DE DISIPADORES DE FRICCIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.

DIAGRAMA DE MOMENTO CURVATURA

PORTICO= 8 Pisos
 SECCION= 600 mm x 600mm
 ELEMENTO= Columna
 ARMADO= 16φ18mm
 3Est.φ10mm C100/150/100mm

DIAGRAMA REAL			DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (rad/m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)
0.0000	0	0.00	0	0.00
0.0043	4	31.65	11	45.84
0.0107	11	45.84	223	58.13
0.0193	19	48.20	255	22.27
0.0300	30	49.84	265	11.16
0.0429	43	51.45	411	11.16
0.0579	58	53.34		
0.0750	75	53.07		
0.0943	94	53.21		
0.1158	116	54.33		
0.1394	139	55.36		
0.1651	165	56.37		
0.1930	193	57.26		
0.2230	223	58.13		
0.2551	255	22.27		
0.2894	289	22.64		
0.3259	326	11.16		
0.3645	365	11.30		
0.4052	405	11.47		
0.4106	411	11.49		



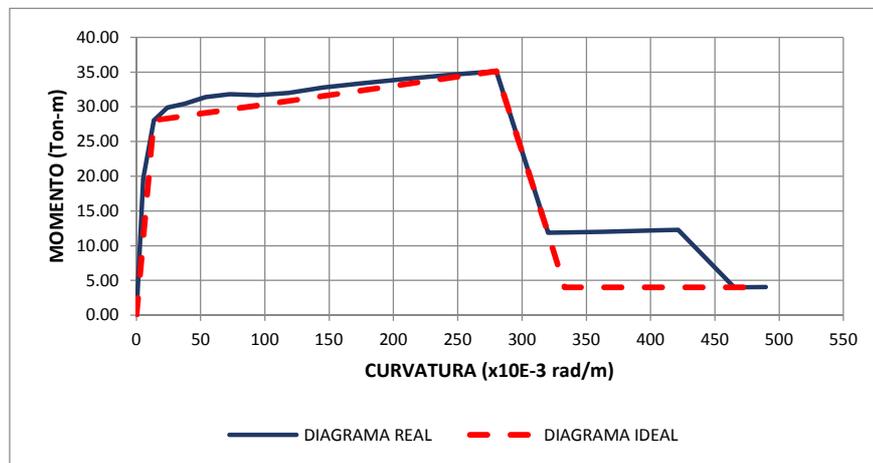
TRABAJO DE GRADO

ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DE DISIPADORES DE FRICCIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO SISMICO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.

DIAGRAMA DE MOMENTO CURVATURA

PORTICO= 8 Pisos
 SECCION= 500 mm x 500mm
 ELEMENTO= Columna
 ARMADO= 12φ18mm
 3Est.φ10mm C100/150/100mm

DIAGRAMA REAL			DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (rad/m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)
0.0000	0	0.00	0	0.00
0.0054	5	19.68	14	28.02
0.0135	14	28.02	280	35.11
0.0242	24	29.90	320	11.85
0.0377	38	30.44	333	4.03
0.0538	54	31.37	490	4.03
0.0727	73	31.83		
0.0942	94	31.69		
0.1185	119	32.00		
0.1454	145	32.75		
0.1750	175	33.36		
0.2073	207	33.97		
0.2423	242	34.56		
0.2800	280	35.11		
0.3204	320	11.85		
0.3635	364	12.02		
0.4093	409	12.22		
0.4214	421	12.26		
0.4651	465	4.03		
0.4895	490	4.04		



TRABAJO DE GRADO

ANALISIS DE LA APLICACIÓN DE DISIPADORES DE FRICCIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO SISMICO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGON ARMADO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.

DIAGRAMA DE MOMENTO CURVATURA

PORTICO= 8 Pisos

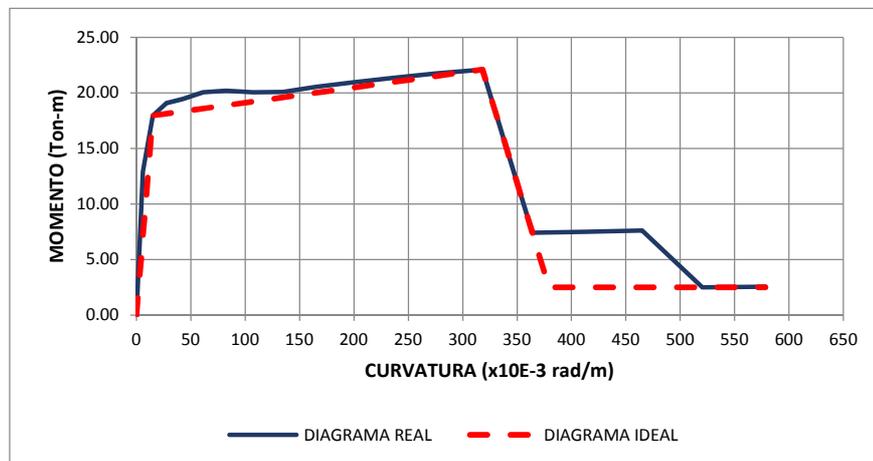
ELEMENTO= Columna

SECCION= 450 mm x 450mm

ARMADO= 12φ16mm

3Est.φ10mm C100/150/100mm

DIAGRAMA REAL			DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (rad/m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)
0.0000	0	0.00	0	0.00
0.0061	6	12.94	15	17.96
0.0153	15	17.96	318	22.11
0.0275	28	19.07	364	7.41
0.0428	43	19.45	379	2.51
0.0612	61	20.04	578	2.51
0.0826	83	20.20		
0.1071	107	20.06		
0.1346	135	20.09		
0.1652	165	20.55		
0.1989	199	20.95		
0.2356	236	21.35		
0.2754	275	21.73		
0.3182	318	22.11		
0.3641	364	7.41		
0.4131	413	7.51		
0.4651	465	7.63		
0.5202	520	2.51		
0.5783	578	2.56		



TRABAJO DE GRADO

ANALISIS DE LA APLICACIÓN DE DISIPADORES DE FRICCIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO SISMICO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.

CALCULO DE FUERZAS DE DESLIZAMIENTO DE DISIPADORES

1.0 PROPIEDADES DINAMICAS SISTEMA

Nf	8 Pisos	
W	1170.45 Ton	Peso sísmico considerado para el análisis*
Tu	0.83430 seg	Período Natural de la estructura sin arriostamiento*
Tb	0.50083 seg	Período Natural de la estructura con arriostamiento*
		*Datos tomados de análisis de SAP2000
Tg	0.40 seg	Período Predominante de excitación sísmica
a(g)=	0.40	PGA característico
Tb/Tu	0.600	
Tg/Tu	0.479	
Q	1.251	Factor Filiatrault and Cherry
Vo/W	0.500	
Vo	585.62 Ton	
Vsi	36.60 Ton	

2.0 PROPIEDADES DISIPADORES

PISO	PORTICO DE 8 PISOS		
	FUERZA DESLIZAMIENTO	SECCION	RIGIDEZ DISIPADOR
1	22.88 Ton	2C 200x200x12 mm	24424.96 Ton/m
2	21.35 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m
3	21.35 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m
4	21.35 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m
5	21.35 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m
6	21.35 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m
7	21.35 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m
8	21.35 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m

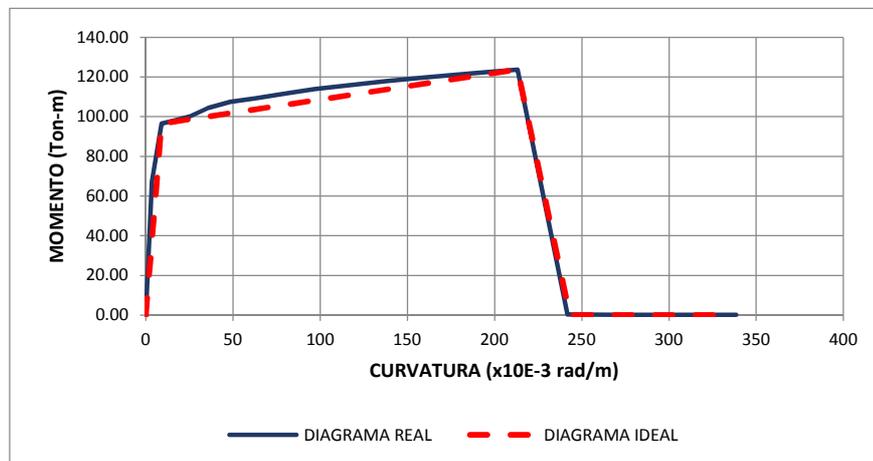
TRABAJO DE GRADO

ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DE DISIPADORES DE FRICCIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.

DIAGRAMA DE MOMENTO CURVATURA

PORTICO= 12 Pisos
 SECCION= 500 mm x 700mm
 ELEMENTO= Viga-Momento Negativo
 ARMADO= Sup. 4φ28mm + 3φ25mm
 Inf. 2φ25mm + 2φ22mm
 2Est. φ10mm C100/150/100mm

DIAGRAMA REAL			DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (rad/m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)
0.0000	0	0.00	0	0.00
0.0036	4	67.41	9	96.58
0.0090	9	96.58	213	123.71
0.0161	16	97.96	243	0.00
0.0251	25	100.03	339	0.00
0.0358	36	104.48		
0.0484	48	107.54		
0.0627	63	109.22		
0.0788	79	111.44		
0.0967	97	113.85		
0.1164	116	115.89		
0.1379	138	117.95		
0.1612	161	119.89		
0.1863	186	121.85		
0.2131	213	123.71		
0.2418	242	0.34		
0.2722	272	0.26		
0.3044	304	0.23		
0.3385	339	0.19		



TRABAJO DE GRADO

ANALISIS DE LA APLICACIÓN DE DISIPADORES DE FRICCIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO SISMICO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGON ARMADO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.

DIAGRAMA DE MOMENTO CURVATURA

PORTICO= 12 Pisos

SECCION= 500 mm x 700mm

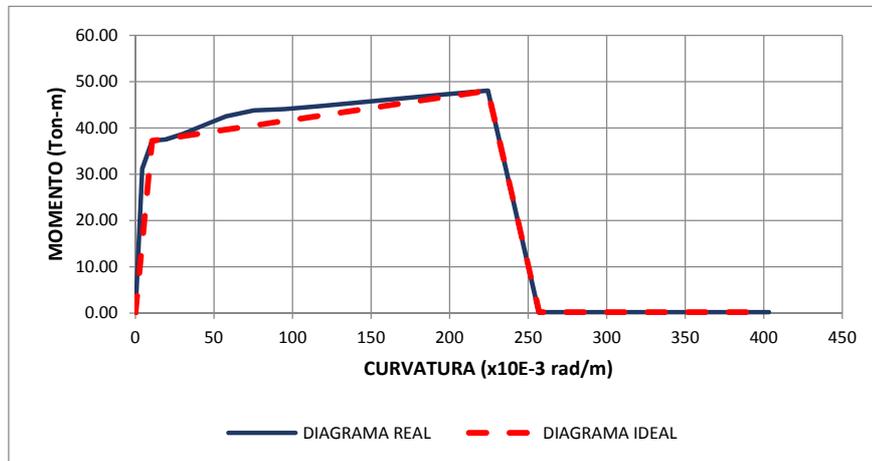
ELEMENTO= Viga-Momento Positivo

ARMADO= Sup. 4φ28mm + 3φ25mm

Inf. 2φ25mm + 2φ22mm

2Est.φ10mm C100/150/100mm

DIAGRAMA REAL			DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (rad/m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)
0.0000	0	0.00	0	0.00
0.0043	4	31.18	11	37.20
0.0108	11	37.20	224	48.08
0.0194	19	37.54	257	0.20
0.0302	30	38.69	403	0.20
0.0432	43	40.53		
0.0583	58	42.51		
0.0755	76	43.77		
0.0950	95	44.09		
0.1165	117	44.71		
0.1403	140	45.46		
0.1662	166	46.29		
0.1942	194	47.17		
0.2244	224	48.08		
0.2568	257	0.23		
0.2913	291	0.20		
0.3280	328	0.22		
0.3669	367	0.21		
0.3874	387	0.20		
0.4033	403	0.23		



TRABAJO DE GRADO

ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DE DISIPADORES DE FRICCIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.

DIAGRAMA DE MOMENTO CURVATURA

PORTICO= 12 Pisos

SECCION= 450 mm x 700mm

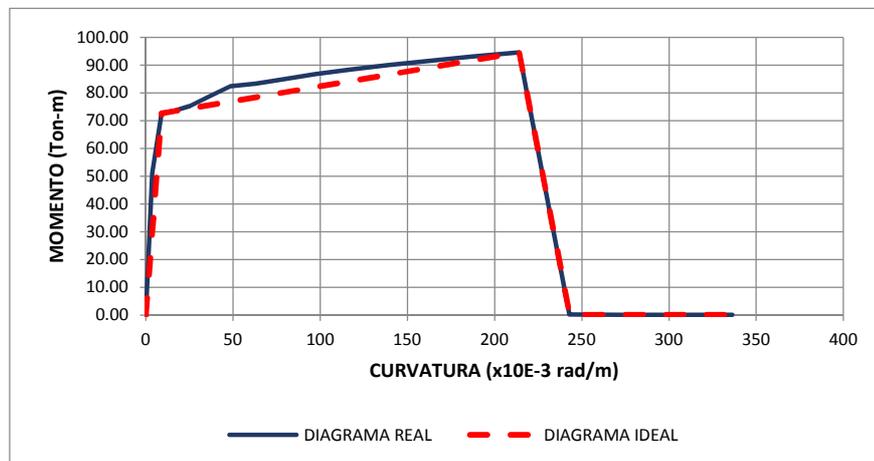
ELEMENTO= Viga-Momento Negativo

ARMADO= Sup. 2φ28mm + 5φ25mm

Inf. 4φ22mm

2Est.φ10mm C100/150/100mm

DIAGRAMA REAL			DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (rad/m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)
0.0000	0	0.00	0	0.00
0.0036	4	51.11	9	72.63
0.0090	9	72.63	214	94.63
0.0162	16	73.57	243	0.17
0.0252	25	75.22	336	0.17
0.0360	36	78.61		
0.0486	49	82.43		
0.0630	63	83.37		
0.0792	79	84.90		
0.0972	97	86.77		
0.1170	117	88.34		
0.1386	139	89.98		
0.1619	162	91.47		
0.1871	187	93.05		
0.2141	214	94.63		
0.2429	243	0.22		
0.2735	274	0.17		
0.3059	306	0.16		
0.3230	323	0.17		
0.3363	336	0.17		



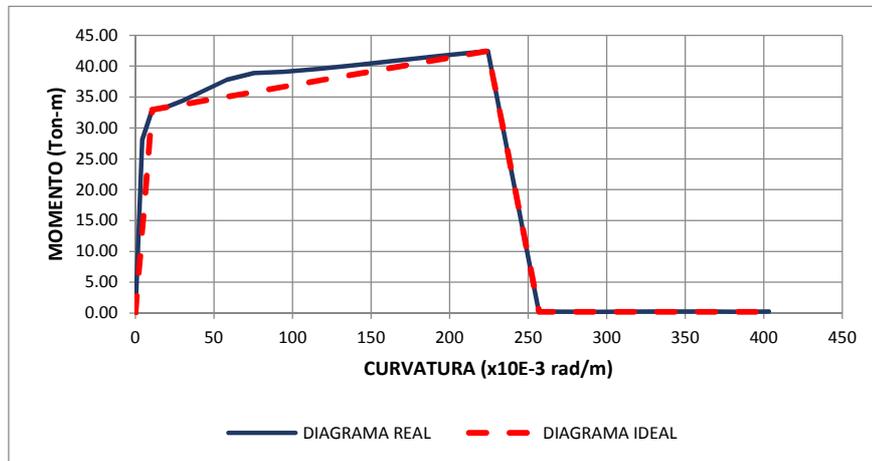
TRABAJO DE GRADO

ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DE DISIPADORES DE FRICCIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.

DIAGRAMA DE MOMENTO CURVATURA

PORTICO= 12 Pisos
 SECCION= 450 mm x 700mm
 ELEMENTO= Viga-Momento Positivo
 ARMADO= Sup. 2φ28mm + 5φ25mm
 Inf. 4φ22mm
 2Est. φ10mm C100/150/100mm

DIAGRAMA REAL			DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (rad/m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)
0.0000	0	0.00	0	0.00
0.0043	4	28.07	11	32.95
0.0108	11	32.95	224	42.46
0.0194	19	33.28	257	0.23
0.0302	30	34.36	403	0.23
0.0432	43	36.01		
0.0583	58	37.79		
0.0755	76	38.90		
0.0950	95	39.10		
0.1165	117	39.57		
0.1403	140	40.20		
0.1662	166	40.90		
0.1942	194	41.67		
0.2244	224	42.46		
0.2568	257	0.25		
0.2913	291	0.23		
0.3280	328	0.25		
0.3669	367	0.25		
0.3874	387	0.23		
0.4033	403	0.26		



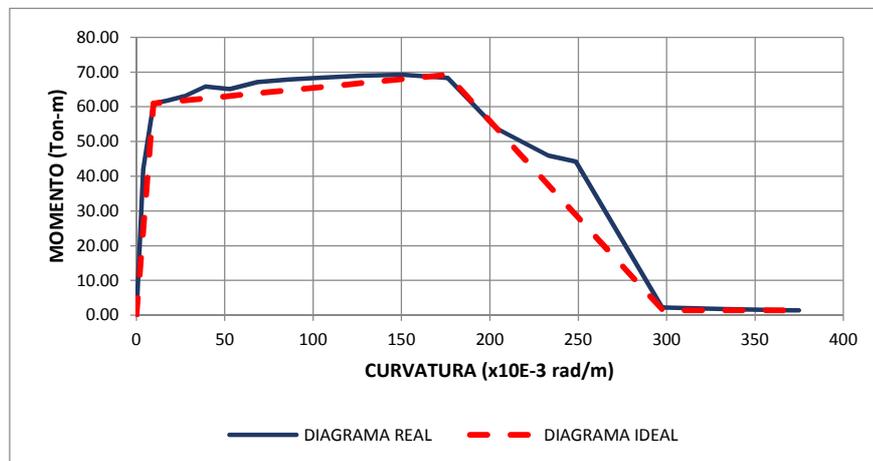
TRABAJO DE GRADO

ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DE DISIPADORES DE FRICCIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.

DIAGRAMA DE MOMENTO CURVATURA

PORTICO= 12 Pisos
 SECCION= 350 mm x 650mm
 ELEMENTO= Viga-Momento Negativo
 ARMADO= Sup. 2φ28mm + 3φ25mm
 Inf. 3φ22mm
 1Est.φ10mm C100/150/100mm

DIAGRAMA REAL			DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (rad/m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)
0.0000	0	0.00	0	0.00
0.0039	4	42.01	10	60.93
0.0098	10	60.93	176	69.23
0.0176	18	61.82	298	1.37
0.0274	27	63.06	375	1.37
0.0391	39	65.80		
0.0528	53	65.05		
0.0685	69	67.09		
0.0861	86	67.80		
0.1057	106	68.37		
0.1272	127	68.92		
0.1507	151	69.23		
0.1762	176	68.29		
0.2036	204	53.81		
0.2329	233	45.93		
0.2486	249	44.22		
0.2975	298	2.18		
0.3328	333	1.72		
0.3699	370	1.40		
0.3748	375	1.37		



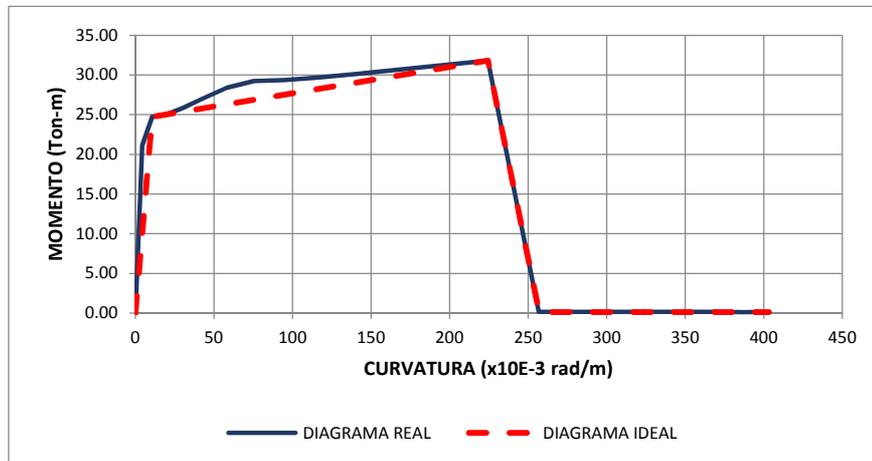
TRABAJO DE GRADO

ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DE DISIPADORES DE FRICCIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.

DIAGRAMA DE MOMENTO CURVATURA

PORTICO= 12 Pisos
 SECCION= 350 mm x 650mm
 ELEMENTO= Viga-Momento Positivo
 ARMADO= Sup. 2φ28mm + 3φ25mm
 Inf. 3φ22mm
 1Est.φ10mm C100/150/100mm

DIAGRAMA REAL			DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (rad/m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)
0.0000	0	0.00	0	0.00
0.0043	4	21.11	11	24.74
0.0108	11	24.74	224	31.81
0.0194	19	25.00	257	0.15
0.0302	30	25.82	403	0.15
0.0432	43	27.06		
0.0583	58	28.39		
0.0755	76	29.22		
0.0950	95	29.35		
0.1165	117	29.68		
0.1403	140	30.14		
0.1662	166	30.66		
0.1942	194	31.21		
0.2244	224	31.81		
0.2568	257	0.18		
0.2913	291	0.15		
0.3280	328	0.17		
0.3669	367	0.16		
0.3874	387	0.15		
0.4033	403	0.16		



TRABAJO DE GRADO

ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DE DISIPADORES DE FRICCIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO SISMICO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.

DIAGRAMA DE MOMENTO CURVATURA

PORTICO= 12 Pisos

SECCION= 250 mm x 600mm

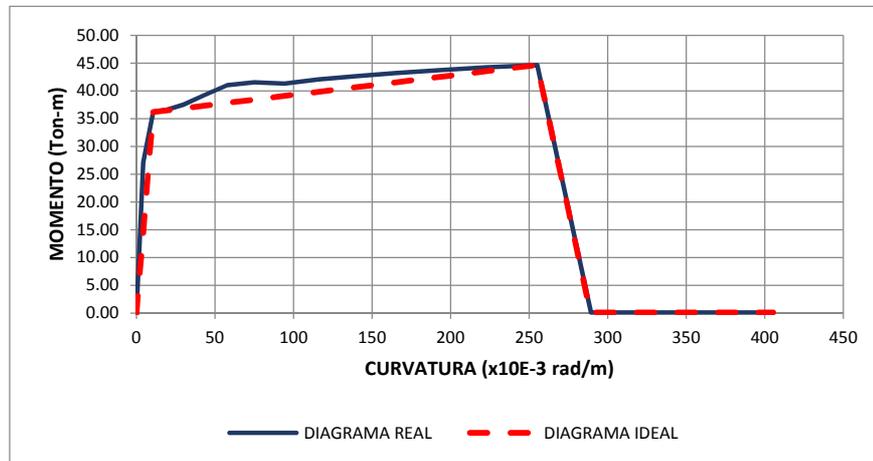
ELEMENTO= Viga-Momento Negativo

ARMADO= Sup. 2φ22mm + 2φ20mm + 1φ18mm

Inf. 3φ18mm

1Est.φ10mm C100/150/100mm

DIAGRAMA REAL			DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (rad/m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)
0.0000	0	0.00	0	0.00
0.0043	4	27.13	11	36.19
0.0107	11	36.19	255	44.67
0.0193	19	36.63	289	0.11
0.0300	30	37.52	405	0.11
0.0429	43	39.18		
0.0579	58	41.00		
0.0750	75	41.57		
0.0943	94	41.30		
0.1158	116	42.07		
0.1394	139	42.65		
0.1651	165	43.22		
0.1930	193	43.72		
0.2230	223	44.22		
0.2551	255	44.67		
0.2894	289	0.15		
0.3259	326	0.12		
0.3645	365	0.11		
0.4052	405	0.11		



TRABAJO DE GRADO

ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DE DISIPADORES DE FRICCIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO SISMICO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.

DIAGRAMA DE MOMENTO CURVATURA

PORTICO= 12 Pisos

SECCION= 250 mm x 600mm

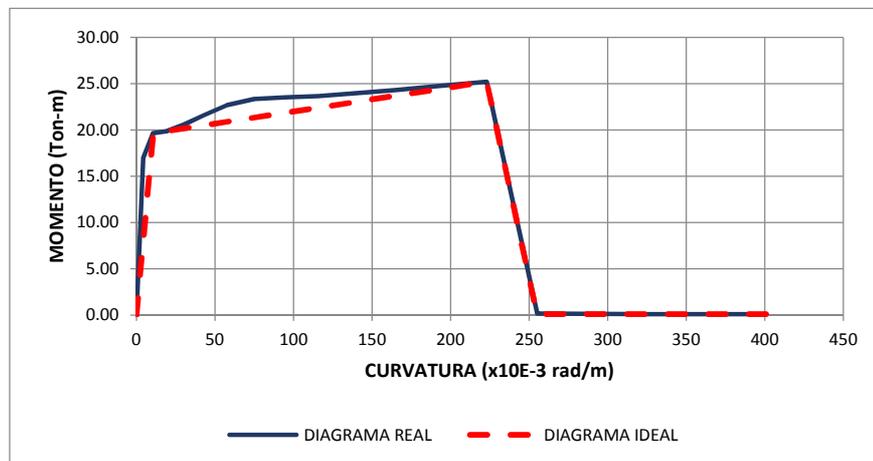
ELEMENTO= Viga-Momento Positivo

ARMADO= Sup. 2φ22mm + 2φ20mm + 1φ18mm

Inf. 3φ18mm

1Est.φ10mm C100/150/100mm

DIAGRAMA REAL			DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (rad/m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)
0.0000	0	0.00	0	0.00
0.0043	4	16.93	11	19.66
0.0107	11	19.66	223	25.19
0.0193	19	19.87	255	0.10
0.0300	30	20.55	401	0.10
0.0429	43	21.58		
0.0579	58	22.68		
0.0750	75	23.34		
0.0943	94	23.51		
0.1158	116	23.64		
0.1394	139	23.95		
0.1651	165	24.31		
0.1930	193	24.74		
0.2230	223	25.19		
0.2551	255	0.18		
0.2894	289	0.14		
0.3259	326	0.11		
0.3645	365	0.11		
0.3849	385	0.10		
0.4007	401	0.12		



TRABAJO DE GRADO

ANALISIS DE LA APLICACIÓN DE DISIPADORES DE FRICCIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO SISMICO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGON ARMADO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.

DIAGRAMA DE MOMENTO CURVATURA

PORTICO= 12 Pisos

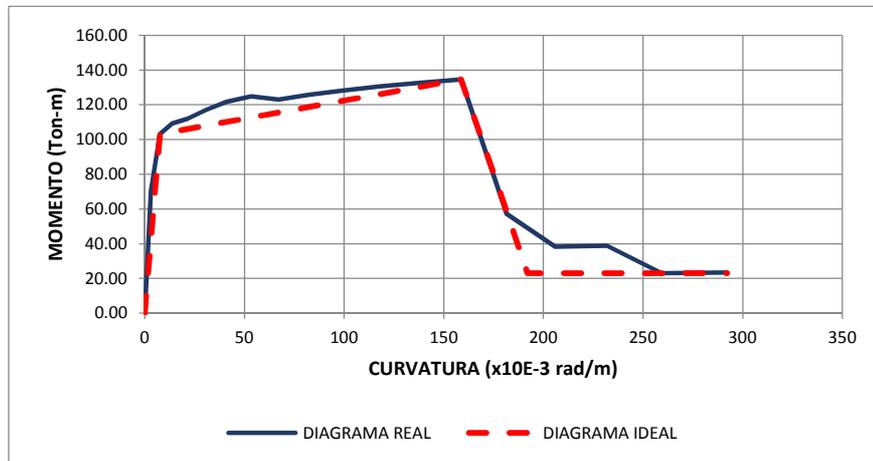
ELEMENTO= Columna

SECCION= 800 mm x 800mm

ARMADO= 24φ20mm

6Est.φ10mm C100/150/100mm

DIAGRAMA REAL			DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (rad/m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)
0.0000	0	0.00	0	0.00
0.0031	3	70.46	8	103.08
0.0076	8	103.08	159	134.53
0.0137	14	109.15	182	57.17
0.0214	21	112.06	192	23.09
0.0305	31	117.03	292	23.09
0.0412	41	121.64		
0.0534	53	124.91		
0.0671	67	122.97		
0.0824	82	125.73		
0.0992	99	128.13		
0.1175	118	130.48		
0.1373	137	132.58		
0.1587	159	134.53		
0.1815	182	57.17		
0.2059	206	38.18		
0.2319	232	38.73		
0.2593	259	23.09		
0.2883	288	23.42		
0.2921	292	23.44		



TRABAJO DE GRADO

ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DE DISIPADORES DE FRICCIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.

DIAGRAMA DE MOMENTO CURVATURA

PORTICO= 12 Pisos

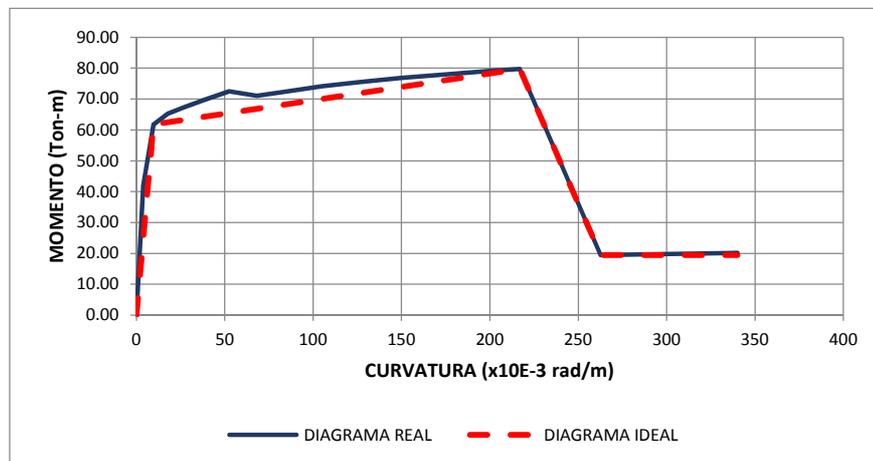
ELEMENTO= Columna

SECCION= 650 mm x 650mm

ARMADO= 20φ20mm

5Est.φ10mm C100/150/100mm

DIAGRAMA REAL			DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (rad/m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)
0.0000	0	0.00	0	0.00
0.0039	4	42.04	10	61.74
0.0097	10	61.74	217	79.79
0.0175	18	65.20	263	19.43
0.0272	27	67.30	340	19.43
0.0389	39	69.84		
0.0525	53	72.47		
0.0681	68	71.08		
0.0856	86	72.51		
0.1051	105	74.12		
0.1265	127	75.50		
0.1498	150	76.80		
0.1751	175	78.01		
0.2024	202	79.20		
0.2170	217	79.79		
0.2627	263	19.43		
0.2958	296	19.73		
0.3308	331	20.05		
0.3400	340	20.13		



TRABAJO DE GRADO

ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DE DISIPADORES DE FRICCIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.

DIAGRAMA DE MOMENTO CURVATURA

PORTICO= 12 Pisos

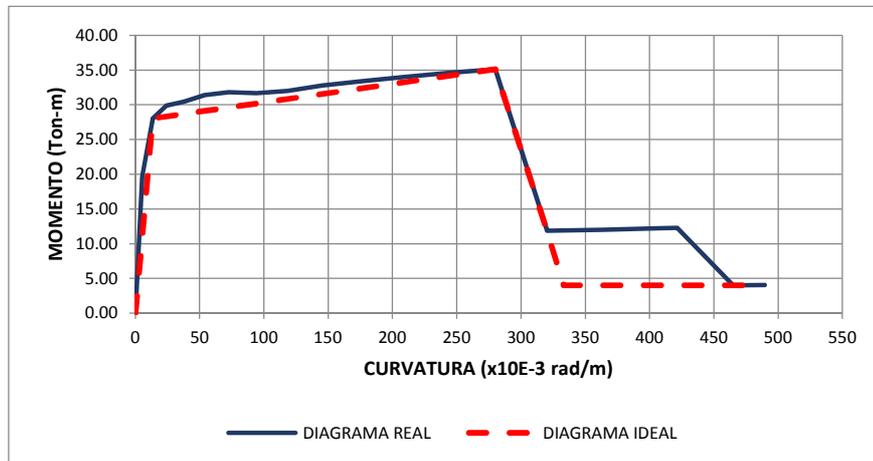
ELEMENTO= Columna

SECCION= 500 mm x 500mm

ARMADO= 12φ18mm

3Est.φ10mm C100/150/100mm

DIAGRAMA REAL			DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (rad/m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)
0.0000	0	0.00	0	0.00
0.0054	5	19.68	14	28.02
0.0135	14	28.02	280	35.11
0.0242	24	29.90	320	11.85
0.0377	38	30.44	333	4.03
0.0538	54	31.37	490	4.03
0.0727	73	31.83		
0.0942	94	31.69		
0.1185	119	32.00		
0.1454	145	32.75		
0.1750	175	33.36		
0.2073	207	33.97		
0.2423	242	34.56		
0.2800	280	35.11		
0.3204	320	11.85		
0.3635	364	12.02		
0.4093	409	12.22		
0.4214	421	12.26		
0.4651	465	4.03		
0.4895	490	4.04		



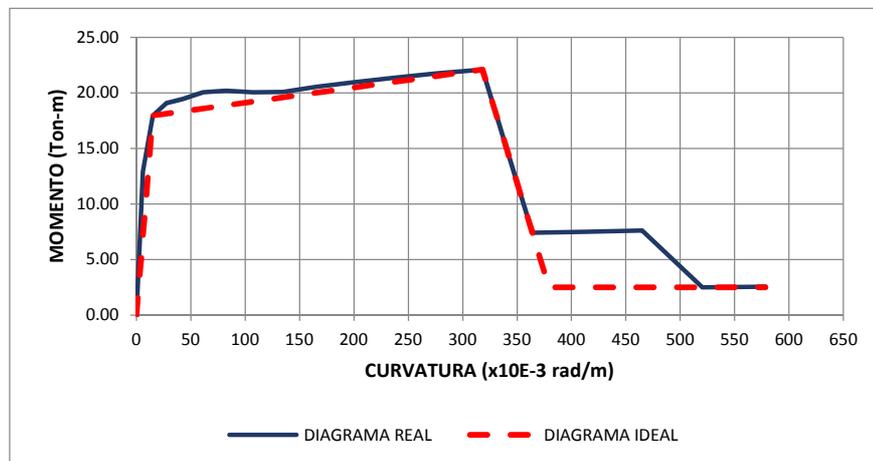
TRABAJO DE GRADO

ANALISIS DE LA APLICACIÓN DE DISIPADORES DE FRICCIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO SISMICO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGON ARMADO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.

DIAGRAMA DE MOMENTO CURVATURA

PORTICO= 128 Pisos
 SECCION= 450 mm x 450mm
 ELEMENTO= Columna
 ARMADO= 12φ16mm
 3Est.φ10mm C100/150/100mm

DIAGRAMA REAL			DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (rad/m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)	Curvatura (x10E-3 rad/m)	Momento (Ton-m)
0.0000	0	0.00	0	0.00
0.0061	6	12.94	15	17.96
0.0153	15	17.96	318	22.11
0.0275	28	19.07	364	7.41
0.0428	43	19.45	379	2.51
0.0612	61	20.04	578	2.51
0.0826	83	20.20		
0.1071	107	20.06		
0.1346	135	20.09		
0.1652	165	20.55		
0.1989	199	20.95		
0.2356	236	21.35		
0.2754	275	21.73		
0.3182	318	22.11		
0.3641	364	7.41		
0.4131	413	7.51		
0.4651	465	7.63		
0.5202	520	2.51		
0.5783	578	2.56		



TRABAJO DE GRADO

ANALISIS DE LA APLICACIÓN DE DISIPADORES DE FRICCIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO SISMICO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGON ARMADO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.

CALCULO DE FUERZAS DE DESLIZAMIENTO DE DISIPADORES

1.0 PROPIEDADES DINAMICAS SISTEMA

Nf	12 Pisos	
W	1861.33 Ton	Peso sísmico considerado para el análisis*
Tu	1.21507 seg	Período Natural de la estructura sin arriostamiento*
Tb	0.82561 seg	Período Natural de la estructura con arriostamiento*
		*Datos tomados de análisis de SAP2000
Tg	0.40 seg	Período Predominante de excitación sísmica
a(g)=	0.40	PGA característico
Tb/Tu	0.679	
Tg/Tu	0.329	
Q	0.852	Factor Filiatrault and Cherry
Vo/W	0.341	
Vo	634.51 Ton	
Vsi	26.44 Ton	

2.0 PROPIEDADES DISIPADORES

PISO	PORTICO DE 12 PISOS		
	FUERZA DESLIZAMIENTO	SECCION	RIGIDEZ DISIPADOR
1	16.52 Ton	2C 200x200x12 mm	24424.96 Ton/m
2	15.42 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m
3	15.42 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m
4	15.42 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m
5	15.42 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m
6	15.42 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m
7	15.42 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m
8	15.42 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m
9	15.42 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m
10	15.42 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m
11	15.42 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m
12	15.42 Ton	2C 150x150x12 mm	19217.45 Ton/m