



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES

Universidad Autónoma de Aguascalientes

Centro de ciencias del diseño y de la construcción

T E S I S

ESTUDIO NUMÉRICO PARA EVALUAR LA EFECTIVIDAD DE DISIPADORES ENERGÉTICOS PARA LA PROTECCIÓN DE EDIFICIOS PATRIMONIALES RELIGIOSOS ANTE UNA SOLICITACIÓN SÍSMICA

PRESENTA:

Ing. Rodolfo Estuardo Rivera Cano

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
INGENIERÍA CIVIL AREA TERMINAL ESTRUCTURAS**

TUTOR:

DR. Jesús Pacheco Martínez

COMITÉ TUTORIAL:

M.C. Enrique Mendoza Otero

Dr. José Ángel Ortiz Lozano

Aguascalientes, Ags. a 18 de mayo de 2016



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES

Centro de Ciencias del Diseño
y de la Construcción

DR. EN ING. MARIO EDUARDO ZERMEÑO DE LEÓN
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN
PRESENTE

Por medio del presente, como Tutor designado del estudiante **ING. RODOLFO ESTUARDO RIVERA CANO**, con ID 184810, quien realizó la tesis titulada: "**Estudio numérico para evaluar la efectividad de disipadores energéticos para la protección de edificios patrimoniales ante una sollicitación sísmica**" y con fundamento en el Art. 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el **VOTO APROBATORIO** para que él pueda proceder a imprimirla y así continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su amable consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo,

ATENTAMENTE
"SE LUMEN PROFERRE"

Aguascalientes, Ags., a 20 de abril de 2016

DR. JESÚS PACHECO MARTÍNEZ
TUTOR DE TESIS

M. EN ING. ENRIQUE MENDOZA OTERO
LECTOR

DR. JOSÉ ÁNGEL ORTIZ LOZANO
LECTOR

c.c.p.- M. en Ing. José Luis López López - Secretario de Investigación y Progreso del CCDC
c.c.p.- Ing. Rodolfo Estuardo Rivera Cano - Alumno
c.c.p.- Archivo
JPMe/br

v. B.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES

Centro de Ciencias del Diseño
y de la Construcción

OFICIO No. CCDC-D-123/2016
ASUNTO: Conclusión de Tesis

**DRA. GUADALUPE RUIZ CUELLAR
DIRECCIÓN GENERAL DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
PRESENTE.**

Por medio de este conducto informo que el documento final de tesis titulado: "Estudio numérico para evaluar la efectividad de disipadores energéticos para la protección de edificios patrimoniales ante una sollicitación sísmica". Presentado por el sustentante: **ING. RODOLFO ESTUARDO RIVERA CANO** con ID 184810 egresado de la **MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL**, cumple las normas y lineamientos establecidos institucionalmente. Cabe mencionar que el autor cuenta con el voto aprobatorio correspondiente.

Para efecto de los trámites que al interesado convengan se extiende el presente, reiterándole las consideraciones que el caso amerite.

A T E N T A M E N T E
"SE LUMEN PROFERRE"
Aguascalientes, Ags., a 22 de abril de 2016


Dr. en Ing. Mario Eduardo Zermeno de León
DECANO DEL C. DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

- c.c.p.- M. en Ing. José Luis López López – Secretario de Investigación y Posgrado del CCDC.
- c.c.p.- Dr. Jesús Pacheco Martínez – Secretario Técnico de la Maestría en Ingeniería Civil.
- c.c.p.- Dr. Jesús Pacheco Martínez – Tutor de Tesis.
- ✓ c.c.p.- Ing. Rodolfo Estuardo Rivera Cano – Egresado de la Maestría en Ingeniería Civil.
- c.c.p.- Lic. Delia Guadalupe López Muñoz – Jefe Sección de Certificados y Títulos.
- c.c.p.- Archivo

MEZL/ebv

Agradecimientos

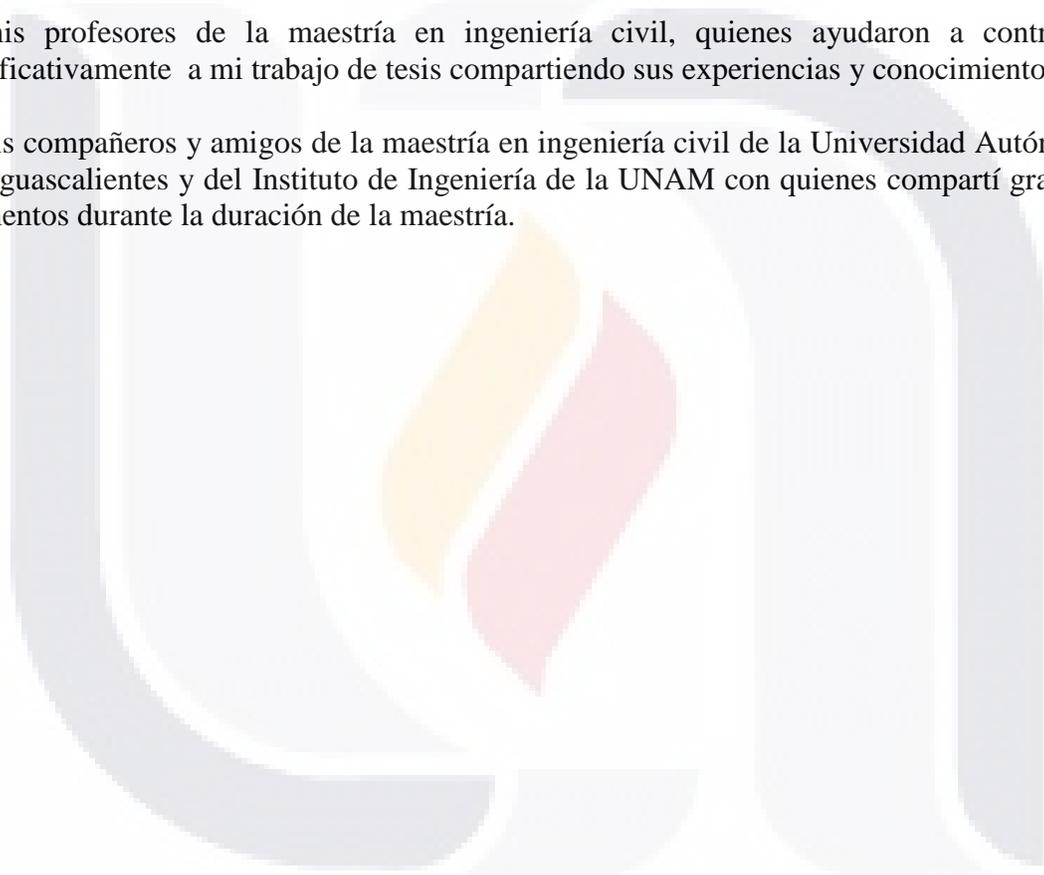
A mi tutor, el Dr. Jesús Pacheco Martínez, por haberme dado la oportunidad de ser mi tutor y por compartir parte de su invaluable experiencia en su asesoría.

A mi cotutor, el Ing. Enrique Mendoza Otero, por su apoyo académico y asesoría para los análisis sísmicos así como compartir conmigo su pasión por la ingeniería sísmica.

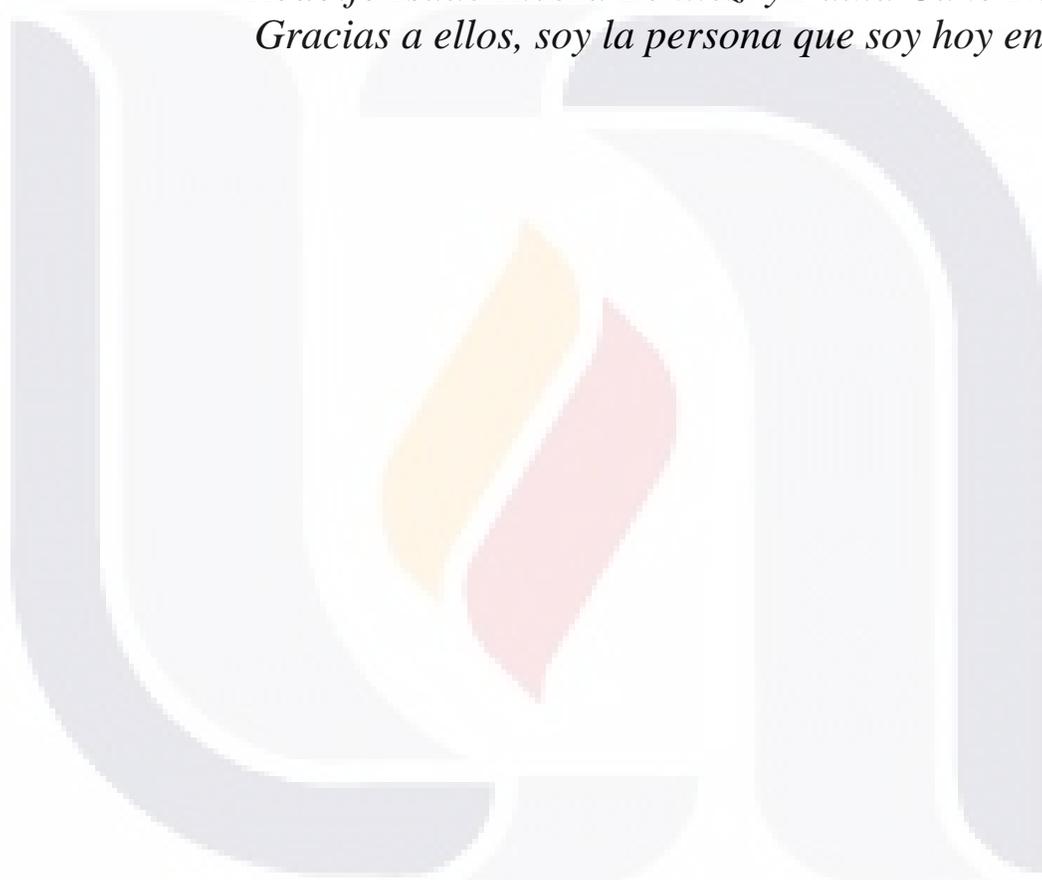
Al Instituto de Ingeniería y al Dr. Fernando Peña Mondragón por su apoyo académico y compartir conmigo su conocimiento y experiencia en las estructuras históricas.

A mis profesores de la maestría en ingeniería civil, quienes ayudaron a contribuir significativamente a mi trabajo de tesis compartiendo sus experiencias y conocimientos

A mis compañeros y amigos de la maestría en ingeniería civil de la Universidad Autónoma de Aguascalientes y del Instituto de Ingeniería de la UNAM con quienes compartí grandes momentos durante la duración de la maestría.

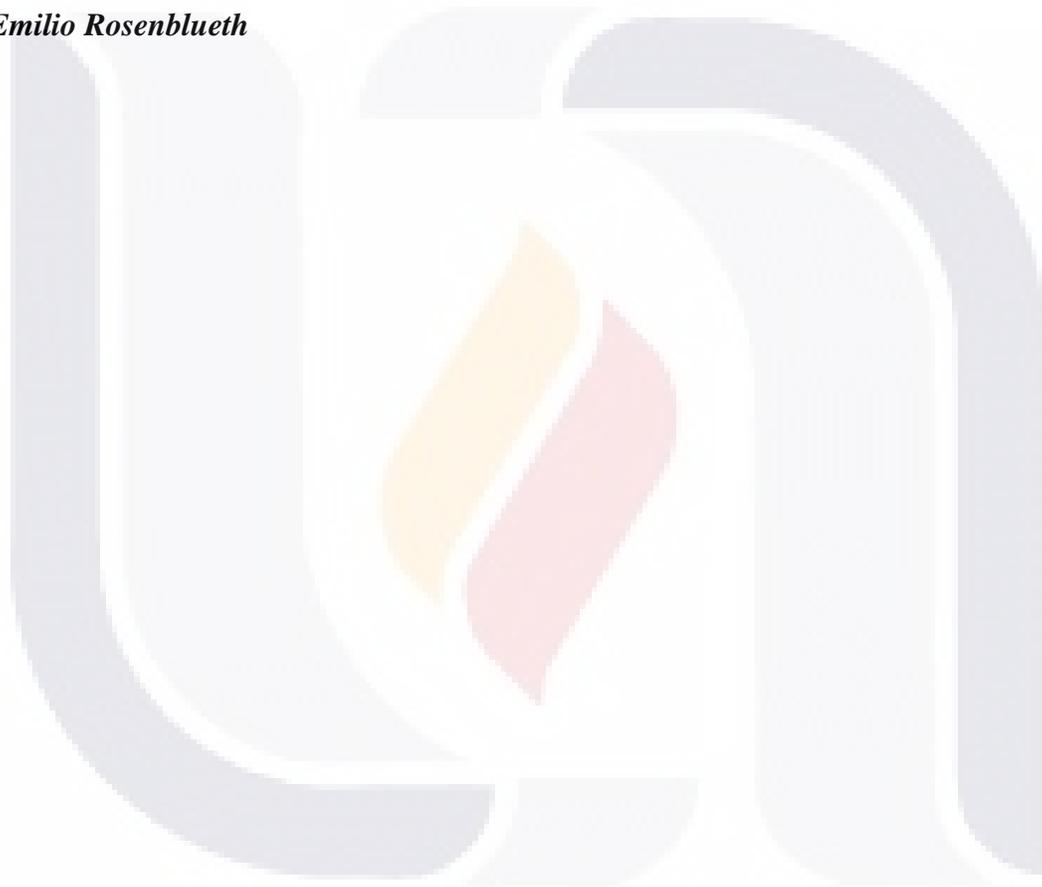


*A mis padres:
Rodolfo Isaac Rivera Benítez y Paula Cano Reyes
Gracias a ellos, soy la persona que soy hoy en día*



“La ingeniería sísmica es la corona de la ingeniería estructural, ya que es en los sismos donde salen a relucir las deficiencias y omisiones en el diseño y construcción de las estructuras”

Dr. Emilio Rosenblueth



Capítulo 1
Introducción

1.1 Planteamiento del problema13

1.2 Objetivos y alcances13

 1.2.1 Objetivo general13

 1.2.2 Objetivo particulares14

Capítulo 2
Antecedentes y experiencias previas

2.1 Uso de mecanismos de disipación energética en edificios patrimoniales15

 2.1.1 La experiencia Europa (PROHITEC).....15

2.2 Aplicación de mecanismos de disipación energética de fluido viscoso en edificios patrimoniales16

Capítulo 3
Aspectos teóricos

3.1 Aspectos generales en la conservación y reparación de edificios patrimoniales.....18

 3.1.1 Principios de ISACARSAH18

 3.1.2 Criterios para el refuerzo antisísmico de estructuras históricas.....19

 3.1.3 Ingeniería estructural de edificios religiosos coloniales típicos de México...22

3.2 Comportamiento sísmico de edificios religiosos patrimoniales23

 3.2.1 Comportamiento estructural de la mampostería.....24

 3.2.2 Patrón de daños en edificios religiosos coloniales.....25

 3.2.3 Refuerzo sismorresistente para una edificación religiosa patrimonial.....26

 3.2.4 Reducción de la demanda sísmica26

 3.2.5 Aumento de la capacidad sísmica27

3.3 Mecanismos de disipación energética pasivos28

 3.3.1 Disipación energética28

3.3.2	Características de los mecanismos de disipación energética	30
3.3.3	Capacidad estructural para disipar energía	31
3.3.4	Propiedades mecánicas de disipadores energéticos de fluido viscoso	32
3.4	Uso de disipadores energéticos de fluido viscoso en edificaciones históricas	35
3.4.1	Aplicación de mecanismos de fluido viscoso en edificaciones históricas.....	35
3.4.2	Uso de disipadores energéticos en edificios religiosos patrimoniales	36
3.5	Descripción de las configuraciones de los mecanismos de disipación energética aplicados en el análisis del edificio religioso colonial	37
3.6	Instalación de los mecanismos de disipación energética	39

Capítulo 4

Descripción de los modelos numéricos y análisis

4.1	Descripción del edificio religioso colonial y modelo de análisis	42
4.1.1	Descripción del tipo de edificio religioso colonial estudiado	42
4.1.2	Dimensiones del edificio religioso colonial	42
4.1.3	Modelo de análisis seleccionado.....	43
4.2	Método de análisis	45
4.2.1	Modelo de análisis por elementos finitos	45
4.2.2	Descripción del elemento cascaron (Shell) de 4 nudos	45
4.2.3	Los grados de libertad del elemento cascaron (Shell)	47
4.2.4	Propiedades de los esfuerzos	48
4.3	Efectos del peso propio	48
4.4	Propiedades mecánicas de los materiales	49
4.5	Acelerogramas usados en el análisis	50
4.6	Método de análisis sísmico para evaluar la efectividad de los mecanismos de disipación energética en el edificio religioso colonial	52
4.6.1	Software usado en el análisis	52
4.6.2	Descripción del método de análisis sísmico	52
4.7	Desarrollo de los 5 análisis del edificio religioso colonial	54
4.8	Resultados obtenidos en el análisis sísmico del templo colonial	58
4.9	Efectividad medida de los mecanismos de disipación energética en el análisis numérico	

del edificio religioso colonial62
 4.10 Descripción resumida de los 5 análisis usados en SAP200064

Capitulo 5

Análisis de resultados

5.1 Revisión del efecto del peso propio haciendo uso de la función rampa en una historia del tiempo70
 5.2 Propiedades dinámicas y calibración del modelo numérico71
 5.3 Respuesta dinámica de la estructura73
 5.3.1 Desplazamientos en una historia de tiempo en los puntos 1, 2, 3.....73
 5.3.2 Desplazamientos en una historia de tiempo en los puntos 4, 575
 5.3.3 Velocidades en una historia de tiempo en los puntos 1, 2 y 376
 5.3.4 Velocidades en una historia de tiempo en los puntos 4 y 578
 5.3.5 Aceleraciones en una historia de tiempo en los puntos 1, 2 y 380
 5.3.6 Aceleraciones en una historia de tiempo en los puntos 4 y 581
 5.4 Variación de efectos debido a los mecanismos de disipación energética83
 5.4.1 Variación de efectos en desplazamientos83
 5.4.2 Variación de efectos en velocidades87
 5.4.3 Variación de efectos en aceleraciones91
 5.5 Amortiguamiento adicional resultante del uso de disipadores energéticos95
 5.5.1 Periodo de vibración para verificar el amortiguamiento adicional95
 5.5.2 Energía por amortiguamiento para verificar el amortiguamiento adicional97
 5.6 Solicitación en los disipadores energéticos bajo la carga sísmica99
 5.6.1 Fuerzas axiales de los mecanismos de disipación energética99
 5.6.2 Curvas de histéresis en mecanismos de disipación energética99
 5.7 Efectividad de los disipadores energéticos en base a la reducción de esfuerzos.....102

Capitulo 6

Conclusiones

6.1 Propiedades dinámicas del edificio religioso patrimonial y calibración del modelo numérico106

6.2 Respuesta dinámica de la estructura106

6.3 Reducción de efectos debido a los mecanismos de disipación energética106

6.4 Amortiguamiento adicional resultante del uso de disipadores energéticos.....107

6.5 Solicitud en los disipadores energéticos bajo la carga sísmica 107

6.6 Efectividad de los disipadores energéticos en base a la reducción de esfuerzos108

6.7 Conclusiones generales 108

Referencias109

Anexo 1

Acelerograma usado

A1.1 Obtención de archivo para el acelerograma utilizado en el estudioA1

Anexo 2

Archivos de entrada en SAP2000

A2.1 Generación de acelerograma y función rampa.....A2

A2.2 Definición de caso de cargaA3

A2.3 Propiedades mecánicas en elemento linkA4

Anexo 3

Mecanismos de disipación energética pasivos

A3.1 Usos de mecanismos de disipación energética pasivos en estructurasA6

A3.2 Amortiguamiento no clásicoA8

A3.3 Mecanismos de disipación energética metálicosA8

A3.4 Mecanismos de disipación energética por fricciónA10

A3.5 Mecanismos de disipación energética visco-elástico sólidoA14

A3.6 Mecanismos de disipación energética de fluido viscosoA17

Anexo 4

Dinámica estructural de edificios religiosos coloniales del centro y sur de México

A4.1 Peligro sísmico en MéxicoA23
 A4.2 Estructuración de edificios religiosos coloniales en zonas de alta sismicidad A24
 A4.3 Materiales usados en edificios religiosos colonialesA26
 A4.4 Dinámica estructural de los edificios religiosos coloniales mexicanosA27
 A4.5 Daños estructurales de edificios religiosos coloniales bajo cargas sísmicasA28
 A4.6 Métodos de análisis sísmicosA30

Índice Tablas

Capitulo 3

Aspectos teóricos

Tabla 3.127
 Tabla 3.228
 Tabla 3.340

Capitulo 4

Descripción de los modelos numéricos y análisis

Tabla 4.150
 Tabla 4.264
 Tabla 4.364
 Tabla 4.464
 Tabla 4.566
 Tabla 4.668

Capitulo 5

Análisis de resultados

Tabla 5.170
 Tabla 5.271
 Tabla 5.372

Tabla 5.4	73
Tabla 5.5	74
Tabla 5.6	74
Tabla 5.7	75
Tabla 5.8	76
Tabla 5.9	76
Tabla 5.10	77
Tabla 5.11	78
Tabla 5.12	78
Tabla 5.13	79
Tabla 5.14	80
Tabla 5.15	80
Tabla 5.16	81
Tabla 5.17	82
Tabla 5.18	82
Tabla 5.19	83
Tabla 5.20	84
Tabla 5.21	85
Tabla 5.22	85
Tabla 5.23	86
Tabla 5.24	87
Tabla 5.25	88
Tabla 5.26	89
Tabla 5.27	89
Tabla 5.28	90
Tabla 5.29	91
Tabla 5.30	92
Tabla 5.31	93
Tabla 5.32	93
Tabla 5.33	94
Tabla 5.34	96

Tabla 5.35	96
Tabla 5.36	97
Tabla 5.37	98
Tabla 5.38	99
Tabla 5.39	99
Tabla 5.40	99
Tabla 5.41	100
Tabla 5.42	100
Tabla 5.43	101
Tabla 5.44	102
Tabla 5.45	103
Tabla 5.46	104

Anexo 3

Mecanismos de disipación energética pasivos

Tabla A.1	A29
Tabla A.2	A31

Índice Figuras

Capítulo 2

Antecedentes y experiencias previas

Figura 2.1	15
Figura 2.2	16
Figura 2.3	17
Figura 2.4	17

Capítulo 3

Aspectos teóricos

Figura 3.1	19
------------------	----

Figura 3.2.....	20
Figura 3.3.....	23
Figura 3.4.....	24
Figura 3.5.....	25
Figura 3.6.....	29
Figura 3.7.....	29
Figura 3.8.....	32
Figura 3.9.....	33
Figura 3.10.....	34
Figura 3.11.....	34
Figura 3.12.....	35
Figura 3.13.....	37
Figura 3.14.....	38
Figura 3.15.....	38
Figura 3.16.....	39
Figura 3.17.....	41

Capítulo 4

Descripción de los modelos numéricos y análisis

Figura 4.1.....	42
Figura 4.2.....	44
Figura 4.3.....	44
Figura 4.4.....	45
Figura 4.5.....	46
Figura 4.6.....	47
Figura 4.7.....	48
Figura 4.8.....	49
Figura 4.9.....	50
Figura 4.10.....	51
Figura 4.11.....	51

Figura 4.12	53
Figura 4.13	55
Figura 4.14	56
Figura 4.15	56
Figura 4.16	57
Figura 4.17	58
Figura 4.18	59
Figura 4.19	62
Figura 4.20	63
Anexo 1	
Acelerograma usado	
Figura A1.1.....	A1
Anexo 2	
Archivos de entrada en SAP2000	
Figura A2.1	A3
Figura A2.2	A5
Anexo 3	
Mecanismos de disipación energética pasivos	
Figura A3.1	A7
Figura A3.2	A8
Figura A3.3	A9
Figura A3.4	A9
Figura A3.5	A10
Figura A3.6	A10
Figura A3.7	A11
Figura A3.8	A11
Figura A3.9	A12

Figura A3.10	A13
Figura A3.11	A13
Figura A3.12	A14
Figura A3.13	A15
Figura A3.14	A15
Figura A3.15	A16
Figura A3.16	A18
Figura A3.17	A19
Figura A3.18	A19
Figura A3.19	A20
Figura A3.20	A21
Figura A3.21	A21
Figura A3.22	A22
Anexo 4	
Dinámica estructural de edificios religiosos coloniales del centro y sur de México	
Figura A4.1	A23
Figura A4.2	A24
Figura A4.3	A25
Figura A4.4	A26
Figura A4.5	A27
Figura A4.6	A27
Figura A4.7	A29
Figura A4.8	A31
Figura A4.9	A32

Resumen

En este trabajo se desarrollaron varios análisis de un edificio religioso de tipo colonial, con el fin de medir la eficacia de los mecanismos de disipación energética aplicados a este tipo de estructuras, principalmente los mecanismos de fluido viscoso. En primera estancia se optó por darle un seguimiento a un templo colonial definido por el Instituto de Ingeniería de la UNAM con las características típicas de un edificio de este tipo. Haciendo uso de este mismo templo se desarrollaron varios análisis, en cada uno de estos análisis se aplicaron mecanismos de disipación energética, incluyendo configuraciones que amplifican la eficacia de los mecanismos. Como resultados se midieron las respuestas dinámicas, la variación de efectos, el amortiguamiento adicional, sollicitud de los mecanismos y por último la efectividad de los mecanismos de acuerdo a la reducción de esfuerzos. Para cada uno de los análisis, se utilizó el programa SAP2000, ya que este programa tiene las mejores herramientas para la aplicación de los mecanismos de disipación energética de software conocidos en el mercado, además se aplicó para cada análisis dinámico la función del acelerograma del sismo del 19 de septiembre de 1985, con el registro en roca más cercano al epicentro. Los resultados mostraron que la parte superior de las torres de los campanarios, son las áreas que más se pueden beneficiar con el uso de estos mecanismos, la configuración conocida como excéntrica con palanca demostró su alta eficiencia para proteger los campanarios de daños estructurales y los valores intrínsecos de un edificio religioso patrimonial.

Abstract

In this work, some analysis of a typical colonial church building were developed in order to test the efficacy of energy dissipation devices applied to this kind of structures, mainly the viscous fluid devices. As first option it has been decided to give a continuation to a previous work of a colonial church defined by the Instituto de Ingeniería de la UNAM, included the typical characteristics of this kind of building. Working with this same building some analysis have been developed, then for every analysis has been applied the energy dissipation devices including those configurations that amplify the efficiency of these devices. As a results, the dynamic responses, effect variation, the additional damping and device sollicitation have been gotten, also the device efficiency as function of the reduction of stresses were included. For every analysis, it has been used the structural software SAP2000,

because this software has the best tools to apply the energy dissipation devices, among the commercial software known, also it has been apply for every dynamic analysis the accelerogram function of the September 19, 1985 earthquake, using the rock record near to epicenter. The results showed, that the top of bell tower are the most profited area because the use of these devices. Configuration known as toggle brace-damper showed its high efficiency to protect the bell tower of structural damage and intrinsic values of the church building.



Capítulo 1

Introducción

1.1 Planteamiento del problema

México ha sido afectado por sismos a través de su historia, algunos de ellos han causado daños muy graves y un número significativo de víctimas, principalmente en el sur, occidente y noroeste del país donde se localizan los principales epicentros de la mayoría de los movimientos sísmicos. Siendo estas áreas de población de importante riesgo sísmico. Uno de los principales problemas en el país en particular y en el planeta en general a los que se enfrentan las estructuras patrimoniales o históricas, son los terremotos de altas magnitudes.

Es por esto que en nuestro país existe una necesidad imperiosa para proteger las construcciones, especialmente aquellas consideradas como patrimonio histórico, dado que estas edificaciones hechas principalmente de mampostería carecen de resistencia suficiente para sobrellevar esfuerzos a tensión las cuales producen grietas y el colapso de estas estructuras. Una de las técnicas de protección sismorresistente que se ha comenzado a implementar en edificios patrimoniales, es la de la aplicación de mecanismos de disipación energética estructural (Mazzonali, Federico 2008, Winters Craig n.d.), principalmente en estructuras de mampostería y madera.

1.2 Objetivos y Alcances

1.2.1 Objetivo General

La tesis consiste en desarrollar un análisis numérico ante una sollicitación sísmica de un edificio patrimonial típico de México, que incluya el amortiguamiento adicional dado por mecanismos de disipación energética estructural. Para este análisis se optó por los mecanismos de fluido viscoso comerciales, ya que estos mecanismos solo proporcionan un amortiguamiento adicional a la estructura y a diferencia de otros mecanismos de disipación energética que además de proporcionar amortiguamiento, proporcionan rigidez adicional a la estructura. Esto es muy importante porque para transmitir rigidez adicional se requiere de una fuerza importante sobre la mampostería del cual está construida la iglesia, y es muy

probable que esta fuerza sea mayor a su resistencia propia. Por último en base a este análisis se hará una evaluación de la eficacia de los disipadores energéticos para edificios patrimoniales religiosos.

1.2.2 Objetivos particulares

- Se desarrollará un análisis numérico de una iglesia colonial haciendo uso del método de elementos finitos, El análisis de elementos finitos corresponde a un prototipo desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, dicho prototipo cuenta con las características típicas en geometría y materiales de una iglesia colonial oaxaqueña (Chávez M. 2010).
- Se analizará el modelo numérico primero sin incluir los mecanismos de disipación energética de fluido viscoso y posteriormente incluyendo los mecanismos disipación, obteniendo resultados como las respuestas dinámicas, los esfuerzos desarrollados por los materiales, y la energía disipada.
- Se evaluarán los resultados mencionados en el anterior párrafo con el fin de compararlos ya sea con o sin mecanismos de disipación energética de fluido viscoso y en base a esto se evaluará su eficacia como herramienta para proteger a los edificios patrimoniales religiosos de daños estructurales causado por sollicitaciones sísmicas de gran magnitud.

Capítulo 2

Antecedentes y experiencias previas

2.1 Uso de mecanismos de disipación energética en edificios patrimoniales.

En los últimos años se han desarrollado un gran número de trabajos aplicando disipadores en estructuras patrimoniales con el fin de protegerlas ante las solicitaciones sísmicas, principalmente en Europa y quizá el ejemplo más notable es el de la Acrópolis de Atenas, principalmente en el edificio conocido como Partenón, donde se hizo uso de un mecanismo de disipación energética por degradación del material a base de barras dúctiles entre las juntas de las columnas que le dan forma a estas, desarrollado y probado en una mesa vibradora por la Universidad Tecnológica de Atenas.



Figura 2.1 Reparación y refuerzo del Partenon de Atenas

2.1.1 La experiencia europea (PROHITEC)

Otras de las experiencias más conocidas en Europa es PROHITEC (Seismic protection of historical buildings by reversible mixed technologies), un consorcio de universidades principalmente de países con alta sismicidad como Italia, Grecia, Turquía, Macedonia, Portugal entre otros con el fin de desarrollar técnicas para proteger edificios patrimoniales.

Una de estos trabajos desarrollados, es precisamente con la aplicación de mecanismos de disipación energética en edificios patrimoniales. Como se menciono además del caso del Partenón de Atenas se han desarrollaron algunos otros estudios como el de la Catedral Gótica de Fassanova (Mazzonali, Federico 2008), en este estudio se aplicaron cables de fibra de vidrio (FRP) postensionados vertical y horizontalmente en los marcos principales de la nave de esta catedral como se muestra en la figura 2.2.



Figura 2.2 Modelo a escala en mesa vibradora (F Mazzonali 2008)

Se desarrollo un modelo a escala 1:5.5 en una tabla vibradora, en este modelo primero se aplico el movimiento sísmico activando los cables en la parte superior y posteriormente activando todos los cables, los resultados mostraron un incremento en la resistencia sísmica hasta de 3 veces más con los cables con respecto a los marcos sin cables.

2.2 Aplicación de mecanismos de disipación energética de fluido viscoso en edificios patrimoniales

Uno de los casos conocidos en la aplicación de disipadores energéticos fue el de la Academia de Estudios Económicos de Bucarest, Rumania donde se hizo uso de amortiguadores de fluido viscoso combinado con aislamiento a la base con elementos elastomericos como se muestra en la figura 2.3, donde se hizo una combinación de estos dos sistemas con el fin de incrementar la capacidad del edificio aislado para prevenir la transmisión directa de un movimiento sísmico importante.



Figura 2.3 Uso de mecanismos de disipación energética en un edificio histórico de Bucarest, Rumania (Winters Craig n.d.)

Un segundo caso fue el hotel Woodland en California, donde se implementaron mecanismos de disipación energética de fluido viscoso, una de las razones de esta implementación fue la demanda del propietario de evitar modificaciones importantes para reforzar la estructura. En este caso el edificio estructuralmente cuenta con un primer piso débil se optó por instalar los disipadores con arreglo de tipo chevrón como se muestra en la figura, en total se instalaron 16 mecanismos con una capacidad de 444,897 Newtons



Figura 2.4 Mecanismo de disipación energética en edificio de mampostería (Winters Craig n.d.)

Capítulo 3

Aspectos teóricos

3.1 Aspectos generales en la conservación y reparación de edificios patrimoniales

3.1.1 Principios de ISACARSAH

Los principios de ISACARSAH (International scientific committee on the analysis and restoration of structures and architectural heritage), son los principios de conservación y criterios para el análisis y restauración de estructuras históricas, estos se basan en varios criterios con el fin de minimizar los daños en los valores intrínsecos del patrimonio histórico. Los valores intrínsecos son aquellos aspectos generales que rodean la vida de un edificio patrimonial que se podría perder sean tangible o intangible tales como la arquitectura, el arte, la historia y la ingeniería. Los principios de ISACARSAH fueron desarrollados por ICOMOS 1964 (International charter for the conservation and restoration of monuments and sites) en la carta de Venecia y se enumeran de la siguiente forma.

- 1.- Respeto a la autenticidad estructural: El sistema estructural original es parte del valor cultural de la edificación
- 2.- Impacto mínimo o mínima alteración: Al tratar de reforzar una estructura patrimonial se debe minimizar el impacto o la alteración de la estructura y la arquitectura original.
- 3.- Seguridad estructural: El objetivo principal del refuerzo de un edificio patrimonial es preservar su valor artístico e histórico.
- 4.- Compatibilidad: El uso de materiales nuevos en un trabajo de preservación debe cumplir en lo posible con la compatibilidad de propiedades mecánicas y químicas con respecto a los materiales originales o en su defecto minimizar la alteración de las propiedades de estos.

5.- No intrusivos y no invasivos: Cuando se requiera de elementos estructurales diferentes a los originales se debe evitar lo mas que se pueda la invasión de estos, o minimizarlo en lo posible.

6.-Reversibilidad y remoción: En la medida de los posible cuando se considere remover elementos estructurales con el fin de hacer reparaciones, esta debe sufrir los mínimos cambios y daños al momento de recolocar los elementos estructurales de nuevo.

7. Monitoreo: Durante los trabajos de reparación y refuerzo, se deben monitorear durante el tiempo que duren los trabajos, para evitar daños o alteraciones que sean irreversibles.



Figura 3.1 Ejemplos del principio de alteración: a) solución que altera poco el sistema original; b) solución que altera totalmente el sistema original (Peña F. and Lourenço P. 2012)

3.1.2 Criterios para el refuerzo antisísmico de estructuras históricas

1. Metodología para la intervención de edificios patrimoniales

Antes que todo se debe reconocer el carácter multidisciplinario para el trabajo de la restauración de edificios históricos, disciplinas tales como la arqueología, arquitectura,

ingeniería, historia, restauración del arte. El ingeniero debe reconocer los valores intrínsecos mencionados en los anteriores párrafos con el fin de garantizar una buena sincronización con las diferentes disciplinas de los criterios predeterminados para los trabajos de conservación.

De acuerdo a ICOMOS (2003a,b) y sus recomendaciones la metodología de un trabajo de intervención de un edificio patrimonial se puede dividir en cuatro partes y son :

1. *Adquisición de datos*
2. *Comportamiento estructural*
3. *Diagnóstico y seguridad*
4. *Medidas de intervención*

Como se muestra en la figura 3.2 la metodología requiere de la interacción de las 4 partes mencionadas para un trabajo de intervención estructural.

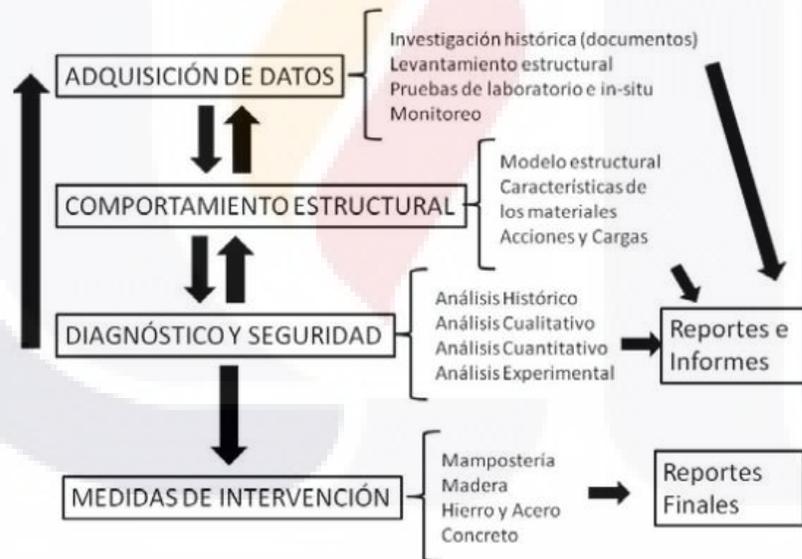


Figura 3.2 Diagrama de flujo con la metodología propuesta por ICOMOS para las intervenciones estructurales de edificios históricos (Lourenço, P. 2006)

El mal manejo de esta interacción puede ocasionar que los valores intrínsecos de un edificio patrimonial queden afectados llegando a una mala conclusión (Lourenço, P. 2006)

2. Adquisición de datos

En esta etapa es necesario tener un buen diagnóstico del comportamiento estructural, para esto se requiere del mayor conocimiento e información de la estructura, como materiales, historia de la estructura, descripción geométrica, estudios preliminares entre otros. La información histórica es una de las primeras referencias que se deben tomar en cuenta ya que esta será de vital importancia en el desarrollo de un diagnóstico en el comportamiento estructural. La información histórica debe incluir rasgos como daños por sismos, hundimientos o cualquier otro riesgo natural, así como las reparaciones y/o modificaciones estructurales y arquitectónicas derivadas de las afectaciones históricas. (Peña F. and Lourenço P. 2012). Un ejemplo muy claro es el caso histórico de la catedral metropolitana de Guadalajara (Ver anexo A.2 para mayor información). Es importante tener una buena descripción de la geometría del edificio y poder distinguir los elementos estructurales de los elementos arquitectónicos ya que muchas veces resulta complicado poder hacerlo. Es deseable hacer un estudio preliminar de los materiales del edificio patrimonial, sean estudios semi-destructivos o no destructivos, estas pruebas no pueden dar una idea de cómo la degradación de los materiales pueden estar induciendo una falla en la estructura. Algunos de los métodos usados en un estudio preliminar de materiales in-situ son: sónicas, de radar, termografía, vibración ambiental, gatos planos, entre otras.

3. Comportamiento estructural

El método de los elementos finitos ha demostrado ser una herramienta eficaz para conocer el comportamiento dinámico de estructuras de mampostería (Peña F. 2010), sin embargo entre más compleja sea la geometría de un edificio histórico más complicado será la tarea de análisis, es por esto que se ha propuesto algunos métodos simplificados especialmente para esta clase de edificaciones.

4. Diagnostico estructural

El diagnóstico estructural de una estructura patrimonial debe estar sustentado en la historia de la estructura así como en procedimientos cuantitativos y cualitativos. Los procedimientos cualitativos se basan en métodos empíricos como la observación de daños de materiales, tales como la degradación ambiental y estructurales tales como grietas en muros.

Los procedimientos cuantitativos se basan en métodos científicos tales como pruebas de laboratorio, análisis numérico, instrumentación para monitoreo entre otros. Ambos procedimientos deben interactuar en algunas de las etapas del diagnóstico, por ejemplo en el análisis numérico se pueden considerar factores como el agrietamiento y la degradación de materiales para tomarlos en cuenta en las propiedades mecánicas del modelo numérico.

5. Medidas de intervención

Para las medidas de intervención se deben tomar factores de compatibilidad de los diferentes métodos ya sean tradicionales o modernos con los valores intrínsecos de un edificio patrimonial (ICOMOS 2003a). Las medidas de intervención deben estar justificadas para con el fin de proteger y resolver el problema raíz de un edificio patrimonial, ya que muchas veces las medidas de intervención pueden llegar a alterar las propiedades originales a veces inevitable, pero teniendo en cuenta que estas alteraciones sean mínimas y compatibles a los valores intrínsecos, por ejemplo a veces los muros de mampostería antigua que requieren de reparación se aplican nuevos materiales más resistentes a las fuerzas estructurales y la degradación ambiental, sin embargo estos materiales nuevos no alteran la arquitectura y la textura de dichos muros. Los análisis numéricos deben estar calibrados con las propiedades mecánicas originales de la edificación, para obtener estas propiedades es necesario hacer pruebas de laboratorio, así como se debe simular en los modelos numéricos los mismos mecanismos para los que fueron diseñados originalmente las edificaciones patrimoniales.

6. Técnicas de refuerzo

Las técnicas de refuerzo deben estar basadas en los principios de conservación y los criterios modernos para la restauración de estructuras históricas (ICOMOS 2003a), (ICOMOS 2003b)

3.1.3 Ingeniería estructural de edificios religiosos coloniales típicos de México

La mayor parte de los templos coloniales que fueron construidos entre los siglos XVI y XVIII, fueron hechos a base de mampostería de piedra y ladrillo, pegados por medio de un mortero. Los elementos estructurales están formados principalmente de muros de más de 50

cms de espesor, los cuales usualmente soportan elementos como las bóvedas y cúpulas. Las cúpulas y bóvedas están hechas principalmente de ladrillo, las cúpulas se apoyan sobre un tambor que es una especie de anillo, las cúpulas rematan en la parte superior con una linternilla. En las fachadas podemos encontrar elementos como el frontón y las torres de campanario. Las torres de campanarios son los elementos más flexibles de las iglesias coloniales, estas rematan en su parte superior con uno o un par de campanarios. Muchas de las iglesias construidas en zonas de alta sismicidad cuentan con un contrafuerte que a veces es bastante robusto. Por últimos en la parte superior podemos encontrar el Ábside que es un elemento bastante rígido en la parte posterior del templo, esta puede ser de forma esférica o semiparabólica. Estos elementos estructurales se pueden observar en la figura 3.3. En México existen diferentes configuraciones de iglesias coloniales, las más usadas son de tipo I latina y de una sola nave (Ver anexo A.2 para mayor información sobre la geometría de un templo colonial). Es importante mencionar que se debe tomar en cuenta las diferentes configuraciones geométricas ya que esto influye en el comportamiento dinámico de la estructura ante una sollicitación sísmica.

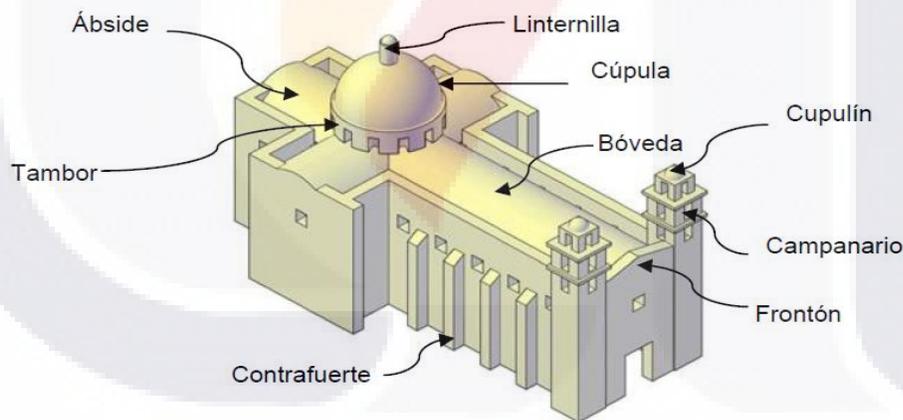


Figura 3.3 Elementos estructurales de una iglesia típica colonial (Chavez M. 2010)

3.2 Comportamiento sísmico de edificios religiosos patrimoniales

Originalmente las iglesias coloniales de mampostería fueron diseñadas para soportar cargas de gravedad con elementos estructurales que trabajan principalmente a compresión (Castellanos Hugo 2004). El principal problema que enfrentan estas estructuras ante cargas sísmicas, es que desarrollan esfuerzos a tensión y cortante ante los cuales son débiles, lo cual propicia la aparición de grietas. Teóricamente la aparición de grietas ayuda a la estructura a

disipar energía, sin embargo las grietas también cambian las propiedades dinámicas de la estructura haciéndolas más flexibles y aumentando su deformación lateral, exponiéndose, con ello a un modo de inestabilidad que la lleve al colapso. Es importante también notar que los diferentes elementos estructurales que componen una iglesias la mayor parte de las veces durante un sismo no responden con la misma sincronía, y muchas de las veces sus periodos y modos de vibración propias son muy divergentes. Esto provoca fuertes daños principalmente en aquellos elementos que sirven de liga como las bóvedas que conectan los muros laterales de la nave. Es por esto que algunos investigadores (Doglioni F. 1994); (Lagormarsino S. 1998) han sugerido que algunos elementos que tienen un comportamiento con características dinámicas propias sean analizados de forma independiente tales, como, las torres, las fachadas y los ábsides. Sin embargo no hay que dejar de tomar en cuenta la conexión de estos elementos con el resto de la estructura.

3.2.1 Comportamiento estructural de la mampostería

El comportamiento de la mampostería es generalmente no lineal, la figura 3.4 muestra un diagrama típico de esfuerzos para mampostería, sin embargo se puede considerar como hipótesis que es elástica ya que la mampostería desarrolla esfuerzos máximos no mayores al 10% de su resistencia a compresión σ_c (Castellanos Hugo 2004). Es por esto que para el desarrolla en particular de esta tesis nos enfocaremos a considerar el comportamiento de la mampostería como elástico lineal, para fines del análisis con amortiguamiento adicional esta hipótesis es completamente válida.

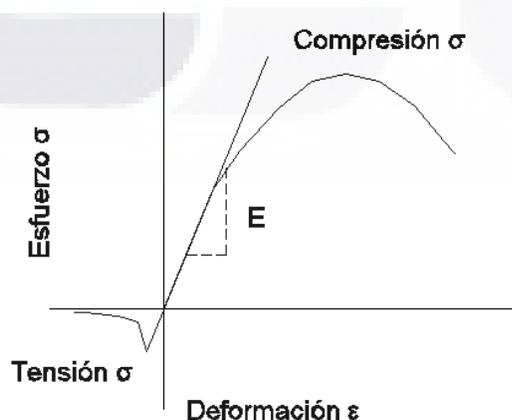


Figura 3.4 Diagrama de esfuerzos generales en mampostería

3.2.2 Patrón de daños en edificios religiosos coloniales

A continuación se hace una descripción de los patrones de daños y modos de falla observados en edificaciones religiosas coloniales en el país debido a eventos sísmicos en los últimos años, en la figura 3.5. Se pueden observar los principales patrones de daños en un templo colonial.

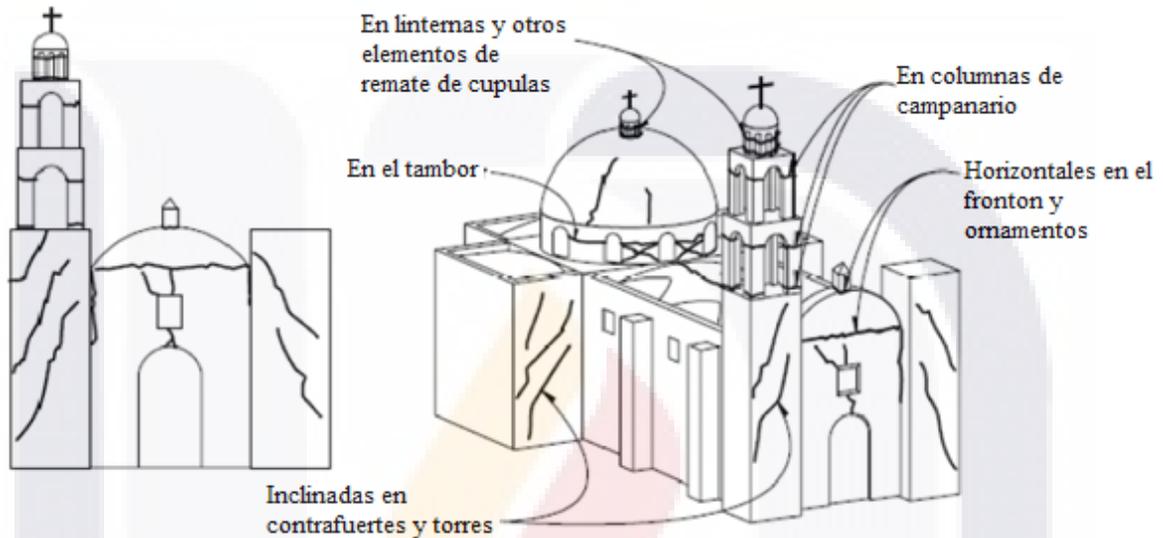


Figura 3.5 Patrón de agrietamiento típico de un edificio religioso colonial debido a fuerzas sísmica (Alcocer S. 1999)

Torres. Las torres para los campanarios, son los elementos más flexibles de un templo y normalmente representan el periodo fundamental. Las grietas que aparecen en las torres debido a una sollicitación sísmica son en diagonal en los muros de estas, estas grietas son debido a esfuerzos a corte y tensión, también en las discontinuidades debido a las aberturas en los campanarios es muy común observar grietas. Otro tipo de grietas aparecen en la unión entre la torre y la nave principal, así como grietas en los apoyos debido a altos esfuerzos a compresión por volteo de la torre.

Fachada. Es un elemento bastante rígido y usualmente su modo de vibración dominante es en el sentido perpendicular a su plano, propiciando con esto que trate de separarse de la nave principal, otro modo de falla se presenta a veces por el aplastamiento ocasionado por el choque de las torres contra esta.

Muros. Los muros de soporte de la nave principal no presentan un alto daño como el resto de los elementos estructurales, los mayores daños en los muros son debido a la acción de la bóveda sobre el muro en el cual se apoya, presentando grieta en la parte superior donde se apoya la bóveda en el muro. Los contrafuertes rara vez presentan daños, son elementos demasiado rígidos, pero muchas de las veces, tienden a hundirse durante un sismo en su base debido a su alto peso.

Bóvedas y Cúpulas. Las bóvedas son elementos que presentan fuertes daños en sismos de alta magnitud, debido principalmente a esfuerzos a tensión principalmente en los riñones de estas cerca de la conexión entre la bóveda y el muro. Las bóvedas son débiles a cargas en el plano perpendicular y el patrón de grietas es la dirección longitudinal. Las cúpulas también son elementos susceptibles a sufrir grandes daños, principalmente cerca de la base de estas, mostrando grietas en diagonal.

Ábside. Normalmente presenta grietas verticales en la unión con los muros longitudinales.

3.2.3 Refuerzo sismorresistente de una edificación religiosa patrimonial

Un refuerzo para una estructura de valor patrimonial en la mayor de los casos provoca una modificación en sus valores intrínsecos, algunas veces por cambios de materiales o elementos originales, es por esto que se debe tratar de minimizar dichas afectaciones de acuerdo a los principios de conservación establecidos para estructuras patrimoniales (ICOMOS 2003a), (ICOMOS 2003b). Las técnicas usadas deben mejorar el comportamiento sísmico de la estructura, el comportamiento sísmico se puede mejorar de tres formas, reduciendo la demanda sísmica, aumentando su capacidad o una combinación de ambas técnicas (EECCP 2006a), (EECCP 2006b)

3.2.4 Reducción de la demanda sísmica

Modificar el periodo de la estructura para reducir su deformación, esto conlleva a que se modifiquen las propiedades dinámicas de la estructura tales como la rigidez, masa e inclusive el amortiguamiento, otra técnica sería aislar la estructura del suelo con el fin de reducir las aceleraciones provenientes del suelo. El aislamiento sísmico es un mecanismo de

disipación energética, haciendo uso de sistemas elastoméricos o de fricción que son descritos más adelante en esta tesis. Para aplicar esta técnica se requiere de modificaciones sustanciales en la base del edificio. En los edificios históricos, normalmente requieren de un ajuste a la cimentación, muchas veces se incluye una nueva cimentación lo suficientemente rígido para mantener el edificio con una aceleración constante en toda su planta, esto es lo que hace que esta técnica sea muy costosa que algunas veces llegan a superar más de tres veces el costo de la estructura, y no todas las estructuras patrimoniales son candidatas a la técnica de aislamiento.

3.2.5 Aumento de la capacidad sísmica

El aumento de la capacidad de una estructura patrimonial hoy en día se hace de dos formas aplicando sistemas y materiales modernos, o haciendo uso de técnicas tradicionales. Normalmente cuando se trata de mejorar la capacidad sísmica de una estructura patrimonial se optan por los métodos modernos, sin embargo como se menciono anteriormente se deben de respetar los criterios para la conservación y reparación de edificios patrimoniales por lo dispuesto por ICOMOS 1964, también en el refuerzo se deben tomar en cuenta la compatibilidad de materiales entre los nuevo y antiguos, ya que muchas de las veces los materiales nuevos debido a su alta resistencia desarrollan fuerzas mucho mayores a las permisibles de los materiales antiguos. Otro criterio importante en el respecto de la arquitectura y valores intrínsecos originales, por cual se debe minimizar las invasiones a los espacios importantes, por ejemplo en las cúpulas de las iglesias, se ha hecho uso de tensores para minimizar la tensión provocada en la base de las cúpulas, estos tensores desarrollan fuerzas muy altas, dañando las paredes de las cúpulas donde se anclan estos tensores.

En las siguientes tablas se muestran algunos de los métodos tradicionales y modernos de aumento de capacidad de acuerdo con el reporte (EECCP 2006b)

Tabla 3.1 Métodos tradicionales de refuerzo de acuerdo al EECCP, 2006b	
Método	Descripción
Conexiones locales	Una de las técnicas muy utilizadas para juntas es el uso de grapas, muchas veces de acero o de madera
Confinamiento de columnas y	Como sabemos el confinamiento de un elemento estructural aumenta su capacidad a compresión y momento, este confinamiento normalmente se

muros	hace por medio de placas o anillos, en muros de hace por medio de barras de acero transversalmente.
Contrafuertes	Los contrafuertes son elementos de refuerzo más usado en estructuras antiguas para resistir cargas horizontales, muchas de las veces estos contrafuertes se hacen del mismo material de la estructura original
Reconstrucción local	Se sustituyen aquellos materiales dañados por otros de las mismas propiedades mecánicas.
Rejunteo	Se sustituye el mortero entre la mampostería por uno nuevo que sea compatible al original pero de mejor capacidad.
Substitución de elementos	Muchas de las veces se sustituyen elementos estructurales usando materiales modernos, tratando de evitar que esto cambie o modifique de manera importante los valores intrínsecos y la arquitectura original

Tabla 3.2 Métodos modernos de refuerzo de acuerdo al EECCP, 2006b

Método	Descripción
Anclajes	El anclaje se hace mediante barras y cables de acero para aumentar su estabilidad y reducir deformaciones
Costuras armadas	En esta opción se introducen barras de metal a través de oquedades hechas en los elementos a reforzadas y después rellenas de mortero, este método no es muy recomendable ya que es altamente invasora.
Encamisados de concreto	Los encamisados de concreto consiste en cubrir por ambos lados un muro con concreto armado con el fin de reducir las deformaciones debido a esfuerzos a compresión, este método no es muy recomendable ya que, terminaría por eliminar la identidad arquitectónica original del edificio
Inyección	El objetivo de esta técnica consiste en inyectar mortero o resinas epóxicas a través de grietas o agujeros previamente realizados, para rellenar las cavidades y vacíos al interior de los elementos tratados, así como para rellenar grietas. Este método no se debe utilizar si existen pinturas o murales en el muro
Refuerzo externo	La aplicación de refuerzo en las caras externas de los elementos estructurales utilizando material de alto rendimiento (FRP, mallas de acero, polímeros, etc.) permitiendo el incremento de su capacidad. Este método no se debe utilizar si existen pinturas o murales en el muro

3.3 Mecanismos de disipación energética pasivos

3.3.1 Disipación energética

El termino disipación energética se define como el área dentro de la grafica de deformación y la fuerza del material bajo una sollicitación estática o dinámica, tal como se muestra en la figura 3.6. La disipación energética tiene una variedad de aplicaciones en la

ingeniería, en áreas como la hidráulica, estructuras, aeronáutica, mecánica, automotriz, entre otras.

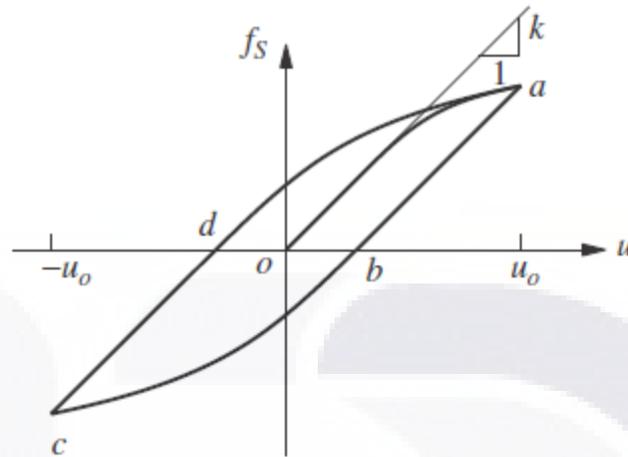


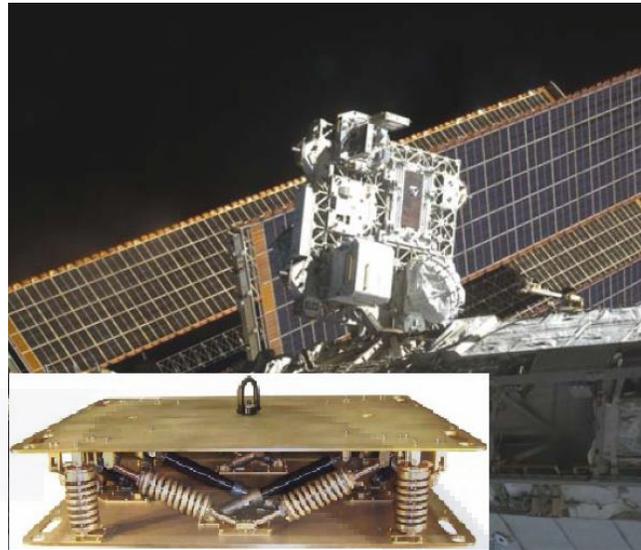
Figura 3.6 grafica típica de fuerza deformación inelástica donde el área es igual a la energía disipada (Chopra Anil 2010)

La energía disipada en un medio continuo, se puede obtener de dos formas muy conocidas en ingeniería, ya sea por deformación plástica del material o por amortiguamiento propio o adicional. Existe una gran variedad de mecanismos de disipación energética que proporcionan un amortiguamiento adicional, podemos hablar de algunos de ellos como los disipadores de choque usados en los automóviles y aviones, los amortiguadores y aisladores estructurales usados en edificios, puentes y en el espacio como los mostrados en la figura 3.7.



Figura 3.7a Muestra un puente peatonal en un parque de Atlanta, E.U. esta plataforma cuenta con un mecanismo de disipación energética formado por un amortiguador visco-elástico sólido a base un resorte para disipar las vibraciones ocasionadas por el movimiento de los peatones o el viento. (Winters Craig n.d.)

Figura 3.7b Muestra una plataforma de instrumentos colocada en la estación espacial internacional, esta plataforma cuenta con un mecanismo de disipación energética formado por un amortiguador visco-elástico sólido a base un resorte para disipar las vibraciones ocasionadas durante el despegue del transportador o el ajuste de orbita de la misma estación espacial. (Winters Craig n.d.)



3.3.2 Características de los mecanismos de disipación energética

Actualmente existen un sinnfín de sistemas de control estructurales, estas se dividen en tres grupos, 1.- Aislamiento sísmico, 2.- Disipadores energéticos pasivos, 3.- Sistemas activos y semi-activos (Constantinou Michael et al. 1998)

■ Aislamiento Sísmico

- Apoyos elastomericos
- Apoyos a base de corcho
- Apoyos combinados
- Sistemas de péndulo por fricción
- Apoyos con deslizamiento con fuerza restauración

■ Disipación energética pasiva

- Amortiguadores metalicos
- Amortiguadores por fricción
- Amortiguadores visco-elástico sólido
- Amortiguadores de fluido viscoso y visco-elástico
- Amortiguadores de masa sintonizada
- Amortiguadores de líquido sintonizado

■ **Sistemas activos o semiactivos**

Sistemas de contraventeo activo

Amortiguador de masa activa

Sistemas de amortiguando con rigidez variable

Materiales inteligentes

3.3.3 Capacidad estructural para disipar energía

La capacidad de una estructura para disipar energía depende de diferentes factores, por ejemplo una estructura elástica disipa energía por deformación, dependiendo básicamente de la rigidez de la estructura. Una segunda forma de disipar energía es por deformación plástica o elasto-plástica, debido a la formación de articulaciones plásticas que se forman en las vigas y columnas, la estructura puede incrementar su capacidad para sobrevivir a un sismo evitando su colapso. Una tercera forma de disipación energética es incrementando el amortiguamiento de la estructura, existen varias formas de hacerlo, incluyendo los mecanismos de disipación energética que son parte de este estudio.

La energía disipada del sistema puede obtenida al integrar los diferentes términos de la ecuación de movimiento, la cual se presenta de la siguiente manera (Chopra Anil 2010).

$$\int_0^u m\ddot{u}(t)du + \int_0^u c\dot{u}(t)du + \int_0^u fsdu = - \int_0^u m\ddot{u}_g(t)du$$

Donde:

El primer término del lado izquierdo representa la energía cinética de la masa con relación al movimiento relativo del terreno

$$E_k(t) = \int_0^u m\ddot{u}(t)du$$

El segundo término del lado izquierdo representa la energía disipada por el amortiguamiento viscoso

$$E_D(t) = \int_0^u c\dot{u}(t)du$$

El tercer término del lado izquierdo representa la energía por recuperación elástica del sistema

$$E_s(t) = \int_0^u f s du = \int_0^u K u du$$

Por último el primer término del lado derecho representa la energía de entrada debido a la excitación sísmica en el sistema

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

En la figura 3.8 se muestra la variación de la suma de la energía en una historia del tiempo de una estructura bajo una sollicitación sísmica, básicamente lo que representa la gráfica es la energía total para cada paso del tiempo Δt en la cual se divide el análisis paso a paso. Esta misma gráfica será tomada en cuenta en los resultados generados en los diferentes modelos que se desarrollaron en esta tesis, principalmente para la energía por amortiguamiento ya que es esta la que se incrementa debido al amortiguamiento adicional en el sistema estructural.

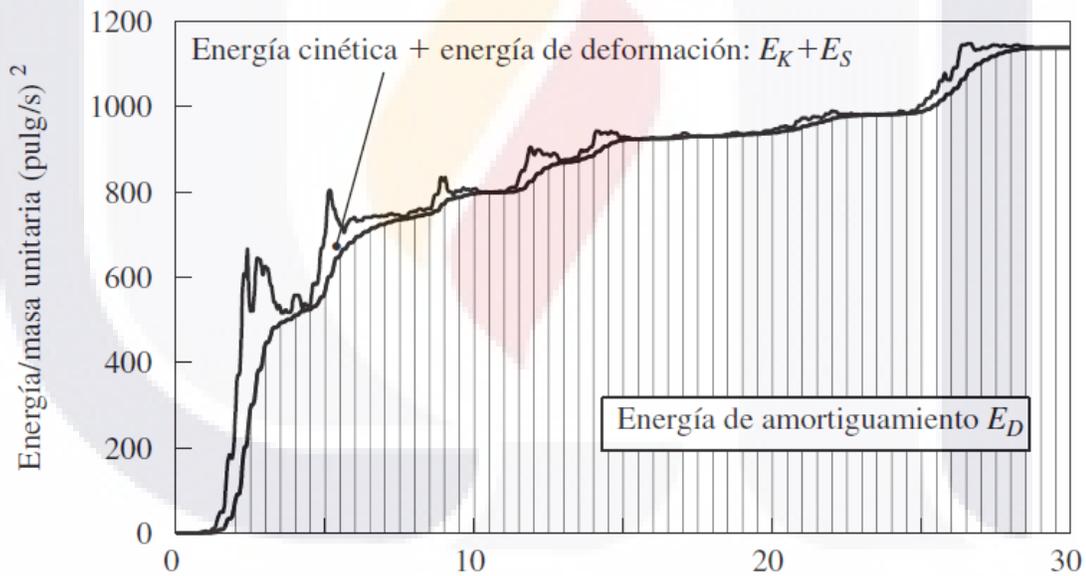


Figura 3.8 Variación de la energía disipada en una historia del tiempo bajo una sollicitación sísmica en un sistema lineal (Chopra Anil 2010)

3.3.4 Propiedades mecánicas de disipadores energéticos de fluido viscoso

Para el análisis numérico de este trabajo se va hacer uso de disipadores energéticos o amortiguadores de fluido viscoso, ya que son los más comerciales en la actualidad para estructuras. El mecanismo de un disipador de fluido viscoso está constituido básicamente, de un vástago y una cabeza de pistón con orificios, dentro de un cilindro con un acumulador en

un extremo y un sello en el otro extremo donde el vástago tiene libertad para moverse axialmente. El fluido usado para esta clase de disipadores es un aceite de silicón compresible, el cual tiene alta densidad, si nosotros llenáramos estos disipadores con agua su efectividad se reduciría, ya que la fricción entre el agua y la cabeza del pistón es menor que la del fluido de base silicón como se muestra en la figura 3.9.

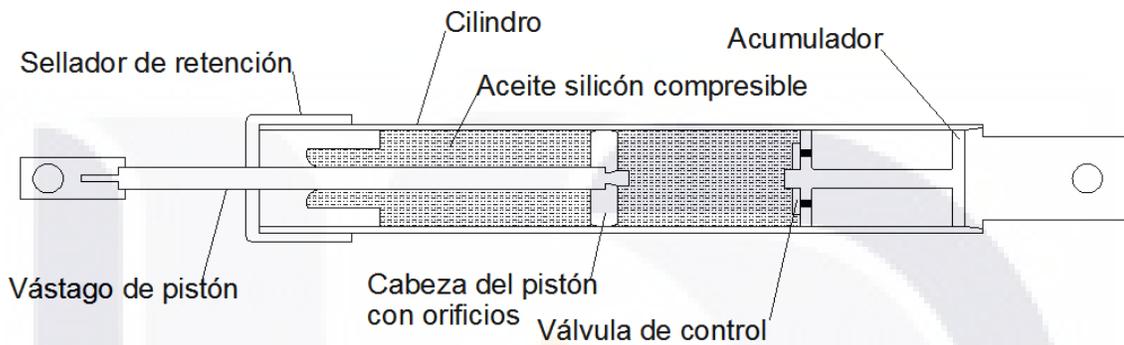


Figura 3.9 Arreglo de un mecanismo de fluido viscoso (Seleemah A. 1997)

Existen dos clases de disipadores de fluido viscoso, lineales y no lineales, la diferencia física se basa en el tipo de fluido, analíticamente esto se refleja en la siguiente formula empírica:

$$p = C_0[\dot{u}]^\alpha \text{sig } \dot{u}$$

Donde:

p es la carga axial

C_0 es el coeficiente de amortiguamiento

\dot{u} es la velocidad aplicada al disipador

α es un coeficiente que va de 0.3 a 2, para disipadores lineales el valor de $\alpha = 1$, para disipadores no lineales el valor de $\alpha = 0.5$

Para calcular el valor del coeficiente C_0 se prueba el disipador dinámicamente a diferentes frecuencias y velocidades, obteniéndose las graficas histéresis que muestran la fuerza del amortiguador y el desplazamiento (Seleemah A. and Constantinou M. 1997) como se muestra en la figura 3.10.

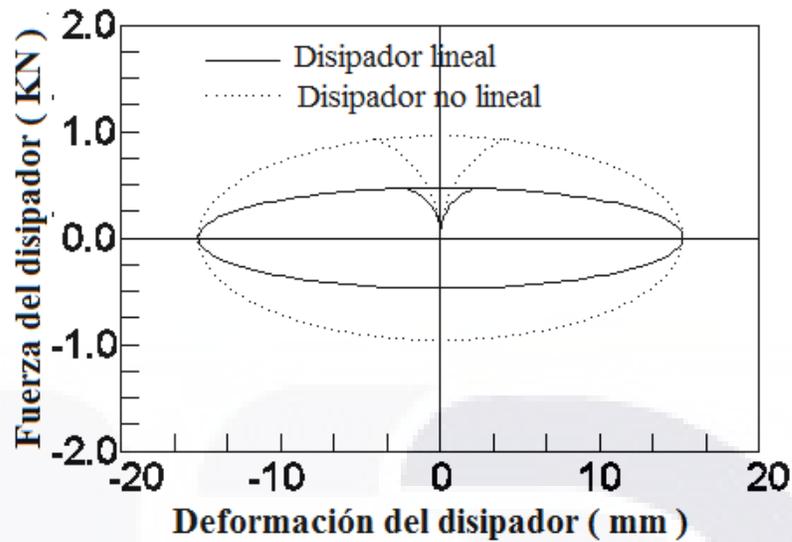


Figura 3.10 Curva de histeresis típica de un disipador de fluido viscoso (Seleemah A. and Constantinou M. 1997)

Una vez obtenidos estas graficas se grafican las fuerzas máximas para cada velocidad como se muestran en las figuras 3.11 y 3.12 para disipadores lineales y no lineales.

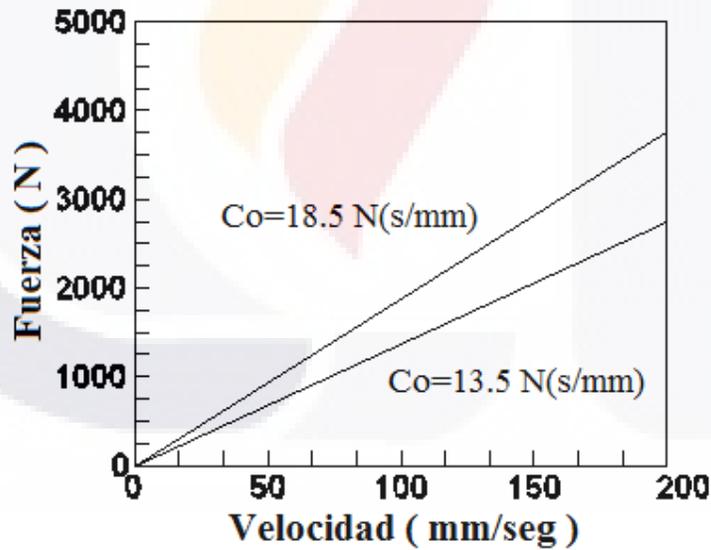


Figura 3.11 Grafica de la fuerza para un disipador lineal (Seleemah A. and Constantinou M. 1997)

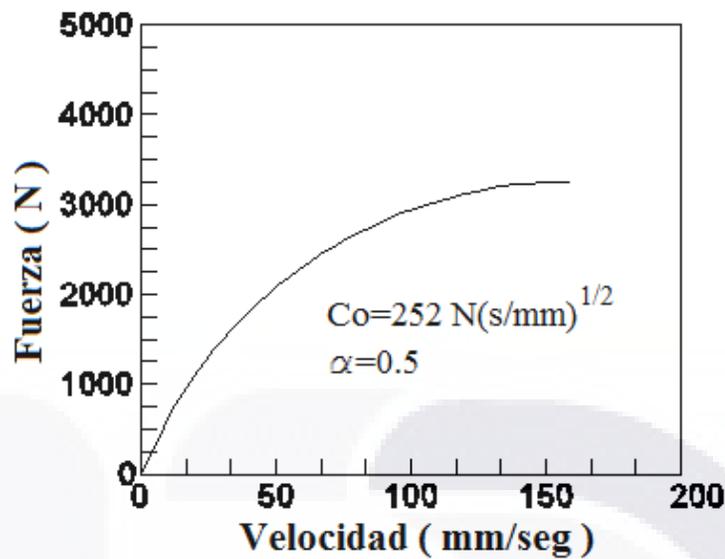


Figura 3.12 Grafica de la fuerza para un disipador no lineal (Seleemah A. and Constantinou M. 1997)

Como se muestran en estas graficas el valor de C_0 es la pendiente de las graficas es decir $C_0 = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Velocidad}}$. Para este estudio se hará uso de la grafica de C_0 para disipadores o amortiguadores lineales, dicho valor se usara en el software de análisis estructural usado para este estudio. Como se ha mostrado en las figuras 3.11 y 3.12 los disipadores no lineales muestran una mayor fuerza a mayores velocidades que los disipadores lineales (Seleemah A. and Constantinou M. 1997). La fuerza resultantes p en el mecanismo de disipación es el resultado del fluido a través de los orificios de la cabeza del pistón, dando como resultado una diferencia de presión a través del pistón (Constantinou Michael et al. 1998), es decir esta fuerza es proporcional es la diferencia de presión entre las dos cámaras.

3.4 Uso de disipadores energéticos de fluido viscoso en edificaciones históricas.

3.4.1 Aplicación de mecanismos de fluido viscoso en edificaciones históricas

La aplicación de los mecanismos de disipadores energéticos en edificaciones comenzó hacerse para reforzar edificios ya existentes, principalmente aquellas edificaciones que han tenido que ser reforzadas debido a que las últimas investigaciones en ingeniería sísmica han demostrado que son vulnerables a fuertes daños estructurales.

En los últimos años se ha comenzado a diseñar edificios nuevos incluyendo los mecanismos de disipación energética, los códigos de todo el mundo han adaptado sus criterios de diseño estructural para incluir el amortiguamiento adicional, además de adoptar los espectros de diseño para este criterio. En los últimos años se ha comenzado aplicar estos dispositivos mecánicos a edificios de mampostería, particularmente en algunos a edificios históricos, como se describió en el capítulo 2 (Mazzonali, Federico 2008), sin embargo sabemos de ante mano que una estructura de mampostería tiene una mayor rigidez a la flexión, es por esto que en principio un disipador o amortiguador tiene una menor contribución a reducir la respuesta dinámica en un edificio de mampostería que a un edificio con mayor ductilidad como una estructura a base de marcos. Sin embargo, la contribución de un disipador energético en un edificio de mampostería puede ayudar a minorar el daño y el colapso de esta, en algunos casos como edificios históricos la fuerte inversión que implica hacer, puede quedar justificada por los valores intrínsecos e históricos que se busca proteger. Cabe mencionar que el objetivo de un disipador energético de fluido viscoso es de proveer de un amortiguamiento adicional a una estructura, existen mecanismos de disipación energética como los disipadores visco-elásticos o de fricción que además de proveer amortiguamiento adicional proveen rigidez adicional a la estructura, sin embargo en el caso de una estructura histórica de mampostería con materiales más débiles no es conveniente hacer uso de disipadores energéticos que proveen rigidez, ya que esto implica componentes de fuerzas verticales y horizontales inducidas a la estructura por el disipador, siendo estas fuerzas en algunas ocasiones demasiado grandes que lleven a la falla la mampostería de un edificio histórico durante un evento sísmico.

3.3.2 Uso de disipadores energéticos en edificios religiosos patrimoniales

En la actualidad se ha hecho uso de mecanismos de disipación energética en edificaciones religiosas patrimoniales, sin embargo muchas de estas aplicaciones son producto de una adaptación en particular ya que debido a la compleja geometría es difícil poder colocarlos de forma efectiva. Esta misma dificultad no fue la excepción durante este análisis, de tal forma que solo se encontraron dos opciones para localizar estos mecanismos de disipación energética como se describirá más adelante. Se han desarrollado ya algunas aplicaciones de sistemas de protección en edificios religiosos patrimoniales, principalmente

sistemas de disipación energética. Una de estas experiencias ha sido el desarrollado por Prohitec para la catedral gótica de Fossanova (Mazzonali, Federico 2008), donde se desarrollaron modelos numéricos y modelos a escala con el fin de evaluar la viabilidad del uso de sistemas de protección sismorresistente. En este caso se probó un sistema de disipación a base de cables hechos de fibra de vidrio, se hicieron pruebas en la tabla vibradora como se ve en la figura 3.13, las pruebas mostraron que el uso de cables de fibra de vidrio aumento la resistencia de la estructura hasta 3 veces.

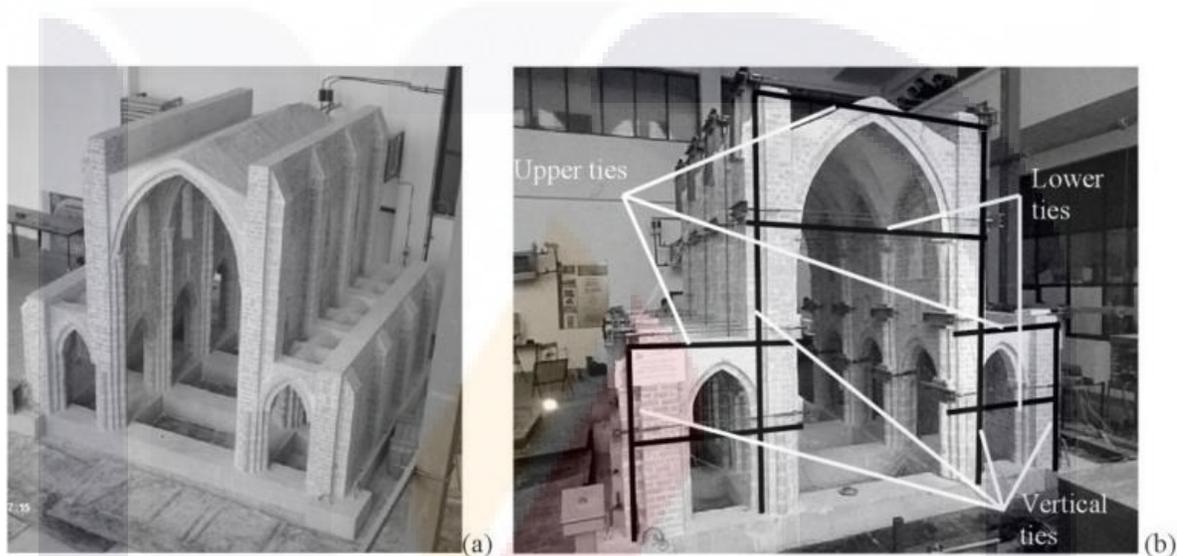


Figura 3.13 Modelo escala de la catedral de Fossanova en IZIIS Laboratory in Skopje

3.5 Descripción de las configuraciones de los mecanismos de disipación energética aplicados en el análisis del edificio religioso colonial

Antes de entrar en los detalles de las diferentes configuraciones usadas en esta tesis, hay que aclarar que todos los mecanismos de disipación energética recibirán solo cargas axiales de la estructura durante la sollicitación sísmica, independientemente de la configuración que se use, se proponen tres configuraciones una simple y dos configuraciones con el fin de amplificar la carga axial en el mecanismo. La primera, es una configuración simple, donde el mecanismo de disipación energética se coloca usando elementos estructurales en forma axial, es decir, se puede decir que el disipador recibe las cargas axiales de la estructura de forma directa y este se conecta por medio de ménsulas fijas a la estructura y articuladas al mecanismo como un contraviento como se muestra en la figura 3.14.

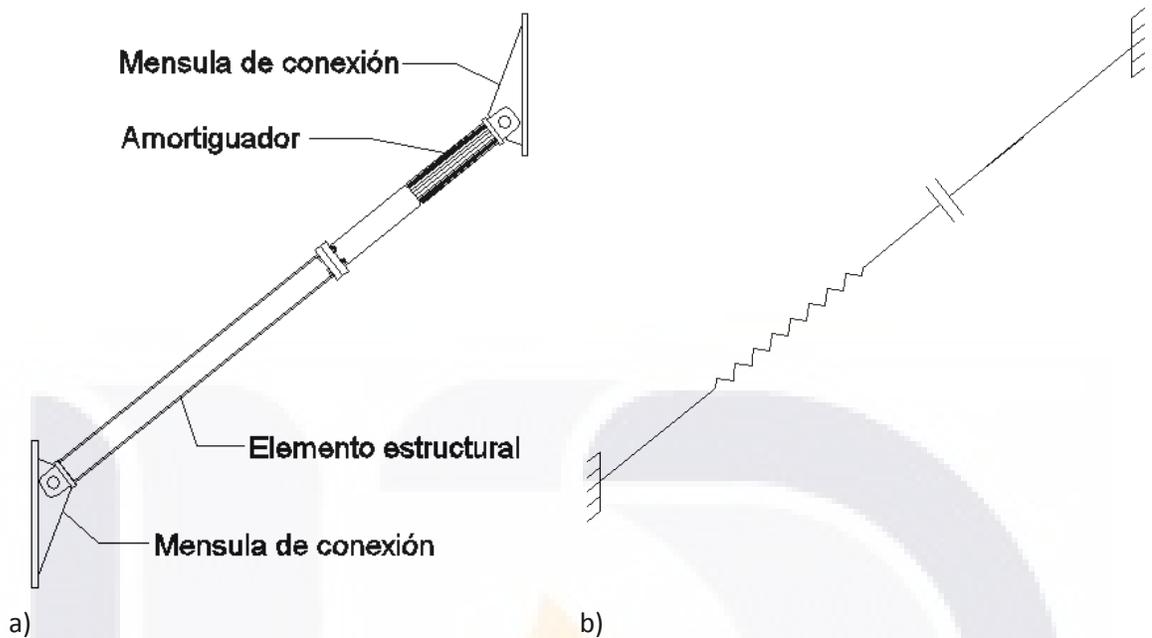


Figura 3.14 a) Configuración de mecanismo de disipación simple b) modelo reológico

En los últimos años se han desarrollado algunas configuraciones especiales para los mecanismos de disipación energética, con elementos estructurales hechos de acero con el fin de amplificar la efectividad del disipador, en las figuras 3.15 y 3.16, se muestran la segunda y tercera configuraciones usadas en esta tesis, ya que en algunos casos la configuración simple por sí sola no es capaz trabajar con suficiente efectividad debido a la geometría y rigidez de la estructura.

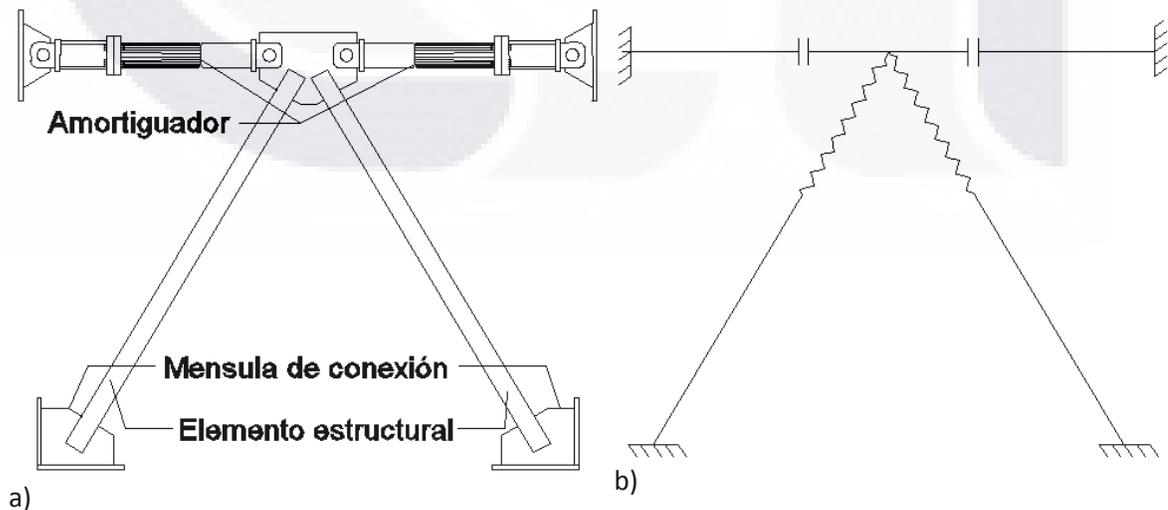


Figura 3.15 a) Configuración de mecanismo de disipación en chevron b) modelo reológico

Las configuraciones de los mecanismos de disipación energética mostrados en las figuras 3.15 y 3.16, ayudan a mejorar la respuesta dinámica del disipador, esto, es una ventaja, principalmente para estructuras de mampostería con mayor rigidez, menor deformación y velocidades más bajas durante una sollicitación sísmica. El mecanismo definido como tijera mostrado en la tabla 3.3 no será usado para esta tesis por la dificultad para instalarlo a través de la estructura del templo colonial. En la tabla 3.3 se muestran los factores de amplificación y estos son mayores para las configuraciones en chevron y excéntrico con palanca que las configuraciones simples.

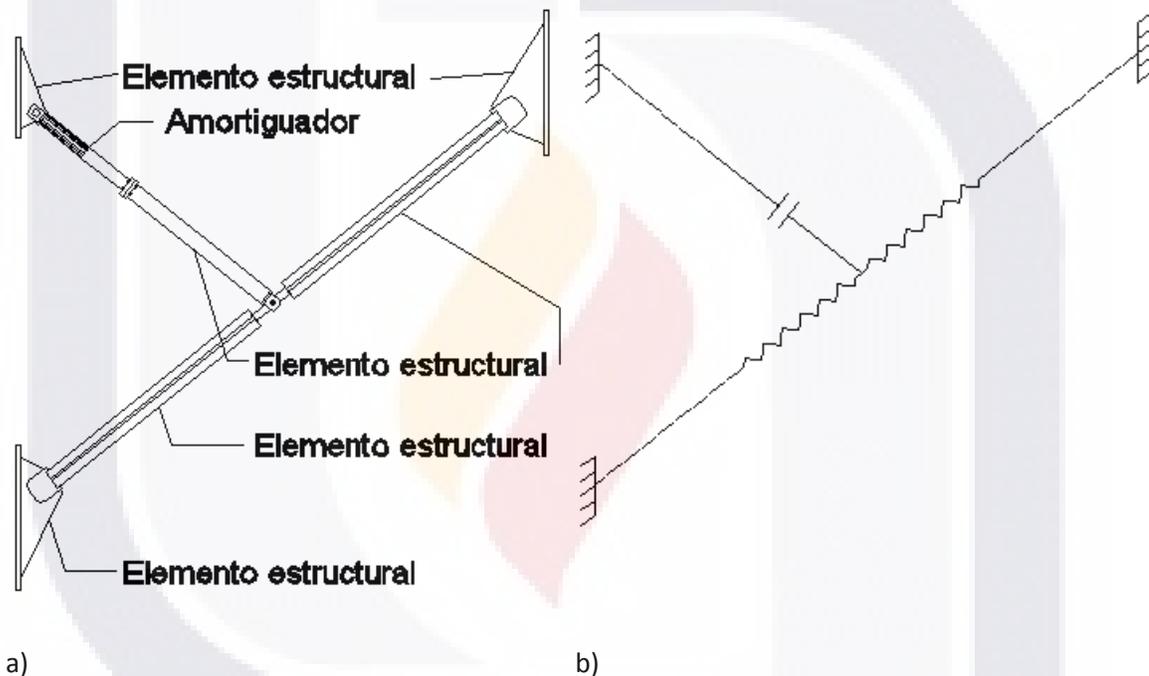
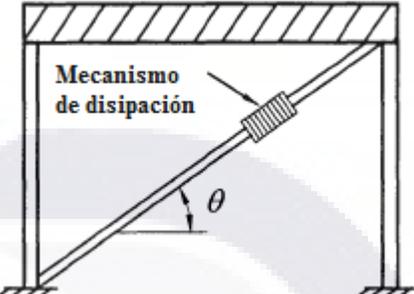
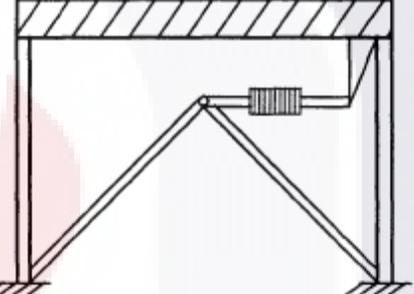
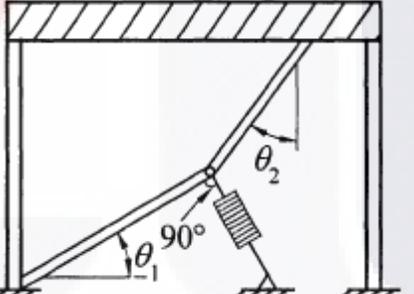
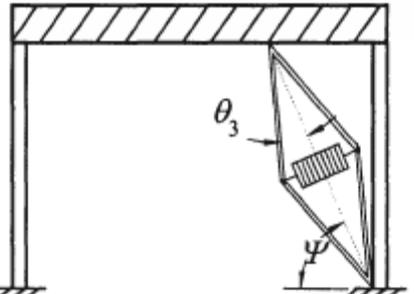


Figura 3.16 a) Configuración de mecanismo de disipación excéntrico con palanca b) modelo reológico

3.6 Instalación de los mecanismos de disipación energética

En la figura 3.17 se muestra como se puede instalar y conectar los mecanismos de disipación energética con el edificio religioso colonial. Los elementos de las diferentes configuraciones se conectan a través de ménsulas hechas a base de placas de acero, a su vez estas ménsulas se conectan a la edificación patrimonial de mampostería por medio de anclas de acero, tratando de realizar las menores perturbaciones en la estructura de mampostería existentes, se deberán de realizar agujeros, donde se introducirán estas anclas a su vez se

puede usar un epóxico químico elástico para asegurar la conexión entre las anclas y la mampostería.

Tipo de mecanismo	Configuración del mecanismo
<p>Disipador de fluido viscoso simple</p> <p>Factor de amplificación</p> <p>$f = \cos \theta$</p>	 <p>Mecanismo de disipación</p> <p>θ</p>
<p>Disipador de fluido viscoso en chevron, con dos elementos estructurales</p> <p>Factor de amplificación</p> <p>$f = 1$</p>	
<p>Disipador de fluido viscoso con palanca excéntrica, con dos elementos estructurales</p> <p>Factor de amplificación</p> <p>$f = \frac{\sin \theta_2}{\cos(\theta_1 + \theta_2)} + \sin \theta_1$</p>	 <p>θ_2</p> <p>90°</p> <p>θ_1</p>
<p>Disipador de fluido viscoso en tijeras, con 4 elementos estructurales</p> <p>Factor de amplificación</p> <p>$f = \frac{\cos \psi}{\tan \theta_3}$</p>	 <p>θ_3</p> <p>ψ</p>

En la figura 3.17 se muestra como se puede instalar y conectar los mecanismos de disipación energética con el edificio religioso colonial. Los elementos de las diferentes configuraciones se conectan a través de ménsulas hechas a base de placas de acero, a su vez estas ménsulas se conectan a la edificación patrimonial de mampostería por medio de anclas de acero, tratando de realizar las menores perturbaciones en la estructura de mampostería existentes, se deberán de realizar agujeros, donde se introducirán estas anclas a su vez se puede usar un epóxico químico elástico para asegurar la conexión entre las anclas y la mampostería.

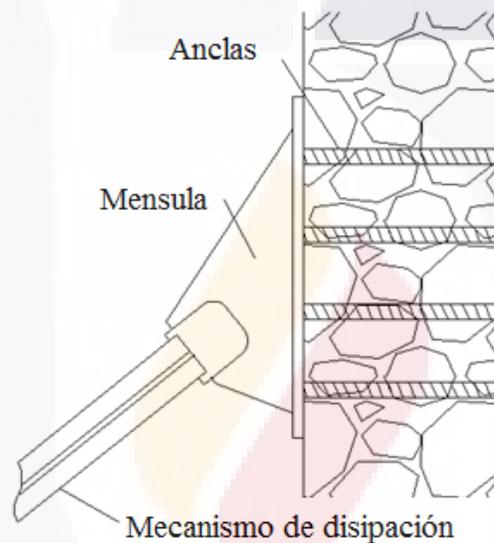


Figura 3.17 Conexión de un mecanismo de disipación energética en un muro de mampostería

Es importante aclarar nuevamente que los mecanismos de disipación de fluido viscoso tienen la gran ventaja de no transmitir rigidez a la estructura, es decir, la perturbación de la carga axial del mecanismo de disipación hacia la mampostería a través de la conexión deba ser cerca de 0 newtons. Por último se recomienda que los mecanismos de disipación energética no desarrollen cargas de más de 10,000 newtons, con el objetivo de poder instalar mecanismos que no sean muy grandes, ya que será muy difícil su instalación en esta clase de estructuras pues entre más capacidad requieren los mecanismos son de mayores dimensiones y peso, se recomienda instalar mecanismos que no midan más de 100 centímetros de longitud y que no pesen más de 80 kilogramos.

Análisis de los modelos numéricos

4.1 Descripción de los modelos numéricos y análisis**4.1.1 Elección de un modelo**

Para el modelo de análisis de la iglesia colonial se hizo uso de un prototipo desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Este prototipo es una simplificación de un templo colonial típica de Oaxaca, que se definió originalmente para desarrollar un modelo a escala 1:8 con el fin de hacer pruebas en la tabla vibradora del Instituto de Ingeniería (Chavez M. 2010). Posteriormente se desarrollo un análisis numérico en base a las dimensiones del templo colonial para tratar de validar las pruebas hechas en el modelo a escala.

4.1.2 Descripción del tipo de edificio religioso colonial estudiado

El prototipo como se menciona anteriormente es una simplificación de un templo colonial oaxaqueño, como se muestra en la figura 4.1.

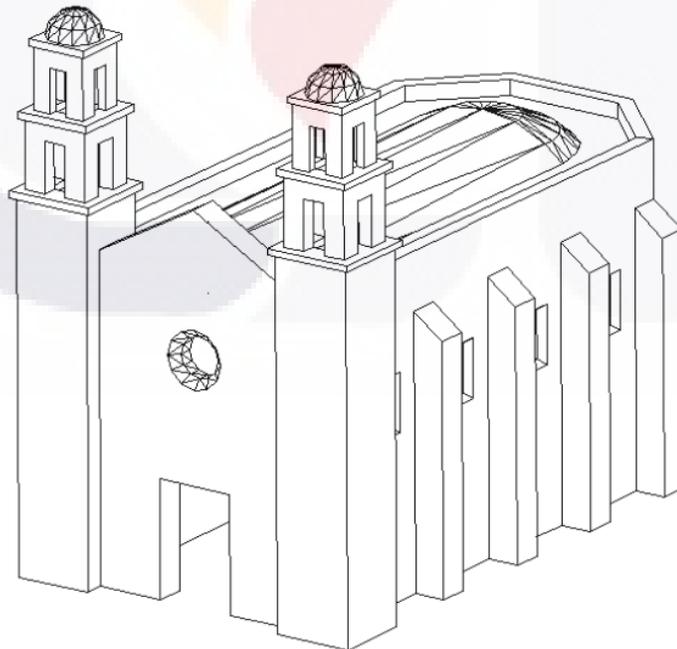
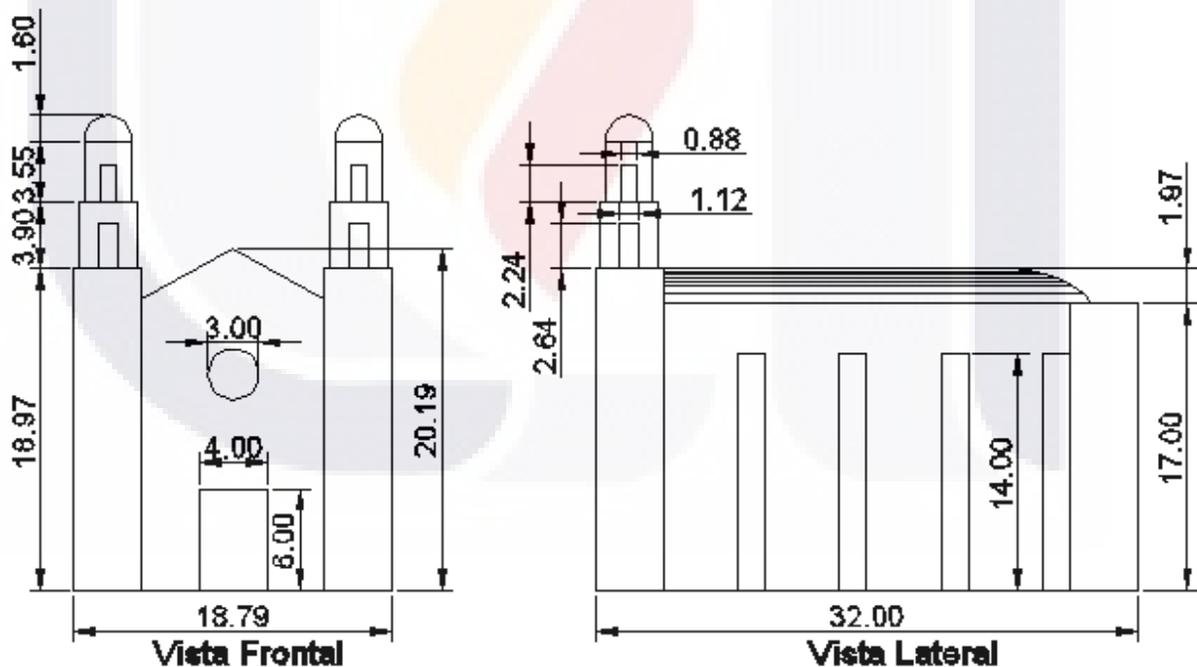


Figura 4.1. Prototipo de un templo colonial típico oaxaqueño usado en análisis de esta tesis (Chávez M 2005)

La nave principal está compuesta por muros laterales reforzados con contrafuertes repartidos en su longitud, el ábside, se compone de muros del mismo espesor que los muros laterales, y tiene una forma semicircular, la cubierta está formada por un arco hecho a base de ladrillo, la bóveda se apoya en los muros laterales y en la parte trasera esta rematada por un semiesfera. A su vez, existe sobre los muros perimetrales un parapeto que cubre parcialmente la cubierta, por último, la fachada está compuesta por dos torres unidas con un muro que termina en un frontón en forma triangular, las torres cambian de sección en su altura como se muestran en las dimensiones, en la parte superior existen dos campanarios en cada torres, la torres remata en su parte superior con dos cupulines de forma semiesférica.

4.1.3 Dimensiones del edificio religioso colonial

A continuación se ilustran las dimensiones del prototipo del edificio religioso colonial típico oaxaqueño que se selecciono para el modelo numérico de esta tesis.



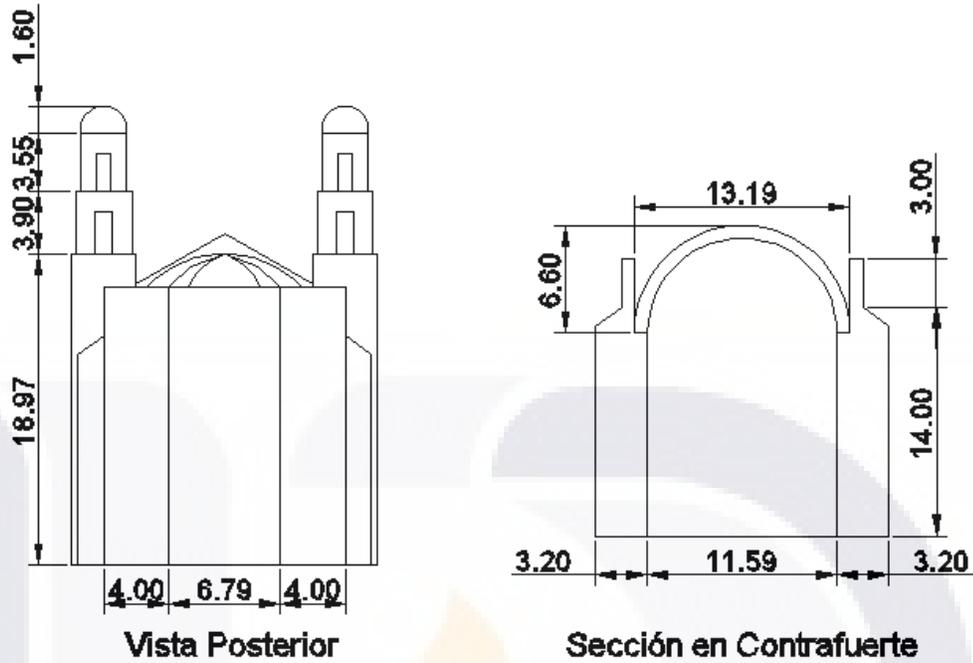


Figura 4.2 Dimensiones (metros) de las alturas de templo colonial

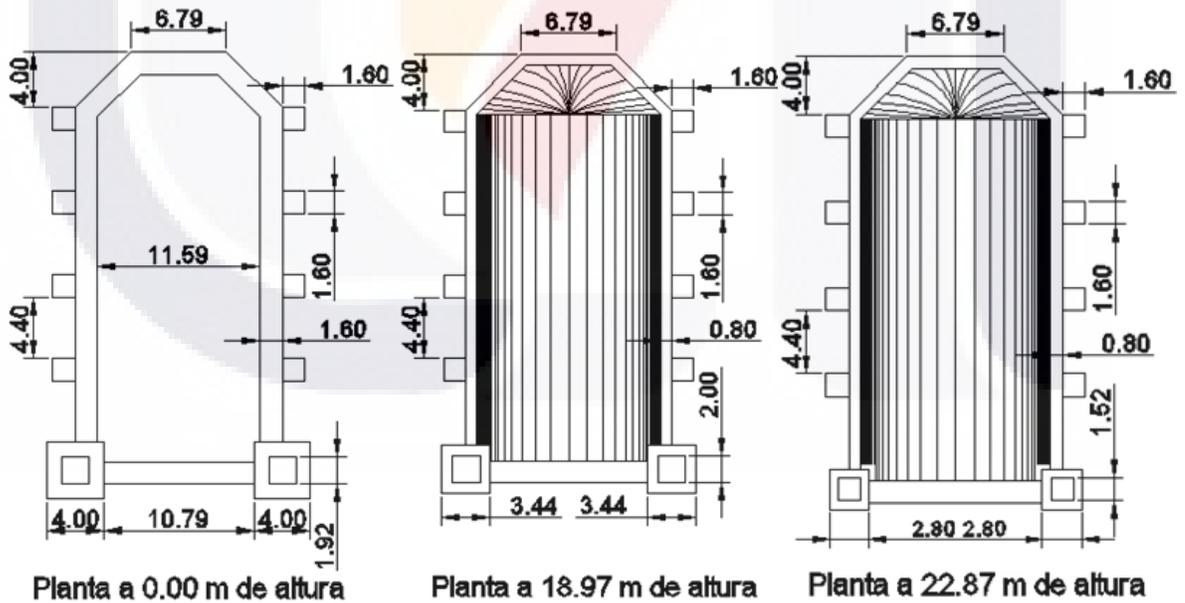


Figura 4.3 Dimensiones (metros) en planta del templo colonial

4.2 Método de análisis

4.2.1 Modelo de análisis por elementos finitos

El análisis numérico se desarrollo haciendo uso del método de elementos finitos en SAP2000. Para los análisis estático y dinámico se usaron elementos cascarón de cuatro y tres nudos, estos elementos trabajan tanto en su plano como en el perpendicular, es decir asumen elementos mecánicos de membranas y placas. Si bien los elementos cascarón muestran los esfuerzos en dos caras, para los objetivos de este análisis es más que suficiente y el análisis se puede hacer en tres dimensiones, en la figura 4.4 se muestra el modelo por elementos finitos en tres dimensiones usado para este análisis. En los análisis de esta tesis el modelo usado está compuesto por 7467 nudos y 7398 elementos.

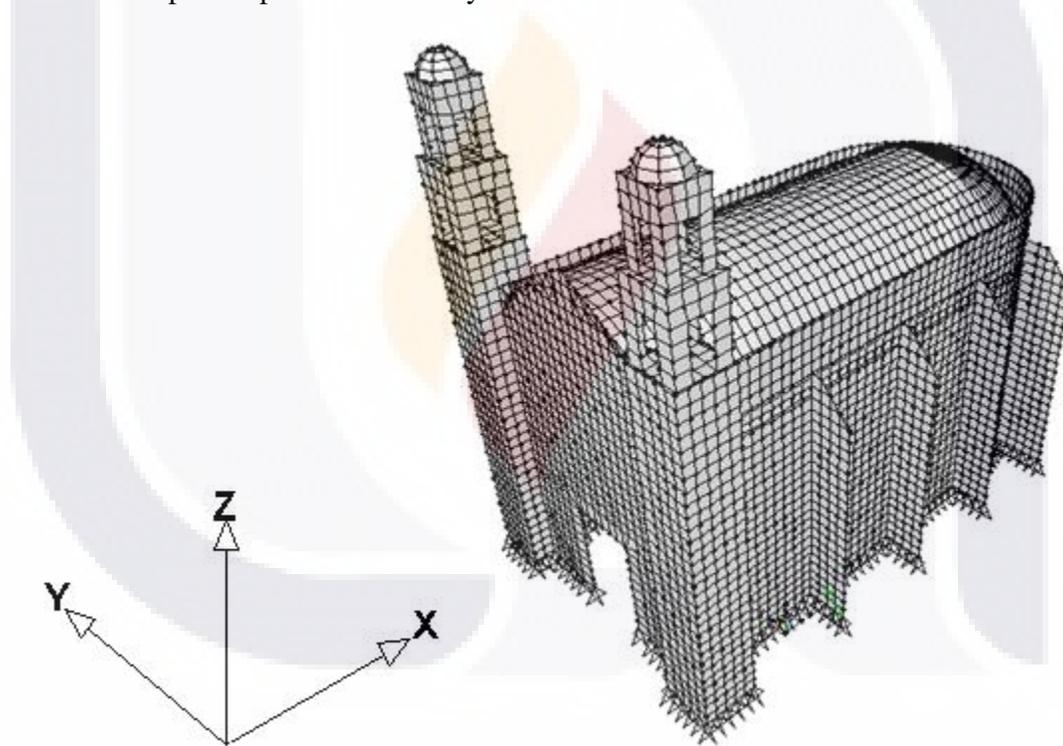


Figura 4.4. Modelo de análisis por elementos finitos y los ejes globales principales

4.2.2 Descripción del elemento cascaron (Shell) de 4 nudos

La formulación de la integración numérica de cuatro puntos es usada para la rigidez, esfuerzos, fuerzas internas y momentos, en un sistema coordenadas locales elementales son evaluados en puntos de integración gaussiana de 2 por 2 y extrapolado en las juntas del elemento. Un error

aproximado en los esfuerzos y las fuerzas internas del elemento pueden ser estimadas a partir de la diferencia de los valores calculados de diferentes elementos que tiene nudos en común. Esto nos dará una indicación de la exactitud de la aproximación por elementos finitos así como el refinamiento del mallado seleccionado. En la figura 4.5 se muestran algunas de las propiedades de los elementos cascarón de cuatro y tres nudos usados en esta tesis, como sus ejes locales elementales, la configuración de sus caras, y sus nudos. La orientación por default de los ejes locales 1 y 2 están determinadas por la relación entre el eje local 3 y el eje global Z.

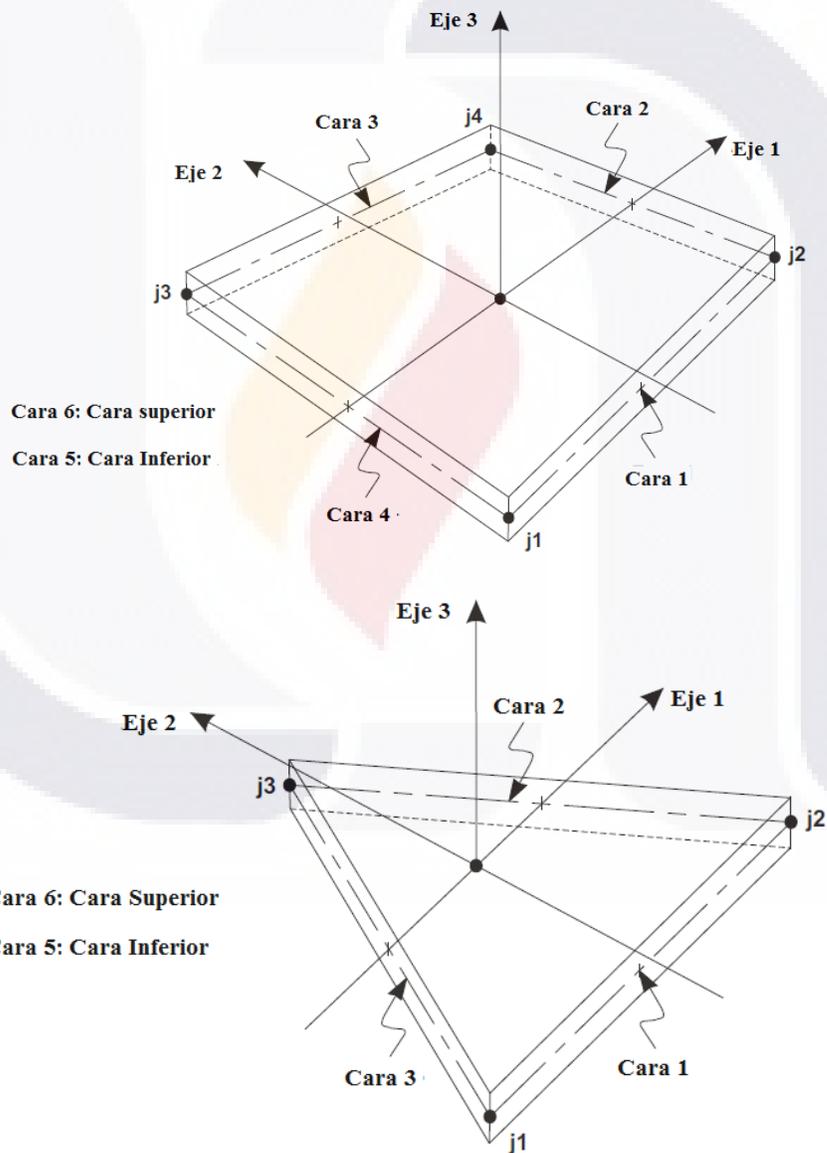


Figura 4.5. Elementos cascarón de 4 y 3 nudos, ejes y caras (Computer and Structures Inc. 2009)

- El plano local 3-2 es tomado como vertical paralelo al eje Z
- El eje 2 es tomado en dirección vertical hacia arriba (+Z), a menos de que el elemento esta horizontal, en cuyo caso, el eje 2 se considera paralelo al eje global +Y
- El eje local 1 es horizontal, si limita con el plano X-Y
- El elemento se considera como horizontal si el seno del ángulo entre el eje local 3 y el eje global Z es menor a 10^{-3}

Para el espesor del elemento cascarón se esta considerando en SAP2000 como la formulación Thick-plate (Midlin/Reisner) para tener en cuenta los efectos a cortante ya que en elemento rígidos y gruesos como la mampostería son importantes, a pesar de que estos se encuentran bajo momentos flexionantes principalmente.

4.2.3 Los grados de libertad del elemento cascaron (Shell)

Usualmente existen 6 grados de libertad en cada nudo (UX, UY, UZ, RX RY y RZ) como se muestran en la figura 4.6, se recomienda usar el elemento cascarón en análisis tridimensional es decir membrana mas placa (Computer and Structures Inc. 2009), todos los grados de libertad están activos para en los diferentes análisis de esta tesis.

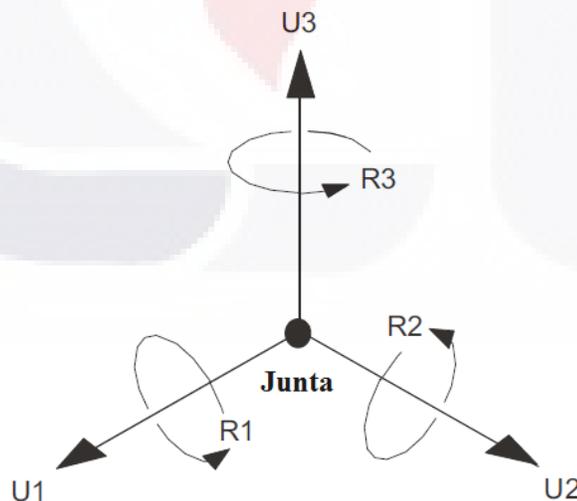


Figura 4.6 grados de libertad activados para cada nudo del elemento cascarón (Computer and Structures Inc. 2009)

4.2.4 Propiedades de los esfuerzos

Los esfuerzos para los elementos cascaron son 5 (S11, S22, S12, S13, S23 notación para SAP2000) Para efectos de esta tesis se utilizaran los esfuerzos elementales en su plano, los cuales representan a los esfuerzos axiales σ_{11} (S11) y σ_{22} (S22), los esfuerzos resultantes del análisis nos darán un parámetro de la efectividad de los mecanismos de disipadores energéticos aplicados a la estructura, ya que, el amortiguamiento adicional reducirá tanto las deformaciones como los esfuerzos en la estructura bajo la sollicitación sísmica, en la figura 4.7 se muestran la característica de los esfuerzos en el plano del elemento cascaron (Shell).

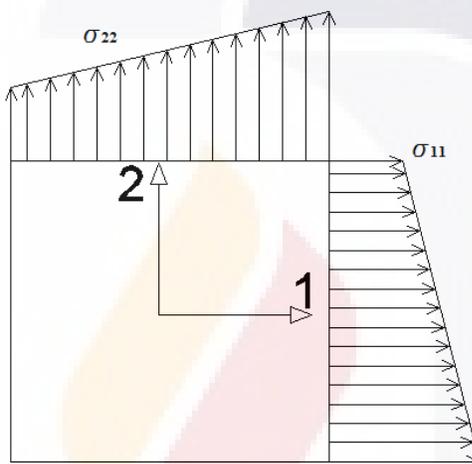


Figura 4.7 Esfuerzos locales en el elemento cascaron (Shell)

4.3 Efectos del Peso propio

Es muy importante tomar en cuenta los efectos del peso propio en estructuras de tipo colonial. Sin embargo los efectos del peso propio se obtienen mediante un análisis estático, el cual no se puede combinar directamente con el efecto del sismo en un análisis paso a paso en una historia de tiempo. Es por esto que se propone cargar los efectos del peso propio por medio de una función rampa, el cual tendrá la misma duración que la función usada para el acelerograma del sismo que se va a utilizar en el análisis dinámico del templo colonial. Se propuso que la función rampa comience en cero, y suba con una pendiente de un segundo de longitud y 981 cm/seg^2 , la cual es la aceleración de la gravedad multiplicada por la masa nos dará el peso propio de la estructura, después de un segundo la aceleración de 981 cm/seg^2 se mantendrá constante hasta terminar el sismo. De esta manera se podrá combinar el efecto del peso propio con el sismo durante el análisis paso a paso.

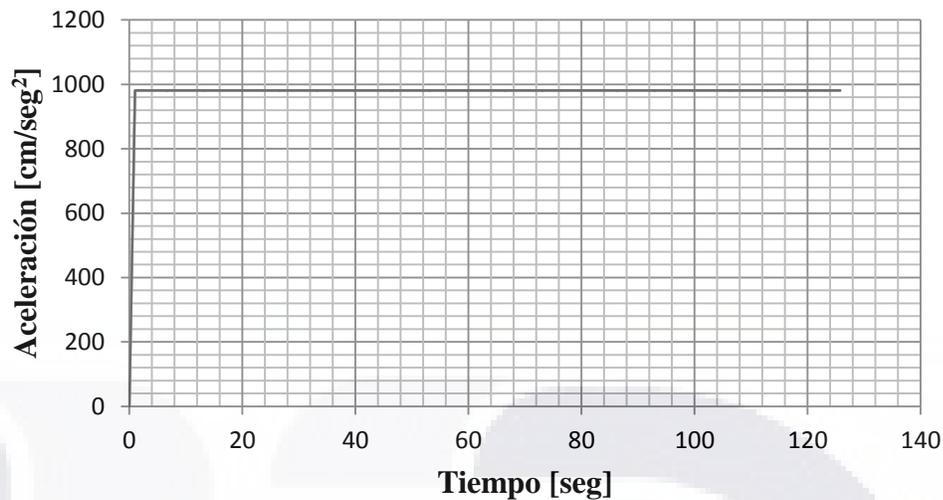


Figura 4.8 Función rampa para tomar en cuenta el peso propio durante el análisis paso a paso en una historia de tiempo.

Cabe destacar que esta función fue calibrada con el análisis estático considerando peso propio, y se verificaron las deformaciones y esfuerzos para verificar que estas fueran compatibles y validar la función rama para un análisis dinámico.

4.4 Propiedades mecánicas de los materiales

En la tabla 4.1 se muestran las propiedades mecánicas de los materiales usados para este análisis, principalmente el peso volumétrico y el modulo de elasticidad. Estas propiedades son producto de pruebas de laboratorio efectuadas en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Chavez M. 2010). En la figura 4.9 se muestra como han sido distribuidos los materiales en los modelos originales en la cual se ha basado este trabajo y de la misma forma para los análisis de esta tesis. El comportamiento de las propiedades mecánicas de los materiales usados en esta tesis se limita a un comportamiento elástico-lineal, ya que para los objetivos y alcances de este trabajo, no se requiere de un comportamiento inelástico por parte de los materiales. Además también el comportamiento de los mecanismos de disipación energética se limitara de la misma manera a un comportamiento elástico, cuyas propiedades fueron descritas en el capítulo 3.

Tabla 4.1 Propiedades mecánicas de materiales						
Tipo de Mampostería	Elementos Estructurales	Peso Volumétrico [Kg/cm ³]	Modulo de Elasticidad [Mpa]	Resistencia a la Compresión [Mpa]	Resistencia a la Tensión [Mpa]	Relación de Poisson
Piedra	Nave Torres parte inferior	1800	442	1.28	0.089	0.3
Ladrillo	Bóveda Torres parte superior	1550	540	3.93	0.28	0.3

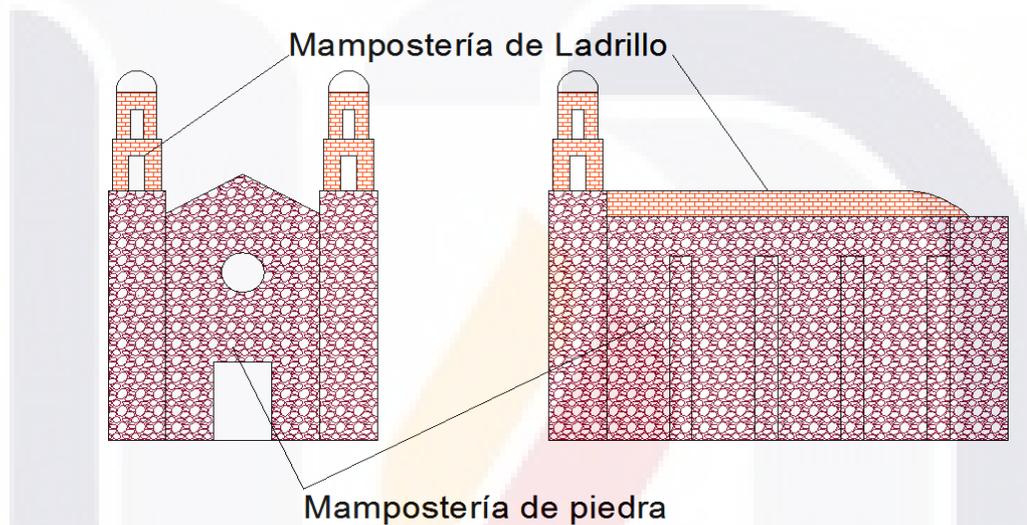


Figura 4.9 Localización de los materiales en el análisis numérico

4.5 Acelerogramas usados en el análisis

En esta sección se muestra el acelerograma usado para esta tesis, este acelerograma es un registro del sismo que tuvo lugar el 19 de septiembre de 1985, este registro que corresponde a la estación La Unión en el estado de Guerrero, sobre roca y fue obtenido en la base de datos de los registros acelerográficos de la Red Sísmica Mexicana del Instituto de Ingeniería de la UNAM, en el anexo A.1 se muestran instrucciones para obtener estos registros en la página de internet.

Datos del sismo
 Fecha del sismo y hora [GMT] :1985/09/19, 13:17:42,6
 Magnitud(es) : Mb=6.80/Ms=8.10/Mc=8.10
 Coordenadas del epicentro : 102.942 LONG. W
 Profundidad focal (km) : 15

En la figura 4.10 se muestra el acelerograma usado en esta tesis, el cual corresponde a la componente Norte-Sur de la base de datos, usualmente cada registro muestra las aceleraciones de 3 componentes, Este-Oeste , Vertical y Norte-Sur, para los análisis de esta tesis se opto por la componente Norte-Sur ya que esta componente tiene las mayores aceleraciones.

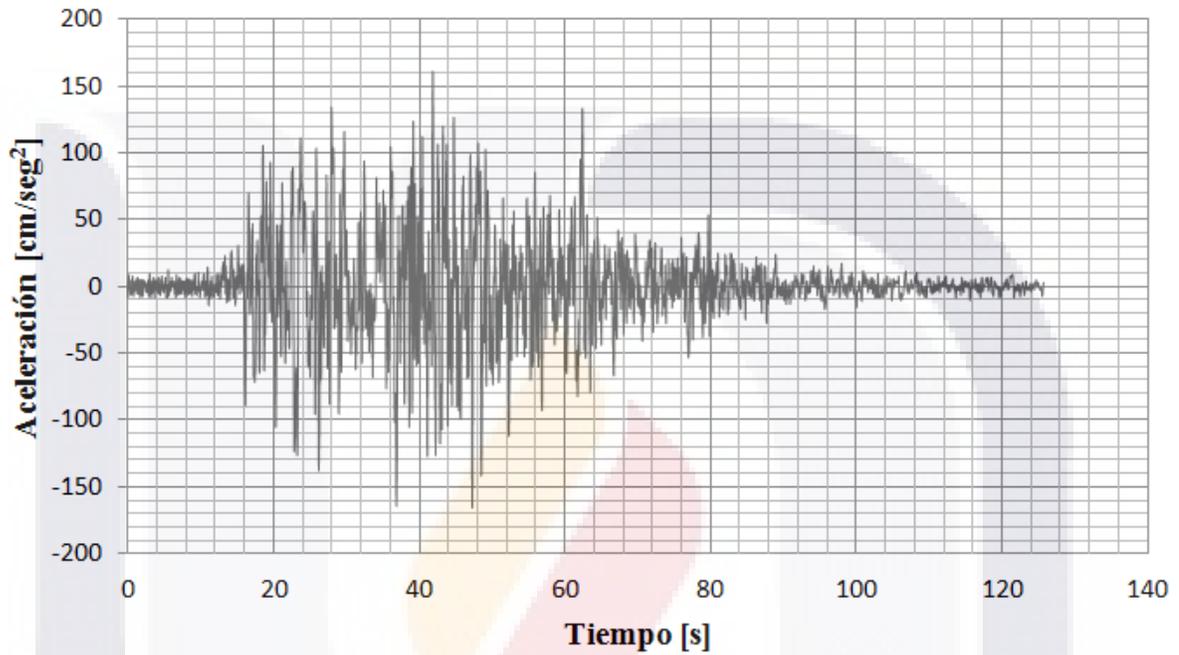


Figura 4.10 Acelerograma usado para los análisis

Para el análisis sísmico de la iglesia colonial se aplico el acelerograma en la dirección Y como muestra en la figura 4.11

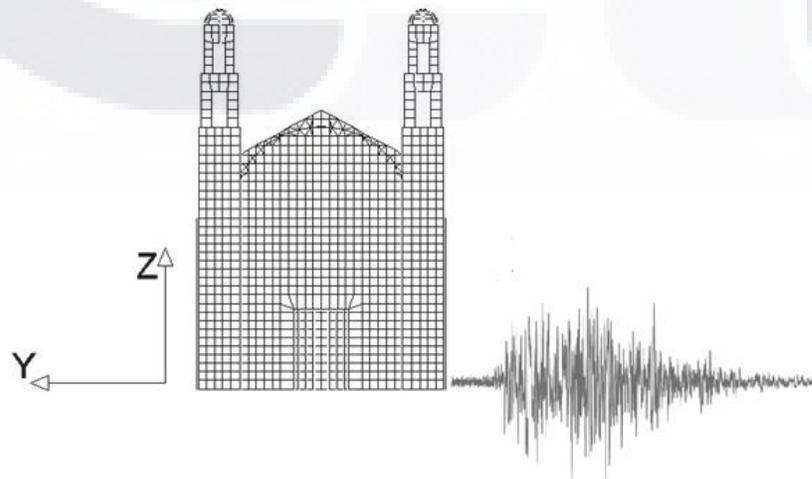


Figura 4.11 Dirección en la que se aplico el acelerograma en el modelo estructural

4.6 Método de análisis sísmico para evaluar la efectividad de los mecanismos de disipación energética en el edificio religioso colonial

4.6.1 Software usado en el análisis

Para el análisis sísmico del prototipo del templo colonial se hará uso del programa de análisis estructural llamado SAP2000, este software cuenta con una poderosa herramienta de análisis dinámico paso a paso modal, además, es uno de los programas con las mayores opciones para introducir las propiedades de los diferentes mecanismos de disipación energética conocido en la actualidad, especialmente los mecanismos de disipación energética de fluido viscoso usados en esta tesis. Los mecanismos de disipación energética son dados de alta en SAP2000 como elementos links. Estos elementos tienen características mecánicas típicas de amortiguamiento que se define como la pendiente entre la fuerza y la velocidad como se mostro en la sección 3.2.2. En el anexo A.1 se muestran los pasos a seguir para dar de alta las propiedades mecánicas el elemento link.

4.6.2 Descripción del método de análisis sísmico

El método usado evaluar la efectividad de los mecanismos de disipación energética en el prototipo de la iglesia colonial consiste básicamente en generar un análisis de la respuesta dinámica de la iglesia paso a paso, usando la función del acelerograma mostrado en la sección 4.5. Se genera un primer modelo para el análisis sísmico, sin incluir los mecanismos de disipación energética, posteriormente se generan otros modelos incluyendo estos mecanismos con el fin de comparar los resultados con el primer modelo. Para el análisis sísmico paso a paso se optara por el análisis dinámico modal lineal en una historia de tiempo. Como se ha mencionado se opto por un análisis elástico lineal ya que de acuerdo a los alcances de esta tesis, sólo se requiere conocer los efectos dinámicos del modelo de la iglesia incluyendo el amortiguamiento adicional aportado por la disipación energética. Para los sistemas lineales la ecuación que controla la respuesta lineal inducida por un movimiento sísmico está dada por:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p_{ef}(t)$$

donde:

$$p_{ef}(t) = m\ddot{u}_g(t)$$

La respuesta estructural $u(t)$ esta en función de $\ddot{u}_g(t)$ es la excitación sísmica $\ddot{u}_g(t)$ a la base como se muestra en la figura 4.12

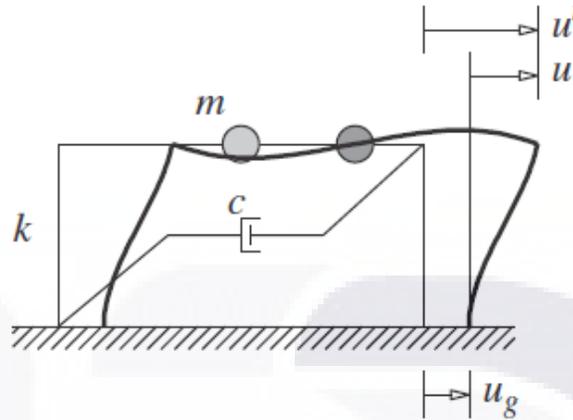


Figura 4.12 Respuesta estructural debido a un movimiento a la base (Chopra Anil 2010)

La matriz de amortiguamiento \mathbf{c} no es necesaria en el análisis modal de la respuesta sísmica; en su lugar, son suficientes las fracciones de amortiguamiento modal (Chopra Anil 2010). El desplazamiento \mathbf{u} de un sistema con N grados de libertad puede definirse como la superposición de las contribuciones modales:

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

La distribución espacial de las fuerzas sísmicas efectivas $p_{ef}(t)$ está definida por $s = m\ell$. Esta distribución de fuerza puede expandirse como la sumatoria de las distribuciones de la fuerza inercial modal s_n

$$m\ell = \sum_{n=1}^N S_n = \sum_{n=1}^N \Gamma_n m \phi_n$$

donde: $\Gamma_n = \frac{L_n}{M_n}$ $L_n = \phi_n^T m \ell$ $M_n = \phi_n^T m \phi_n$

El coeficiente L_n puede deducirse al multiplicar antes ambos lados de la ecuación anterior por ϕ_n^T y usando la propiedad de ortogonalidad de los modos para $s = m\ell$. La contribución del n -ésimo modo $s = m\ell$ a es

$$s_n = \Gamma_n m \phi_n$$

Aplicando las ecuaciones modales usando la aceleración en el terreno $\ddot{u}_g(t)$ obtenemos:

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

Sustituimos las coordenada modales q_n por D_n donde $q_n = \Gamma_n D_n$ obtenemos :

$$\ddot{D}_n + 2\xi_n \omega_n \dot{D}_n + \omega_n^2 D_n = -\ddot{u}_g(t)$$

De tal forma $q_n(t)$ puede calcularse una vez que se resuelva la ecuación para $D_n(t)$ usando los mismos métodos numéricos en el tiempo paso a paso para los sistemas de un grado de libertad. La contribución del n -ésimo modo a los desplazamientos nodales $\mathbf{u}(t)$ es

$$u_n(t) = \phi_n q_n(t) = \Gamma_n m \phi_n D_n(t)$$

4.7 Desarrollo de los 5 análisis del edificio religioso colonial

Para las diferentes etapas del modelo numérico, se desarrollaron 5 análisis, los cuales se describen de la siguiente manera.

- Análisis 1 Se desarrollo este análisis para calibrar el método descrito en la sección 4.3.3: Efecto del peso propio, para considerar dicho efecto en el análisis sísmico paso a paso.
- Análisis 2 Se desarrollo este análisis para el primer análisis sísmico sin disipador energético con el fin de comparar la respuesta dinámica del prototipo con los modelos incluyendo los disipadores y amplificadores. Otro resultado de este mismo modelo servirá para calibrar el modelo por elementos finitos de este trabajo con el desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM y poder validar las propiedades mecánicas de materiales y la dinámica del modelo estructural
- Análisis 3 Se desarrollo este análisis para el segundo análisis con el fin de incluir los mecanismos de disipación energética simples, estos son colocados horizontalmente en la bóveda en su longitud, como se muestra en la figura 4.13 y en diagonal en las dos torres del campanario como se muestra en la figura 4.14

Análisis 4 Se desarrollo este análisis para incluir el mecanismo de disipación energética en chevron, con dos elementos estructurales. Este mecanismo en fue descrito en el capítulo 3. El mecanismo en chevron fue sólo colocado en la dos torres del campanario como se muestra en la figura 4.15, ya que en la bóveda es imposible localizarlo, es por esto que en este análisis los mecanismos de disipación energética en la bóveda quedan con la misma configuración del análisis 3.

Análisis 5 Se desarrollo este análisis para incluir el mecanismo de disipación energética excéntrico con palanca. Este mecanismo fue descrito en el capítulo 3. El excéntrico con palanca fue sólo colocado en las torres de campanario como se muestra en la figura 4.16, ya que en la bóveda es imposible localizarlo, es por esto que en este modelo los mecanismos de disipación energética en la bóveda quedan con la misma configuración del análisis 3

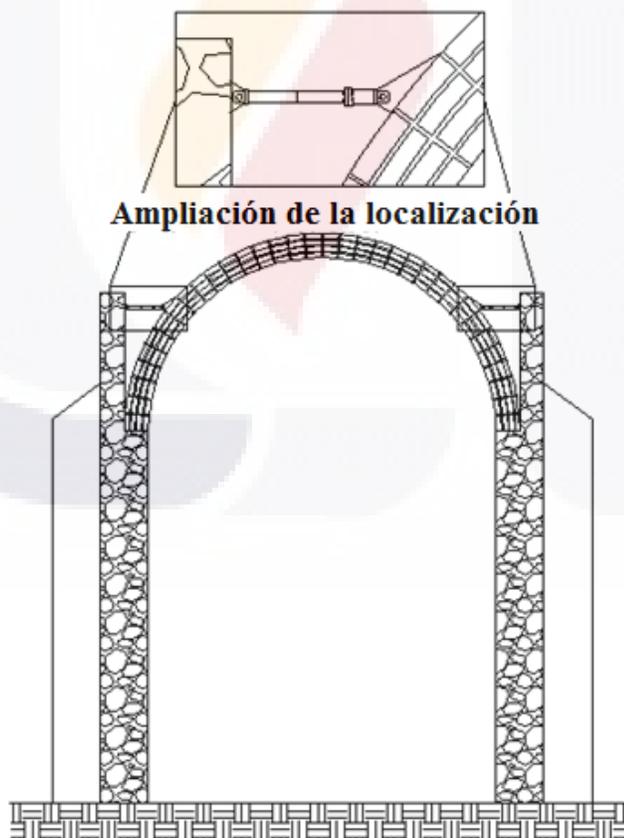


Figura 4.13 Localización de disipadores energéticos simples en la Bóveda

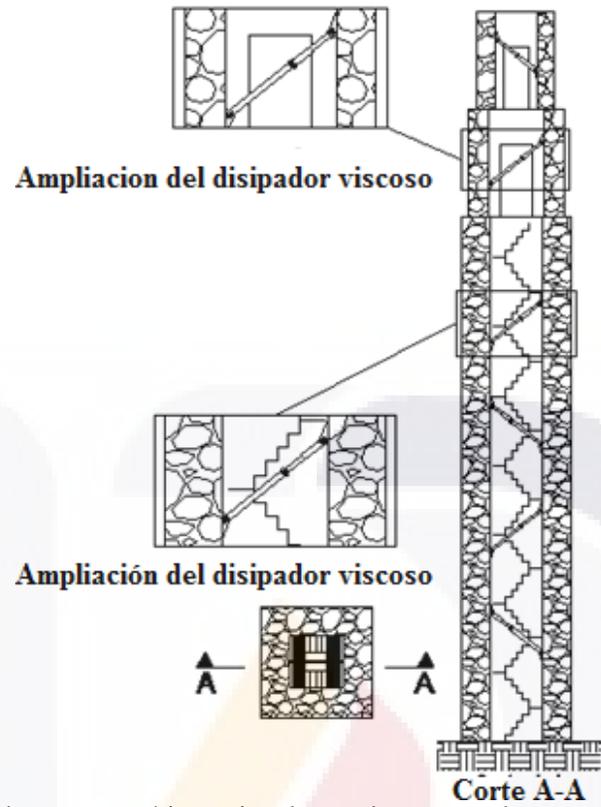


Figura 4.14 Disipadores energéticos simples en las torres de campanario para análisis 3

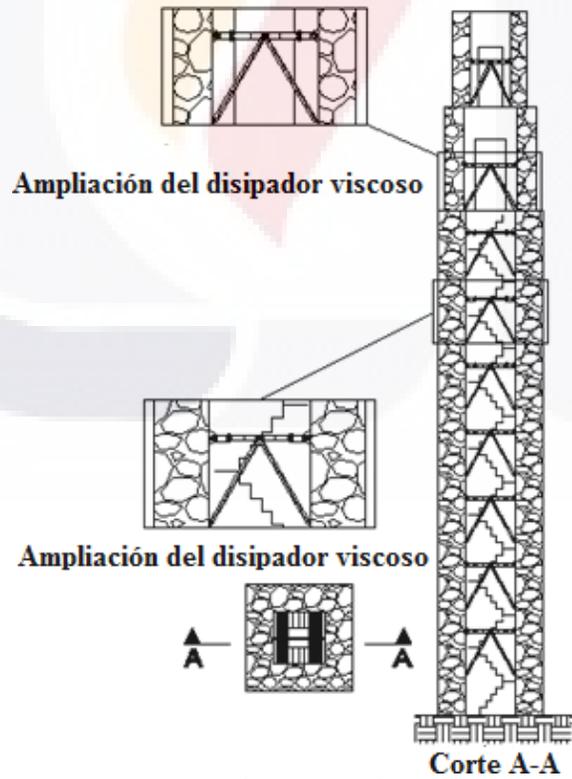


Figura 4.15 Disipadores energéticos en chevron en las torres de campanario para análisis 4

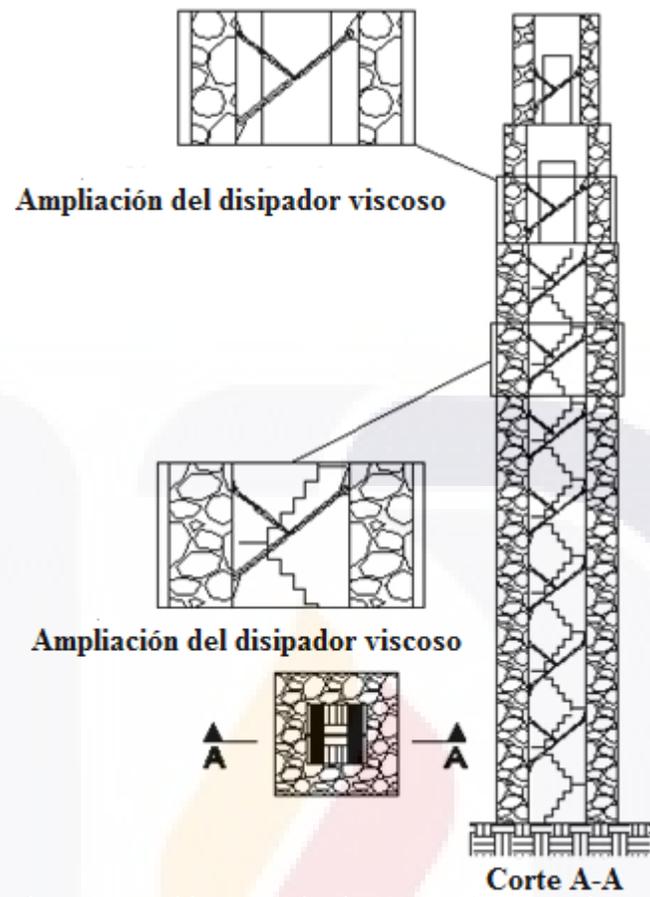


Figura 4.16 Disipadores energéticos excéntrico con palanca en las torres de campanario para análisis 5

4.8 Resultados obtenidos en el análisis sísmico del templo colonial

En esta sección se describen los resultados de los diferentes modelos generados, además se especifica cuáles son los objetivos de cada uno de los análisis realizados con el fin de medir la eficacia de los mecanismos de disipación energética. En base a la sollicitación sísmica descrita en la sección 4.5 se obtuvieron las respuestas dinámicas del templo en diferentes puntos de la estructura, localizados como se muestra en la figura 4.17, para los análisis 4 y 5 descritos en la sección 4.7, los puntos 2 y 3 registraran sus respuestas con el mismo mecanismo de disipación energética usado en el análisis 3, es decir los análisis 4 y 5 usaran el disipador simple (como se muestra en la figura 4.13), sin duda la respuesta para los análisis 4 y 5 debe ser igual a la respuesta análisis 3 en los puntos 2 y 3, ya que como se menciona, es imposible hacer uso de mecanismo de disipación energética con la ayuda de elementos estructurales en chevron y excéntricos en estos puntos.

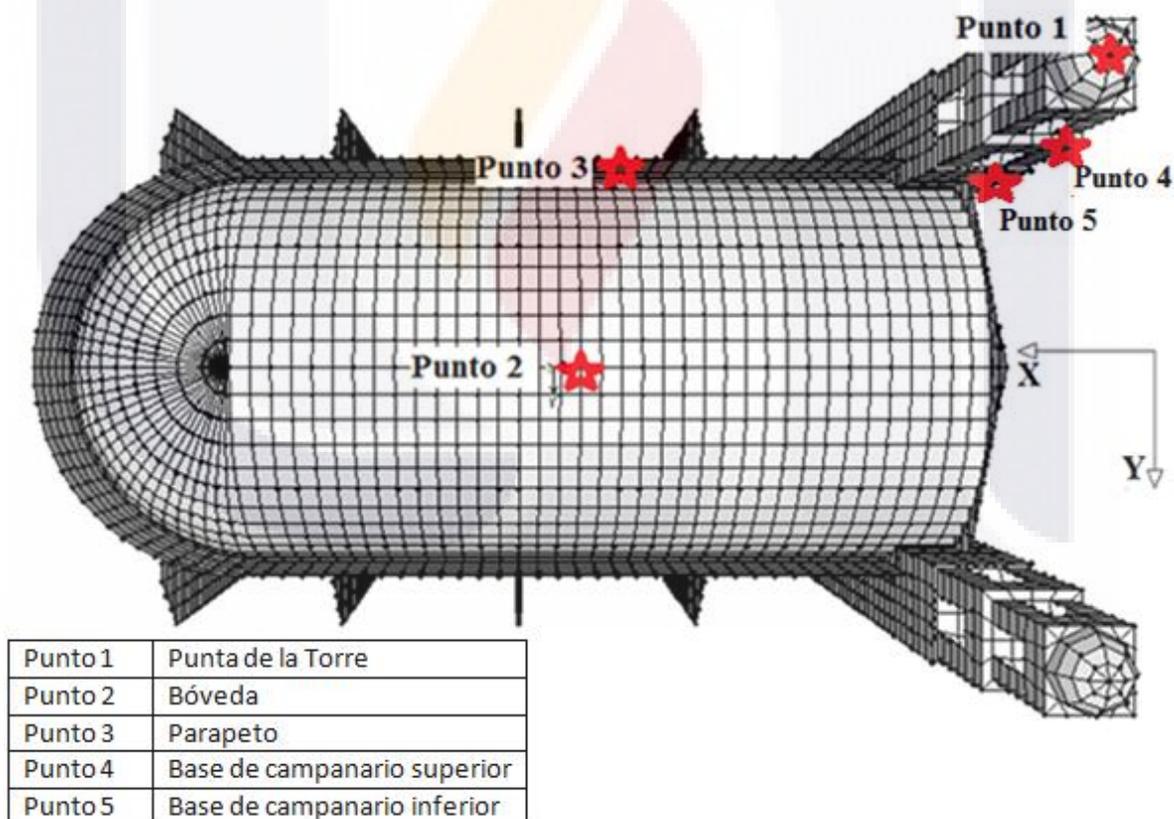


Figura 4.17 Puntos de muestreo para medir las respuesta dinámicas de los análisis durante la sollicitación sísmica

En la figura 4.18 se muestran las zonas donde se midieron los esfuerzos máximos bajo la sollicitación sísmica, se escogieron estas zonas en la fachada y el parapeto ya que son las zonas más beneficiadas en cuanto a reducción de esfuerzos se refiere debido al amortiguamiento adicional por parte de los mecanismos de disipación energética.

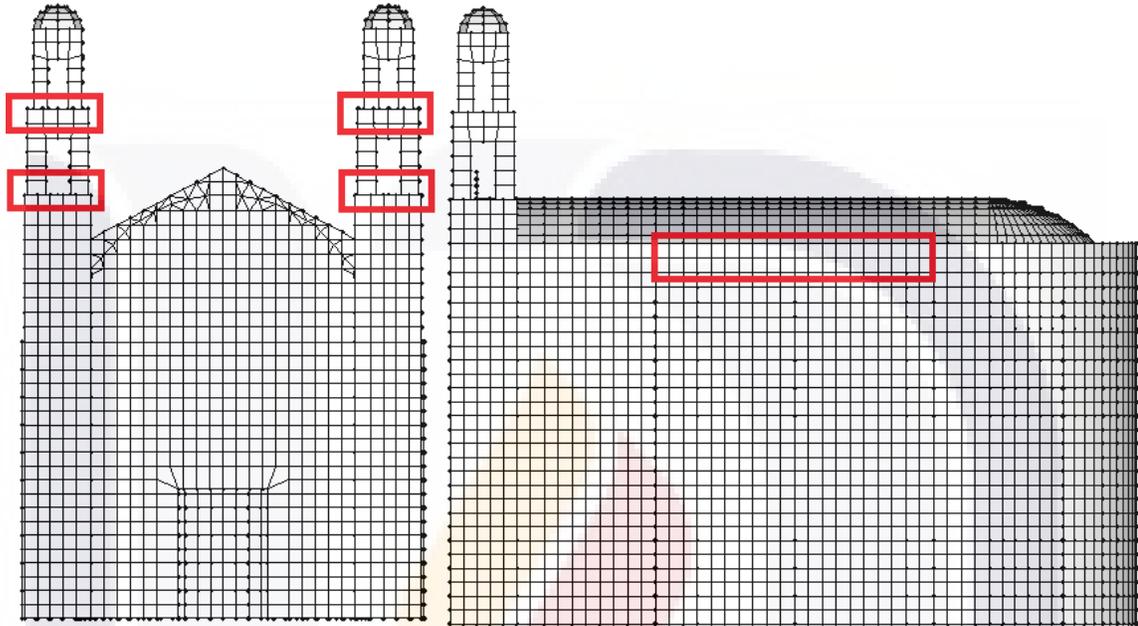


Figura 4.18 Puntos de muestreo para medir los esfuerzos máximos durante la sollicitación sísmica

Los resultados a obtener en los puntos definidos en la figura 4.16, se clasifican en 4 rublos:

- 1) Propiedades dinámicas
- 2) Respuesta dinámica de la estructura
- 3) Amortiguamiento estructural adicional resultante del uso de disipadores energéticos
- 4) La sollicitud de los disipadores energéticos bajo la carga sísmica.

Los resultados para cada uno de los 4 rublos se describen de la siguiente forma:

1.- Propiedades dinámicas

Modos de y periodos de vibración Se realizó un análisis modal dinámico para determinar los modos y periodos de vibración de la estructura. Estos modos de vibración nos ayudaron a calibrar el modelo con el desarrollado por el

Instituto de Ingeniería de la UNAM. De la misma manera que los modos de vibración, los periodos de vibración se obtuvieron también a partir del análisis modal. Los periodos de vibración nos ayudaron también a calibrar el modelo desarrollado en esta tesis con el desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

2.- Respuesta dinámica de la estructura

Desplazamientos Con los resultados de los análisis 2,3 ,4 y 5, se graficaron los desplazamientos en una historia del tiempo en los puntos indicados en la figura 4.17, con estos resultados se graficaran las funciones de transferencia donde se comparan las diferencias de los desplazamientos del modelo sin disipadores con los modelos con disipadores, con el fin de conocer en una historia del tiempo la reducción de los desplazamientos gracias a los mecanismos de disipación energética.

Aceleraciones Con los resultados de los análisis 2, 3 ,4 y 5, se graficaron las aceleraciones en una historia del tiempo en los puntos indicados en la figura 4.17, con estos resultados se graficaran las funciones de transferencia donde se comparan las diferencias de las aceleraciones del modelo sin disipadores con los modelos con disipadores, con el fin de conocer en una historia del tiempo la reducción de las aceleraciones gracias a los mecanismos de disipación energética.

Velocidades Con los resultados de los análisis 2, 3 ,4 y 5, se graficaron las velocidades en una historia del tiempo en los puntos indicados en la figura 4.17, con estos resultados se graficaran las funciones de transferencia donde se comparan las diferencias de las velocidades del modelo sin disipadores con los modelos con disipadores, con el fin de conocer en una historia del tiempo la

reducción de las velocidades gracias a los mecanismos de disipación energética.

Variación de efectos El análisis de la variación de efectos fue planteado para mostrar la diferencia y/o la reducción (si esta existe) entre el modelo sin mecanismos de disipación energética y los modelos a los que se les agregaron los mecanismos de disipación energética

3.- Amortiguamiento estructural adicional resultante del uso de disipadores energéticos

Análisis de curvas de energía Este análisis permite comparar las curvas de energía disipada acumulada por amortiguamiento estructural entre el modelo sin disipador con el modelo con disipador

Análisis de periodos de vibración Este análisis permite confirmar que existe una ganancia de amortiguamiento adicional debido al uso de mecanismos de disipación energética en el modelo, ya que debido al amortiguamiento adicional los periodos de vibración se incrementan.

4.- La solitud de los disipadores energéticos bajo la carga sísmica

Fuerzas en el disipador Las fuerzas axiales en los mecanismos de disipación energética de los resultados de los análisis 3, 4 y 5 se comparan con el fin de conocer en cuales modelos, los disipadores fueron más solicitados durante el sismo, estas fuerzas se compararan con las capacidades teóricas mencionadas en el capítulo 3

Velocidades Las velocidades en los mecanismos de disipación energética de los resultados de los análisis 3, 4 y 5 se comparan con el fin de conocer en cuales modelos, los disipadores fueron más solicitados durante el sismo.

4.9 Efectividad medida de los mecanismos de disipación energética en el análisis numérico del edificio religioso colonial

La respuesta estructural para los análisis sísmicos desarrollados en este trabajo se limitó al rango elástico, por dos razones:

- a) la primera, es que en edificios históricos, se deben limitar los daños al mínimo, es decir, esperando que la los valores intrínsecos del edificio no sufran daño alguno, como por ejemplo, grietas en los muros, daños en los detalles arquitectónicos, entre otros.
- b) La segunda razón es que como se había mencionado en el capítulo 3, la resistencia lateral de un edificio histórico de mampostería es mínima, es por esto que las limitaciones de deformaciones y agrietamientos deben ser más rígidos para evitar el colapso de la estructura, a diferencia de los edificios de mampostería modernos, donde hay una mayor tolerancia.

En la figura 4.19 se muestran las curvas de esfuerzo deformación de las propiedades mecánicas de los materiales usados para este trabajo, estas curvas son obtenidas en base a las pruebas hechas en laboratorio (Chavez M. 2010).

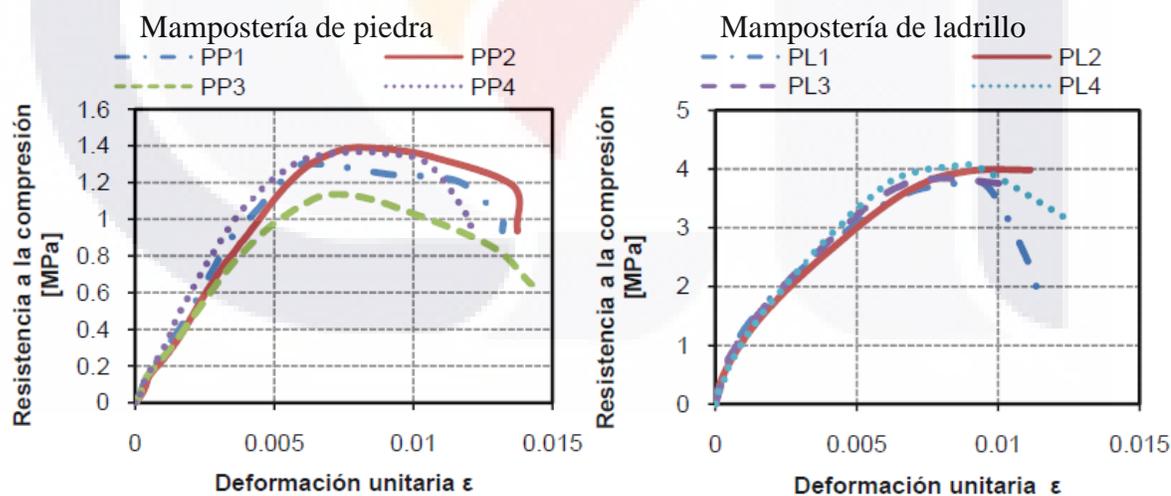


Figura 4.19 Curvas esfuerzo deformación de las mamposterías usadas en los modelos para el análisis sísmico del templo colonial (Chavez M. 2010).

Como se menciona en el mismo trabajo de Chávez M 2010, la grafica referente a la mampostería de piedra muestra lo difícil que es obtener sus propiedades mecánicas, ya que

es difícil obtener la convergencia de las curvas, principalmente después de $\varepsilon = 0.003$. De acuerdo a la tabla 4.1 la resistencia a compresión de la piedra y ladrillo es de 1.28 y 3.93 Mpa. respectivamente a compresión, y de 0.089 y 0.28 Mpa. respectivamente a tensión. Con lo que tomaremos esta información para fijar los límites de los esfuerzos elásticos antes de generar agrietamiento en el material, debido a los esfuerzos ocasionados por la sollicitación sísmica. De esta manera usaremos este parámetro para conocer si los mecanismos de disipación energética son tan efectivos de manera que puedan evitar y reducir los agrietamientos de la estructura del edificio religioso colonial.

En una estructura de mampostería antigua no se esperarían grandes deformaciones, debido a su rigidez y la baja ductilidad, a diferencia de estructuras típicas de concreto armado y acero donde las deformaciones son grandes por su ductilidad, para los cuales los efectos de los mecanismos de disipación energética la reducción de las deformaciones, velocidades y aceleraciones son bastante amplias como se muestran en la figura 4.20. Esto quiere decir que la reducción de las deformaciones, velocidades y aceleraciones en una estructura rígida de mampostería no deben ser tan amplias como la descrita para estructuras con mayor ductilidad.

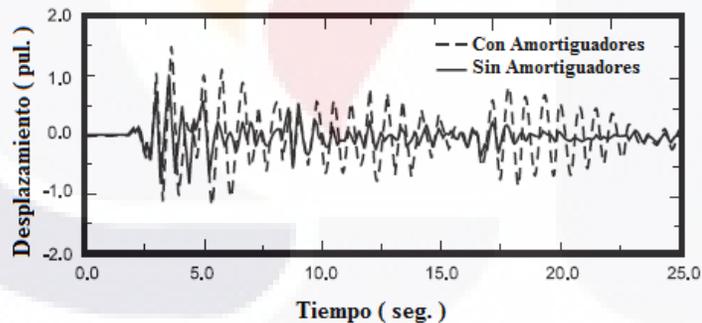


Figura 4.20 Respuesta de desplazamiento en una historia de tiempo con o sin disipadores energéticos o amortiguadores (Seleemah A. and Constantinou M. 1997)

4.10 Descripción resumida de los 5 análisis usados en SAP2000

Tabla 4.2 Análisis 1 :

Objetivo del análisis	Validar las cargas de gravedad para el análisis dinámico
Tipo de análisis	Estático y Dinámico Lineal
Tipo de Cargas	Estáticas de Gravedad : Peso propio Dinámicas : Función rampa para simular peso propio
Materiales (Comportamiento Lineal)	Mampostería de Piedra Mampostería de Ladrillo

Tabla 4.3 Análisis 2 :

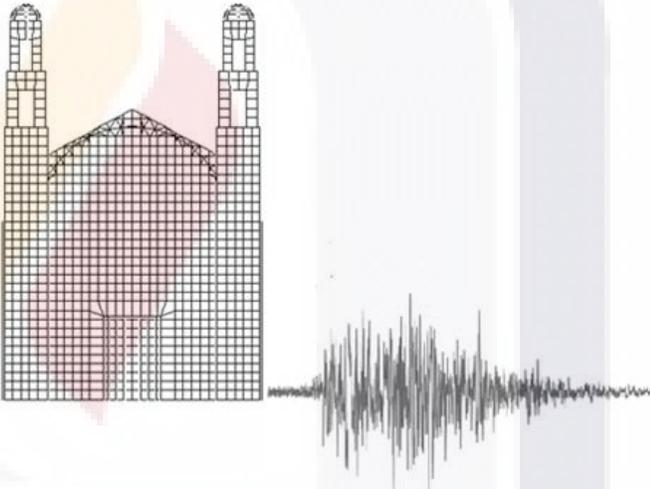
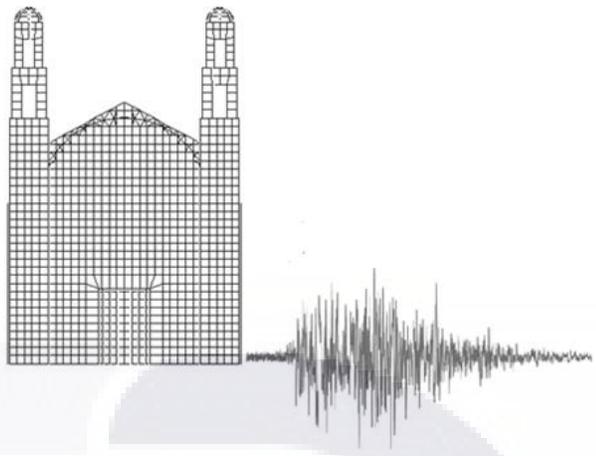
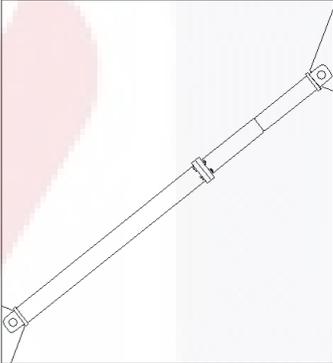
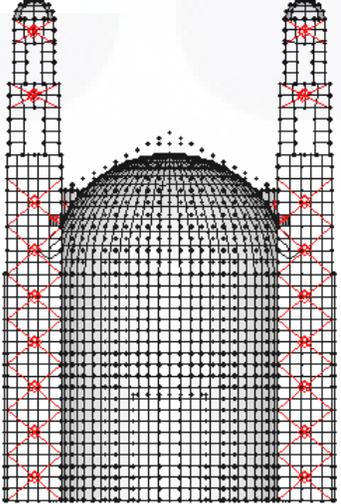
Objetivo del análisis	Obtener la respuesta dinámica de la iglesia durante la solicitud sísmica sin mecanismos de disipación energética
Tipo de análisis	Dinámico-Lineal
Tipo de Cargas	Dinámicas-Sísmicas 1. Función de registro de acelerograma sísmico 
Materiales (Comportamiento Lineal)	Mampostería de Piedra Mampostería de Ladrillo
Mecanismos de disipación energética	Sin mecanismos de disipación energética

Tabla 4.4 Análisis 3 :

Objetivo del análisis	Obtener la respuesta dinámica de la iglesia durante la solicitud sísmica con mecanismos de disipación energética sin amplificador
Tipo de análisis	Dinámico-Lineal

<p>Tipo de Cargas</p>	<p>1. Función de registro de acelerograma sísmico</p>  <p>Dirección del acelerograma en el modelo en SAP2000</p> <p>2. Función rampa para peso propio en función del tiempo</p>
<p>Materiales (Comportamiento Lineal)</p>	<p>Mampostería de Piedra Mampostería de Ladrillo</p>
<p>Mecanismos de disipación energética</p>	 <p>Disipador sin amplificador en bóveda y torre de campanario</p>
<p>Localización de mecanismos de disipación en torres de campanario</p>	

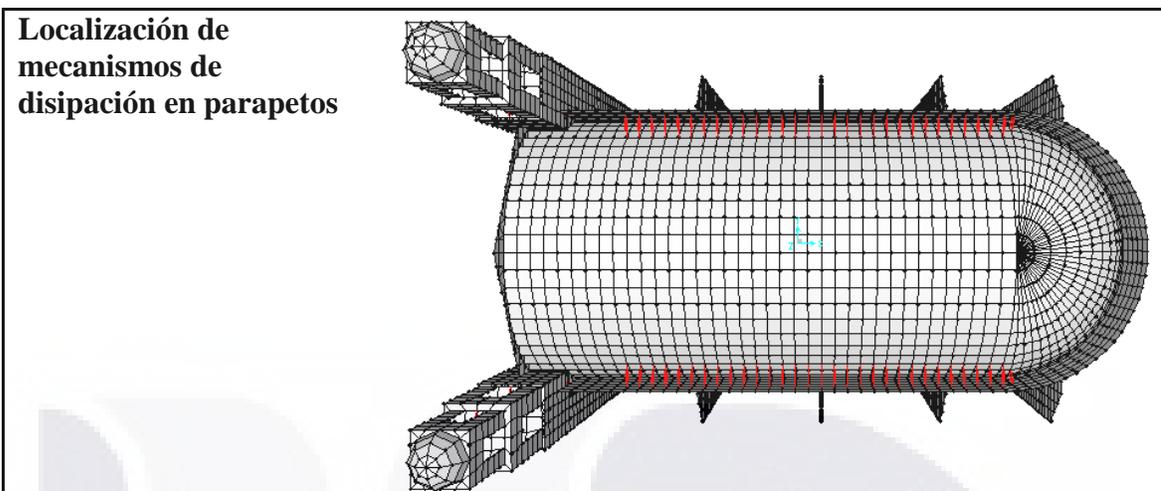
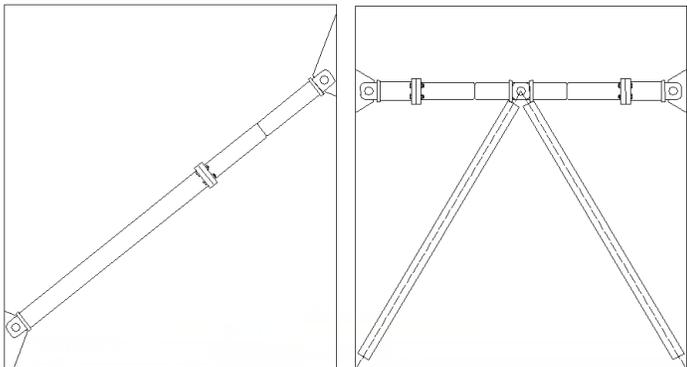


Tabla 4.5 Análisis 4 :	
Objetivo del análisis	Obtener la respuesta dinámica de la iglesia durante la sollicitud sísmica con mecanismos de disipación energética sin amplificador y de chevron
Tipo de análisis	Dinámico-Lineal
Tipo de Cargas	<p>1. Función de registro de acelerograma sísmico</p> <p>Dirección del acelerograma en el modelo en SAP2000</p> <p>2. Función rampa para peso propio en función del tiempo</p>
Materiales (Comportamiento Lineal)	<p>Mampostería de Piedra</p> <p>Mampostería de Ladrillo</p>

Mecanismos de disipación energética

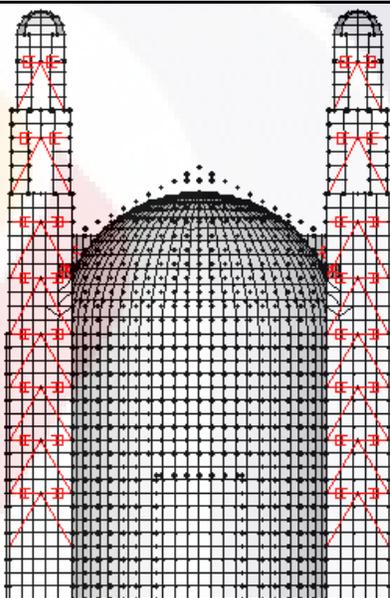


Disipador sin amplificador en bóveda y disipador en chevron en torre de campanario

Secciones estructurales para amplificadores

HSS 4"x4"x1/4" ASTM Grado 50 Ksi

Localización de mecanismos de disipación en torres de campanario



Localización de mecanismos de disipación en parapetos

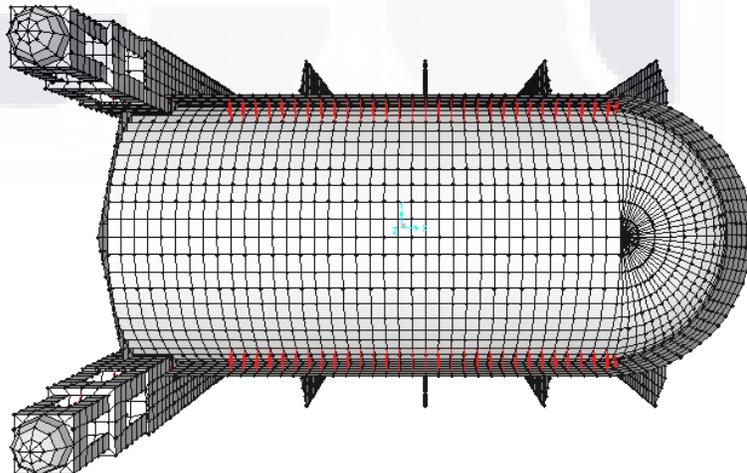
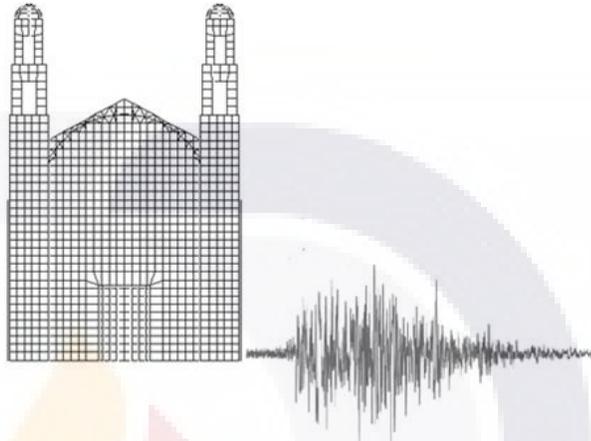
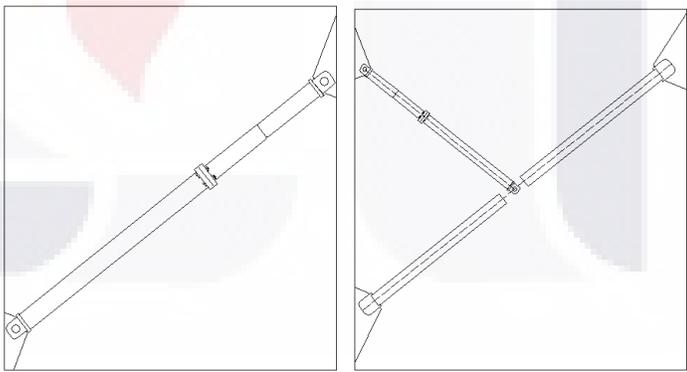
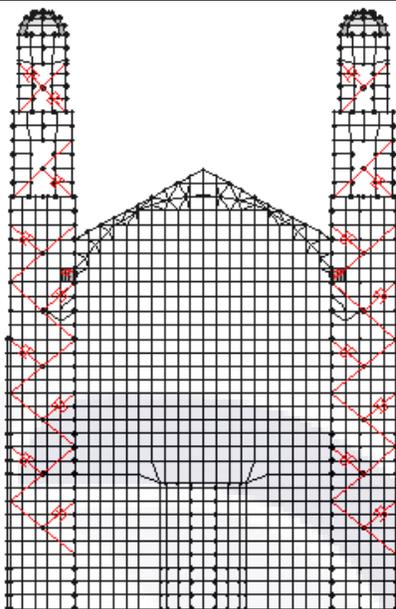
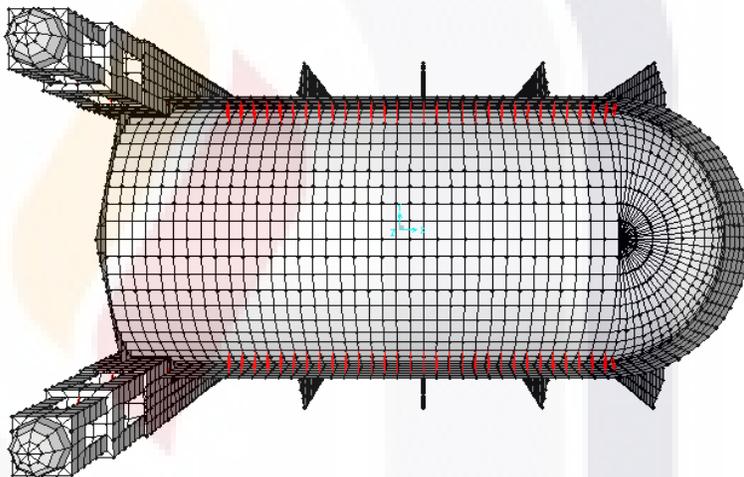


Tabla 4.6 Análisis 5 :	
Objetivo del análisis	Obtener la respuesta dinámica de la iglesia durante la solicitud sísmica con mecanismos de disipación energética sin amplificador y excéntrico con palanca
Tipo de análisis	Dinámico-Lineal
Tipo de Cargas	<p>1. Función de registro de acelerograma sísmico</p>  <p>Dirección del acelerograma en el análisis en SAP2000</p> <p>2. Función rampa para peso propio en función del tiempo</p>
Materiales (Comportamiento Lineal)	<p>Mampostería de Piedra</p> <p>Mampostería de Ladrillo</p>
Mecanismos de disipación energética	 <p>Disipador sin amplificador en bóveda y disipador excéntrico con palanca en torre de campanario</p>
Secciones estructurales para amplificadores	HSS 3"x3"x1/4" ASTM Grado 50 Ksi

Localización de mecanismos de disipación en las torres de campanario



Localización de mecanismos de disipación en parapetos

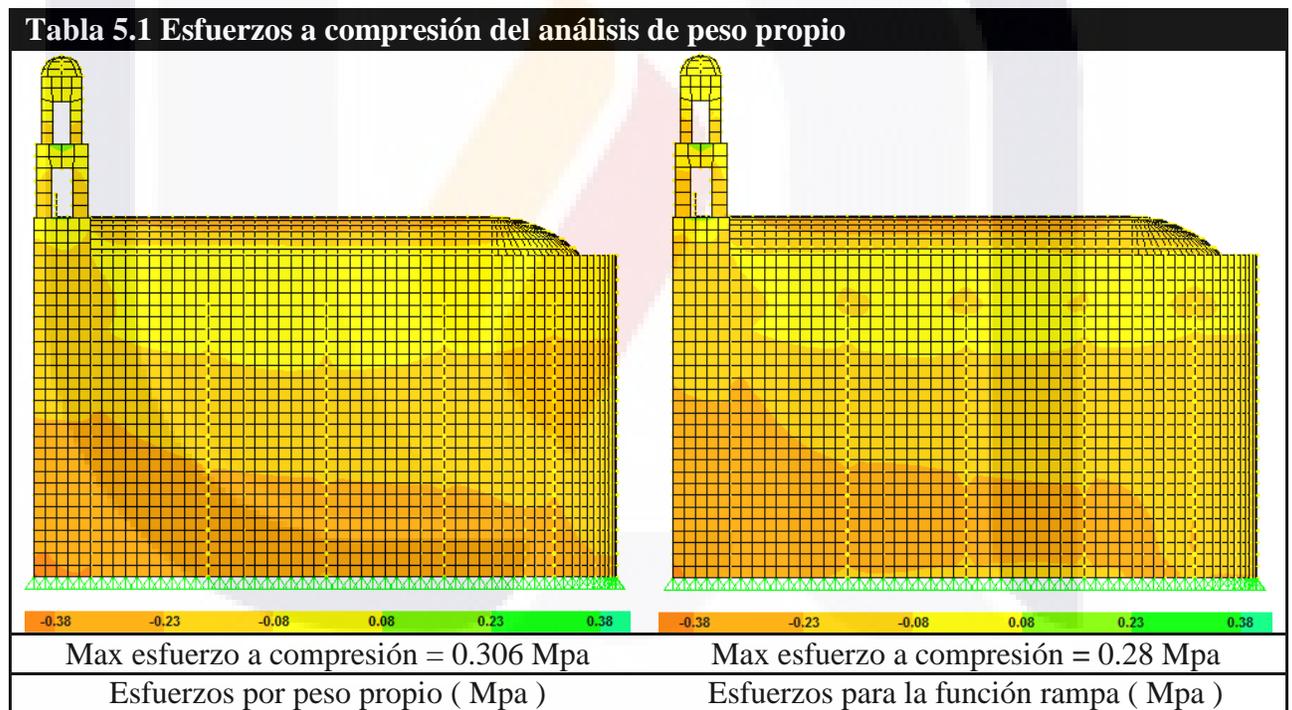


Capítulo 5

Análisis de resultados

5.1 Revisión del efecto del peso propio haciendo uso de la función rampa en una historia del tiempo

Como se describió en la sección 4.3.3 debido a que no se puede incluir el peso propio de la estructura directamente en un análisis dinámico, ya que este peso propio es producto de un análisis estático debido a esto la función rampa fue implementada para incluir este peso propio de la iglesia en el análisis sísmico. En esta sección se comparan los esfuerzos debido a un análisis de estático del peso propio y la función rampa con el fin de validar que la función rampa incluirá el peso propio, como se muestra en la tabla siguiente.



Como se muestra en la tabla 5.1 la diferencia de los esfuerzos es mínima entre el análisis de la función rampa y el peso propio. Esto valida la función rampa para tomar en cuenta el peso propio en un análisis dinámico.

5.2 Propiedades dinámicas y calibración del modelo numérico

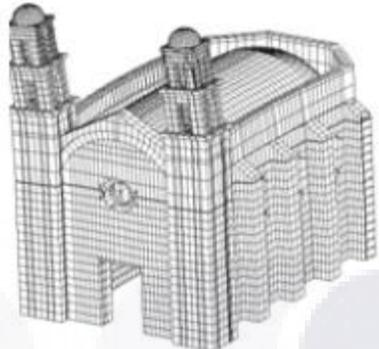
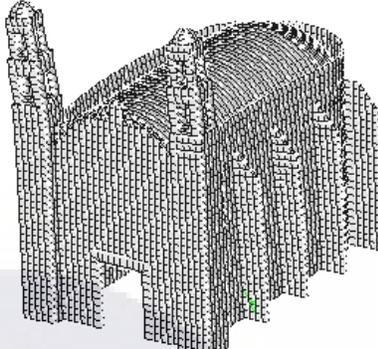
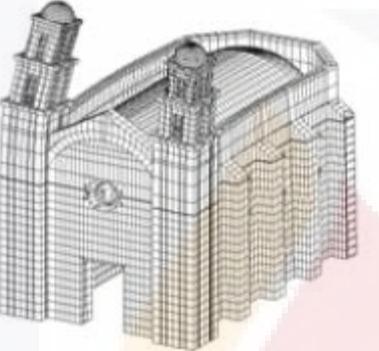
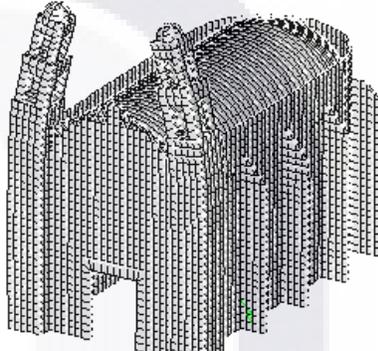
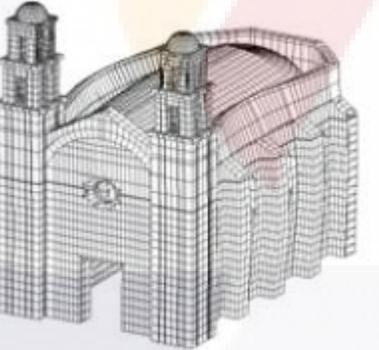
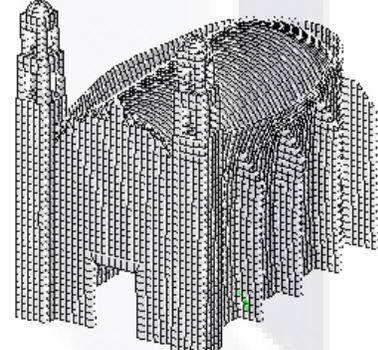
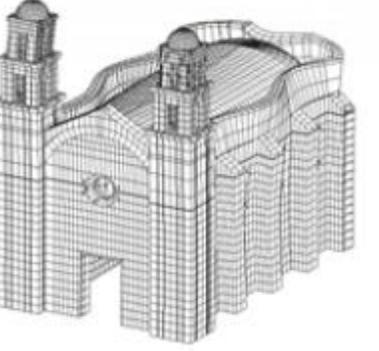
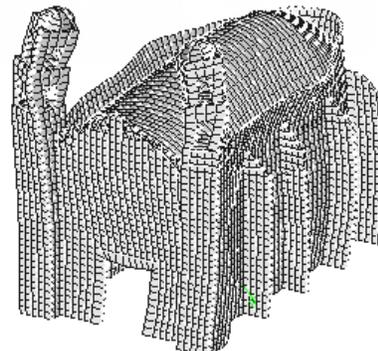
Para la calibración del análisis se compararon los resultados obtenidos en este análisis numérico con el desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM en una tesis sobre el mismo prototipo usado para esta tesis. Los resultados de los periodos de vibración del nuevo modelo sin mecanismo de disipación energética y el desarrollado por el instituto se muestran en la tabla 5.2 donde se muestran los 12 primeros modos de vibración para esta comparación.

Tabla 5.2 Periodos de vibración del análisis del Instituto de Ingeniería y el nuevo análisis para esta tesis			
Modo	Periodo del Instituto de Ingeniería (seg.)	Periodo del nuevo modelo (seg.)	Diferencia (%)
1	0.67	0.70	4.47
2	0.52	0.57	9.62
3	0.51	0.50	-1.00
4	0.49	0.50	2.05
5	0.47	0.48	1.31
6	0.47	0.47	0.00
7	0.35	0.36	2.85
8	0.34	0.36	5.88
9	0.30	0.34	11.33
10	0.30	0.32	6.67
11	0.27	0.28	3.71
12	0.25	0.26	4.10

Los resultados de los modos de vibración mostrados, validan la calibración del modelo numérico nuevo con respecto al modelo usado por el Instituto de Ingeniería, ya que los resultados en su gran mayoría las diferencias entre ambos modelos es de menos de 10% y algunos se acercan a cero, como el modo 6.

Los modos de vibración del análisis realizado en este trabajo (MIC-UAA) y el desarrollado por el Instituto de Ingeniería se muestran en la tabla 5.3 los modos de vibración 1, 6, 13 y 24 para esta comparación, cabe mencionar que solo se usaron estos modos de vibración ya que son los que se muestran en la tesis de del Instituto de Ingeniería donde se desarrollo el modelo original en la cual se basa esta tesis (Chavez M. 2005).

Tabla 5.3 Modos de vibración del análisis del Instituto de Ingeniería y el nuevo análisis para esta tesis

Modo	Instituto de Ingeniería	Nuevo modelo sin disipador
1		
6		
13		
24		

5.3 Respuesta dinámica de la estructura

En las siguientes tablas se muestran las respuestas de los desplazamientos de la iglesia sobre la bóveda, en la parte superior de la torre del campanario y en el parapeto, como se mencionó en el capítulo 4, se escogieron tres puntos localizados en la bóveda, torre del campanario y parapeto para registrar las señales dinámicas debido a la respuesta bajo la sollicitación sísmica, cabe mencionar que en las tablas se muestran las respuestas de los desplazamientos para el análisis 2 sin disipador energético, análisis 3 con disipador energético simple, análisis 4 con disipador energético en chevron y análisis 5 con disipador energético excéntrico.

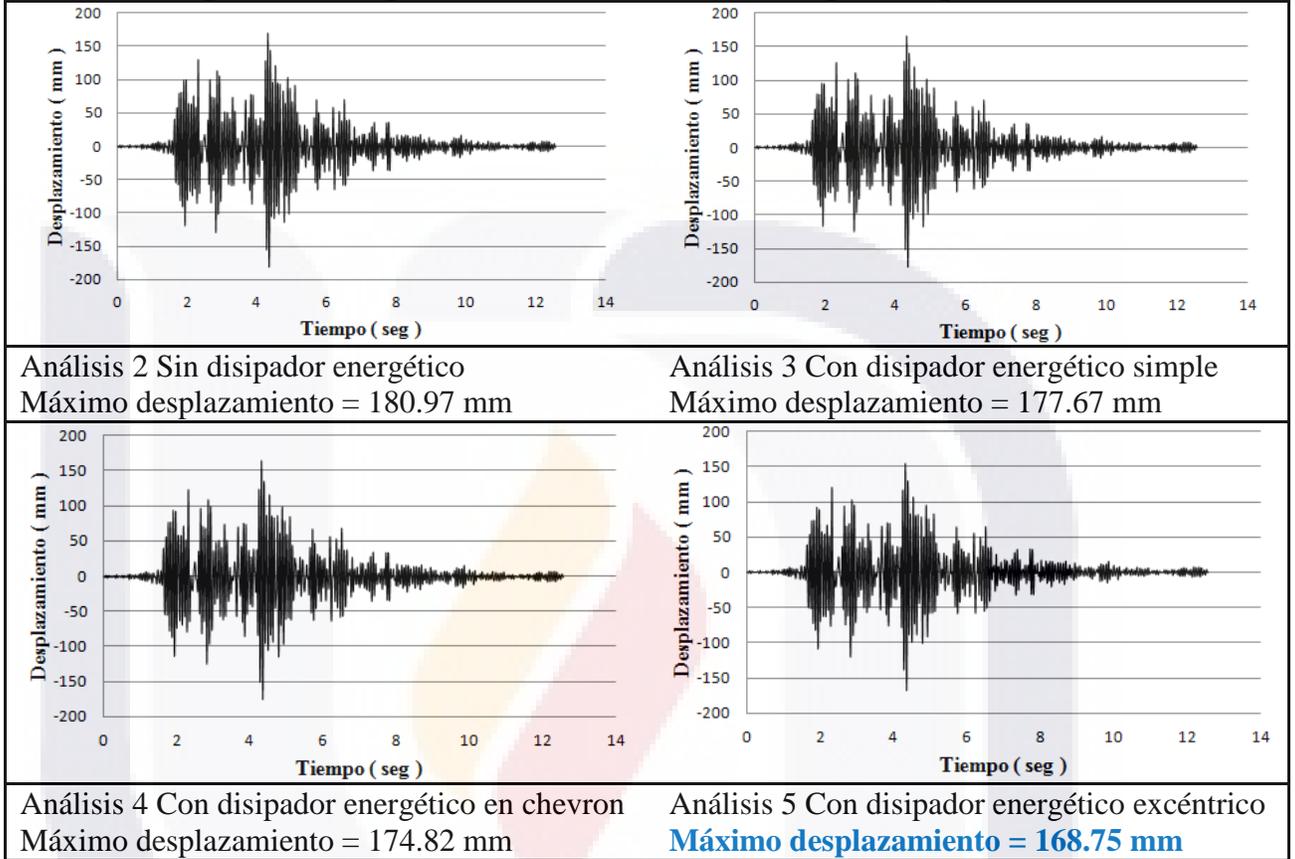
5.3.1 Desplazamientos en una historia de tiempo en los puntos 1, 2, 3

En las tablas siguientes se presentan los desplazamientos con los máximos valores, en azul se indica el menor de los valores máximos

Tabla 5.4 Respuesta de desplazamientos en la bóveda punto 2	
Análisis 2 Sin disipador energético Máximo desplazamiento = 80.93 mm	Análisis 3 Con disipador energético simple Máximo desplazamiento = 78.98 mm
Análisis 4 Con disipador energético en chevron Máximo desplazamiento = 77.61 mm	Análisis 5 Con disipador energético excéntrico Máximo desplazamiento = 78.06 mm

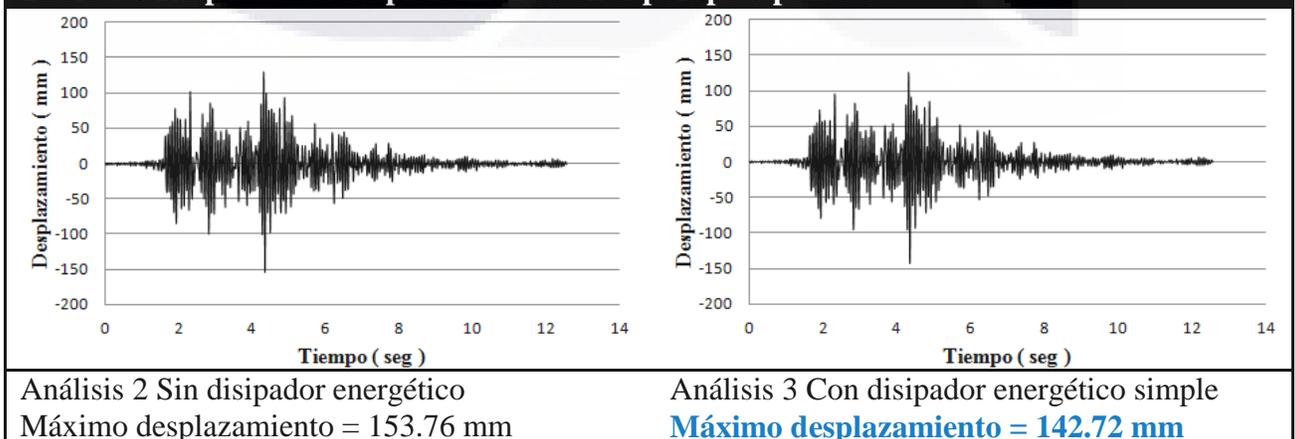
En la tabla 5.5 se presentan los desplazamientos para la torre punto 1 con los máximos valores, en azul se indica el menor de los valores máximos

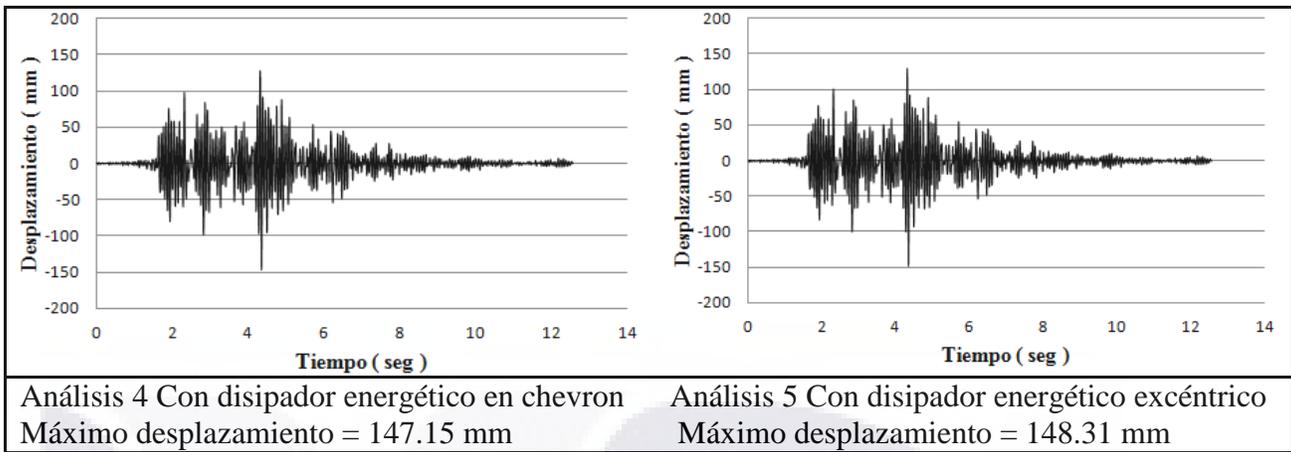
Tabla 5.5 Respuesta de desplazamientos en la torre del campanario punto 1



En la tabla 5.6 se presentan los desplazamientos para el parapeto punto 3 con los máximos valores, en azul se indica el menor de los valores máximos

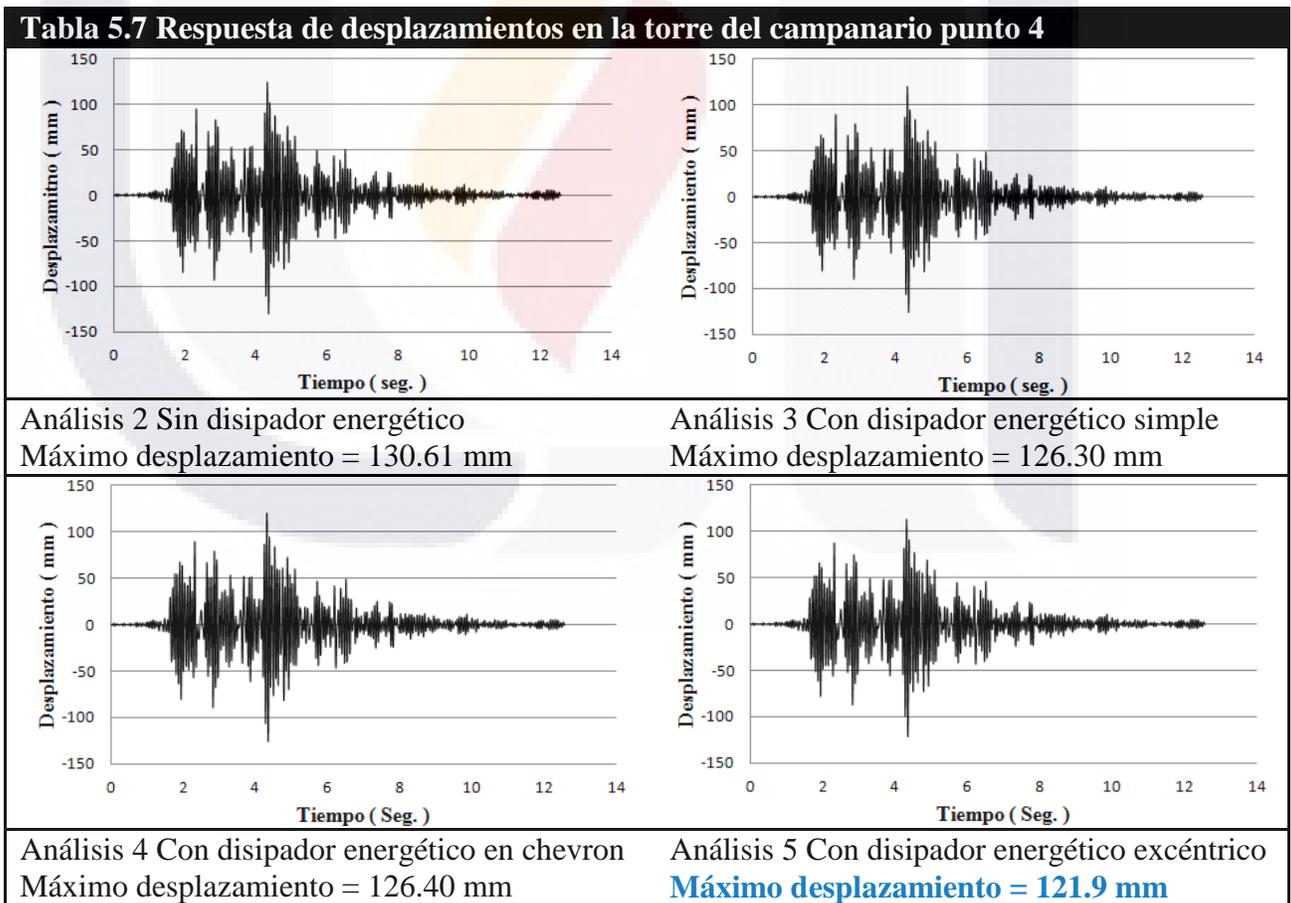
Tabla 5.6 Respuesta de desplazamientos en el parapeto punto 3





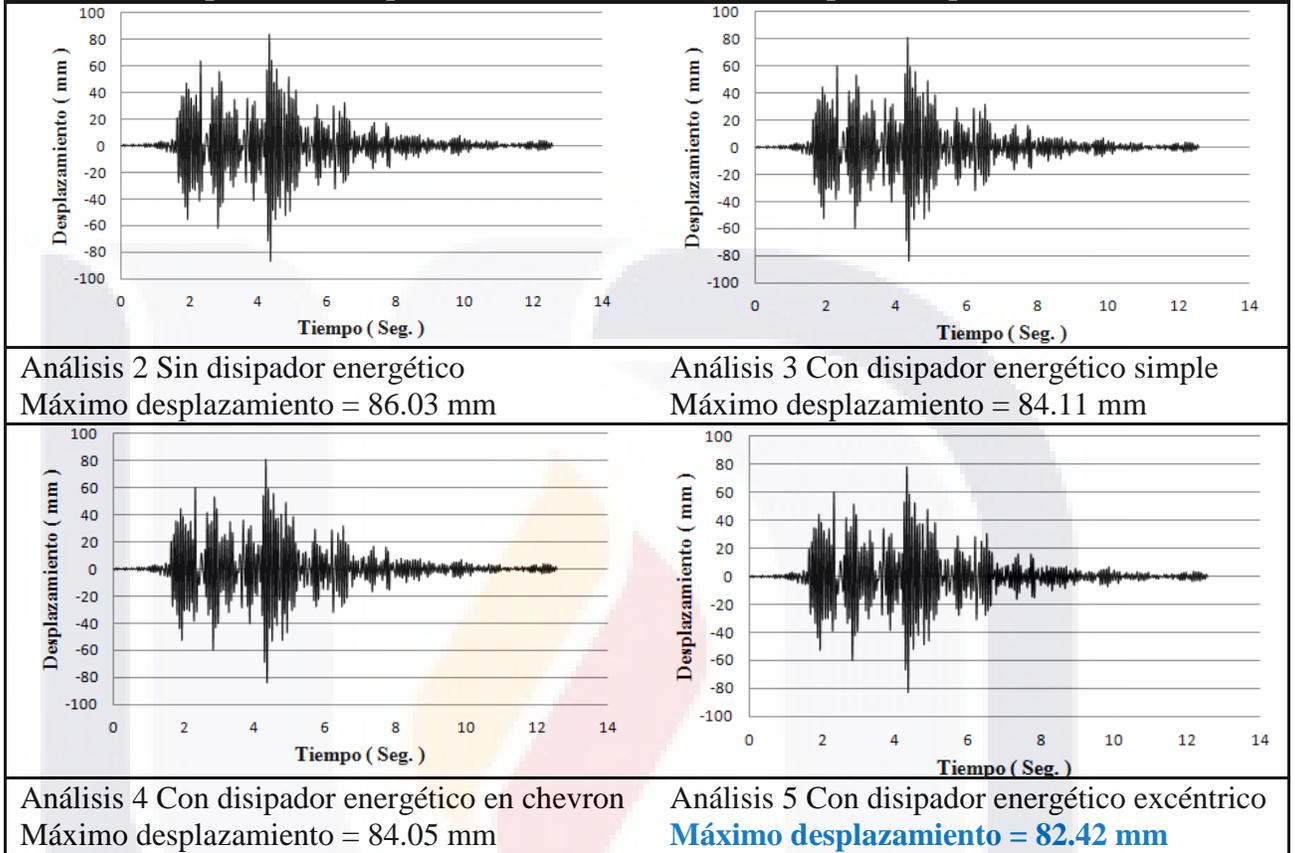
5.3.2 Desplazamientos en una historia de tiempo en los puntos 4, 5

En la tabla 5.7 se presentan los desplazamientos para la torre punto 4 con los máximos valores, en azul se indica el menor de los valores máximos



En la tabla 5.8 se presentan los desplazamientos para la torre punto 5 con los máximos valores, en azul se indica el menor de los valores máximos

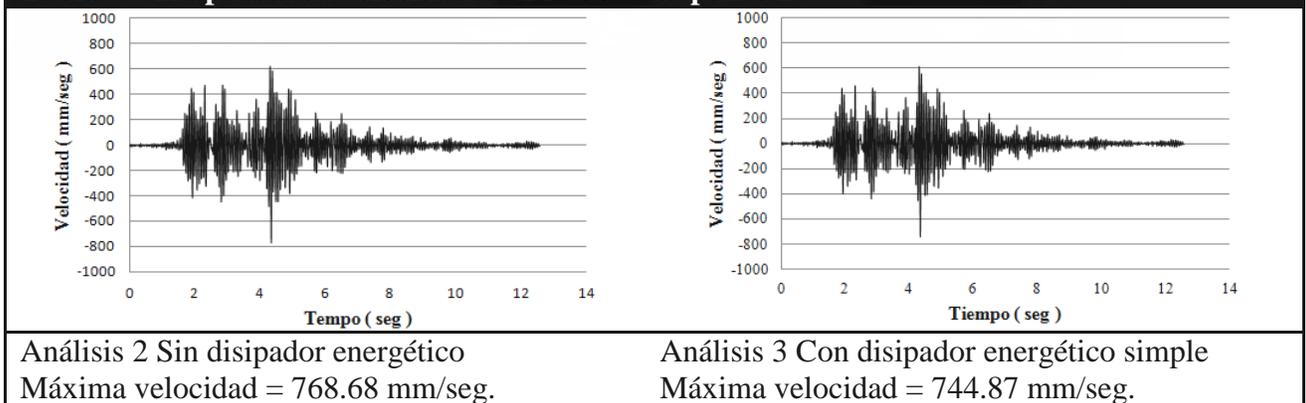
Tabla 5.8 Respuesta de desplazamientos en la torre del campanario punto 5

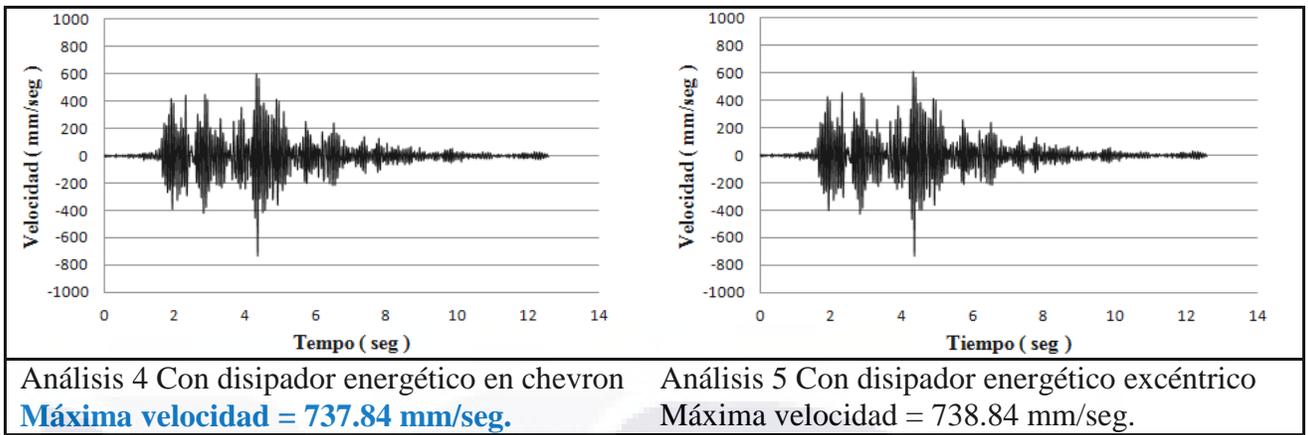


5.3.3 Velocidades en una historia de tiempo en los puntos 1, 2 y 3

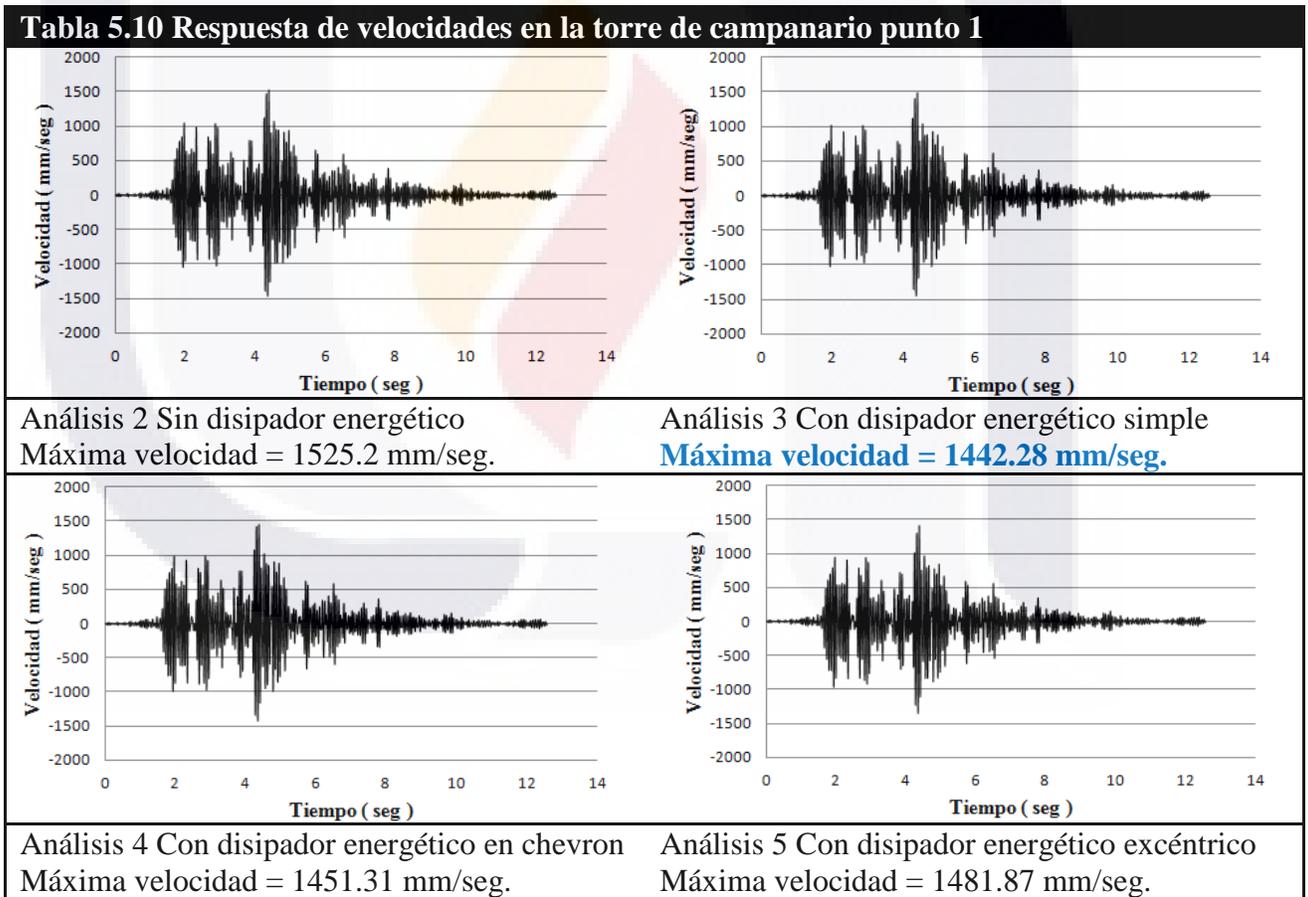
En la tabla 5.9 se presentan las velocidades para la bóveda punto 2 con los máximos valores, en azul se indica el menor de los valores máximos.

Tabla 5.9 Respuesta de velocidades en la bóveda punto 2



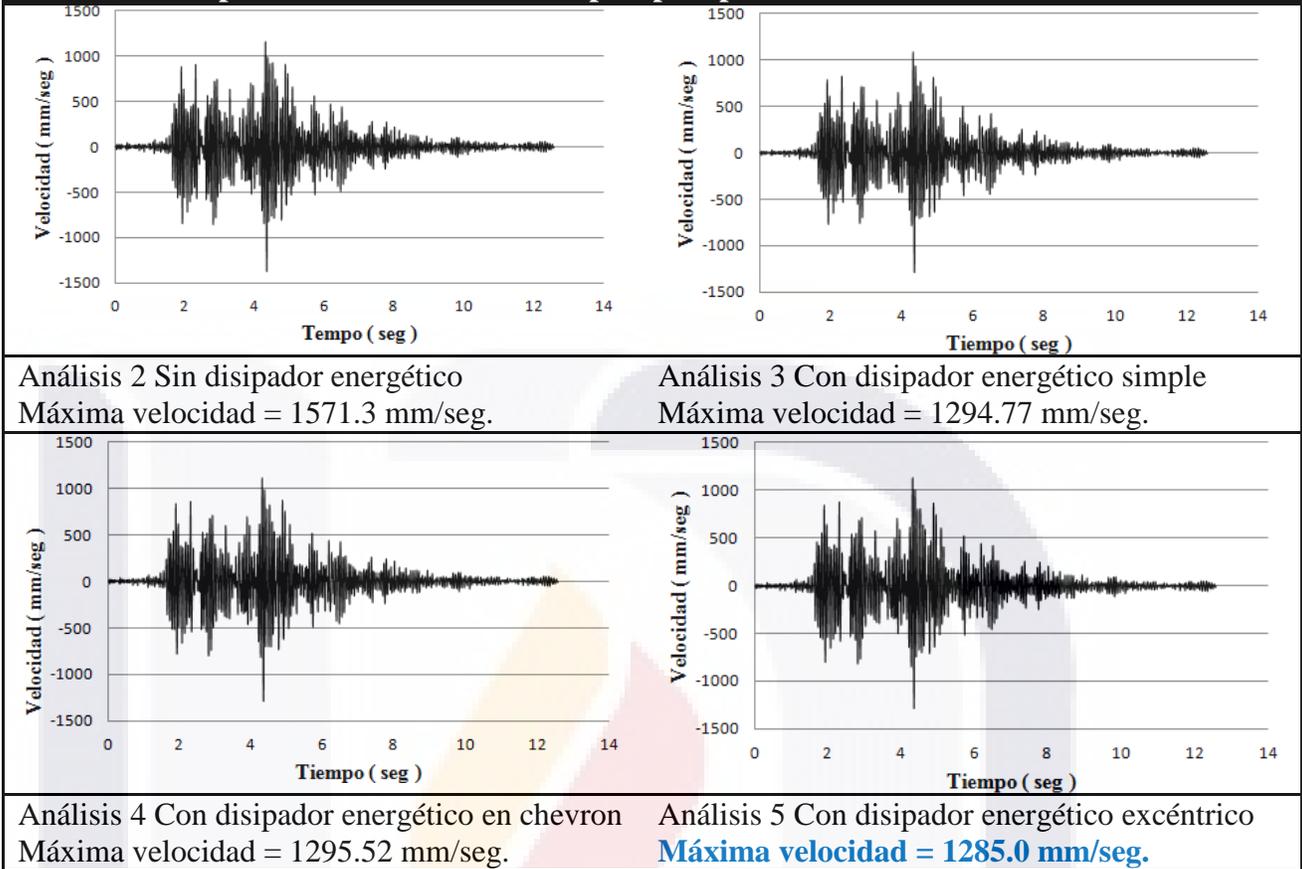


En la tabla 5.10 se presentan las velocidades para la torre del campanario punto 1 con los máximos valores, en **azul** se indica el menor de los valores máximos



En la tabla 5.11 se presentan las velocidades para el parapeto punto 3 con los máximos valores, en **azul** se indica el menor de los valores máximos

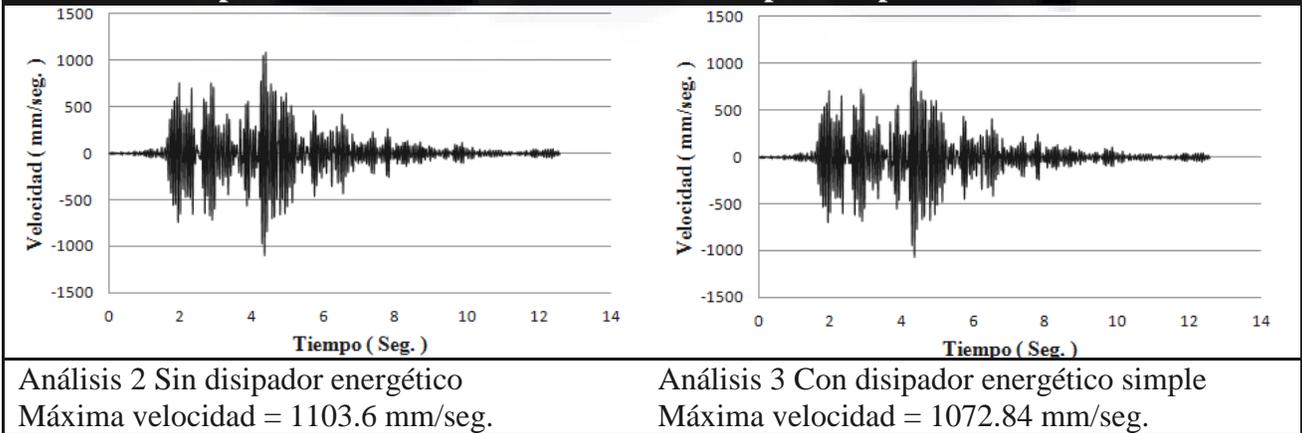
Tabla 5.11 Respuesta de velocidades en el parapeto punto 3

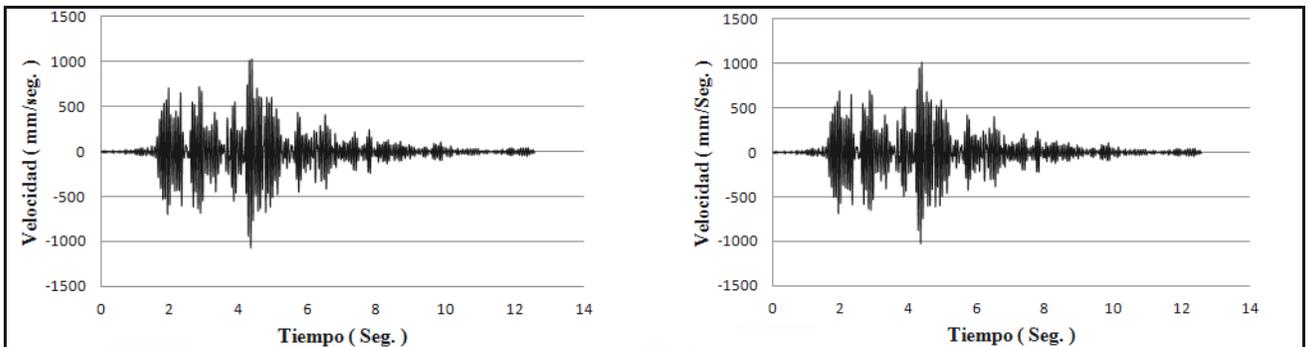


5.3.4 Velocidades en una historia de tiempo en los puntos 4 y 5

En la tabla 5.12 se presentan las velocidades para la torre del campanario punto 4 con los máximos valores, en azul se indica el menor de los valores máximos de los puntos donde se evalúan los esfuerzos

Tabla 5.12 Respuesta de velocidades en la torre de campanario punto 4

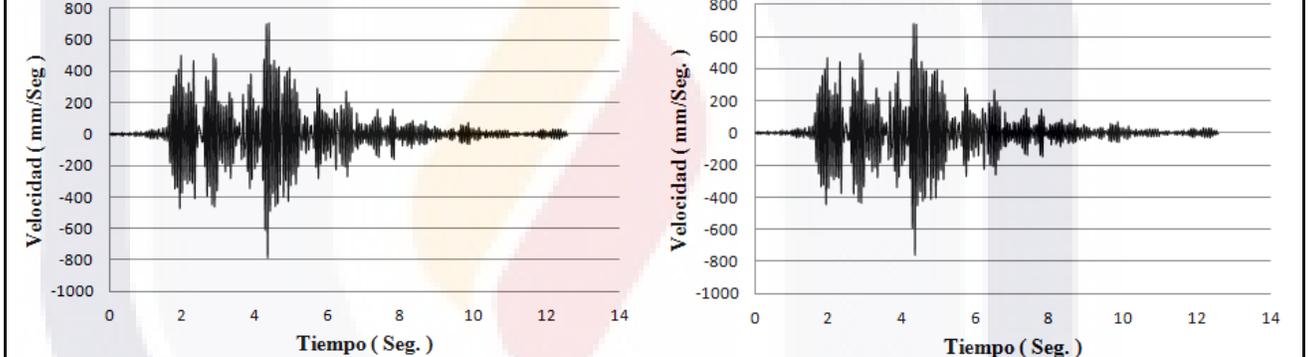




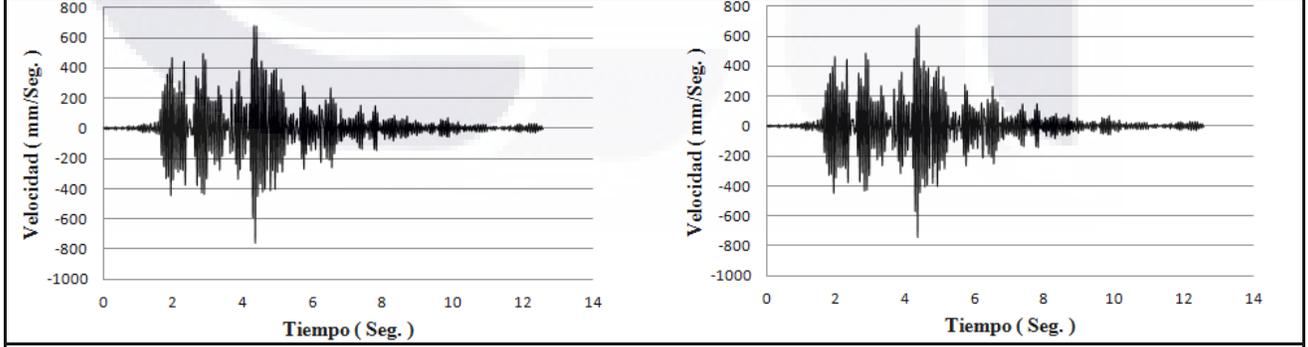
Análisis 4 Con disipador energético en chevron Máxima velocidad = 1073.09 mm/seg.
 Análisis 5 Con disipador energético excéntrico **Máxima velocidad = 1026.51 mm/seg.**

En la tabla 5.13 se presentan las velocidades para la torre del campanario punto 5 con los máximos valores, en **azul** se indica el menor de los valores máximos

Tabla 5.13 Respuesta de velocidades en la torre de campanario punto 5



Análisis 2 Sin disipador energético Máxima velocidad = 790.11 mm/seg.
 Análisis 3 Con disipador energético simple Máxima velocidad = 760.88 mm/seg.



Análisis 4 Con disipador energético en chevron Máxima velocidad = 761.17 mm/seg.
 Análisis 5 Con disipador energético excéntrico **Máxima velocidad = 741.13 mm/seg.**

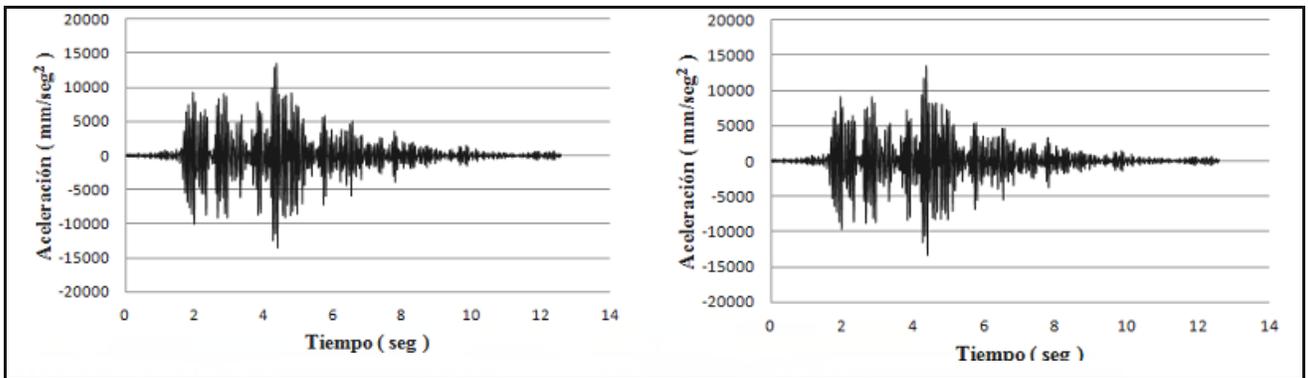
5.3.5 Aceleraciones en una historia de tiempo en los puntos 1, 2 y 3

En la tabla 5.14 se presentan las aceleraciones para la bóveda punto 2 con los máximos valores, en azul se indica el menor de los valores máximos.

Tabla 5.14 Respuesta de aceleraciones en la bóveda punto 2	
Análisis 2 Sin disipador energético Máxima aceleración = 7235.44 mm/seg ²	Análisis 3 Con disipador energético simple Máxima aceleración = 7184. mm/seg ²
Modelo 4 Con disipador energético en chevron Máxima aceleración = 6700.11 mm/seg ²	Modelo 5 Con disipador energético excéntrico Máxima aceleración = 6811.22 mm/seg ²

En la tabla 5.15 se presentan las aceleraciones para la torre del campanario punto 1 con los máximos valores, en azul se indica el menor de los valores máximos

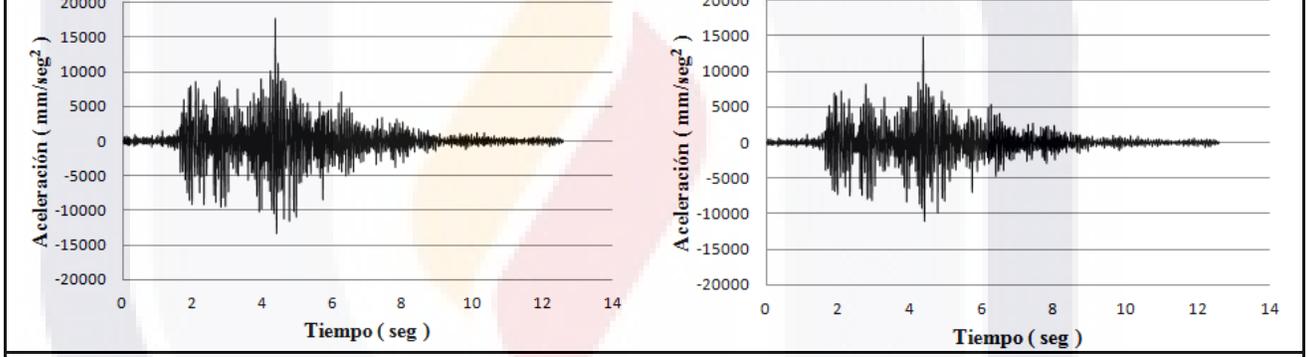
Tabla 5.15 Respuesta de aceleraciones en la torre del campanario punto 1	
Análisis 2 Sin disipador energético Máxima aceleración = 14287.36 mm/seg ²	Análisis 3 Con disipador energético simple Máxima aceleración = 13772.91 mm/seg ²



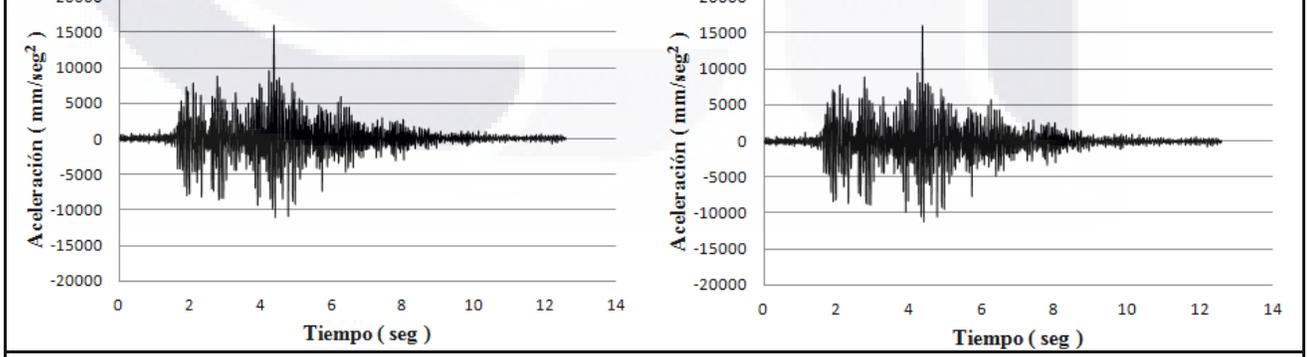
Análisis 4 Con disipador energético en chevron Máxima aceleración = 13681.63 mm/seg²
 Análisis 5 Con disipador energético excéntrico Máxima aceleración = 13416.43 mm/seg²

En la tabla 5.16 se presentan las aceleraciones para el parapeto punto 3 con los máximos valores, en azul se indica el menor de los valores máximos

Tabla 5.16 Respuesta de aceleraciones en el parapeto punto 3



Análisis 2 Sin disipador energético Máxima aceleración = 17755.6 mm/seg²
 Análisis 3 Con disipador energético simple Máxima aceleración = 14815.25 mm/seg²



Análisis 4 Con disipador energético en chevron Máxima aceleración = 15965.21 mm/seg²
 Análisis 5 Con disipador energético excéntrico Máxima aceleración = 16118.84 mm/seg²

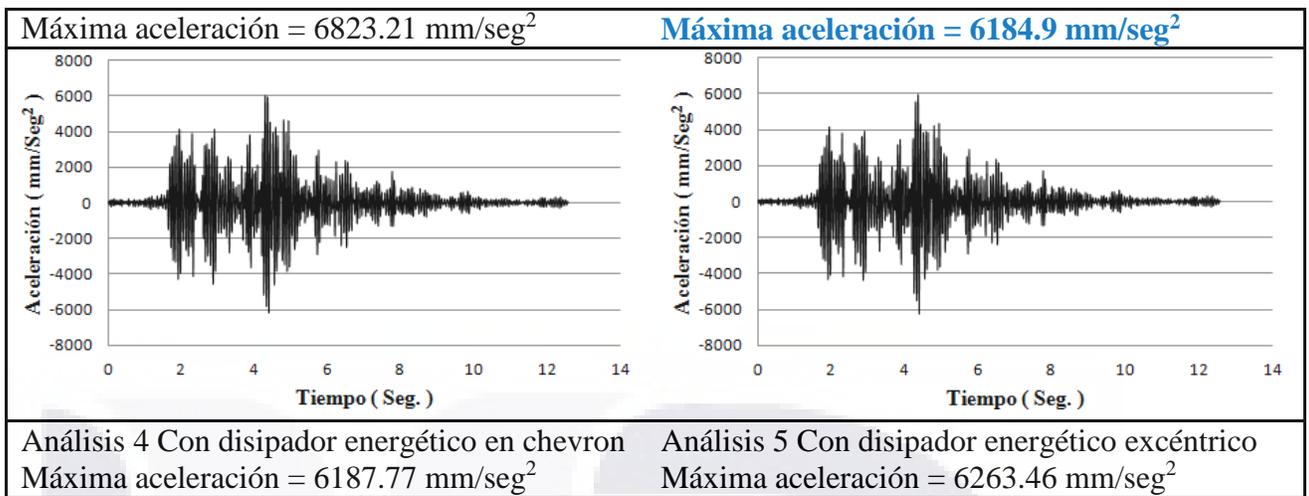
5.3.6 Aceleraciones en una historia de tiempo en los puntos 4 y 5

En la tabla 5.17 se presentan las aceleraciones para la torre del campanario punto 4 con los máximos valores, en azul se indica el menor de los valores máximos

Tabla 5.17 Respuesta de aceleraciones en la torre del campanario punto 4	
Análisis 2 Sin disipador energético Máxima aceleración = 10287.5 mm/seg ²	Análisis 3 Con disipador energético simple Máxima aceleración = 9574.02 mm/seg ²
Análisis 4 Con disipador energético en chevron Máxima aceleración = 9554.27 mm/seg ²	Análisis 5 Con disipador energético excéntrico Máxima aceleración = 9438.9 mm/seg ²

En la tabla 5.18 se presentan las aceleraciones para la torre del campanario punto 5 con los máximos valores, en azul se indica el menor de los valores máximos

Tabla 5.18 Respuesta de aceleraciones en la torre del campanario punto 5	
Análisis 2 Sin disipador energético	Análisis 3 Con disipador energético simple



5.4 Variación de efectos

Como se menciona en el capítulo 4, la variación de efectos es la diferencia de las respuestas dinámicas entre el análisis sin ningún mecanismo de disipación energética y los análisis con los mecanismos de disipación energética, esto nos dará como información cual es la reducción de los efectos durante una sollicitación sísmica gracias a un mecanismo de disipación energética.

5.4.1 Variación de efectos en desplazamientos

En la tabla 5.19 se presenta la variación de efectos para la bóveda punto 2 sin mecanismos de disipación versus con mecanismo de disipación energética, se presentan también la reducción de efectos con los máximos valores en porcentaje.

Tabla 5.19 Variación de efectos de desplazamientos en la bóveda punto 2	
Configuración de mecanismo de disipación energética	Grafica de reducción de efectos de desplazamientos
<p>Reducción de efectos de desplazamientos máximos entre análisis sin disipador y con disipador simple es de 2.41 %</p>	

En la tabla 5.20 se presenta la variación de efectos para la torre del campanario punto 1 sin mecanismos de disipación versus con mecanismo de disipación energética, se presentan también la reducción de efectos con los máximos valores en porcentaje

Tabla 5.20 Variación de efectos de desplazamiento en la torre del campanario punto 1

Configuración de mecanismo de disipación energética	Grafica de reducción de efectos de desplazamientos
Reducción de efectos de desplazamientos máximos entre análisis sin disipador y con disipador simple es de 1.82 %	
Reducción de efectos de desplazamientos máximos entre análisis sin disipador y con disipador en chevron es de 3.4 %	
Reducción de efectos de desplazamientos máximos entre análisis sin excéntrico con palanca es de 6.76 %	

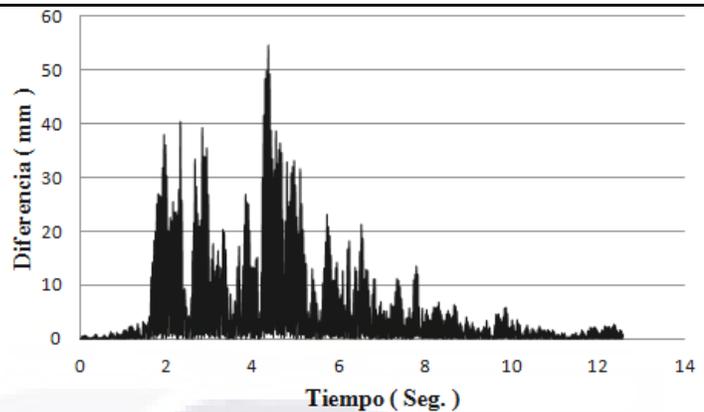
En la tabla 5.21 se presenta la variación de efectos para el parapeto punto 3 sin mecanismos de disipación versus con mecanismo de disipación energética, se presentan también la reducción de efectos con los máximos valores en porcentaje.

Tabla 5.21 Variación de efectos de desplazamientos en el parapeto punto 3	
Configuración de mecanismo de disipación energética	Grafica de reducción de efectos de desplazamientos
Reducción de efectos de desplazamientos máximos entre análisis sin disipador y con disipador simple es de 18.22 %	

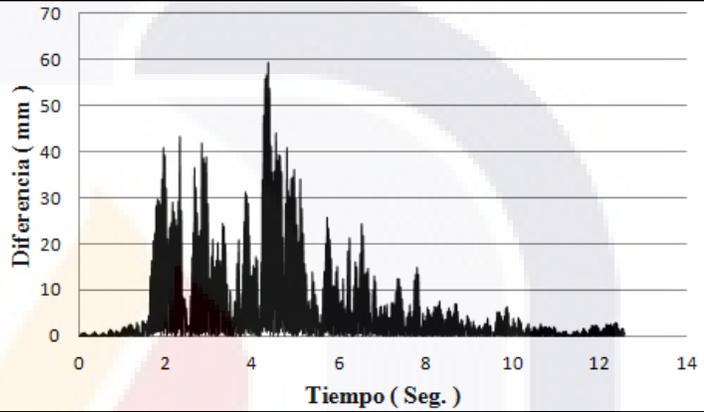
En la tabla 5.22 se presenta la variación de efectos para la torre del campanario punto 4 sin mecanismos de disipación versus con mecanismo de disipación energética, se presentan también la reducción de efectos con los máximos valores en porcentaje.

Tabla 5.22 Variación de efectos de desplazamiento en la torre del campanario punto 4	
Configuración de mecanismo de disipación energética	Grafica de reducción de efectos de desplazamientos
Reducción de efectos de desplazamientos máximos entre análisis sin disipador y con disipador simple es de 3.3 %	

Reducción de efectos de desplazamientos máximos entre análisis sin disipador y con disipador en chevron es de 3.22 %



Reducción de efectos de desplazamientos máximos entre análisis sin disipador y con disipador excéntrico con palanca es de 6.66 %

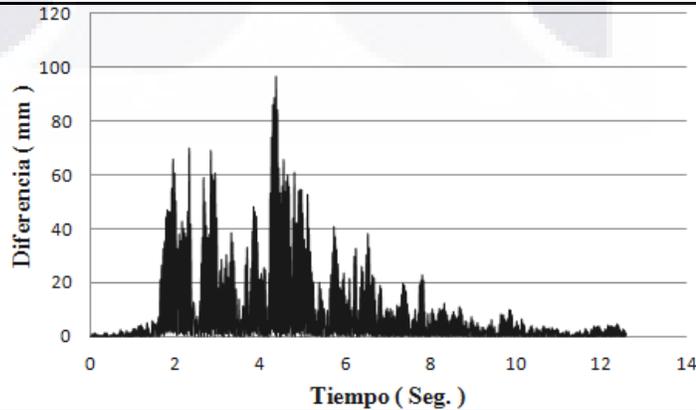


En la tabla 5.23 se presenta la variación de efectos para la torre del campanario punto 5 sin mecanismos de disipación versus con mecanismo de disipación energética, se presentan también la reducción de efectos con los máximos valores en porcentaje.

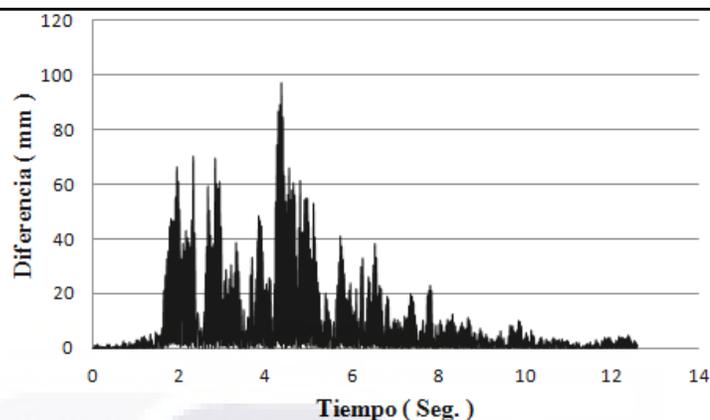
Tabla 5.23 Variación de efectos de desplazamiento en la torre del campanario punto 5

Configuración de mecanismo de disipación energética	Grafica de reducción de efectos de desplazamientos
---	--

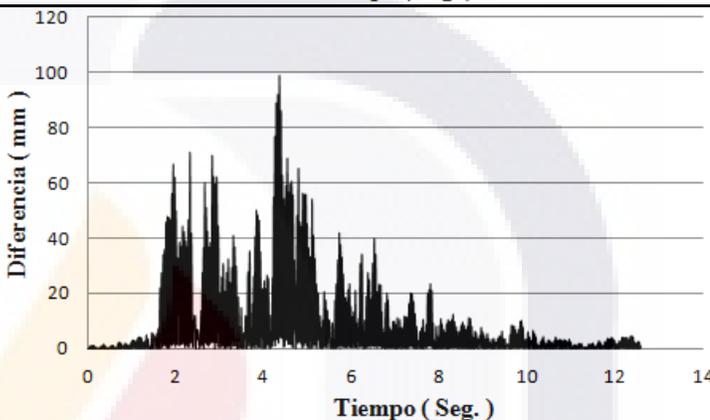
Reducción de efectos de desplazamientos máximos entre análisis sin disipador y con disipador simple es de 2.23 %



Reducción de efectos de desplazamientos máximos entre análisis sin disipador y con disipador en chevron es de 2.3 %



Reducción de efectos de desplazamientos máximos entre análisis sin disipador y con disipador excéntrico con palanca es de 4.2 %



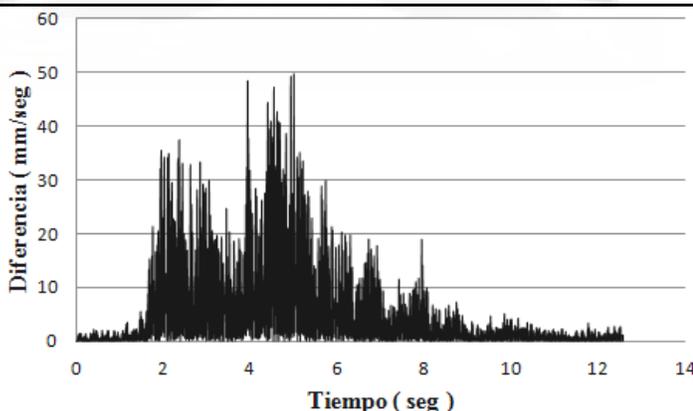
5.4.2 Variación de efectos en velocidades

En la tabla 5.24 se presenta la variación de efectos para la bóveda punto 2 sin mecanismos de disipación versus con mecanismo de disipación energética, se presentan también la reducción de efectos con los máximos valores en porcentaje.

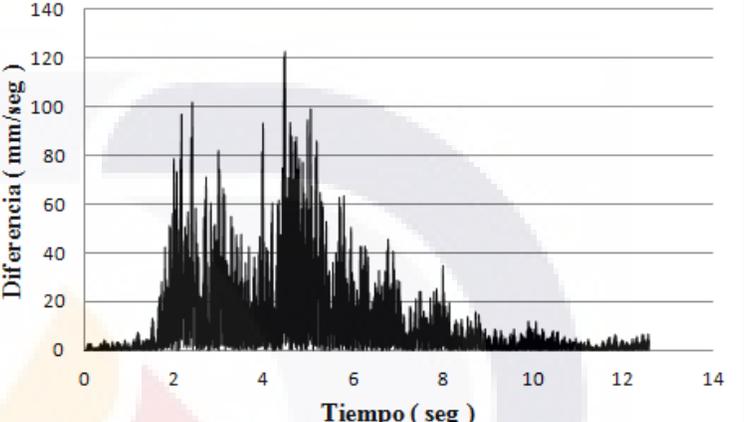
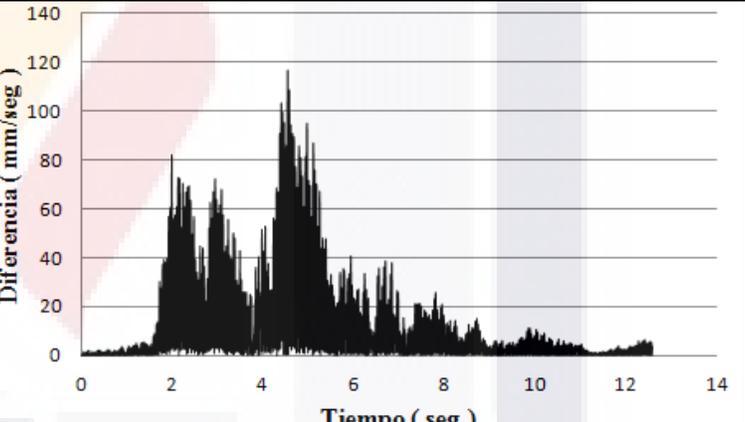
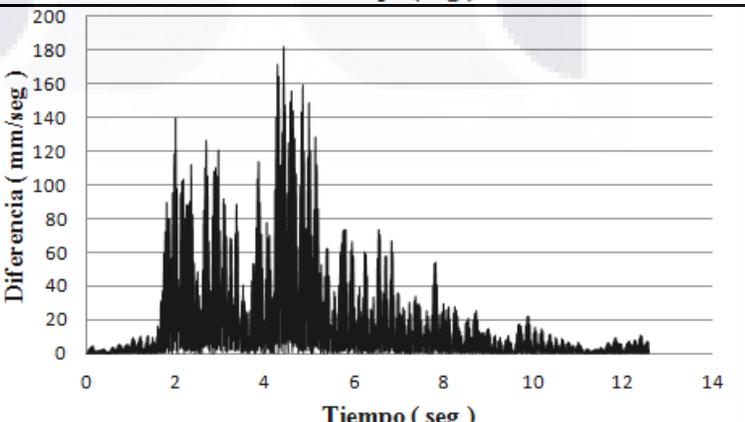
Tabla 5.24 Variación de efectos de velocidades en la bóveda punto 2

Configuración de mecanismo de disipación energética	Grafica de reducción de efectos de velocidades
---	--

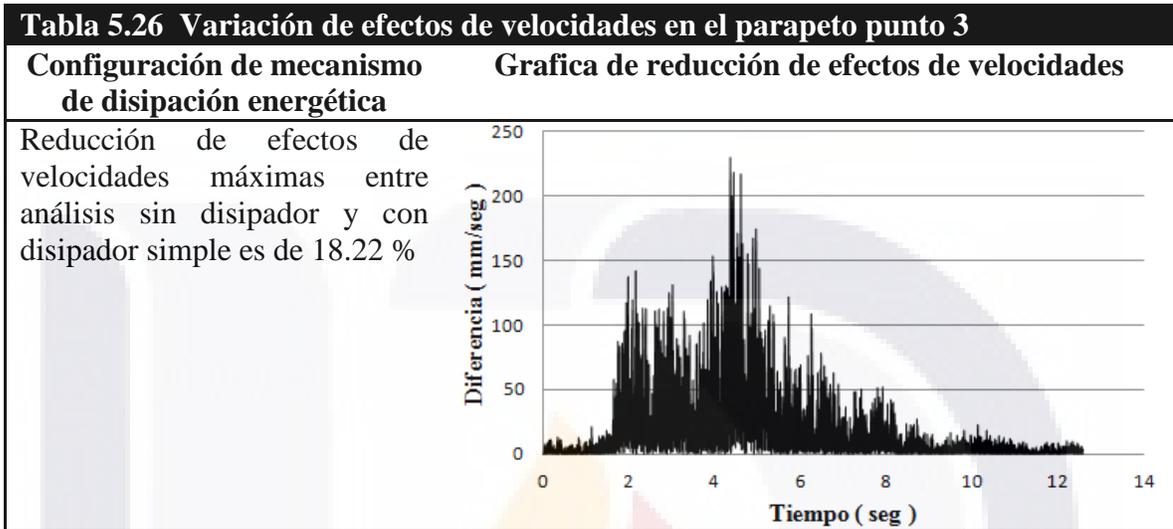
Reducción de efectos de velocidades máximas entre análisis sin disipador y con disipador simple es de 4.0 %



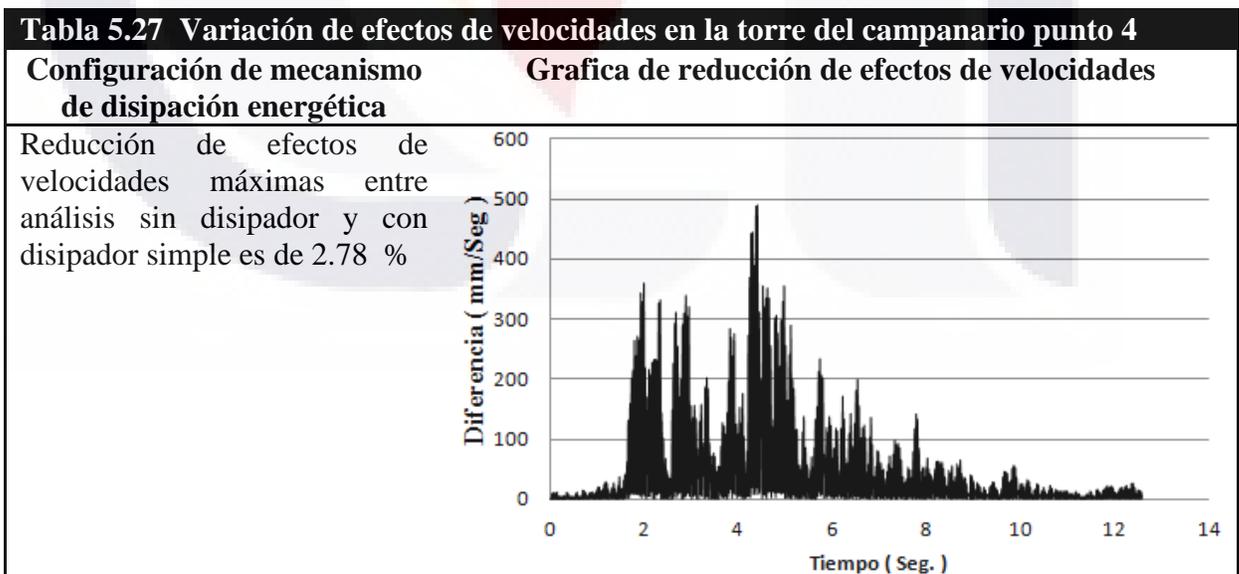
En la tabla 5.25 se presenta la variación de efectos para la torre del campanario punto 1 sin mecanismos de disipación versus con mecanismo de disipación energética, se presentan también la reducción de efectos con los máximos valores en porcentaje.

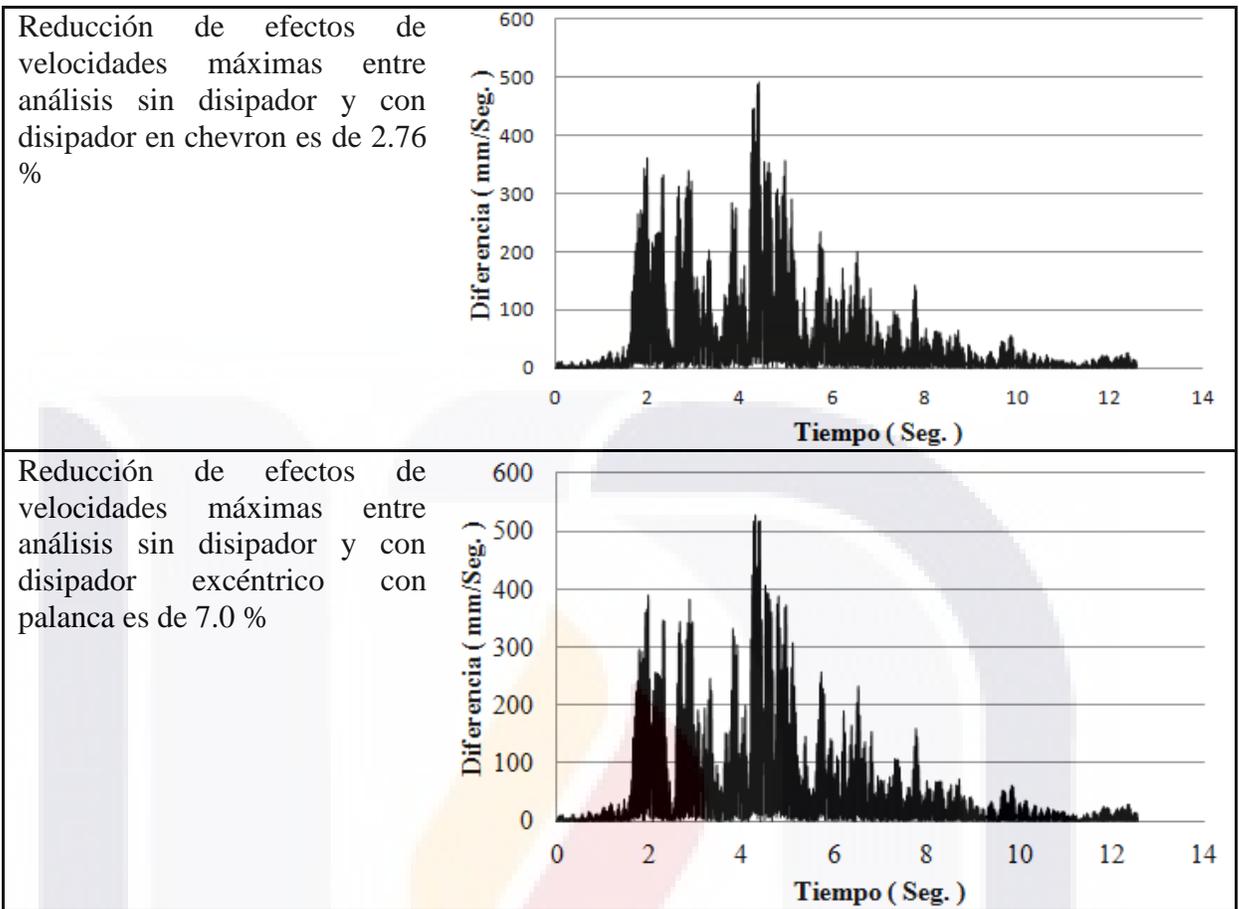
Configuración de mecanismo de disipación energética	Grafica de reducción de efectos de velocidades
<p>Reducción de efectos de velocidades máximas entre análisis sin disipador y con disipador simple es de 5.43 %</p>	
<p>Reducción de efectos de velocidades máximas entre análisis sin disipador y con disipador en chevron es de 4.84 %</p>	
<p>Reducción de efectos de velocidades máximas entre análisis sin disipador y con disipador excéntrico con palanca 2.8 %</p>	

En la tabla 5.26 se presenta la variación de efectos para el parapeto punto 3 sin mecanismos de disipación versus con mecanismo de disipación energética, se presentan también la reducción de efectos con los máximos valores en porcentaje.

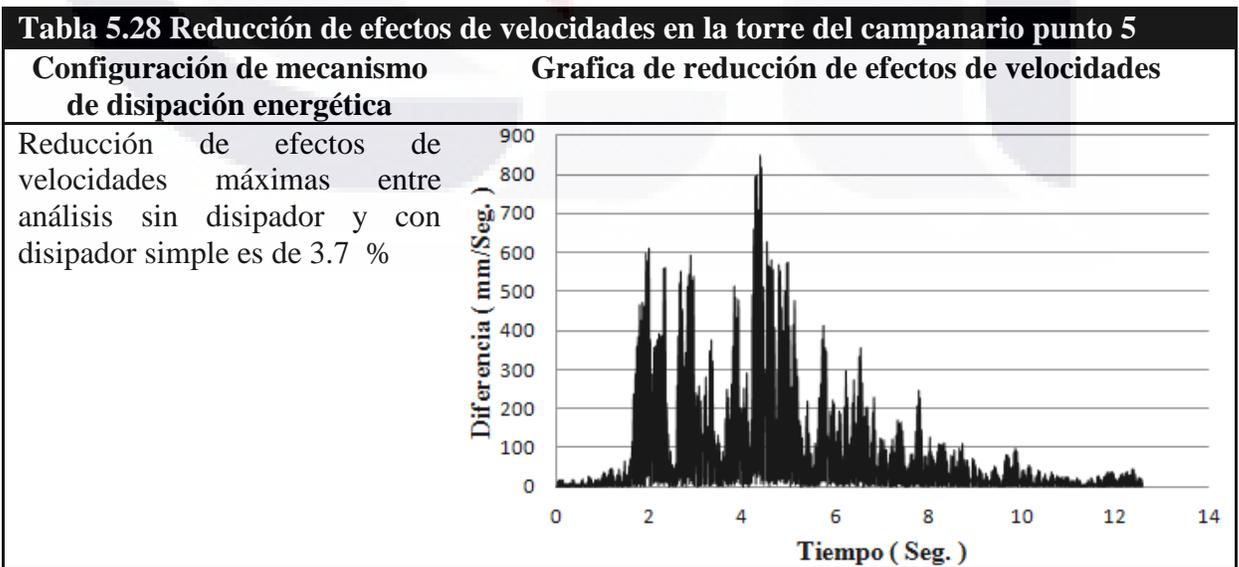


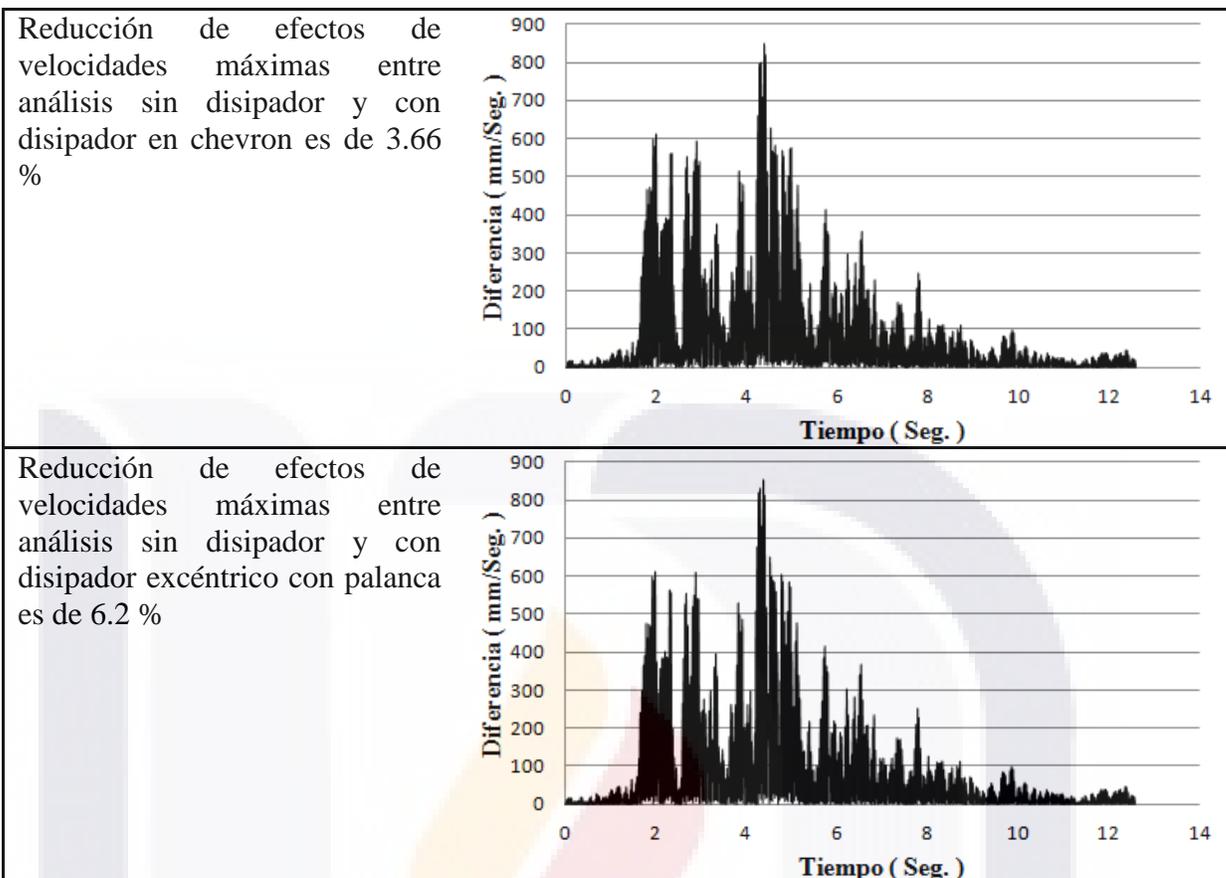
En la tabla 5.27 se presenta la variación de efectos para la torre del campanario punto 4 sin mecanismos de disipación versus con mecanismo de disipación energética, se presentan también la reducción de efectos con los máximos valores en porcentaje.





En la tabla 5.28 se presentan las reducciones de efectos para la torre del campanario punto 5 sin mecanismos de disipación versus con mecanismo de disipación energética, se presentan también la reducción de efectos con los máximos valores en porcentaje.



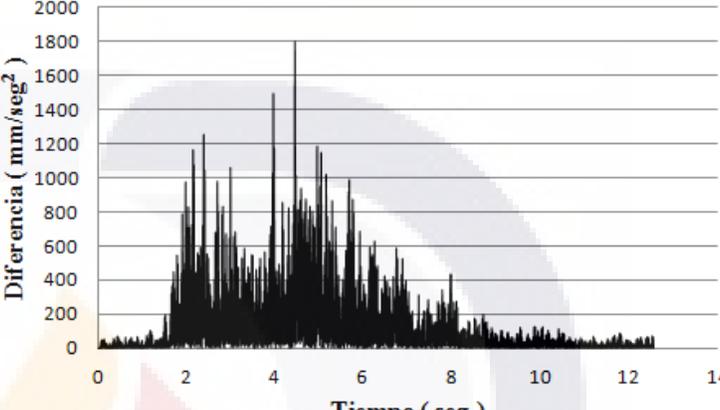
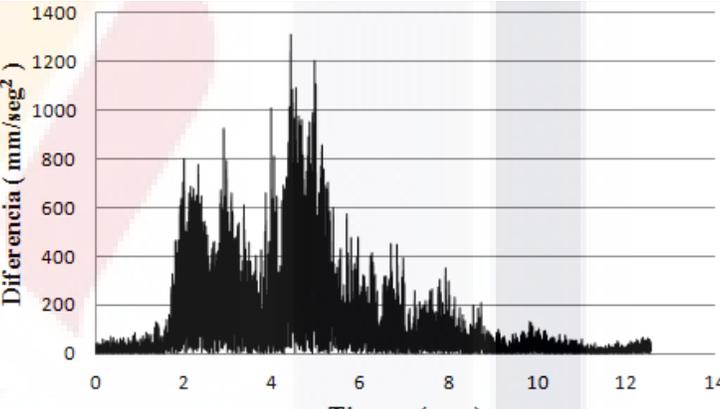
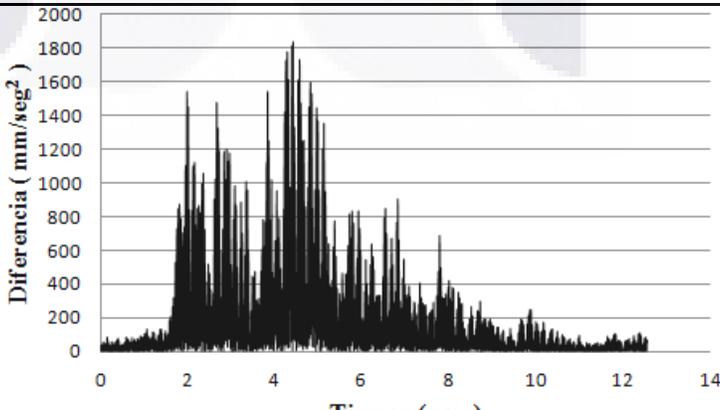


5.4.3 Variación de efectos en aceleraciones

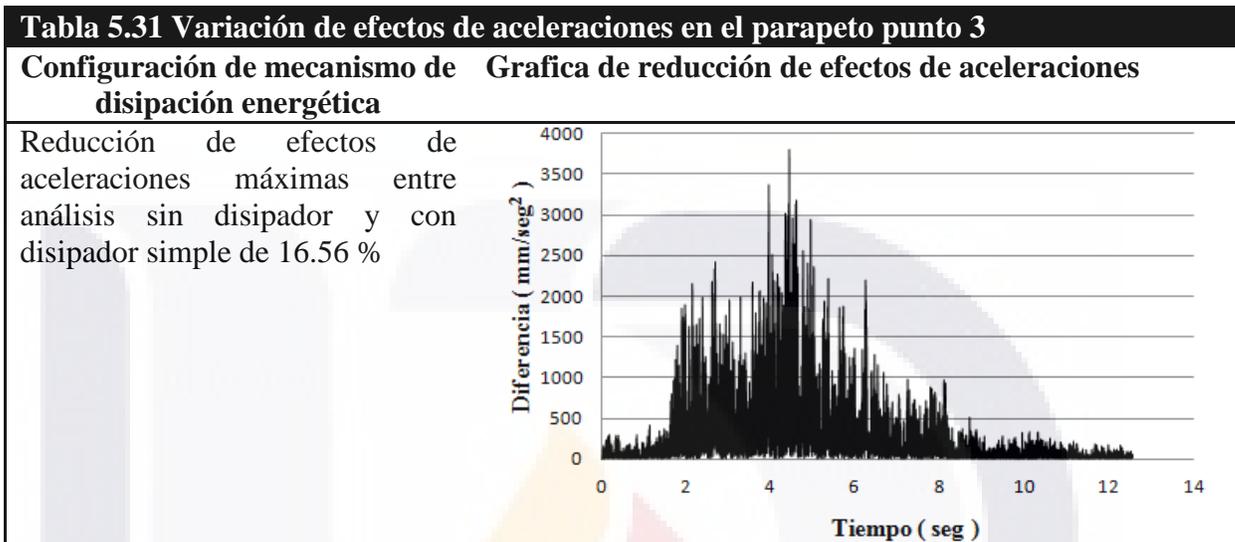
En la tabla 5.29 se presenta la variación de efectos para la bóveda punto 2 sin mecanismos de disipación versus con mecanismo de disipación energética.

<p>Tabla 5.29 Variación de efectos de aceleraciones en la bóveda punto 2</p>	
<p>Configuración de mecanismo de disipación energética</p>	<p>Grafica de reducción de efectos de aceleraciones</p>
<p>Reducción de efectos de aceleraciones máximas entre análisis sin disipador y con disipador simple es de 3.4 %</p>	

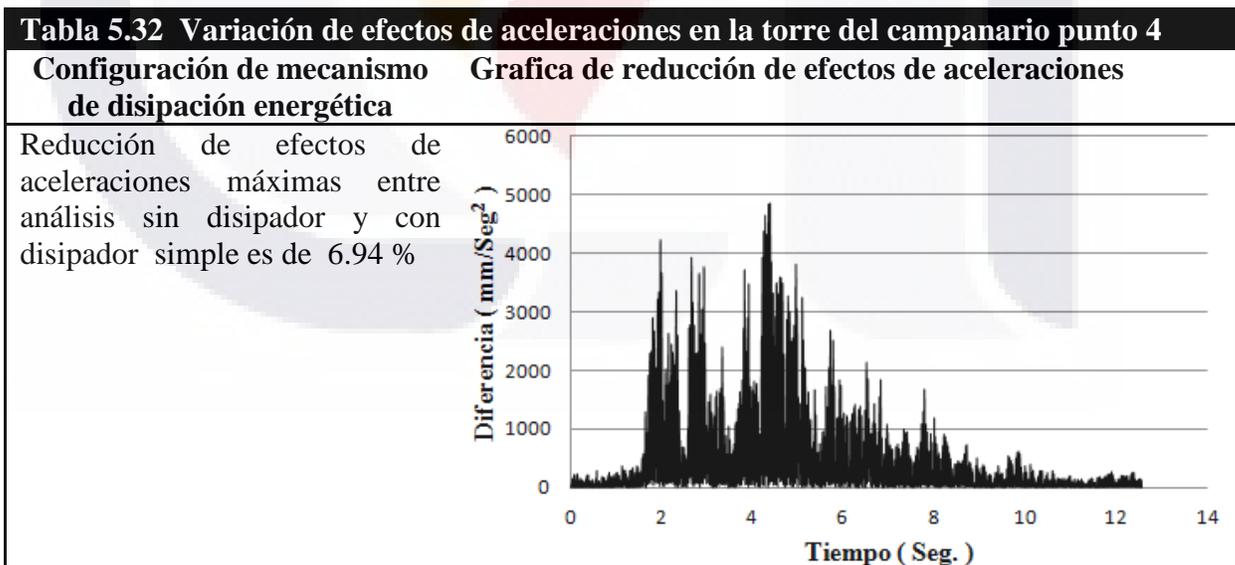
En la tabla 5.30 se presenta la variación de efectos para la torre del campanario punto 1 sin mecanismos de disipación versus con mecanismo de disipación energética, se presentan también la reducción de efectos con los máximos valores en porcentaje.

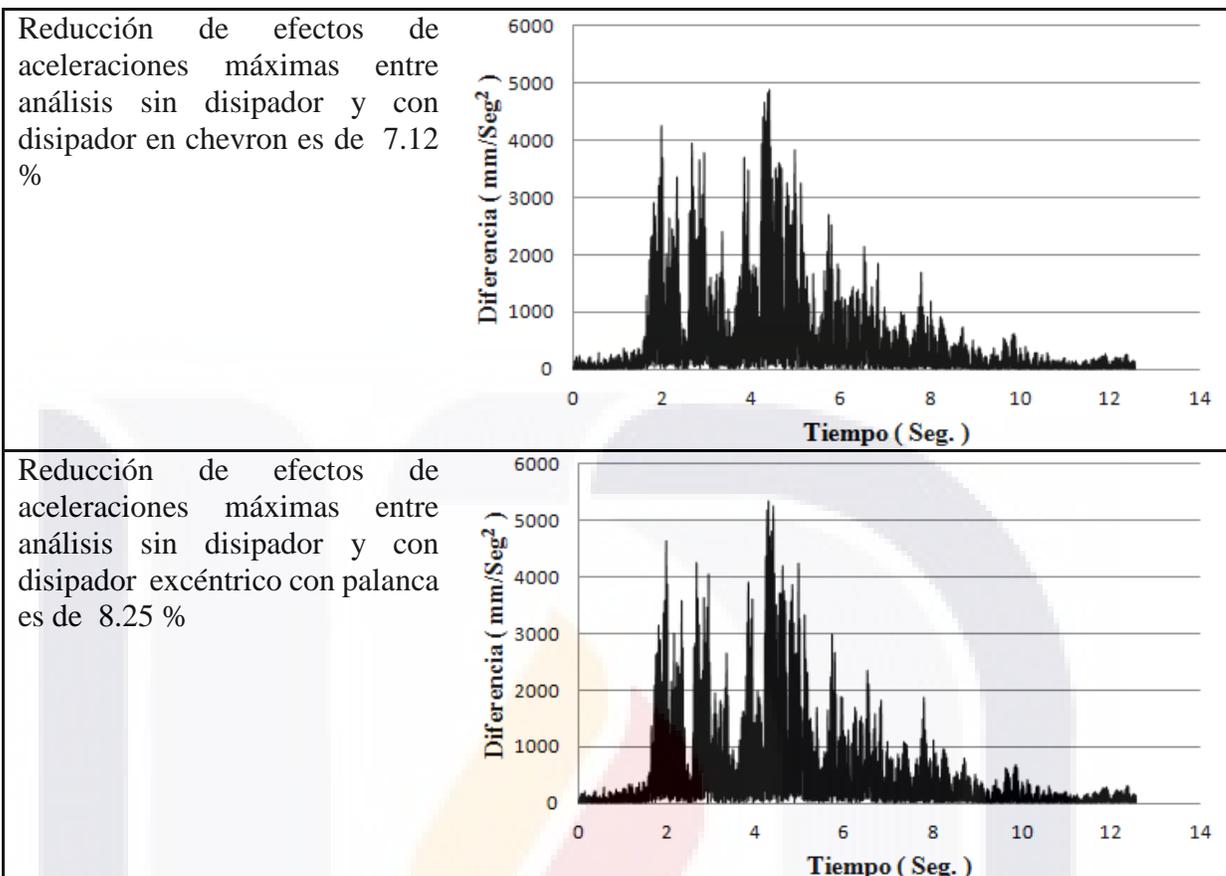
Configuración de mecanismo de disipación energética	Grafica de reducción de efectos de aceleraciones
<p>Reducción de efectos de aceleraciones máximas entre análisis sin disipador y con disipador simple es de 3.6 %</p>	
<p>Reducción de efectos de aceleraciones máximas entre análisis sin disipador y con disipador en chevron es de 4.23 %</p>	
<p>Reducción de efectos de aceleraciones máximas entre análisis sin disipador y con disipador excéntrico con palanca es de 6.1 %</p>	

En la tabla 5.31 se presenta la variación de efectos para el parapeto punto 3 sin mecanismos de disipación versus con mecanismo de disipación energética, se presentan también la reducción de efectos con los máximos valores en porcentaje.

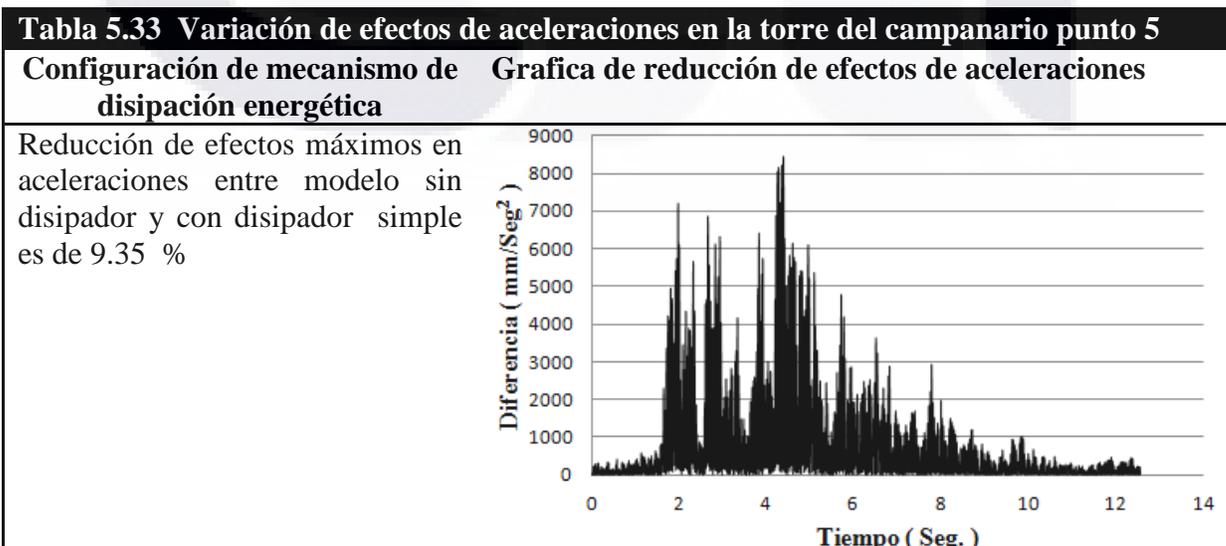


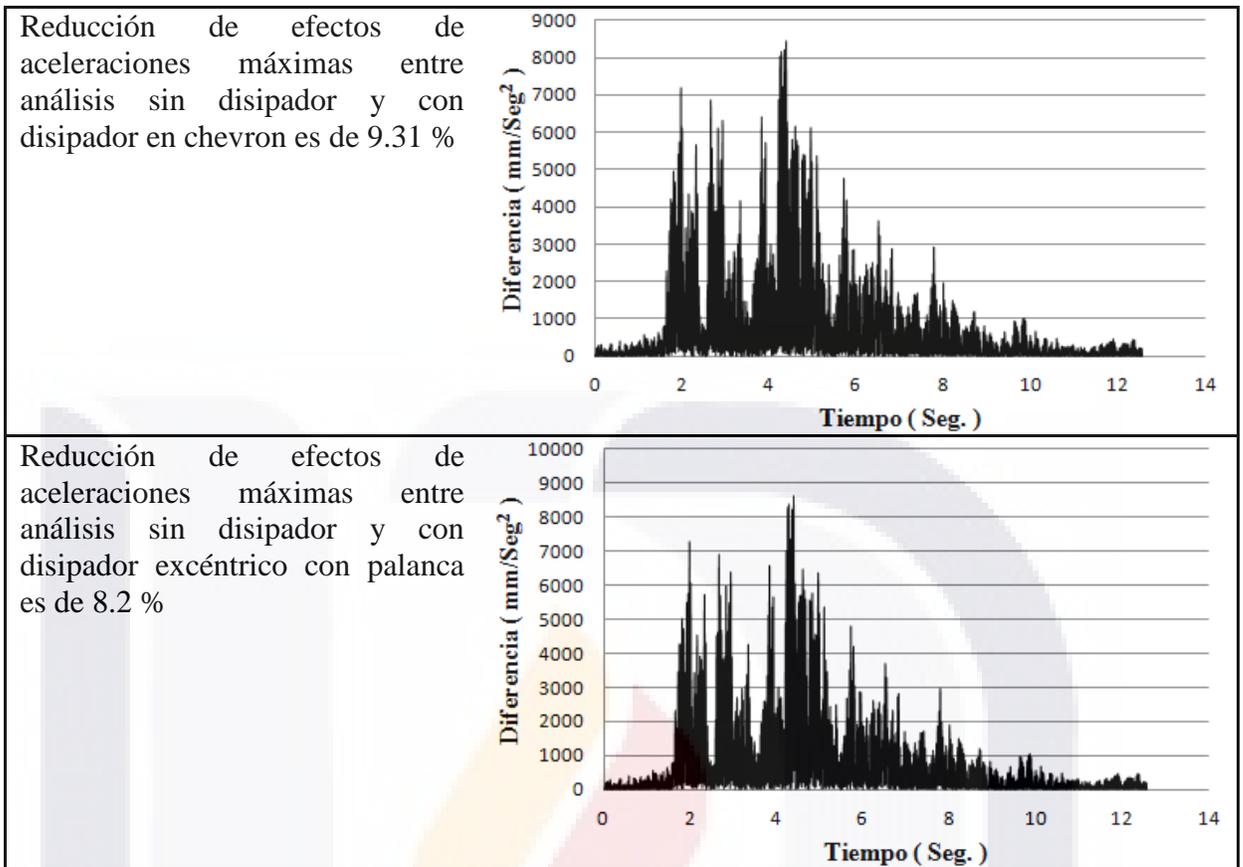
En la tabla 5.32 se presenta la variación de efectos para la torre del campanario punto 4 sin mecanismos de disipación versus con mecanismo de disipación energética, se presentan también la reducción de efectos con los máximos valores en porcentaje.





En la tabla 5.33 se presenta la variación de efectos para la torre del campanario punto 5 sin mecanismos de disipación versus con mecanismo de disipación energética, se presentan también la reducción de efectos con los máximos valores en porcentaje.





5.5 Amortiguamiento adicional resultante del uso de disipadores energéticos

5.5.1 Periodo de vibración para verificar el amortiguamiento adicional

En las tablas 5.34 a la 5.36 se muestran los periodos de vibración de los diferentes análisis que se generaron en esta tesis. En las tablas se comparan los periodos de vibración en segundos correspondientes al modelo sin mecanismos de disipación energética y se

compara con los periodos correspondientes a cada uno de los tres modelos con mecanismos de disipación energética simple, en chevron y excéntrico con palanca.

Tabla 5.34 Periodos de vibración sin disipador vs con disipador simple (segundos)

Modo	Periodo sin disipador	Periodo con disipador simple	Radio sin disipador y disipador simple
1	0.701	0.704	0.995
2	0.570	0.575	0.991
3	0.505	0.508	0.878
4	0.502	0.505	0.994
5	0.476	0.479	0.993
6	0.472	0.475	0.993
7	0.362	0.363	0.997
8	0.357	0.358	0.997
9	0.340	0.344	0.988
10	0.323	0.325	0.994
11	0.280	0.282	0.993
12	0.260	0.264	0.985

Tabla 5.35 Periodos de vibración sin disipador vs con disipador chevron (segundos)

Modo	Periodo sin disipador	Periodo con disipador chevron	Radio sin disipador y disipador chevron
1	0.701	0.740	0.947
2	0.570	0.575	0.991
3	0.505	0.507	0.996
4	0.502	0.505	0.994
5	0.476	0.479	0.993
6	0.472	0.474	0.995
7	0.362	0.363	0.997
8	0.357	0.358	0.997
9	0.340	0.344	0.988
10	0.323	0.325	0.994
11	0.280	0.282	0.993
12	0.260	0.264	0.985

Como se puede ver en las tablas la diferencia de los periodos de vibración es una prueba tangible de la contribución del amortiguamiento de los mecanismos de disipación energética.

Tabla 5.36 Periodos de vibración sin disipador vs con disipador excéntrico de palanca (segundos)

Modo	Periodo sin disipador	Periodo con disipador excéntrico con palanca	Radio sin disipador y disipador excéntrico con palanca
1	0.701	0.702	0.998
2	0.570	0.575	0.991
3	0.505	0.505	1.000
4	0.502	0.501	1.002
5	0.476	0.474	1.004
6	0.472	0.461	1.024
7	0.362	0.359	1.008
8	0.357	0.358	0.997
9	0.340	0.344	0.988
10	0.323	0.324	0.997
11	0.280	0.281	0.996
12	0.260	0.264	0.985

5.5.2 Energía por amortiguamiento para verificar el amortiguamiento adicional

En las siguientes tablas se muestra la energía por amortiguamiento en una historia de tiempo, es decir, se muestra la energía para cada paso Δt en el análisis sísmico lineal. El objetivo es comparar el análisis sin disipador energético con los tres análisis con los mecanismos de disipación energética, simple en chevron y excéntrico con palanca, así se podrá visualizar como la contribución del amortiguamiento de los mecanismos de disipación energética reduce la energía por deformación elástica de la estructura.

Tabla 5.37 Energía por amortiguamiento para cada mecanismo de disipación energética

Configuración de mecanismo de disipación energética	Grafica de energía por amortiguamiento durante el análisis sísmico del modelo	Diferencia en % con respecto al modelo sin disipador
<p>Análisis 3, mecanismo de disipación energético simple</p> <p>— Sin disipador</p> <p>- - - Disipador simple</p>		<p>-1.5</p>
<p>Análisis 4, mecanismo de disipación energético en chevron</p> <p>— Sin Disipador</p> <p>- - - Disipador en Chevron</p>		<p>-1.56</p>
<p>Análisis 5, mecanismo de disipación energético excéntrico con palanca</p> <p>— Sin disipador</p> <p>- - - Con disipador excéntrico</p>		<p>-2.58</p>

5.6 Sollicitación en los disipadores energéticos bajo la carga sísmica

5.6.1 Fuerzas axiales de los mecanismos de disipación energética

Las tablas 5.38 a la 5.40 se muestran las fuerzas axiales máximas para los diferentes mecanismos de disipación energética localizados en la bóveda (cerca del parapeto) y la torres de la iglesia como se describió en el capítulo 4.

5.38 Fuerza axial en mecanismos de disipación energética simple (N)	
Máxima fuerza en Bóveda	8081.00
Máxima fuerza en Torre de campanario	1230.00

5.39 Fuerza axial en mecanismos de disipación energética en chevron (N)	
Máxima fuerza en Bóveda	8044.16
Máxima fuerza en Torre de campanario	2106.83

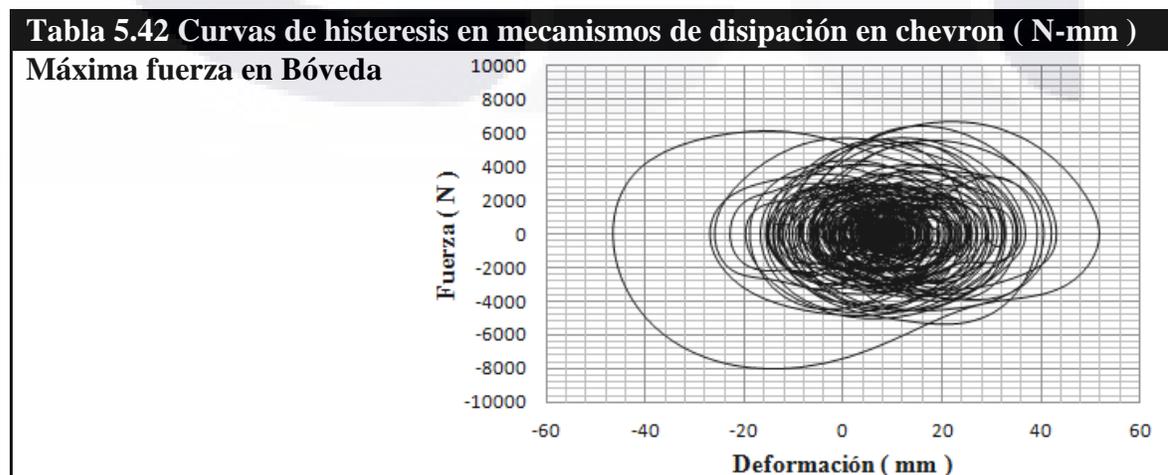
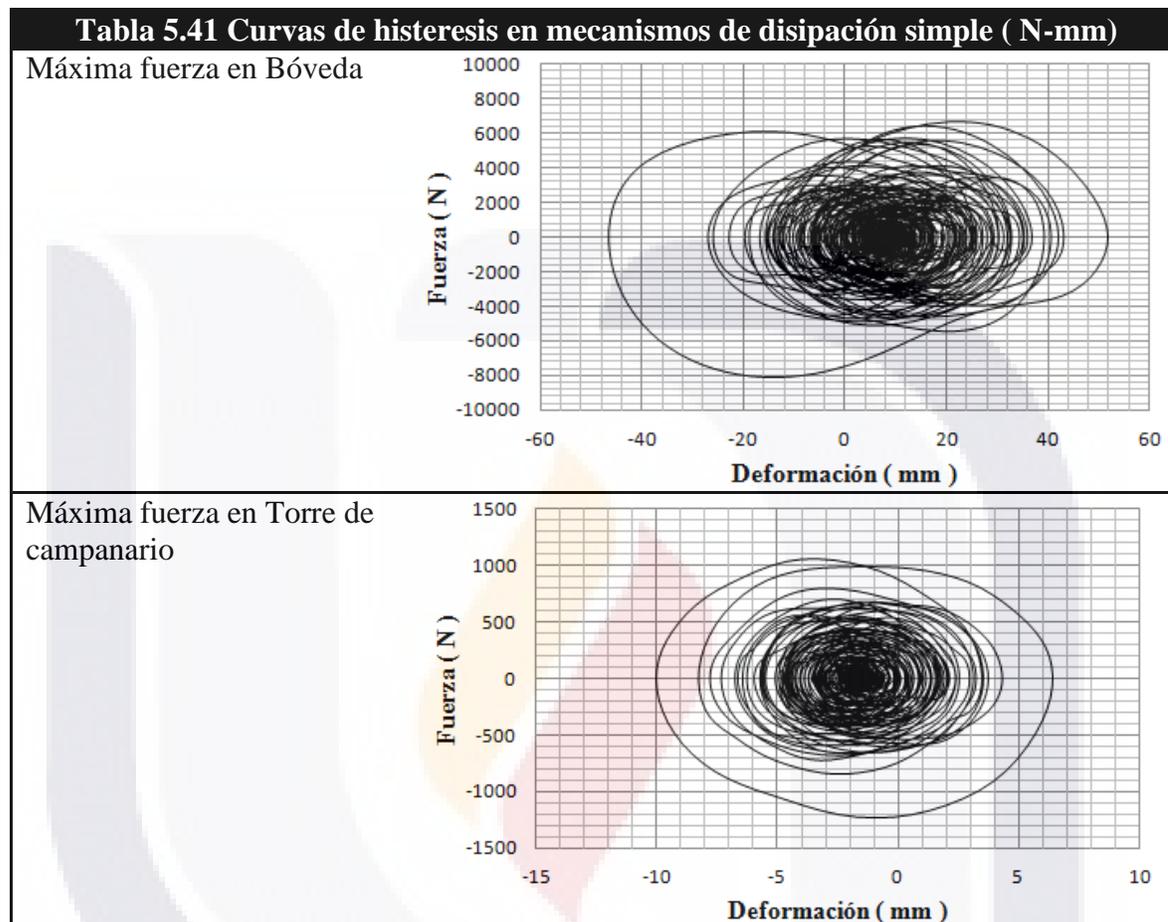
5.40 Fuerza axial en mecanismos de disipación energética excéntrico con palanca (N)	
Máxima fuerza en Bóveda	7939.35
Máxima fuerza en Torre de campanario	1289.27

Las fuerzas axiales máximas de los mecanismos mostradas para la bóveda resultaron demasiado altas para mecanismos comerciales como se mostraron en las figuras 3.9 y 3.10, por lo que su localización no es práctica, ya que solo contribuyeron a reducir las respuestas de los parapetos y no de la estructura en general. Los valores de los mecanismos en la bóveda son alrededor de 8000 N, si revisamos las graficas 3.9 y 3.10 estas fuerzas son demasiado altas para justificar una cantidad importante de estos mecanismos solo para proteger un parapeto que no mide más de 3 metros de altura.

5.6.2 Curvas de histéresis en mecanismos de disipación energética

En las siguientes tablas se muestran las curvas de histéresis para los diferentes mecanismos de disipación energética usados en los modelos 3 simple, 4 en chevron y 5 excéntrico con palanca, el área en cada uno de los bucles es la energía disipada en cada uno de los disipadores energéticos, es decir se suma el área de cada bucle para la energía total disipada el final de la sollicitación sísmica. Como se muestran en las graficas, los bucles de

los mecanismos localizados en la bóveda son mucho más amplios con los localizados en la torre, esto con cuerda con las fuerzas mostradas en el punto 5.5.1 donde las fuerzas axiales son mayores para los mecanismos localizados en la bóveda.



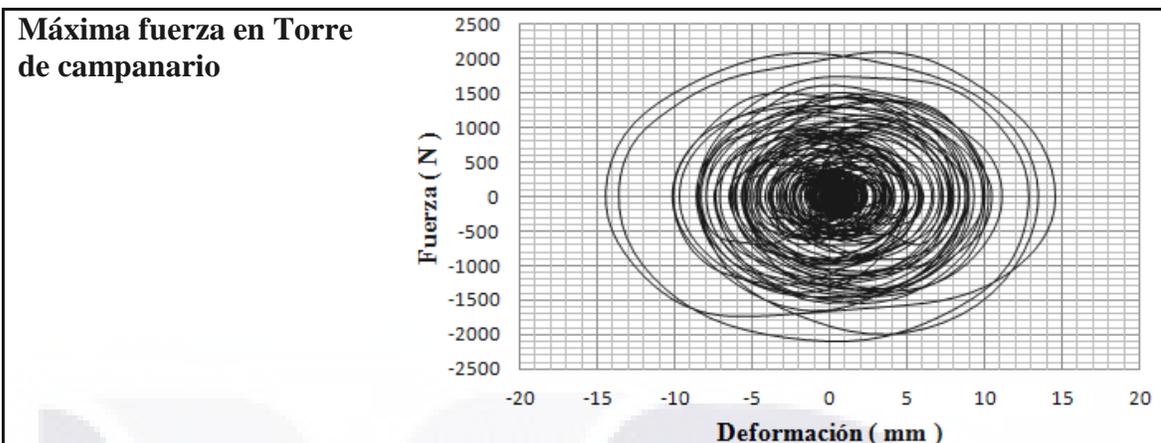
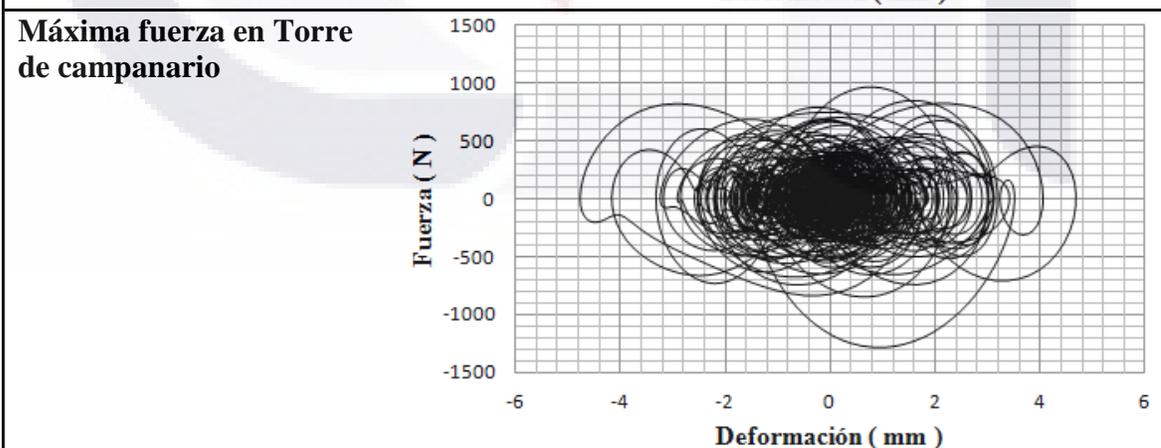
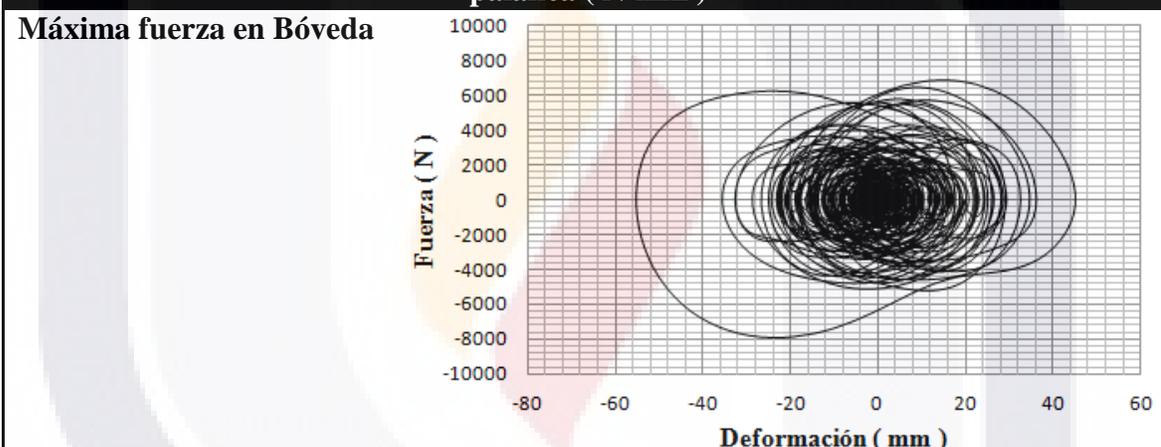


Tabla 5.43 Curvas de histeresis en mecanismos de disipación en excéntrico con palanca (N-mm)

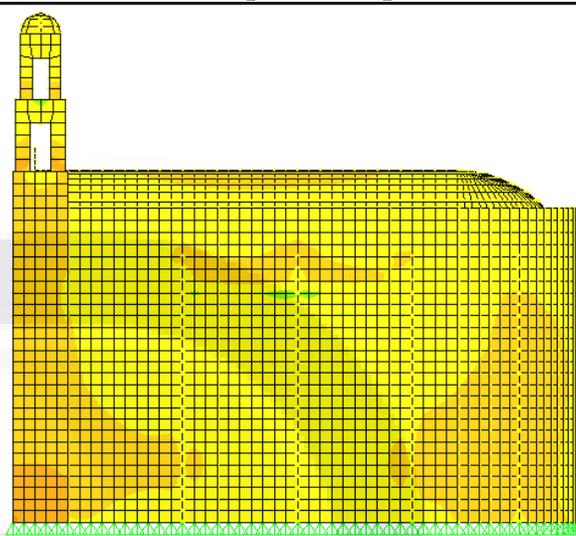
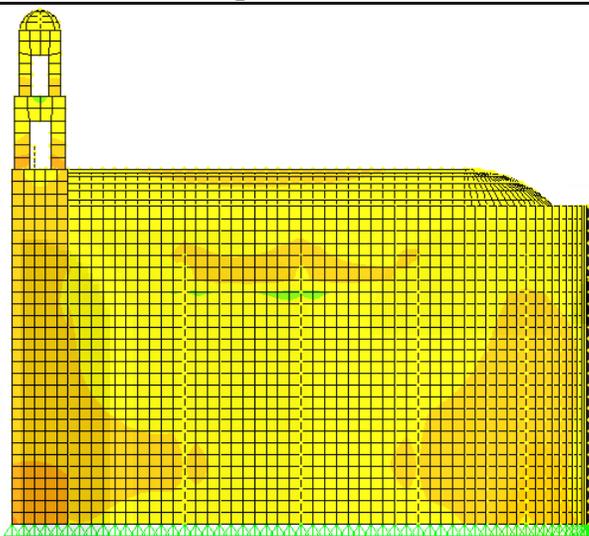


5.7 Efectividad de los mecanismos de disipación energética en base a la reducción de esfuerzos

Tabla 5.44 Esfuerzos de análisis sin disipador versus con disipador simple

Esfuerzos sin disipador

Esfuerzos con disipador simple

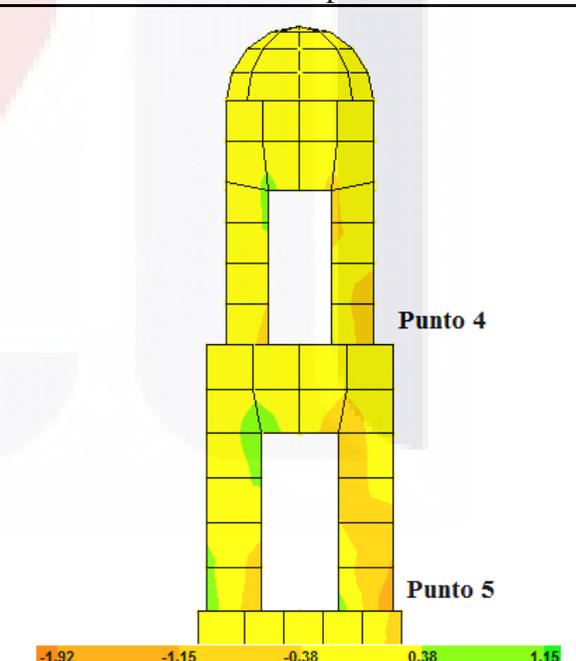
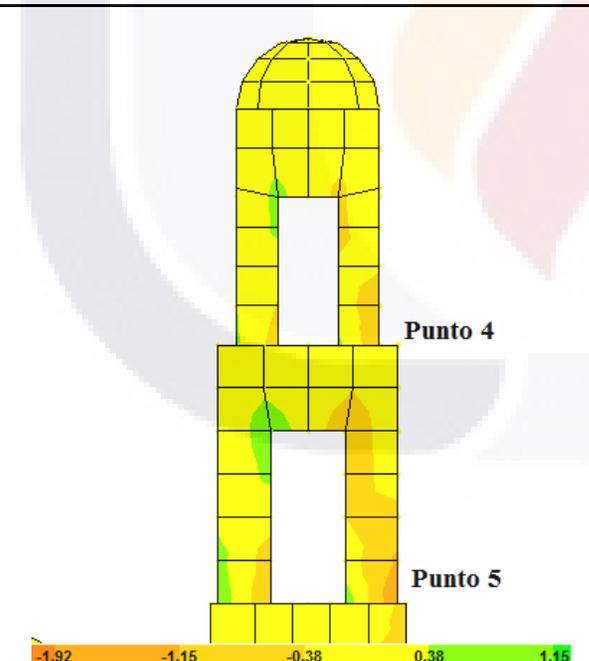


Max. Esfuerzo a compresión : 0.322 Mpa.

Max. Esfuerzo a compresión : 0.30 Mpa.

Máxima reducción a tensión : 0 %

Máxima reducción a compresión: 6.52 %



Max esfuerzo a compresión punto 4 :0.385 Mpa.

Max esfuerzo a compresión punto 4 :0.37 Mpa.

Max esfuerzo a tensión punto 4 :0.175 Mpa.

Max esfuerzo a tensión punto 4 :0.1645 Mpa.

Max esfuerzo a compresión punto 5 :0.672 Mpa.

Max esfuerzo a compresión punto 5 :0.65 Mpa.

Max esfuerzo a tensión punto 5 :0.29 Mpa.

Max esfuerzo a tensión punto 5 :0.269 Mpa.

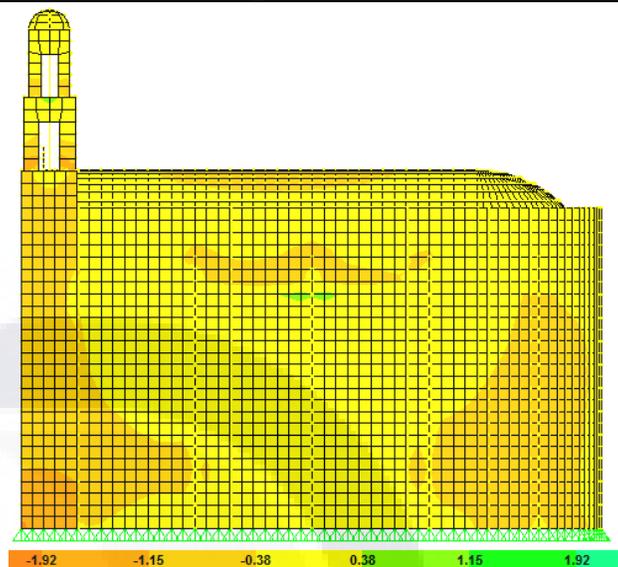
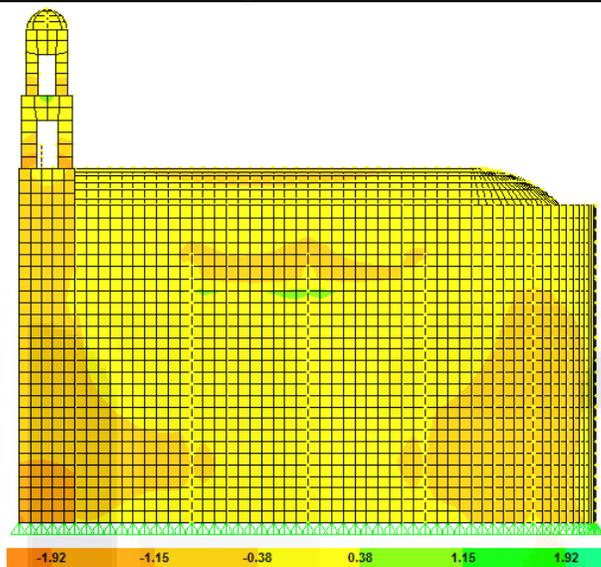
Máxima reducción a tensión : 7.24 %

Máxima reducción a compresión: 3.3 %

Tabla 5.45 Esfuerzos de análisis sin disipador versus con disipador en chevron

Esfuerzos sin disipador

Esfuerzos con disipador en chevron

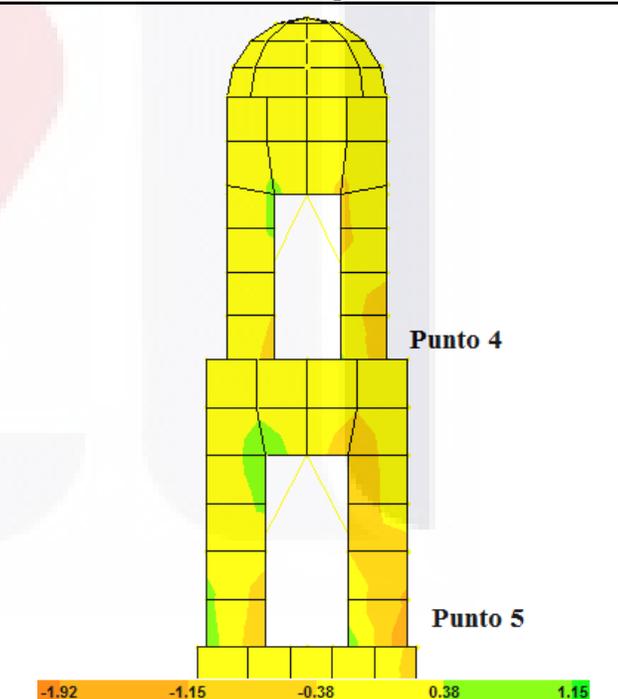
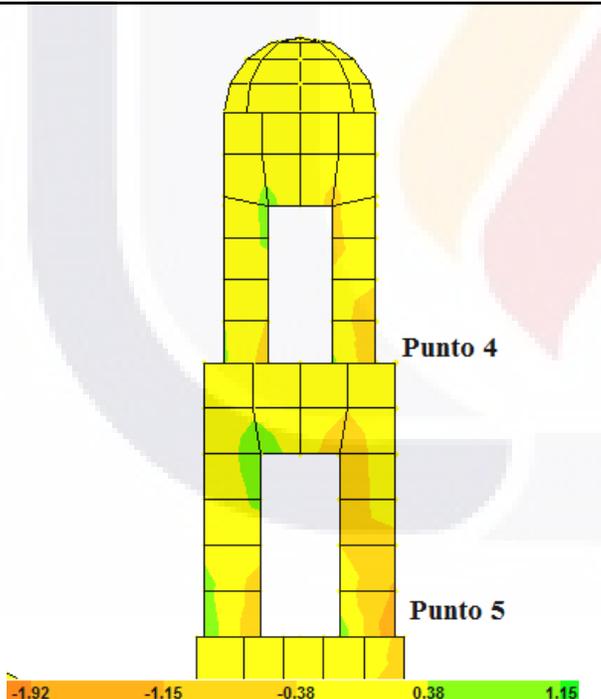


Max. Esfuerzo a compresión : 0.322 Mpa.

Max. Esfuerzo a compresión : 0.3 Mpa.

Máxima reducción a tensión : 0 %

Máxima reducción a compresión: 6.83 %



Max esfuerzo a compresión punto 4 :0.38 Mpa.
 Max esfuerzo a tensión punto 4 :0.175 Mpa.
 Max esfuerzo a compresión punto 5:0.672 Mpa.
 Max esfuerzo a tensión punto 5 :0.29 Mpa.

Max esfuerzo a compresión punto 4 :0.367 Mpa.
 Max esfuerzo a tensión punto 4 :0.1645 Mpa.
 Max esfuerzo a compresión punto 5 :0.668 Mpa.
 Max esfuerzo a tensión punto 5 :0.266 Mpa.

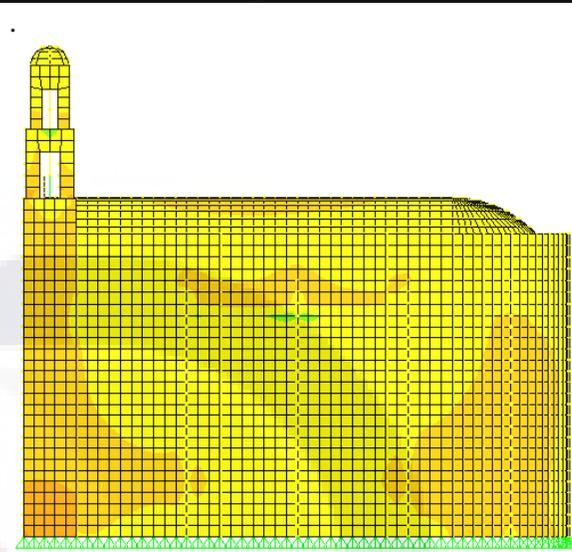
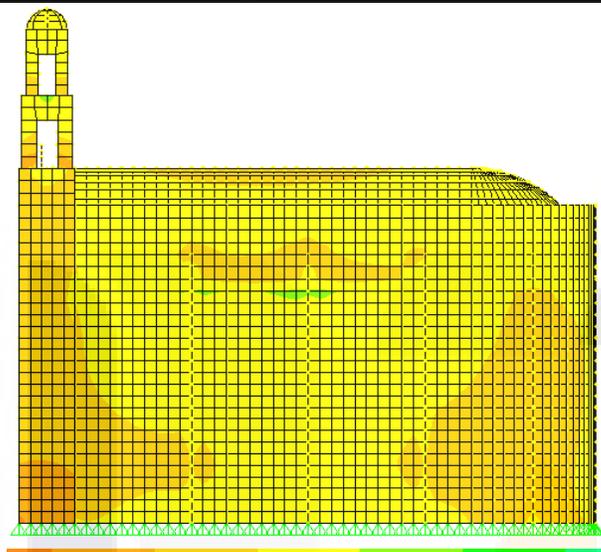
Máxima reducción a tensión : 7.24 %

Máxima reducción a compresión: 4.7 %

Tabla 5.46 Esfuerzos de análisis sin disipador versus con disipador excéntrico

Esfuerzos sin disipador

Esfuerzos con disipador excéntrico

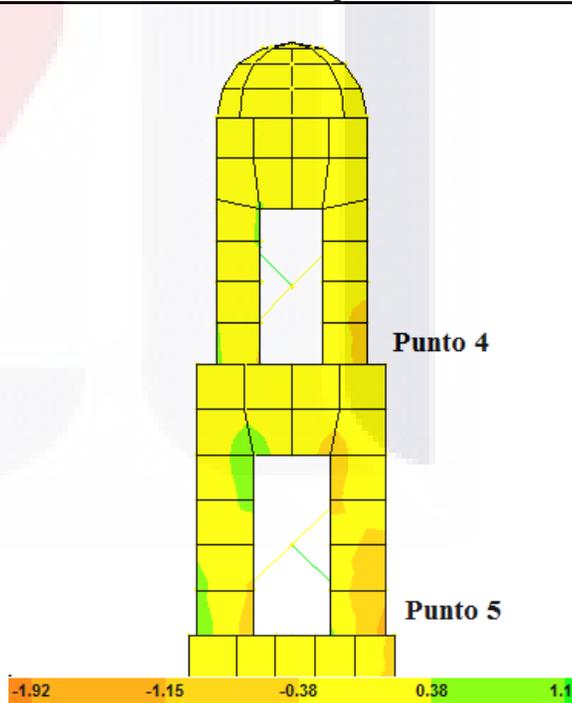
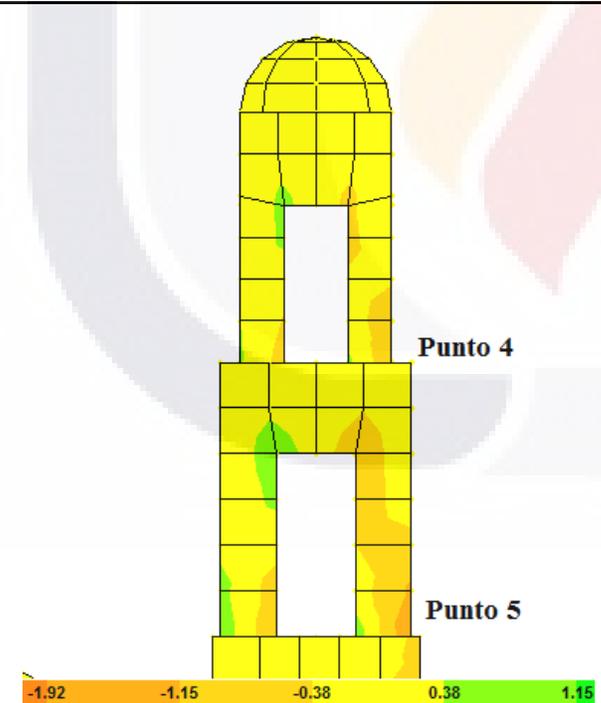


Max. Esfuerzo a compresión : 0.322 Mpa.

Max. Esfuerzo a compresión : 0.315 Mpa.

Máxima reducción a tensión : 0 %

Máxima reducción a compresión: 2.2 %



Max esfuerzo a compresión punto 4 :0.385 Mpa.
 Max esfuerzo a tensión punto 4 :0.175 Mpa.
 Max esfuerzo a compresión punto 5 :0.672 Mpa.
 Max esfuerzo a tensión punto 5 :0.29 Mpa.

Max esfuerzo a compresión punto 4:0.334 Mpa
 Max esfuerzo a tensión punto 4 :0.08 Mpa.
 Max esfuerzo a compresión punto 5:0.65 Mpa
 Max esfuerzo a tensión punto 5 :0.168 Mpa.

Máxima reducción a tensión : 54.3 %

Máxima reducción a compresión:13.2 %

En las tablas 5.44, 5.45 y 5.46 se presentan los esfuerzos máximos en algunas de las áreas más críticas para daños y colapsos en el edificio religioso colonial, con el fin de conocer cual puede ser el beneficio tangible en la aplicación de los mecanismos de disipación energética y poder medir con esto la disminución de la vulnerabilidad sísmica de la estructura patrimonial.

Para representar los esfuerzos en las tablas 5.44, 5.45 y 5.46 se multiplicaron los esfuerzos (Mpa / metro lineal) por un ancho tributario de 35 cms. Las reducciones de esfuerzos están mostradas en porcentajes.



6.1 Propiedades dinámicas del edificio religioso patrimonial y calibración del modelo numérico

Con las propiedades dinámicas presentadas en la sección 5.2, se pudo validar y calibrar el modelo numérico de esta tesis con respecto al desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, esto se hizo con el fin de asegurar que el nuevo modelo siguiera los lineamientos planteados en el modelo en el cual se basó esta tesis, ya que el modelo desarrollado por el Instituto de Ingeniería, hizo uso de elementos sólidos, mientras que el modelo numérico usado en esta tesis se usaron elementos cascarón.

6.2 Respuesta dinámica de la estructura

Las respuestas dinámicas presentadas en la sección 5.3, mostraron una reducción efectiva por parte de los mecanismos de disipación energética de los efectos como desplazamientos, velocidades y aceleraciones para todos los análisis 3, 4, y 5 donde hizo uso de estos mecanismos, las gráficas muestran estas reducciones. Cabe mencionar que las reducciones no son altamente significativas como las de un edificio reticular, ya que se lograron reducciones entre 1.8 % hasta 18.22 %.

6.3 Reducción de efectos debido a los mecanismos de disipación

Los resultados que muestran gráficamente la reducción de efectos, debido al uso de mecanismos de disipación energética, demuestran:

1. Que la eficacia en la reducción de efectos en la bóveda no es muy notable, el porcentaje de reducción de efectos no sobrepasa de un 4 %. Esto era de esperarse ya que, los mecanismos de disipación usados en esta sección de la estructura, están apoyados a su vez un elemento muy flexible como lo es el parapeto, dado que las respuestas dinámicas en el parapeto son mayores que en la bóveda y esa diferencia de rigideces permite que el parapeto sea ampliamente beneficiado cuando se aplican los mecanismos de disipación a diferencia de la bóveda.

2. La reducción de efectos en el parapeto es la más amplia, de todos los elementos donde se localizaron los mecanismos, el porcentaje de reducción varía de un 18 a 20 %, debido a la alta flexibilidad de este, sin embargo como se aclarara más adelante, el uso de demasiados mecanismos en esta área no es justificable.
3. Sin duda donde más se justifica el uso de los mecanismos de disipación energética son en las torres del campanario donde la reducción de efectos varía de 2 % a 9 %. Sin embargo, no es la reducción propiamente de efectos lo que más ayuda a minorar la vulnerabilidad del edificio, desde el punto de vista de resultados, como se mostró en la sección 5.7 Las áreas más críticas y expuestas al colapso, son las bases de las ventanas de los campanarios mostradas en la figura 4.17 las cuales tuvieron una reducción en los esfuerzos de 2.2 % hasta 34.3 %.

6.4 Amortiguamiento adicional resultante del uso de mecanismos de disipación energética

Los resultados en las graficas de energía por amortiguamiento y la modificación de las propiedades dinámicas mostradas en la sección 5.5 muestran que la contribución amortiguamiento no clásico proporcionado por los diferentes configuraciones de los mecanismos de disipación energética usadas en esta tesis adicional es relativamente baja, ya que la masa del edificio religioso es muy grande en comparación con los mecanismos usados a diferencia de las estructuras dúctiles y reticulares donde se ha aplicado usualmente estos mecanismos. Una estructura con materiales relativamente débiles un incremento pequeño de la fracción de amortiguamiento puede ser muy significativo como se mostro en la sección 5.7, donde los esfuerzos de la estructura fueron reducidos significativamente reduciendo la vulnerabilidad del templo colonial de posibles daños estructurales, como se ha expresado en esta tesis.

6.5 Solicitud en los disipadores energéticos bajo la carga sísmica

Como se había mencionado en la sección 5.6 en los mecanismos de disipación energética colocados en los parapetos desarrollan fuerzas axiales demasiado altas (de hasta 8000 N), y requieren de un alto número de mecanismos a cada 0.5 metros, en total 30 mecanismos en cada uno de los dos parapetos, lo cual, económicamente no es viable, ni se

justifica, es por esto que para el parapeto en particular se debe buscar otra opción con el fin de reducir su vulnerabilidad sísmica. Por otro lado las fuerzas axiales desarrolladas en los mecanismos de disipación en las torres de la iglesia son suficientemente óptimos.

6.6 Efectividad de los mecanismos de disipación energética en base a la reducción de esfuerzos

Los resultados sobre los esfuerzos de la iglesia desarrollados de los mecanismos de disipación energética muestran que es posible reducir los esfuerzos de forma considerable. en particular el mecanismo en excéntrico con palanca mostró una muy alta eficiencia.

El mecanismo mostró ser más eficiente, para las dos zonas más críticas del campanario que son las bases de las ventanas de cada uno de los dos campanarios, donde los esfuerzos se reducen a casi 35%, e inclusive se puede visualizar esta misma reducción de forma directa en el mapeo de la distribución de esfuerzos, obtenida se SAP2000.

6.7 Conclusiones generales

Actualmente se desarrollan investigaciones sobre la efectividad de los mecanismos de disipación energética en países como Japón, Canadá, Estados Unidos, Chile, Italia, China. Edificios de mampostería en general e históricos en particular son un área de oportunidad importante en la investigación de la ingeniería sísmica de los mecanismos de disipación energética, principalmente los pasivos, y es un reto grande en edificios religiosos patrimoniales.

Una de las principales limitaciones para aplicar los mecanismos de disipación energética es la geometría del edificio religioso colonial, el cual hizo solo permitió la aplicación de las configuraciones conocidas como chevron y excéntrico con palanca en la torre del campanario. Sobre los parapetos solo fue posible colocar mecanismos simples, debido a esta misma dificultad.

En esencia, el objetivo de la aplicación de mecanismos de control en estructuras históricas es reducir los daños en los valores intrínsecos que rodean la vida de un edificio patrimonial.

Referencias

- Alcocer S., Aguilar G., and Flores L. (1999). *El sismo de Tehuacán del 15 de junio de 1999*. México D.F, 159.
- Castellanos Hugo. (2004). “Efecto del agrietamiento en la respuesta sísmica de un templo colonial típico.” Maestría, U.N.A.M.
- Chávez M. (2005). “Estudio experimental de las propiedades mecánicas de mamposterías de piedra natural.” Maestría, U.N.A.M., D.F. Mexico.
- Chavez M. (2010). “Validación experimental de modelos analíticos para el estudio del comportamiento sísmico de estructuras históricas.” Doctorado, Instituto de Ingeniería, U.N.A.M., D.F. Mexico.
- Chopra Anil. (2010). *Dinámica de estructuras*. Pearson, Berkeley, EU.
- COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD. (2008). “MANUAL DE DISEÑO DE OBRAS CIVILES DISEÑO POR SISMO.” Instituto de Investigaciones Eléctricas.
- Computer and Structures Inc. (2009). “CSI Analysis Reference Manual.”
- Constantinou Michael, Soong Tsu, and Dargush Gary. (1998). *PASSIVE ENERGY DISSIPATION SYSTEMS FOR STRUCTURAL DESIGN AND RETROFIT*. the Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (MCEER, University at Buffalo, EU.
- Dogliani F., Moretti A., and Petrini V. (1994). *Le chiese e il terremoto*. Gruppo Nazionale per la difesa dai terremoti, Trieste, Italia.
- EECCP. (2006a). “Guidelines for the conservation of historical masonry structures in seismic areas.”, EECCP-EU-India Economic Cross Cultural Program.
- EECCP. (2006b). “Identification of strengthening strategies.” EECCP-EU-India Economic Cross Cultural.
- ICOMOS. (2003a). “Principios para el análisis, conservación y restauración estructural del patrimonio arquitectónico.”
- ICOMOS. (2003b). “Recomendaciones para el análisis, conservación y restauración estructural del patrimonio arquitectónico.”
- Kelly J., Skinner R., and Heine A. (1972). *Mechanisms of Energy Absorption in Special Devices for Use in Earthquake Resistant Structures*. Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, 63–88.

- Lagormarsino S. (1998). "A new methodology for the post-earthquake investigation of ancient churches."
- Li C., and Reinhorn A. (1995). *Experimental & Analytical Investigation of Seismic Retrofit of Structures with Supplemental Damping: Part II - Friction Devices*. Technical Report NCEER, University at Buffalo, State University of New York, Buffalo, EU.
- Lourenço, P. (2006). "Recommendations for restoration of ancient buildings and the survival of a masonry chimney." *Construction and Building Materials*, 20, 239–251.
- Mazzonali, Federico (Ed.). (2008). "Advanced Techniques for Seismic Protection of Historical Buildings: Experimental and Numerical Approach." *American Institute of Physics*.
- Meli Roberto. (1998). *Ingeniería Estructural de los Edificios Históricos*. D.F. Mexico.
- Peña F. (2010). "Estrategias para el modelado y el análisis sísmico de estructuras históricas." *Revista de Ingeniería Sísmica, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica*, 83, 43–63.
- Peña F., and Casolo S. (2003). "Análisis dinámico de estructuras de mampostería usando un modelo de elementos rígidos: aplicación en el estudio de la seguridad sísmica de una iglesia barroca." León Guanajuato.
- Peña F., and Lourenço P. (2012). "Criterios para el refuerzo antisísmico de estructuras históricas." *Revista de Ingeniería Sísmica, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica*.
- Peña Fernando, and Mazano Julio. (2015). *Dynamical Characterization of Typical Mexican Colonial Churches, Seismic Assessment, Behavior and Retrofit of Heritage Buildings and Monuments*. Computational Methods in Applied Sciences, Springer International Publishing, Switzerland.
- Seleemah A., and Constantinou M. (1997). *Investigation of Seismic Response of Buildings with Linear and Nonlinear Fluid Viscous Dampers*. Technical Report NCEER, the Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (MCEER), University at Buffalo, State University of New York, EU.
- Skinner R., Kelly J., and Heine A. (1975). "Hysteresis Dampers for Earthquake-Resistant Structures." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 3, 287–296.
- Uang C., and Berteto V. (1998). *Use of Energy as a Design Criterion in Earthquake-Resistant Design*. Technical Report UCB/EERC-88/18, University of California, Berkeley, Berkeley, CA.

Winters Craig. (n.d.). *Seismic Upgrade and Renovation of the ASEII Building – Bucharest, Romania*. Taylor Devices, Inc., North Tonawanda, NY EU.

Winters Craig. (n.d.). “Structural performance enhancement with integral spring-damper elements.” Taylor Devices, Inc.

Zhang R., Soong T., and Mahmoodi P. (1989). “Seismic Response of Steel Frame Structures with Added Viscoelastic Dampers.” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 18, 389–396.



Acelerograma usado

A1.1 Obtención del archivo del acelerograma utilizado en el estudio.

Como se menciona en el capítulo 4, se utilizo un acelerograma el cual fue obtenido en la base de datos de los registros acelerográficos de la Red Sísmica Mexicana del Instituto de Ingeniería de la UNAM en el sitio de internet www.iingen.unam.mx. Una vez que se entra a la pagina en el menú en la parte superior se entra en la opción *Investigación*, posteriormente se escoge la opción *Proyectos*. Una vez en *Proyectos*, aquí aparecen diferentes opciones entre ellos la *Base de datos de registros acelerográficos de la red sísmica mexicana*, cuyo icono se muestra en la figura A1.1, se teclea esta opción y se entrara a una nueva página. Una vez dentro de la página, aparecerá una ventana donde se podrá registrar usando un correo electrónico, una vez registrado el correo se teclea registrar, se abrirá la página de inicio. En la página de inicio se seleccionara la opción *búsqueda por sismo* abriéndose una ventana nueva el cual nos pedirá definir datos del sismo *Fecha y Magnitud mínima*, daremos como fecha el 19 de septiembre de 1985 y magnitud mínima de 6 con el fin de que nos muestre los sismos con magnitud mayor a 6. Tecleamos el botón *Buscar*. Se mostrara una lista de sismos de la fecha definida, del cual seleccionamos el registro que corresponde a la estación La Unión en el estado de Guerrero, sobre roca.

Proyectos



**Base de Datos de Registros
Acelerográficos de la Red
Sísmica Mexicana...**

Figura A1.1 Red de registros acelerográficos del Instituto de Ingeniería de la UNAM

Archivos de entrada en SAP2000

A2.1 Generación de acelerograma y función rampa

Para generar el acelerograma; entrar al menú **Define menu > Functions > Time History** para acceder a *Define Time History Functions* una vez dentro:

- En la ventana *Choose Function Type to Add*, teclear la cortina para entrar a la lista de opciones escogiendo *Function from File*.
- Teclear el botón **Add New Function** para acceder a *Time History Function Definition* una vez dentro de esta ventana:
 - Teclear **SISMO 85** en *Function Name*.
 - Posteriormente teclear el botón **Browse** para cargar el acelerograma en la opción *Function File Pick Function Data File* una vez dentro:
 - Localizar el archivo del acelerograma descargado en la pagina mencionada en la sección A1.1
 - Una vez localizado teclear el botón **Open** para regresar a la opción *Time History Function Definition*.
 - Teclear **110** en la opción *Header Lines to Skip* con el fin de definir el numero de linear a saltar en el momento de que el programa lea el archivo.
 - Teclear **21** en la opción *Number of Points Per Line* con el fin de definir el numero de espacios a leer horizontalmente en el archivo
 - Seleccione en *Values at Equal Intervals* y teclear **.01** con el fin de definir el tamaño de cada paso durante el análisis.
- Teclear el botón **OK** para cerrar la ventana *Time History Function Definition and Define Time History Functions*.

En esta misma ventana se puede mostrar la grafica de la función como se muestra en la figura A2.1. Una vez definido se podrá usar cargar esta función al momento de definir los casos de carga.

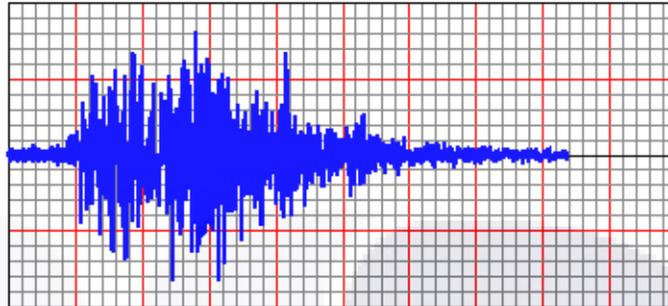


Figura A2.1 Acelerograma generado en SAP2000

Para generar la función rampa; entrar al menú **Define menu > Functions > Time History** para acceder a *Define Time History Functions* una vez dentro:

- En la ventana *Choose Function Type to Add*, teclear en la cortina para entrar a la lista de opciones escogiendo *Ramp*.
- Teclear el botón **Add New Function** para acceder a *Time History Ramp Function Definition* una vez dentro de esta ventana:
 - Teclear **Peso Propio** en *Function Name*.
 - Teclear **1** en la opción *Ramp Time* con el fin de definir la longitud de de la base de la rampa en segundos
 - Teclear **981** en la opción *Amplitud* con el fin de definir la altura de la rampa en cm/seg^2
 - Teclear **125.78** en la opción *Maximum Time* con el fin de definir la longitud de total de la función segundos

Teclear el botón **OK** para cerrar la ventana *Time History Ramp Function Definition* and *Define Time History Functions*

A2.2 Definición de caso de carga

Entrar al menú **Define menú > Load Cases** para acceder a *Define Load Case*. una vez dentro:

- Teclar botón **Add New Load Case** para acceder *Load Case Data*. Una vez dentro:
 - En la opción *Load Case Name*, teclear **ACASE3**
 - En la opción *Load Case Type*, usando la cortina, seleccionar *Time History*
 - En el área de *Analysis Type*, Seleccione la opción *linear*
 - En el área *Loads Applied*, Seleccione la función *SISMO 85* en la cortina de *Function* . Defina también en *Load name* la dirección de la función en el eje local U2, y modifique si se requiere el factor de escala en la opción *Scale Factor*. Teclee el botón **Add**.
 - Nuevamente en el área *Loads Applied*, Seleccione la función *Peso propio* en la cortina de *Function* . Defina también en *Load name* la dirección de la función en el eje local U3, y modifique si se requiere el factor de escala en la opción *Scale Factor*. Teclee el botón **Add**.
 - Teclear **12578** en la opción *Number of Output Time Steps*.
 - Teclear **.01** en la opción *Output Time Step Size*.
 - Teclear el botón **Modify/Show** para el amortiguamiento modal en *Other Parameters* el cual será mostrado en la opción *Modal Damping form* una vez adentro:
 - Teclee **.05** en la opción *Constant Damping For All Modes*.
- Teclar el botón **OK** en *Modal Damping and Load Case Data* para regresar a *Define Load Cases*.

A2.3 Propiedades mecánicas en elemento link

En el capítulo 3 se mencionaron las principales propiedades mecánicas de los disipadores energéticos, como se menciona en este capítulo los valores introducidos en SAP2000 son básicamente el coeficiente de amortiguamiento C_0 y el valor de $\alpha = 1$ y el valor $k = 0$, para disipadores lineales, que para el análisis en SAP2000 el disipador lineal actúa como un resorte y un amortiguador paralelamente como se muestra en la figura A1.2.

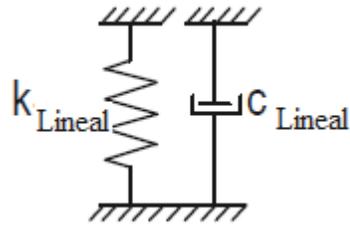


Figura A2.2 Modelo para disipador lineal

Los valores se introducen en SAP2000 de la siguiente manera:

Entrar el menu **Define** > después a **Section Properties** > **Link/Support Properties** una vez abierta la ventana *Link/Support Properties*:

- Teclar el botón **Add New Property** button para acceder a **Link/Support Property Data**. Una vez dentro :
- Seleccionar **Damper** de la cortina de opciones en *Link/Support Type*.
- Escoger **DAMP** en la cortina de opciones posteriormente darle un nombre en *Property Name*, en nuestro caso se uso *“Linear Damper”*
- Teclee **0.1751** en la opción *Mass*.
- Seleccionar **U1 Direction**.
- Teclar el botón **Modify/Show** para U1 para acceder a la ventana **Link Support Direction Properties**. Una vez dentro:
 - Teclee **0** en la opción *Stiffness*.
 - Teclee **16** en la opción *Damping Coefficient*.
 - Se usará **1** para *Damping Exponent α* ya que el análisis es lineal
 - Teclar el botón **OK** en para cerrar las ventanas **Link/Support Directional Properties**, **Link/Support Property Data**, y **Link/Support Properties**.

Una vez definidas las propiedades para el elemento Link, se podrán localizar estos en los 3 análisis que se hicieron para esta tesis.

Mecanismos de disipación energética pasivos

A.3.1 Usos de mecanismos de disipación energética pasivos en estructuras

Una de las razones por las cuales se han desarrollado mecanismos de control, disipación energética y aislamiento sísmico es que muchas de las estructuras existentes deben permanecer funcionando después de un sismo de alta magnitud, tales como hospitales, plantas de energía, estaciones de policías y bomberos entre otros. Es por esto que aplicaciones de diseño convencional ya no es viable, ya en algunos casos bien se podrían diseñar estructuras puramente elásticas de tal modo que no sufran daño alguno, sin embargo esto sería extremadamente costoso. Además de estos casos existen también un número grande de estructuras históricas las cuales carecen de suficiente resistencia lateral, además de falta de detalles para un comportamiento dúctil. El reacondicionamiento de este tipo de estructuras por medios convencionales requiere de una alta inversión además de afectaciones en los valores culturales de la edificación.

Es por esto que se ha desarrollado como una alternativa los sistemas de protección sísmica, estos sistemas pueden ser del tipo de aislamiento sísmico o mecanismos de disipación energética adicional, Durante el sismo la energía de entrada en la estructura es transformada en energía cinética y potencial (por deformación) además de la energía que es disipada por el amortiguamiento propio de la estructura, La respuesta dinámica de la estructura puede ser mejorada si se hace uso de mecanismos de control que absorben parte de la energía de entrada. Esto se puede hacer considerando la relación de energía por conservación (Uang C. and Berteto V. 1998).

$$E = E_K + E_S + E_h + E_d$$

Donde :

E es la energía de entrada

E_K es la energía cinética

E_S es la energía potencial o elástica

E_h es la energía disipada por la propia estructura

E_d es la energía disipada por el amortiguamiento de un mecanismo adicional

Los sistemas de aislamientos desarrollados instalados en la base de una estructura, incorporan mecanismos de disipación energética, tales como apoyos elastomericos de alto amortiguamiento, una combinación de placas de acero con camas elastomericas, además de mecanismos de disipación de fluido viscoso, por fricción etc. El otro sistema desarrollado consiste en sistemas de disipación energética adicional para disipar energía a través de la altura de las estructuras, estos sistemas están formados por mecanismos de fluido viscoso, de fricción, visco-elástico y por fluencia de placas de acero. Algunos mecanismos además de proveer amortiguamiento adicional, proveen también rigidez, incrementando la resistencia. La figura A3.1 muestra graficas de curvas cortante-deformación lateral, en estas curvas se puede visualizar el incremento del cortante basal versus la deformación lateral de la estructura, es decir, una estructura con un mecanismo de disipación energética puede aumentar la resistencia y rigidez de tal forma que puede desarrollar un mayor cortante basal con respecto a aquellas estructuras sin disipación energética. Los disipadores de fluido viscoso no se tomaron en cuenta para estas graficas ya que los mecanismos comparados contribuyen con rigidez y amortiguamiento, a diferencia de los de fluido viscoso solo contribuyen con amortiguamiento adicional.

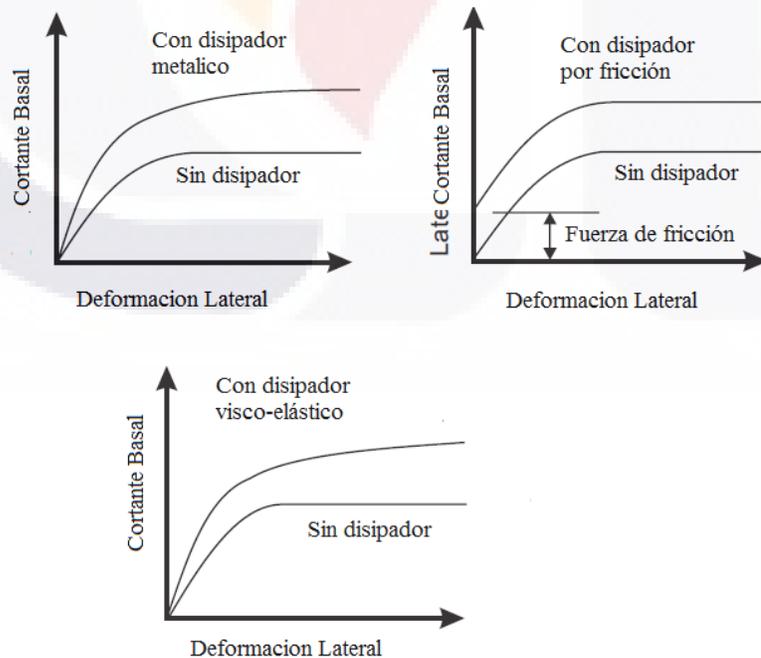


Figura A3.1 Efecto de sistemas de disipación energética en curvas de cortante-deformación lateral (Constantinou Michael et al. 1998)

A3.2 Amortiguamiento no clásico

El amortiguamiento clásico puede ser no válido para una estructura con mecanismos de disipación energética o aislamiento a la base (Chopra Anil 2010), incluso si la propia estructura tiene amortiguamiento clásico, este mismo principio se aplica para la interacción fluido-estructura y suelo-estructura.

Para evaluar la matriz de amortiguamiento no clásico de la estructura, primero se la matriz de amortiguamiento clásico C sin los mecanismos de disipación energética a partir de las fracciones de amortiguamiento adecuadas. Posteriormente se toma en cuenta el amortiguamiento de los disipadores y se ensambla directamente en C con fin de obtener la matriz completa como se muestra en la figura A3.2

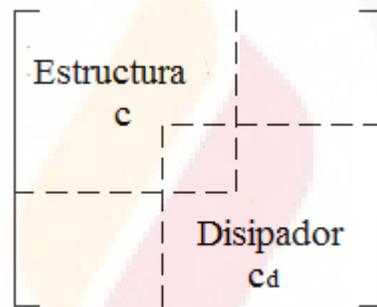


Figura A3.2 ensamblaje de la matriz de amortiguamiento de una estructura con amortiguamiento no clásico

A3.3 Mecanismos de disipación energética metálicos

En la actualidad existe una gran variedad de mecanismos de disipación energética metálicos. Se ha demostrado que las estructuras de acero y concreto pueden disipar energía por deformación plástica con una alta efectividad, sin embargo, además de esto, también existen mecanismos hechos de acero que funcionan como amortiguadores por deformación inelástica como los que se muestran en la figuras A3.3 y A3.4. Este concepto de usar mecanismos metálicos como disipadores energéticos en una estructura fue desarrollado primero por (Kelly J. et al. 1972) and (Skinner R. et al. 1975).

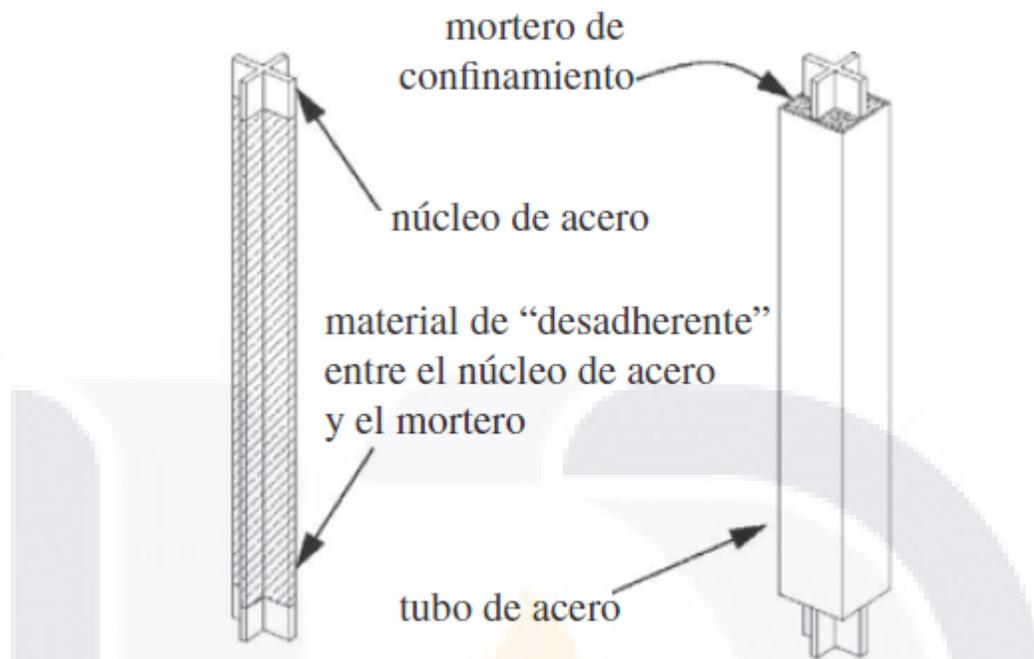


Figura A3.3 Disipador por plastificación contraviento confinado

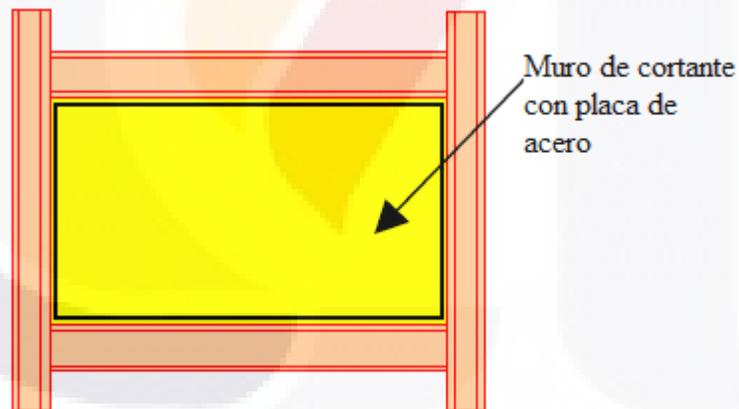


Figura A3.4 Disipador por plastificación de muro metálico

El metal usado para esta clase de mecanismos, es acero de grado estructural típico, ya sea de grado 36 o 50 ASTM, la efectividad de estos mecanismos radica en la deformación inelástica del material en función del tiempo, beneficiándose claramente de la meseta localizada en la grafica de esfuerzo-deformación después del punto de fluencia f_y como se muestra en la figura A3.5.

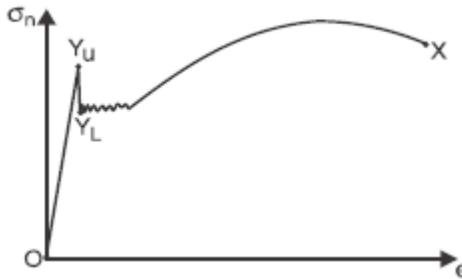


Figura A3.5 Grafica esfuerzo-deformación para el acero estructural

En la figura A3.6 se muestra la típica grafica de histéresis para mecanismos metálicos, pero bajo cargas cíclicas y un comportamiento inelástico propia del material. Las especificaciones de diseño estructural en acero cuentan con un buen número de métodos para diseñar y garantizar la eficiencia de estos mecanismos.

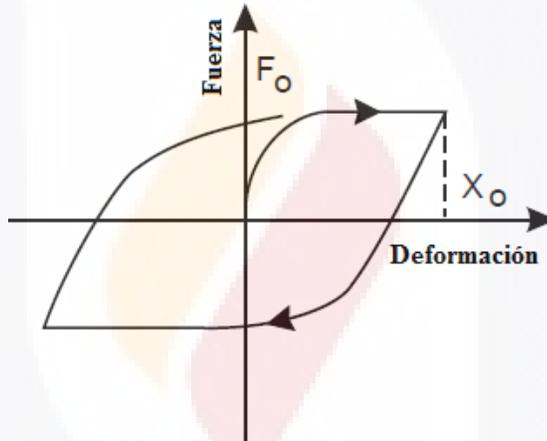


Figura A3.6 Curva de histéresis de mecanismo de disipación metálico por plastificación

A3.4 Mecanismos de disipación energética por fricción

Los mecanismos de disipación energética por fricción, disipan la mayor parte de la energía a través de la transferencia de calor reduciendo la demanda de deformación, las estructuras con estos mecanismos pueden modificar el periodo natural e incrementar la energía de disipación bajo fuertes solicitaciones, estos mecanismos se pueden utilizar en edificios de todos los materiales y en esencia estos mecanismos proveen tanto de rigidez como amortiguamiento adicional a la estructura. La figura A3.7 muestra algunos de los mecanismos de disipación energética por fricción. Existen una gran variedad de mecanismos de este tipo en el mercado hoy en día.

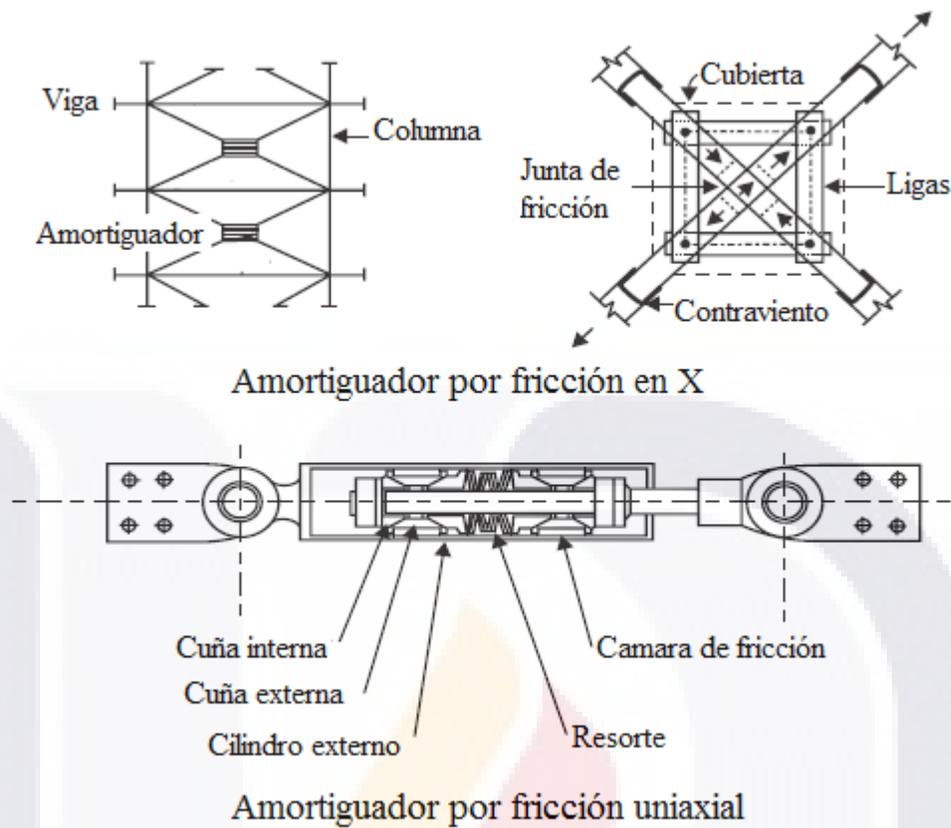


Figura A3.7 Mecanismos de disipación energética por fricción (Constantinou Michael et al. 1998)

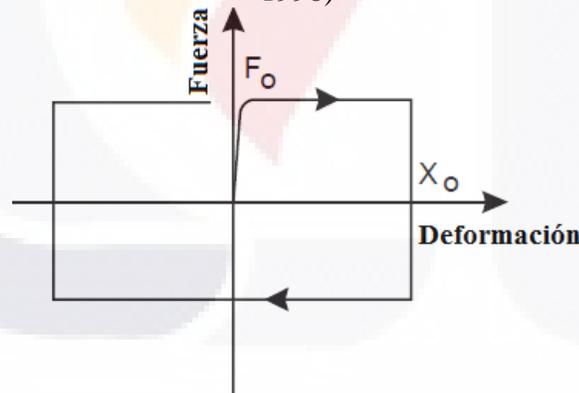


Figura A3.8 Curva de histéresis de mecanismo de disipación por fricción

Usualmente estos mecanismos muestran una curva de histéresis de forma cuadrada como se muestran en la figura A3.8 típica de la fricción por Coulomb. Uno de los mecanismos por fricción más usados es el mecanismo Sumitomo, en la figura A3.9 se muestra un esquema con los principales componentes de este mecanismo, el cual consiste de una serie de cuñas de acero que actúan unas contra otras bajo una carga de un resorte a

compresión aplicando una fuerza normal a la cámara de fricción, la cámara de fricción esta hecha a base de una aleación de cobre y inserciones de grafito el cual provee una lubricación seca a la unidad, garantizando una fricción estable y reduciendo ruido durante el movimiento.

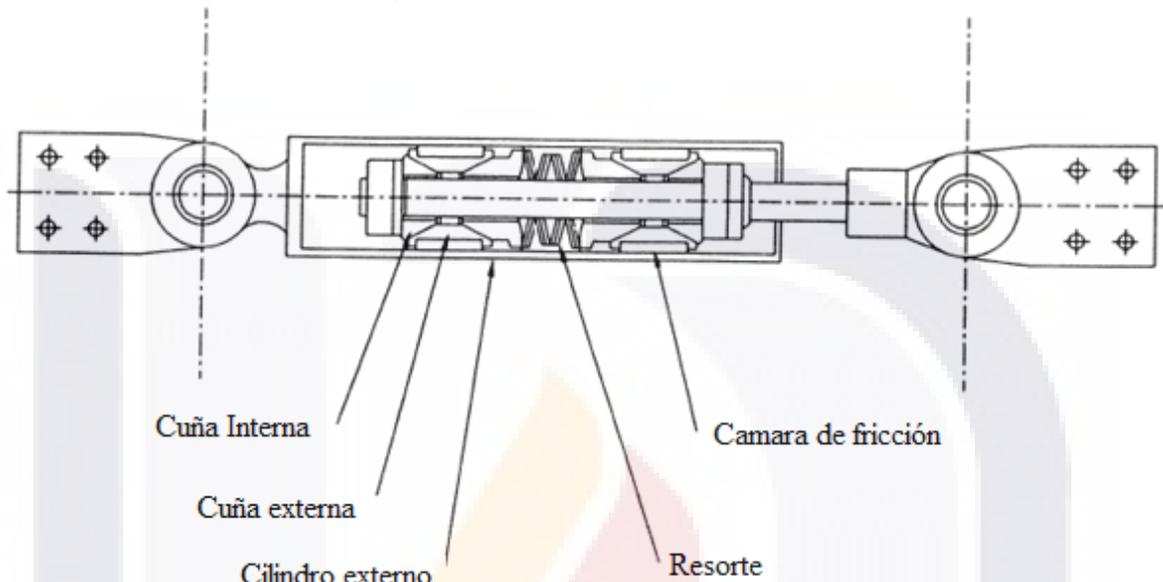


Figura A3.9 Mecanismo de disipación energética por fricción Sumitomo (Li C. and Reinhorn A. 1995)

La fuerza del amortiguador se divide en dos partes, antes y durante la fricción

$$F_D = K_D U$$

$$F_D = m_{\min} N$$

Donde:

F_D es la fuerza de amortiguamiento

K_D es la rigidez del amortiguador

U es la deformación del amortiguador (el Sumitomo la deformación del resorte)

N es la fuerza normal entre las cuñas de acero y la cámara de fricción

m_{\min} es el coeficiente de fricción para que aparezca la fuerza de fricción

En la figura A3.10 se muestra la instalación del mecanismo Sumitomo, el cual es conectado al marco a través de dos elementos estructurales en su extremo, en este caso es un elemento T rolado, y tiene una capacidad de 133.53 Kn, como se había mencionado este mecanismo transmitirá amortiguamiento y rigidez a la estructura durante la sollicitación

sísmica, en la figura A3.11 se muestra la respuesta dinámica típica elástica de este marco con o sin mecanismo de disipación energética mostrando su eficacia para reducir las deformaciones laterales.

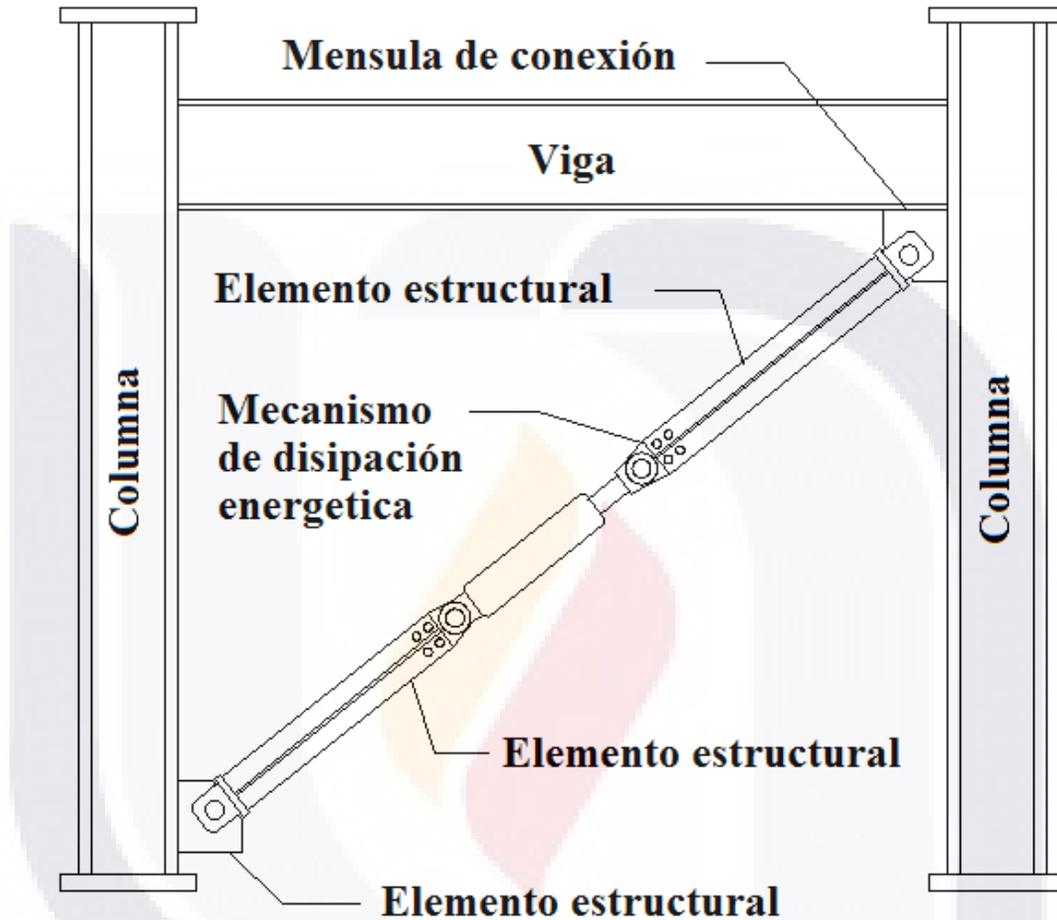


Figura A3.10 Instalación de un mecanismo de disipación energética por fricción.

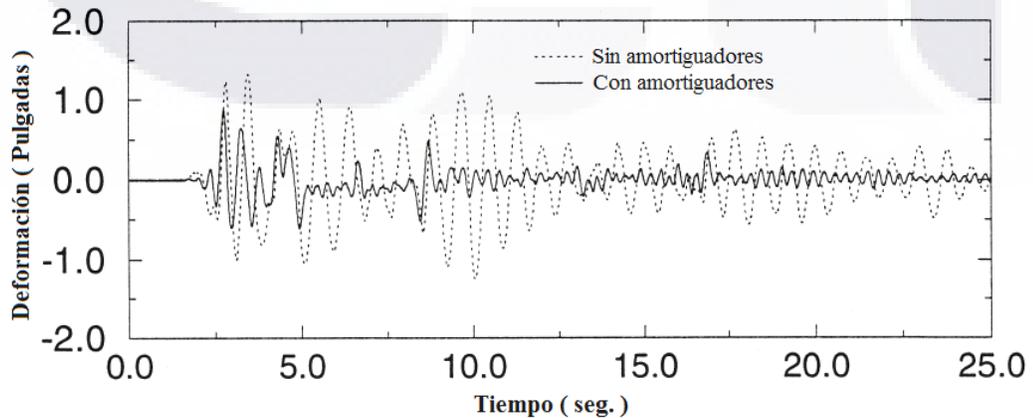


Figura A3.11 Respuesta bajo una sollicitación sísmica (Li C. and Reinhorn A. 1995)

Existen mecanismos de fricción elastomericos, es decir es una mezcla de fricción y fluido viscoso, es por esto que las curvas de histéresis de estos mecanismos son diferentes a los de fricción simple, y dado que son una combinación de un sistema visco-elástico y fricción por Coulomb la forma de la grafica de histéresis tiene la forma de pétalos de flor como se muestra en la figura A3.12.

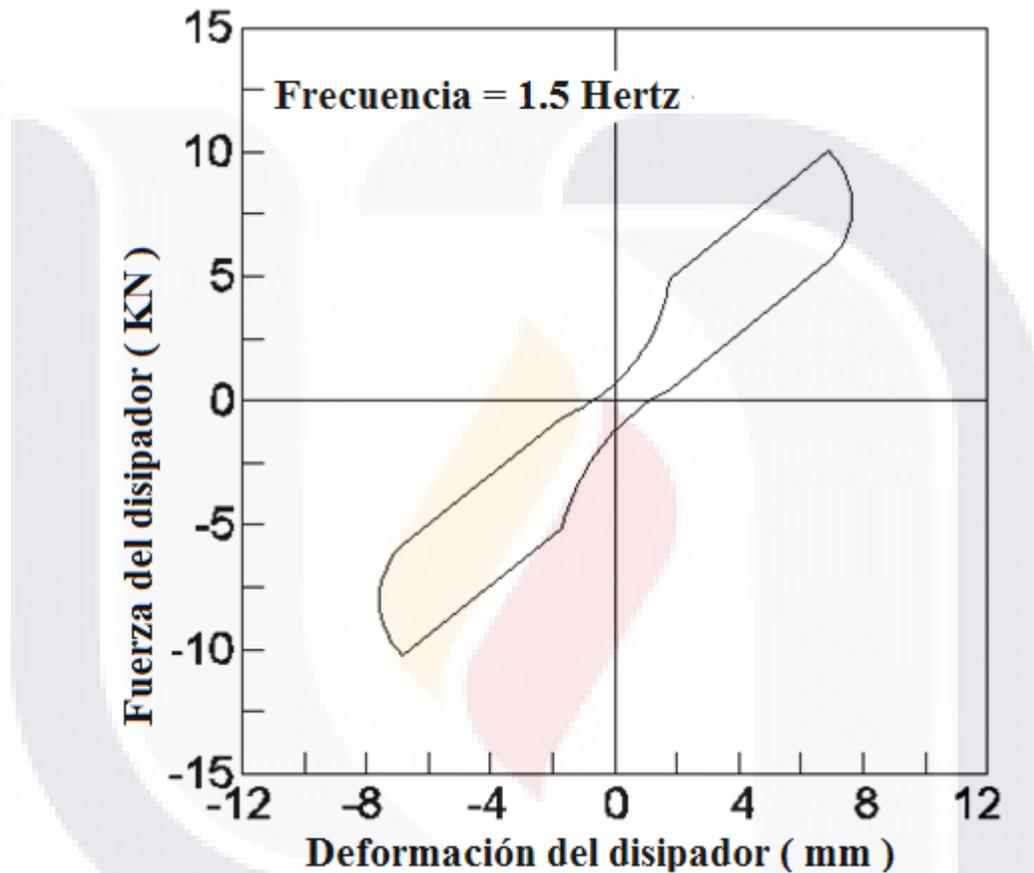


Figura A3.12 Grafica de histéresis para un sistema con disipación por fricción

A3.5 Mecanismos de disipación energética visco-elástico sólido

Este mecanismos de disipación energética como algunos otros mecanismos fue desarrollado principalmente para reducir las vibraciones en una estructura inducidas por el viento, posteriormente se desarrollaron investigaciones para su aplicación en la reducción de la respuesta sísmica en edificios. Usualmente existen dos tipos de mecanismos, el de fluido visco-elástico y el sólido visco-elástico como el mostrado en la figura A2.13. Este sistema exhibe tanto rigidez y amortiguamiento, esto se refleja en la curva de histéresis como se muestra en la figura A3.14.

Los materiales visco-elásticos sólidos como el mostrado en la figura A3.13 están compuestos principalmente con copolímeros o sustancias vítreas que disipan energía cuando están sujetas a una deformación por cortante. El mecanismo mostrado en la figura A3.13 consiste básicamente de capas de material visco-elástico confinadas por placas de acero, este sistema queda conectado en sus extremos por dos elementos estructurales, los cuales causaran una deformación por cortante en el material visco-elástico a través de la deformación relativa entre los patines de acero y la placa central.

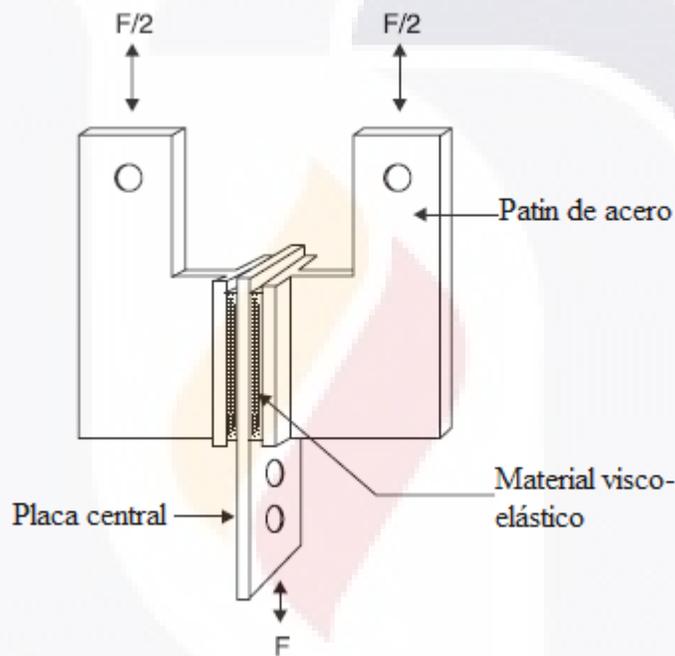


Figura A3.13 Configuración de un mecanismo de disipación energética visco-elástico

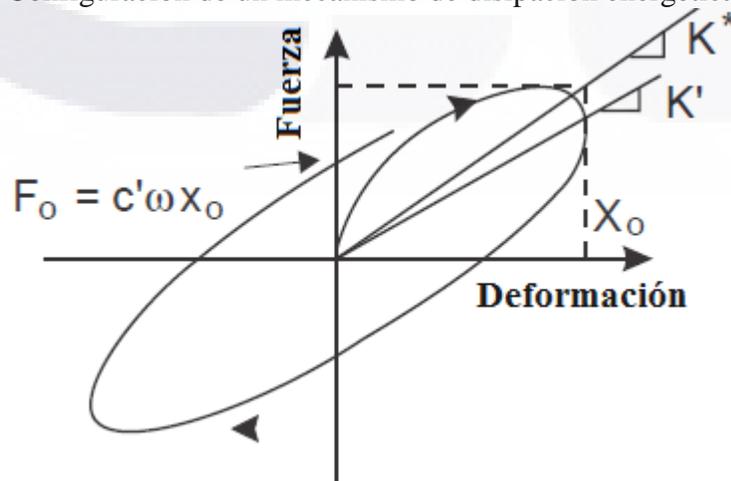


Figura A3.14 Curva de histéresis de mecanismo de disipación por visco-elástica sólido

En la figura A3.15 se muestra una conexión típica de este mecanismo a un marco de acero, en la parte central del elemento estructural se puede visualizar la instalación de este mecanismo. La respuesta de este material visco-elástico depende de la frecuencia de vibración, del nivel de deformación, y de la temperatura ambiente. La relación del esfuerzo cortante $\tau(t)$ en función de la frecuencia ω y la deformación por cortante $\gamma(t)$ puede ser expresada como (Zhang R. et al. 1989)

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

Donde:

$G'(\omega)$ es el cortante acumulado

$G''(\omega)$ es el modulo de perdida

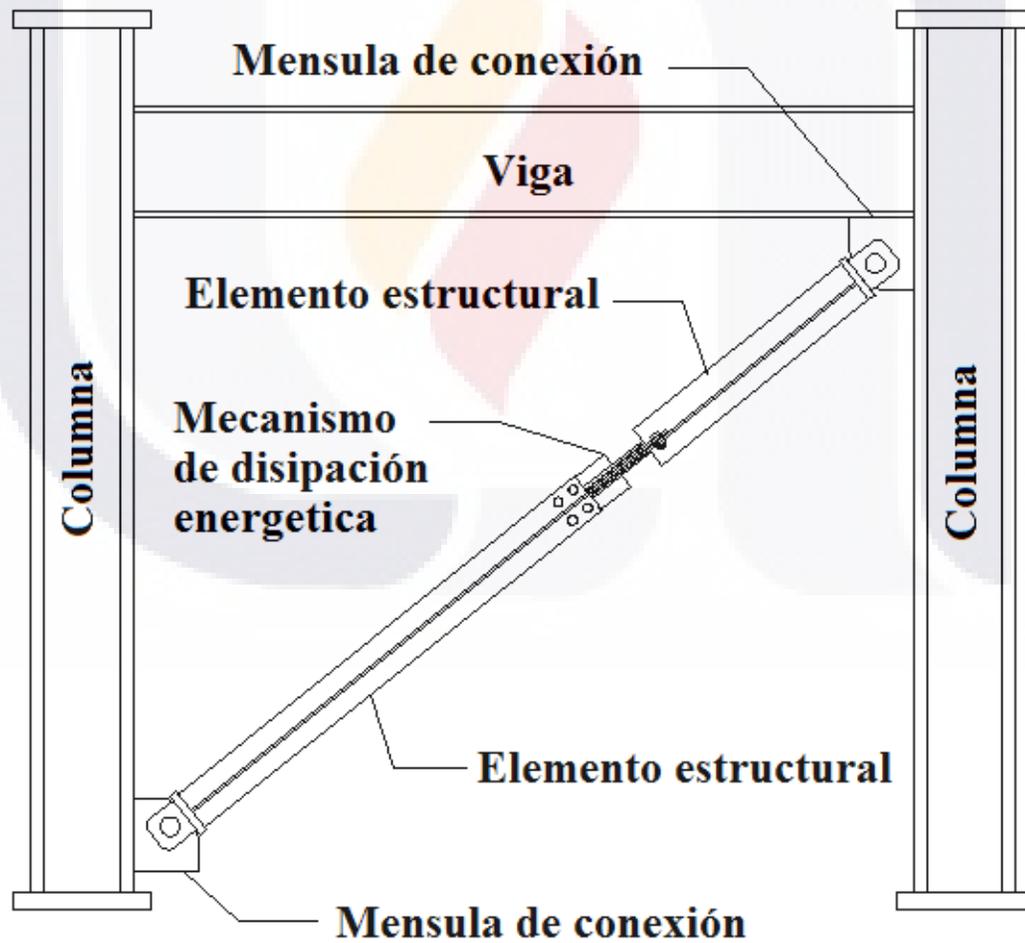


Figura A3.15 Instalación de un mecanismo de disipación energética visco-elástico.

Para los efectos de la temperatura ambiente se sugiere revisar la referencia “(Constantinou Michael et al. 1998) para mayor información.

Por último la relación fuerza-desplazamiento obtenida para una respuesta bajo una excitación armónica, con un área de cortante A y espesor δ es la siguiente:

$$F(t) = k'(\omega)x(t) + c'(\omega)\dot{x}(t)$$

$$k' = \frac{AG'(\omega)}{\delta} \quad \text{y} \quad c' = \frac{AG''(\omega)}{\omega\delta}$$

Los valores de k' y c' se reflejan también en la curva de histéresis mostrada en la figura A3.14, como bien se ha dicho tanto k' , c' , G' y G'' están en función de la frecuencia de vibración.

A3.6 Mecanismos de disipación energética de fluido viscoso

Los mecanismos de fluido viscoso operan bajo el principio de flujo viscoso a través de orificios. Recientemente se han desarrollado aplicaciones para edificios y puentes absorbiendo energía sísmica o de viento a través de la altura de una estructura.

En la figura A3.16 se muestran algunas de las características de los mecanismos de disipación energética, el principio es muy parecido en ambos mecanismos. El muro de fluido viscoso está compuesto de una placa conectada al piso superior, esta se desplaza con respecto al piso inferior con el cual está conectado contenedor del fluido viscoso, estos sistemas han demostrado un excelente comportamiento bajo solicitaciones sísmicas, sin embargo su colocación en edificios es bastante complicada. Por otro lado está el amortiguador de fluido viscoso, el cual consta de un pistón con una cabeza de bronce con orificios, el cilindro está lleno de aceite de silicón compresible el cual fluye a través de los orificios de la cabeza del pistón, también se muestra un acumulador el cual es raro en los mecanismos de gran tamaño.

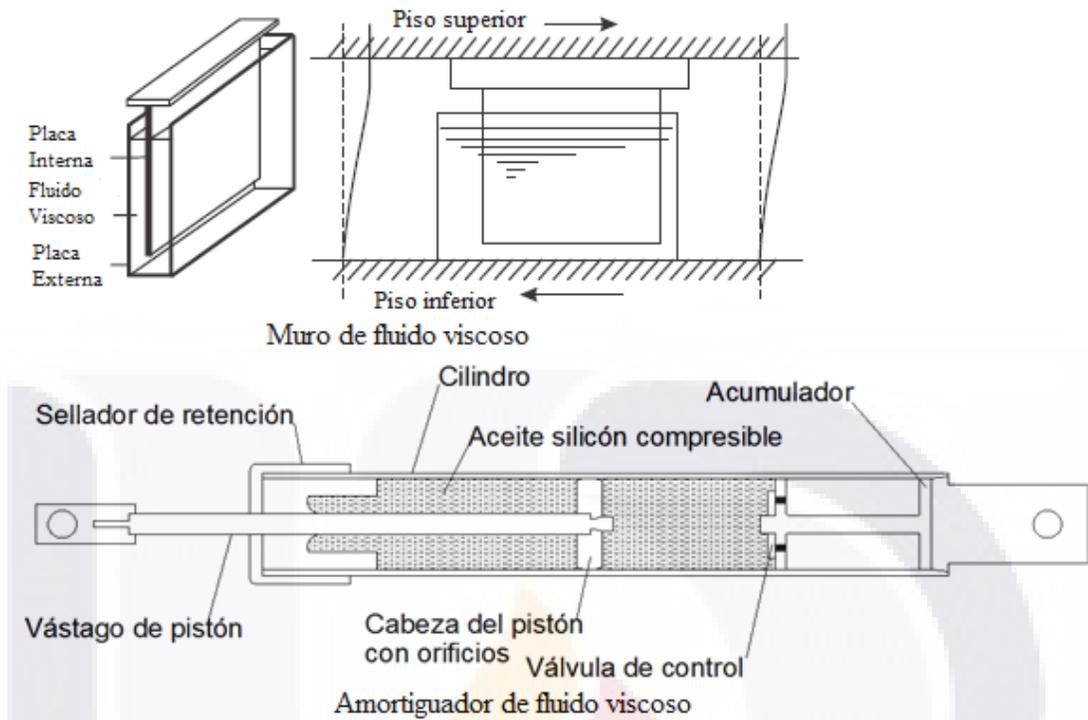


Figura A3.16 Características de dos mecanismos de disipación energética, a) muro de fluido viscoso b) amortiguador de fluido viscoso (Constantinou Michael et al. 1998)

La fuerza resulta de la diferencia de presión a través de la cabeza del pistón. Según la figura A3.16 el fluido corre de izquierda a derecha, creando la diferencia de presión entre las dos cámaras. Sin embargo el fluido también es compresible lo cual puede crear rigidez al deformarse el fluido, esto se puede evitar haciendo uso de un acumulador, principalmente para bajas frecuencias el acumulador apropiadamente para prevenir la deformación por compresión del fluido.

La fuerza desarrollada por los mecanismos de fluido viscoso lineal se representa por la siguiente ecuación:

$$p = C_o[\dot{u}]^\alpha \text{ sig } \dot{u}$$

Donde:

p es la carga axial

C_o es el coeficiente de amortiguamiento

ū es la velocidad aplicada al disipador

α es un coeficiente que va de 0.3 a 2, para disipadores lineales el valor de α = 1, para disipadores no lineales el valor de α = 0.5

Para las propiedades mecánicas de los disipadores, en principio las curvas de histéresis para el mecanismo se muestra como una elipse horizontal como la mostrada en la figura A3.17 ya que como se ha mencionado este sistema provee solo de amortiguación, sin embargo las curvas de histéresis de la estructura junto con los mecanismos de disipación viscosos es como la mostrada en la figura A3.18 ya que la estructura contribuye con la rigidez y por tanto le da la pendiente a la curva de histéresis.

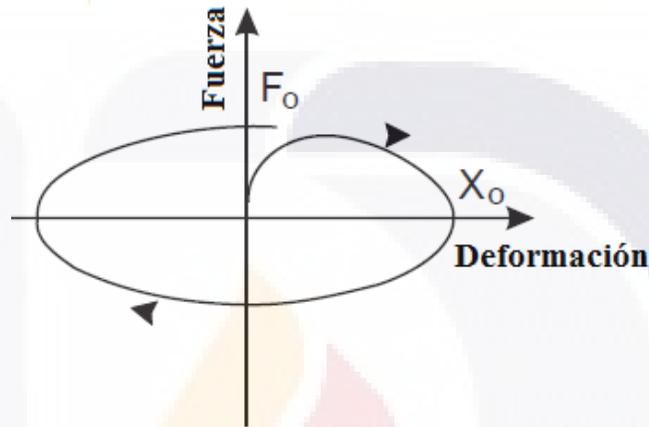


Figura A3.17 Curva de histéresis de mecanismo de disipación de fluido viscoso (Constantinou Michael et al. 1998)

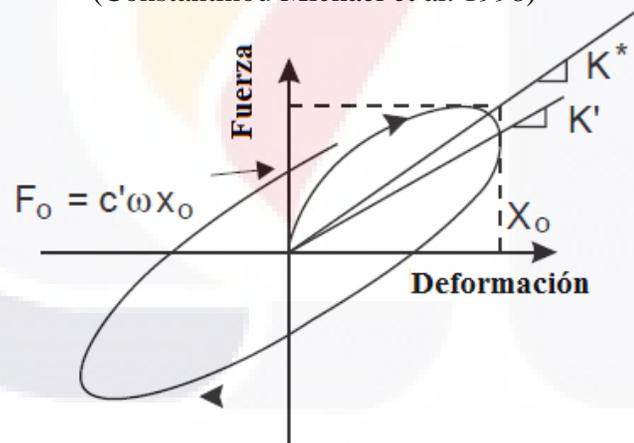


Figura A3.18 Curva de histéresis de mecanismo de disipación de fluido viscoso junto a la estructura que contribuye con la rigidez (Constantinou Michael et al. 1998)
Si el amortiguador esta sujeto a una excitación armónica, el desplazamiento es:

$$u = u_0 \sin(\Omega t)$$

Donde:

- u_0 es la amplitud del movimiento
- Ω es la frecuencia del movimiento
- t es el tiempo

Bajo una condición permanente la fuerza armónica será

$$F = F_0 \sin (\Omega t + \phi)$$

Donde:

F_0 es la amplitud de la fuerza

ϕ es el ángulo de fase

La fuerza del amortiguador es igual a

$$F_d = C u_0 \Omega \cos \Omega t$$

Por último la fuerza del disipador incluyendo la rigidez proporcionada por la estructura

$$F_d(t) = K u(t) + C \dot{u}(t) \quad \text{El modelo también es conocido modelo Kelvin}$$

En la figura A3.19 se refleja este modelo,

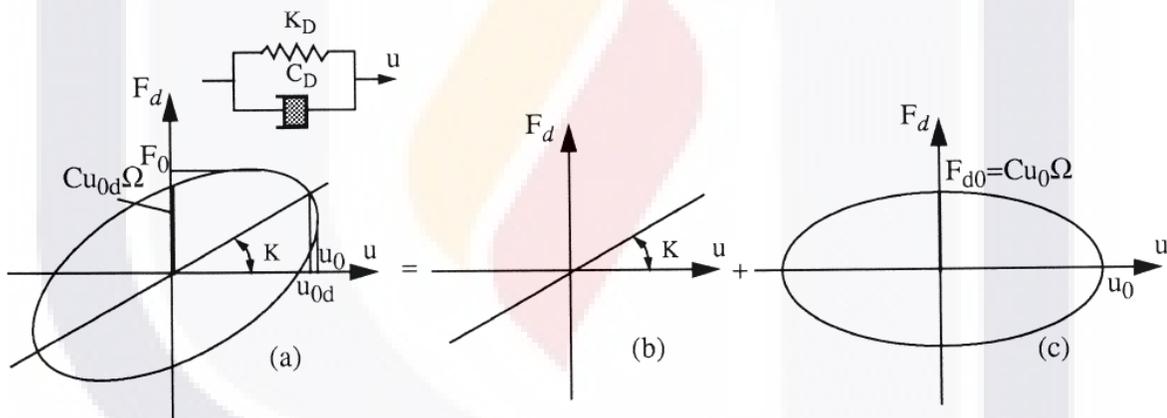


Figura A3.19 Curvas de histéresis a) Incluyendo los componentes de amortiguamiento y rigidez, b) rigidez de la estructura c) amortiguamiento del disipador (Seleemah A. and Constantinou M. 1997)

En la figura A3.20 y A3.21 se muestran dos configuraciones típicas de un mecanismo de disipación energética en un marco rígido de un edificio, la primera una configuración simple con coeficiente de amplificación para la fuerza axial igual a $f = \cos \theta$. y la segunda una configuración en chevron con un coeficiente de amplificación para su fuerza axial $f = 1$.

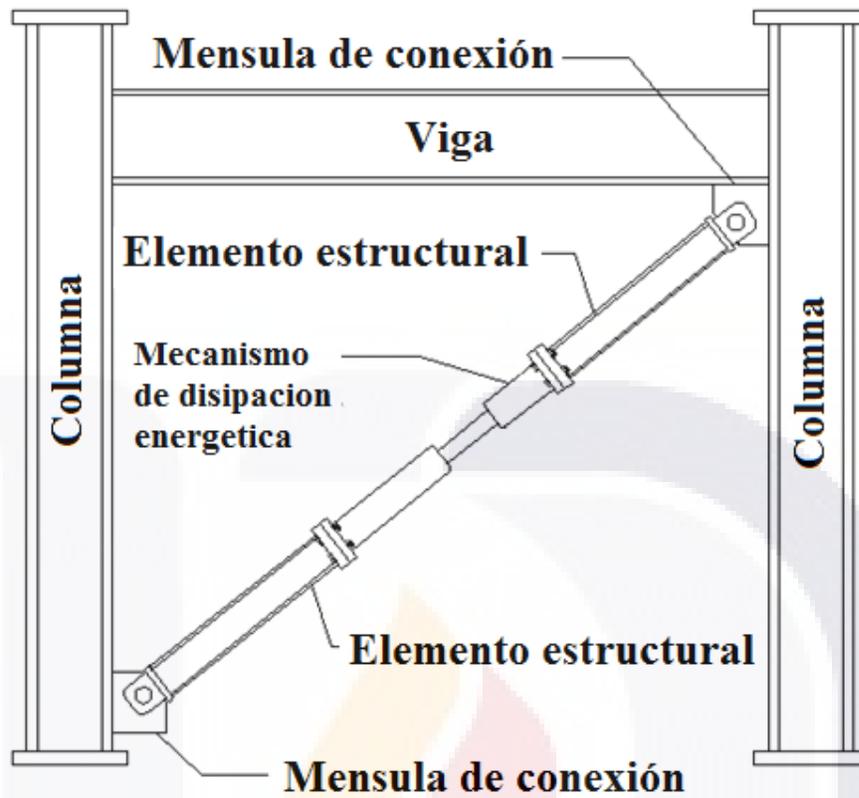


Figura A3.20 Configuración de un disipador simple

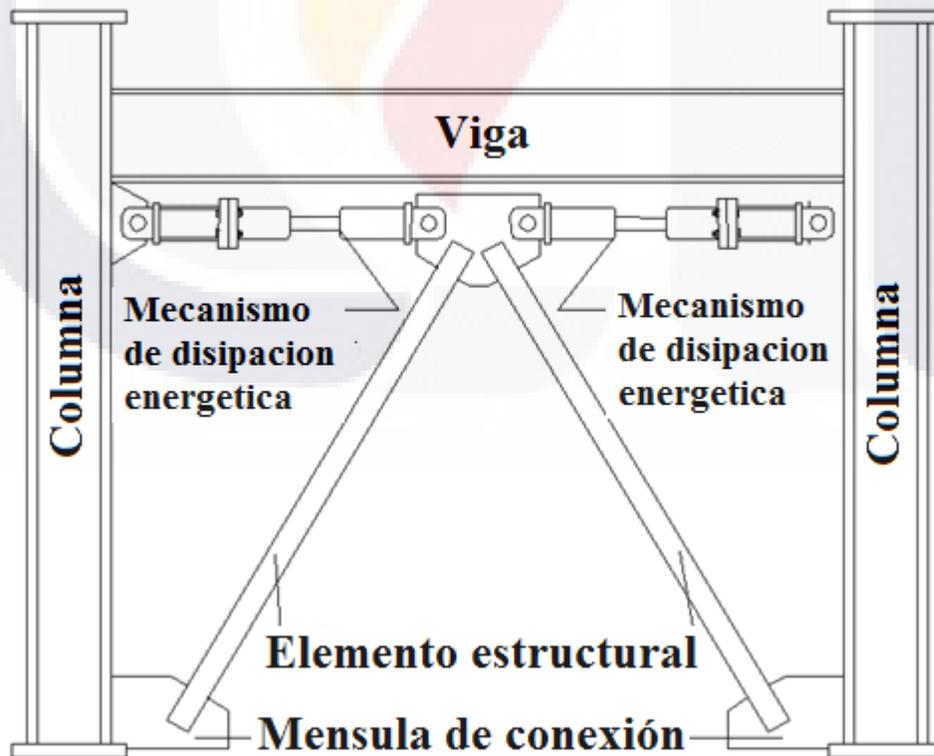


Figura A3.21 Configuración de un disipador en chevron

En la figura A3.22 se muestran las graficas de la energía disipada de una misma estructura sin y con mecanismos de disipación energética de fluido viscoso en una historia de tiempo, como se muestra en la primera grafica sin disipador, la energía disipada en función del tiempo es menor que la energía disipada con disipador. Esto se debe principalmente a que la contribución del mecanismo de disipación en la energía disipada es bastante grande, además que el mecanismo de disipación reduce también la energía disipada por histéresis debido a deformaciones inelásticas y la energía viscosa por el amortiguamiento propio de la estructura, en pocas palabras la contribución del mecanismo de disipación energética reducirá la contribución de la energía disipada por histéresis y viscosidad (amortiguamiento clásico).

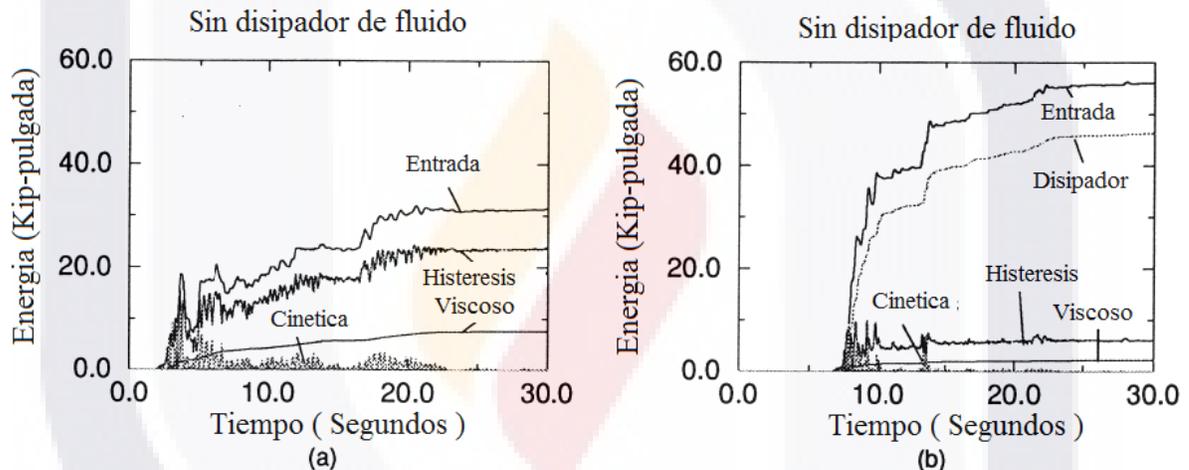


Figura A3.22 Graficas de energía disipada de una estructura, a) sin mecanismo de disipación energética b) con mecanismo de disipación energética (Seleemah A. and Constantinou M. 1997)

Dinámica estructural de edificios religiosos coloniales del centro y sur de México

A.4.1 Peligro sísmico en México

El riesgo sísmico en México se presenta principalmente en 3 zonas, estas zonas se localizan en el noroeste del país, pacifico oeste y pacifico sur referidas a tres mecanismos tectónicos diferentes correspondientes para cada zona, en la figura A4.1 se muestra un mapa del riesgo sísmico.

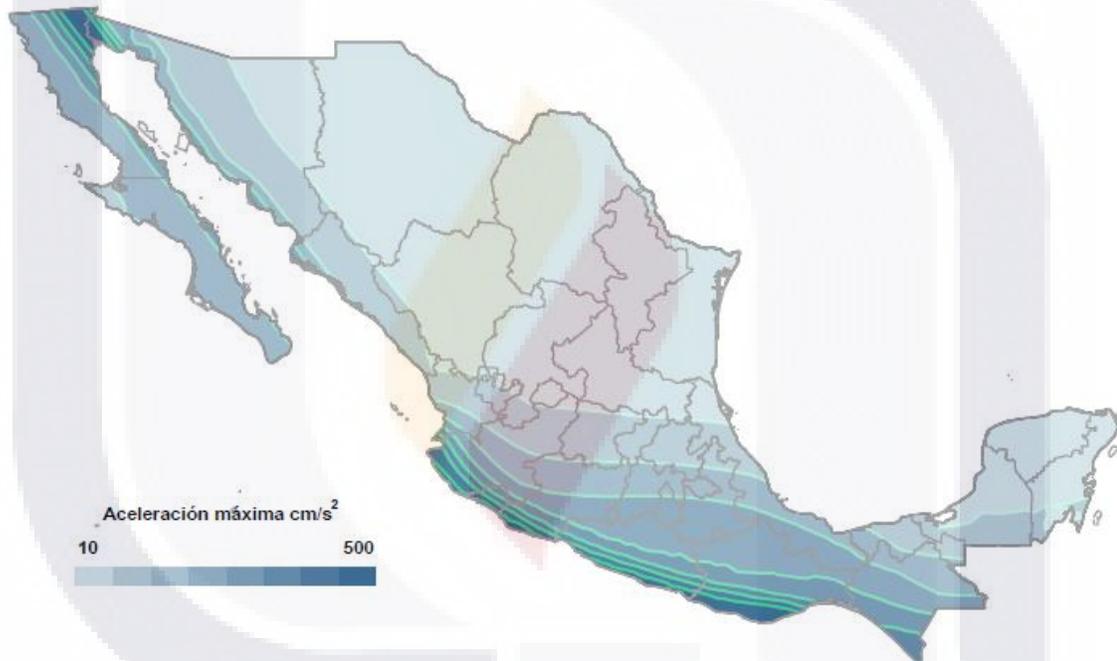


Figura A4.1 Máximas aceleraciones en roca para un periodo de retorno menor a 6500 años (COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD 2008)

En zonas de altos riesgos se localizan un sinnúmero de iglesias de tipo colonial construidas principalmente a base de mampostería de piedra y ladrillo. La mayoría de las iglesias coloniales afectadas se localizan principalmente en los estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Puebla, Guerrero, Oaxaca y Chiapas. Cada año se registran daños en las iglesias coloniales en estos estados, y es por esto que existe una imperiosa necesidad para proteger estos monumentos históricos, ya estos que son el principal icono cultural de muchas de las ciudades del país.

A3.2 Estructuración de edificios religiosos coloniales en zonas de alta sismicidad

Las estructuras usadas en las iglesias coloniales han mostrado su eficacia a través de los años, principalmente para las cargas de gravedad para las cuales fueron diseñadas, en la figura A4.2 se muestran algunos de los elementos estructurales principales en iglesias coloniales (Chavez M. 2010).

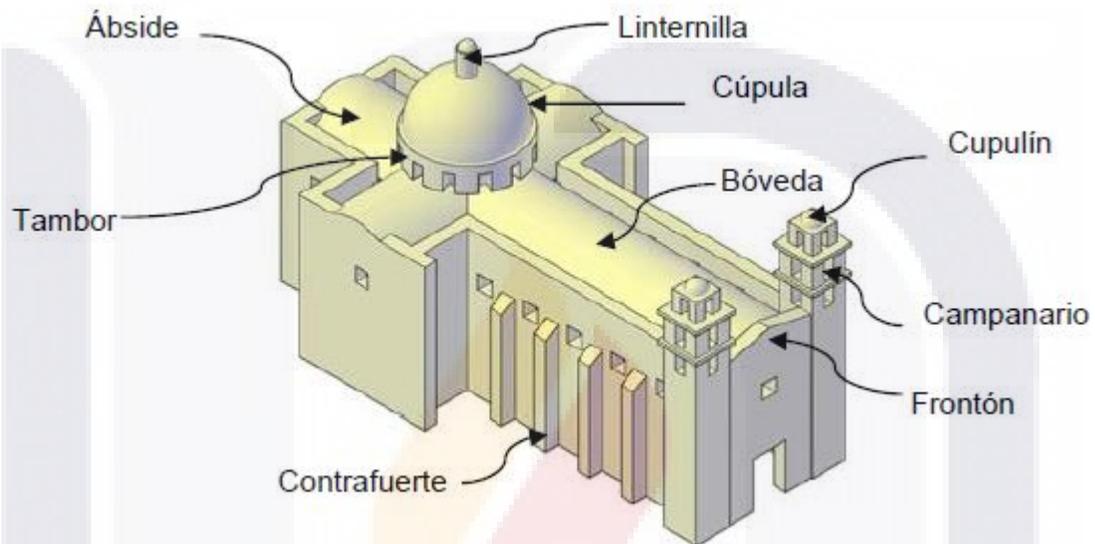


Figura A4.2 Elementos estructurales típicos de iglesia colonial en una zona sísmica (Chavez M. 2010)

Muros: Los muros son junto con las bóvedas el principal elemento estructural de una iglesia colonial, estos, están diseñados para cargas puramente de gravedad, los muros en zonas sísmicas llegan a tener espesores de hasta 2 metros.

Frontón o fachada: Es la parte frontal del templo, y soporta también al igual que los muros laterales la bóveda o cúpula. Los frontones suelen ser un elemento de rigidez lateral.

Torres de campanario: Como su nombre lo dice, son las torres que soportan los campanarios en la parte superior, usualmente en los templos coloniales es común ver una o dos torres, en algunos la torres del campanario es parte de la fachada. Las torres es la parte más flexible del edificio y controlan el periodo fundamental de la estructura.

Bóveda y cúpula: Son los principales elementos de techo en los templos coloniales, las bóvedas usualmente están hechas a base arcos de mampostería, dichos arcos tienen un espesor de hasta 50 cms, el material más común para elementos es el ladrillo.

Tambores: Es un elemento que soporta a la cúpula, y sirve como transición entre la cúpula y la bóveda o la cúpula y los muros verticales. Esta transición es necesaria ya que ayudan a reducir las tensiones desarrolladas en las bases de las cúpulas.

Contrafuerte: En zonas de alta sismicidad es común encontrar iglesias con contrafuertes, estos elementos ayudan a rigidizar lateralmente los muros, que a pesar de tener un gran espesor algunas veces son bastante esbeltos cuando estos son muy altos.

En las zonas de alta sismicidad existen dos configuraciones arquitectónicas típicas para iglesias coloniales, la primera es una nave rectangular de baja altura con una cúpula en el fondo, la segunda es la típica iglesia de cruz latina con una cúpula al centro de la cruz. Una de los elementos comunes en iglesias de las zonas de alta sismicidad es que cuenta con contraventeos en los muros laterales como se muestra en la figura A4.3.



Figura A4.3 Típica iglesia en zona de alta sismicidad del pacifico sur (Castellanos Hugo 2004)

A3.3 Materiales usados en edificios religiosos coloniales

Las principales iglesias coloniales fueron construidas principalmente de mampostería a base de piedra, adobe y ladrillo encontradas en la región, la mampostería no es un material totalmente homogéneo, ya que los bloques están unidos a través de morteros, morteros que en la época colonial (desde el siglo XVII a principio del siglo XIX) estaban hechos principalmente a base de cal, se puede decir desde el punto de vista de la mecánica de materiales que la mampostería tiene un comportamiento anisótropo. En la figura A4.4 se muestran los arreglos de la mampostería que se clasifica principalmente en 4 formas, la regular está compuesta por bloques cortados a la medida, lo cual era difícil de hacer usando piedra principalmente, este arreglo estaba hecho principalmente de ladrillo. El segundo es el irregular, quizá uno de los más comunes en la época colonial mexicana, ya que muchas veces era difícil darles un arreglo arquitectónico por falta de recursos y artesanos calificados. El segundo arreglo es un arreglo de tipo regular exterior e irregular interior, este tipo de arreglo se usaba mas en detalles arquitectónicos como las entradas y ventanas. Y por último el arreglo con piedras de amarre, era muy común en columnas. La selección de los diferentes arreglos de mampostería típica en la época colonial estaba basada en los aspectos arquitectónicos y los recursos disponibles, la mecánica de los materiales tenía muy poca influencia en la selección de los arreglos ya que conocía muy poco sobre la resistencia de estos.

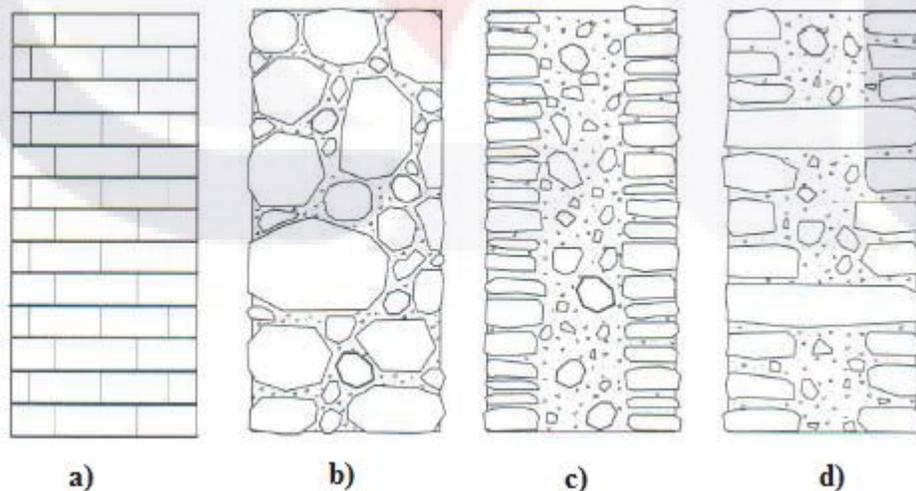


Figura A4.4 Arreglos de mampostería a) regular, b) irregular, c) con parámetro regular exterior e irregular interior, d) con piedras de amarre (Meli Roberto 1998)

A3.4 Dinámica estructural de los edificios religiosos coloniales mexicanos

En la historia de México desde el siglo XIV, muchas de las iglesias coloniales que han sobrevivido hasta hoy en día han sufrido daños importantes, quizá el caso más conocido es la catedral de Guadalajara, el cual fue dañado por varios sismos en su historia, en la figura A4.5 y A4.6 se muestran dos grabados diferentes de la catedral antes y después de 1849, en este año ocurrió un movimiento sísmico en el cual colapsaron las torres del campanario y la cúpula.



Figura A4.5 Catedral de Guadalajara antes de 1949



Figura A4.6 Catedral de Guadalajara después de 1849

Uno de los principales problemas de las edificaciones religiosas coloniales bajo cargas laterales, es cuando sus elementos estructurales desarrollan esfuerzos a tensión y cortante, ya que los materiales usados son generalmente débiles a diferencia de su resistencia a compresión, el principal mecanismo de falla en estas estructuras son las grietas. Si bien el agrietamiento puede ayudar a disipar la energía sísmica en la edificación, sin embargo el principal problema de acuerdo a los patrones de daños en las edificaciones religiosas patrimoniales es que carecen de redundancia lo cual aumenta su vulnerabilidad al colapso.

Una de las características típicas de la dinámica de estas edificaciones es que los diferentes elementos estructurales no responden de manera uniforme, debido a la complejidad arquitectónica y la falta de uniformidad en las uniones de los principales elementos estructurales, por ejemplo, usualmente las torres de los campanarios, responden de manera diferente al resto de la nave, teniendo muchas veces un periodo de vibración demasiado alto con respecto al resto de la estructura. La fachada y los muros laterales responden en el sentido perpendicular a su plano, donde su conexión es débil, provocando agrietamiento en la conexión y en los riñones de la bóveda. La experiencia ha demostrado que los elementos estructurales más expuestos al colapso son precisamente la bóveda y las cúpulas, precisamente debido a los esfuerzos a tensión desarrollados durante la sollicitación sísmica. Algunos investigadores como (Doglioni F. et al. 1994); (Lagormarsino S. 1998), sugieren analizar dinámicamente estas estructuras separando los principales elementos, tales como las torres del campanario, los muros y nave, ábsides, fachadas, y manejandolos como macro elementos, esto con el fin de simplificar los análisis y debido a las grandes diferencias que a veces existen en sus características dinámicas como modos y periodos de vibración

A3.5 Daños estructurales de edificios religiosos coloniales bajo cargas sísmicas

Como se ha mencionado a principios de esta tesis, México es un país una riqueza edilicia de la época colonial muy grande, y los templos coloniales son parte de esta riqueza, desgraciadamente casi la mitad de estas edificaciones están expuestas al riesgo sísmico y su vulnerabilidad es muy alta. Cada año podemos escuchar en las noticias daños causados en los templos coloniales en diferentes poblaciones principalmente en el pacifico sur y occidente del país, dado la baja resistencia de sus materiales y la carencia de ductilidad las hace

vulnerables a daños y colapsos en la figura A4.7 se muestran los principales daños observados a través de la historia en las edificaciones religiosas coloniales en nuestro país.

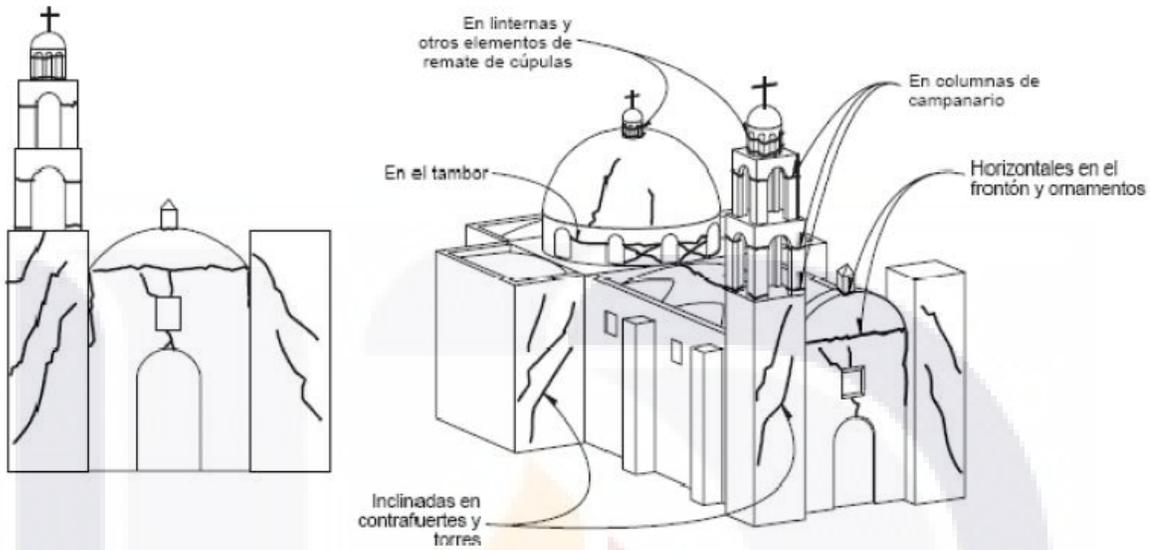


Figura A4.7 Patrón de agrietamiento típico de una iglesia colonial debido a fuerzas sísmica (Alcocer S. et al. 1999)

En las siguiente tabla se definen los patrones de daños expuestos también en el capítulo 3

Tabla A1 Patrón de daños en templos coloniales	
Torres	Las torres para los campanarios, son los elementos más flexibles de una iglesia y normalmente representan el periodo fundamental. Las grietas que aparecen en las torres debido a una sollicitación sísmica son en diagonal en los muros de estas, estas grietas son debido a esfuerzos a corte y tensión, también en las discontinuidades debido a las aberturas en los campanarios es muy común observar grietas. Otro tipo de grietas aparecen en la unión entre la torre y la nave principal, así como grietas en los apoyos debido a altos esfuerzos a compresión por volteo de la torre
Fachada	Es un elemento bastante rígido y usualmente su modo de vibración dominante es en el sentido perpendicular a su plano, propiciando con esto que trate de separarse de la nave principal, otro modo de falla se presenta a veces por el aplastamiento ocasionado por el choque de las torres contra esta.
Muros	Los muros de soporte de la nave principal no presentan un alto daño como el resto de los elementos estructurales, los mayores daños en los muros son debido a la acción de la bóveda sobre el muro en el cual se apoya,

	presentando grieta en la parte superior donde se apoya la bóveda en el muro. Los contrafuertes rara vez presentan daños, son elementos demasiado rígidos, pero muchas de las veces, tienden a hundirse durante un sismo en su base debido a su alto peso.
Bóvedas y cúpulas	Las bóvedas son elementos que presentan fuertes daños en sismos de alta magnitud, debido principalmente a esfuerzos a tensión principalmente en los riñones de estas cerca de la conexión entre la bóveda y el muro. Las bóvedas son débiles a cargas en el plano perpendicular y el patrón de grietas es la dirección longitudinal. Las cúpulas también son elementos susceptibles a sufrir grandes daños, principalmente cerca de la base de estas, mostrando grietas en diagonal
Ábside	presenta grietas verticales en la unión con los muros longitudinales

A3.6 Métodos de análisis sísmicos

Usualmente las estructuras de mampostería histórica muestran una mayor rigidez relativa, es decir bajo esfuerzos por debajo de sus límites a tensión y cortante debido a cargas laterales muestran una deformación pequeña. Es por esto y debido a la alta vulnerabilidad de los materiales de la mampostería histórica, estos edificios tienden siempre a mostrar un comportamiento no lineal bajo sismos de alta magnitud, y se recurre a métodos no lineales para en análisis estructural de edificios de mampostería histórica, con el hecho de conocer los patrones de falla. Se sabe también que la mampostería histórica no es isotrópica, debido a las discontinuidades en las juntas donde el material tiene características diferentes en su resistencia.

Sin embargo el análisis lineal para edificios de mampostería históricos es válido para algunos casos, el de esta tesis es uno de ellos, ya que una de los objetivos de este ejercicio, es evitar los daños y agrietamientos, es decir, el objetivo es presentar resultados por debajo de los niveles de esfuerzos de falla a tensión y cortante.

Existen varios métodos usados en la actualidad para el análisis de mampostería histórica, algunos de ellos son a) Elementos finitos, b) Elementos discretos y c) Elementos rígidos, en la siguiente tabla de describen estos métodos (Peña F. 2010).

Tabla A2 Métodos de análisis para mampostería histórica	
Elementos finitos	Es método es uno de los más populares en el análisis de elementos continuos, se pueden definir en cualquier tipo de geometría, ya sea en dos o tres dimensiones. El método cuenta con varias herramientas, tales como elementos en dos y tres dimensiones, la conexión se realiza a través de nudos, el único inconveniente es que normalmente el método es esencialmente lineal, y para aplicaciones no lineales los parámetros de las propiedades mecánicas son difíciles de evaluar, en la figura A4.9 se muestra un ejemplo del elemento finito aplicado al análisis de un templo colonial
Elementos discretos	Este método es ideal para el análisis de medios discontinuos, ya que permite el movimiento relativo entre elementos, así como el cambio de geometría que se calcula de forma automática. Sin embargo, las propiedades mecánicas de las juntas entre los elementos son difíciles de evaluar; y por tanto la solución numérica es lenta debido a que considera cambios en la geometría.
Elementos Rígidos	Es un método sencillo, eficaz y rápido para el análisis dinámico no lineal, dado que son necesarios pocos elementos, aún para geometrías complejas. Sin embargo, su principal limite es que permite solamente el análisis en dos dimensiones, así como su formulación no es muy conocida. En la figura A4.8 se muestran algunos de los elementos rígidos, usados para análisis de mampostería

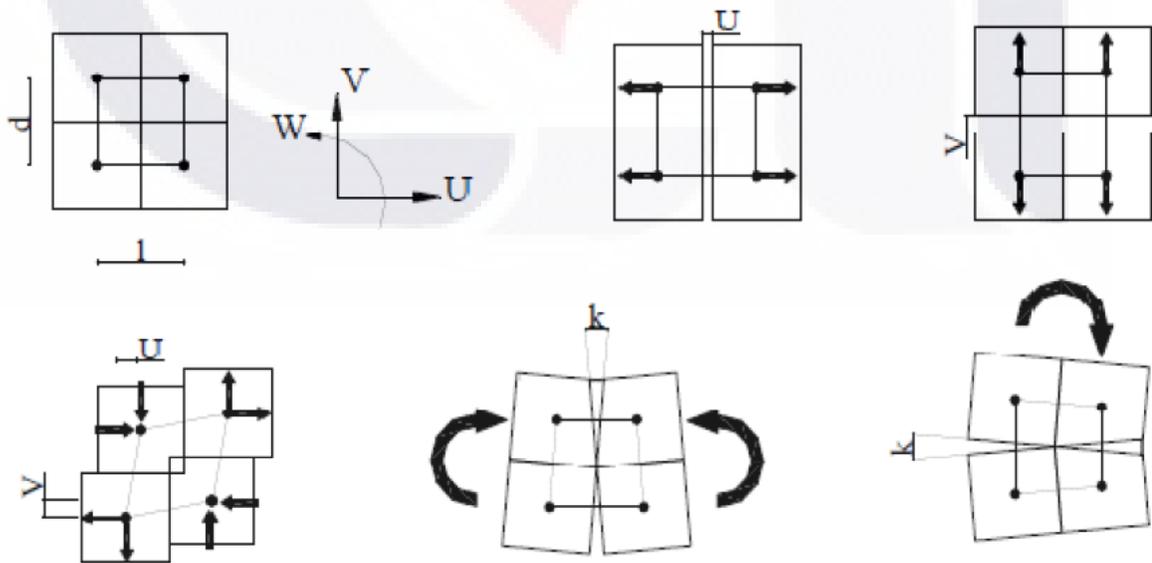


Figura A4.8 Elementos rígidos (Peña F. and Casolo S. 2003)

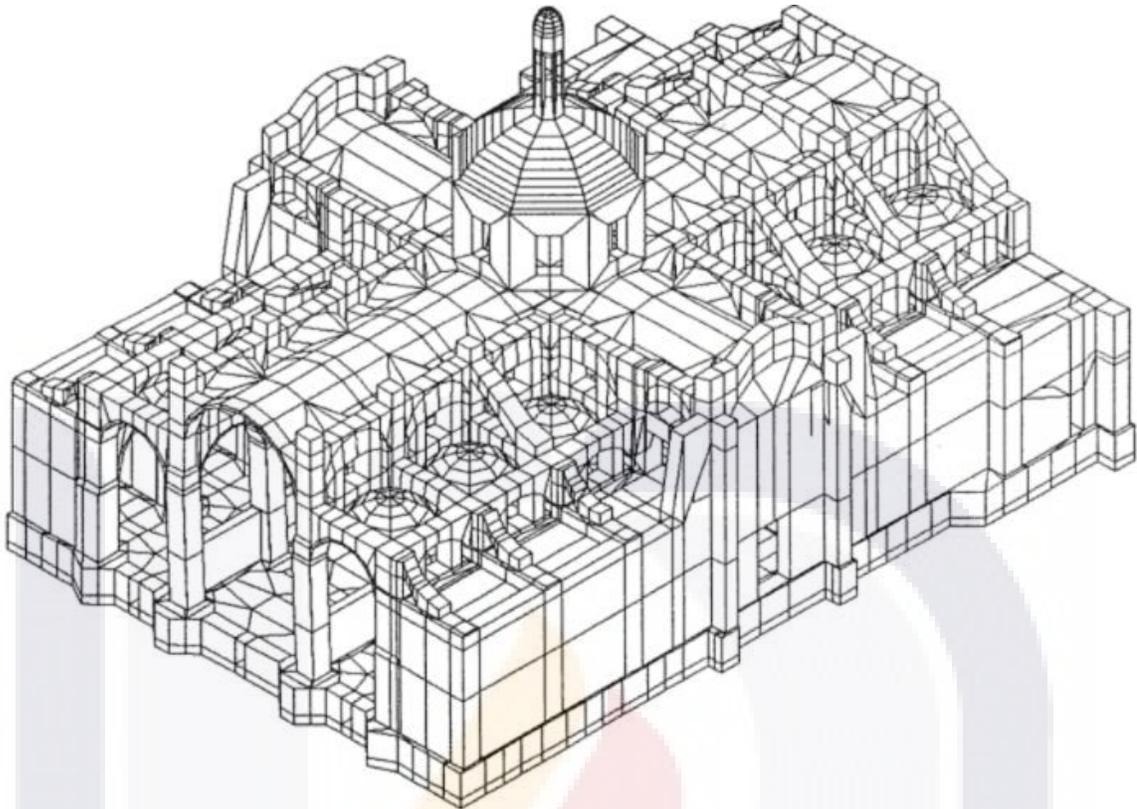


Figura A4.9 Modelo con elemento finito en un templo colonial (Peña Fernando and Manzano Julio 2015)