



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO
ESTRUCTURAL DEL EX-CONVENTO
FRANCISCANO DE TECAMACHALCO**

TESIS

Que para obtener el grado de
**MAESTRO EN INGENIERÍA
CON OPCIÓN TERMINAL EN ESTRUCTURAS**

Presenta:
ING. CARLOS RAMOS MORENO

Asesor de tesis:
Dr. en Ing. Joaquín Lozano Mercado



DIRECCIÓN
GENERAL

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA
CIUDAD UNIVERSITARIA * TELS.: (012) 229 55 00 EXT. 7610, 7617, 7618, 7619, 7623
FAX: 245 48 66
APDO. POSTAL J39 * PUEBLA, PUE., MÉXICO

Oficio No.474/05

ING. CARLOS RAMOS MORENO
Alumno de la Mtría. de Ingeniería en
Estructuras, Fac. Ingeniería, BUAP.
Presente

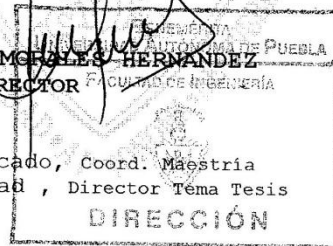
El suscrito Mtro. Ignacio Morales Hernández, Director de esta Facultad; le autoriza el tema de tesis denominado "Estudio del comportamiento Estructural del Exconvento Franciscano de Tecamachalco", así mismo se nombra Director de dicho Tema de Tesis al Mtr. Joaquín Lozano Mercado.

Sin otro particular de momento, reciban un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E
"PENSAR BIEN, PARA VIVIR MEJOR"
Heroica Puebla de Z., febrero 17 de 2005.

MTRO. IGNACIO MORALES HERNÁNDEZ
DIRECTOR FACULTAD DE INGENIERÍA

C.c.p. Mtro. Joaquín Lozano Mercado, Coord. Maestría
C.c.p. Dr. Joaquín Lozano Mercado, Director Tema Tesis
C.c.p. Archivo



GGP/sco*

M. I. Edgar I. Villagrán Arroyo

Director de la Facultad de Ingeniería, BUAP

Presente

El que suscribe, Dr. Joaquín Lozano Mercado, nombrado Director del tema de Tesis: **Estudio del comportamiento estructural del Ex-convento Franciscano de Tecamachalco**, mediante oficio No 474/05; informa a usted que después de haber revisado el contenido del documento, la metodología, así como la redacción, no tengo inconveniente en autorizar la impresión de dicha Tesis, para que el actual estudiante de la **Maestría en Ingeniería opción terminal Estructuras**, Ing. Carlos Ramos Moreno, pueda continuar su proceso de titulación.

Sin otro asunto que considerar, lo hago de su conocimiento para los efectos legales a que haya lugar.

Atentamente

Puebla, Pué. a 24 de junio de 2015



Dr. Joaquín Lozano Mercado
Asesor

c.c.p. Exámenes profesionales

c.c.p. Interesado

c.c.p. Archivo

Dedicatorias

A Dios

Por recuperar mi salud para volver a terminar este proyecto.

A mi Madre

María de Lourdes Moreno Castro

Como un homenaje en vida, a quien con amor, valor y coraje, me enseñó a vencer las adversidades de la vida y así lograr alcanzar las metas fijadas por imposibles que estas parecieran, por que se que el presente trabajo significa el resultado de toda una vida de sacrificio y entrega que no defraudare.

A mi Esposa

Arq. Irma García Torres

Por su amor, consejos, apoyo incondicional y comprensión por el tiempo que he dedicado a este proyecto y que ella ha aprendido a ser suyo.

A mis Abuelos, en memoria de:

Inocencia Castro Muñoz y Luis Moreno Garcés

Por la nobleza heredada a mi madre y por forjar en mi niñez un carácter de lucha y superación.

A mi Familia

A todos mis tíos, primos, sobrinos y principalmente en memoria de:

Prof. Alfonso Ignacio Moreno Castro y José Luis Moreno Castro

Por el respaldo moral y que siempre han sido como hermanos para mí.

*A mi hija **Diana**, aun cuando no esté a mi lado, siempre contará conmigo, deseando que este trabajo sea un ejemplo de actitud y superación en su vida.*

A Tecamachalco

Aportando un grano de arena más, para la conservación del monumento histórico más importante que aun nos queda y aun es tiempo de atenderlo y conservarlo.

Agradecimientos

Al Dr. Joaquín Lozano Mercado

Por su asesoría, apoyo incondicional, interés, consejos y atención prestada para dirigirme adecuadamente desde el inicio hasta la culminación de este trabajo.

A los Catedráticos que me formaron y en especial a: **David de León Escobedo, Edith Salgado, Eduardo Ismael Hernández, Guillermo Muñoz Cordero, Hugo O. Ferrer Toledo, Joel García Vargas, Jorge Antonio de Gante González, José Alberto Escobar Sánchez, José Guadalupe Rangel Ramírez, María de la C. Gómez Soberón, Oscar López Bátiz y Rafael Ramírez Álvarez**, por la humildad para compartir sus conocimientos.

A las autoridades que me facilitaron el acceso y estudio al "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco": Arq. J. Martín Limón Osorio y a la Delegación INAH, Puebla, al Párroco José Juan Calixto Alonso y al Comité en custodia.

Al Ing. Francisco Antonio Regalado

Por el apoyo desinteresado en la instalación y manejo del software requerido para este proyecto.

A mis compañeros y amigos de la maestría: Abel Mendoza Herrera, Ángel Hernández Caballero, Fernando y José Luis Romero Carrasco, Johny Vivar Briones, Daniel Ocotoxtle Márquez, Miguel Ángel Tlatzimatzí Flores, Rubén Aguilar Falcón y José A. Herrera Hernández.

A las instituciones que me formaron: Esc. Primaria Oficial "Miguel Hidalgo y Costilla", Esc. Secundaria Federal "Manuel Ávila Camacho", Preparatoria "Enrique Cabrera Barroso" B.U.A.P., Facultad de Ingeniería de la B.U.A.P.

"El futuro depende de la actitud de hoy"

"Con disciplina, esfuerzo, perseverancia y sobre todo voluntad, logramos alcanzar las metas y hacer que nuestros sueños se vuelvan realidad"

Carlos Ramos Moreno

CONTENIDO

Resumen	x
Abstract	x
Lista de Tablas	xi
Lista de Figuras	xii
Simbología	xviii
Abreviaturas	ixx

CAPITULO 1 INTRODUCCION

1.1	Introducción	1
1.2	Planteamiento del Problema	6
1.3	Justificación	7
1.4	Objetivo General	7
1.5	Objetivos Particulares	7
1.6	Alcances	8
1.7	Metodología	8
1.8	Estado del Arte de los edificios históricos en el mundo	11
1.8.1	¿Qué ha sucedido?	11
1.8.2	¿Qué se ha investigado?	12
1.8.3	¿Qué se está haciendo actualmente?	13
1.8.3.1	En la investigación	13
1.8.3.2	De la información técnica del Edificio	14
1.8.3.3	En cuanto a los trabajos de restauración	15
1.9	Métodos y teorías aplicadas para desarrollar este estudio	16
1.9.1	Método del Elemento Finito	16
1.9.2	Análisis Dinámico	17
1.9.3	Teoría de la Elasticidad	18
1.9.4	Coeficiente de Poisson o coeficiente de deformación transversal	19

CAPITULO II

ESTUDIO GENERAL DEL “EX-CONVENTO FRANCISCANO DE TECAMACHALCO”

2.1	Descripción histórica en fechas de construcción y restauración	20
2.2	Estudio de la geometría del Edificio y metodología de levantamiento	21
2.2.1	La medición del interior del Templo	21
2.2.2	La medición del exterior del Templo	23
2.2.3	Productos obtenidos (elaboración de planos)	24
2.2.3.1	Planta de Conjunto y colindancias del Ex-convento Franciscano de Tecamachalco	24
2.2.3.2	Dimensiones del cuerpo principal del Templo (Área de estudio)	24
2.2.3.3	Planta Arquitectónica, Azotea, Cortes y Fachada	25
2.3	Descripción arquitectónica de los elementos principales del Edificio	26
2.4	Descripción de los elementos estructurales del Edificio	37
2.5	Identificación de los materiales de construcción del edificio	46

CAPITULO III

CONSTRUCCION DEL MODELO ANALITICO

3.1	Descripción del Modelo Analítico (Modelo Representativo)	50
3.2	Herramientas de aplicación en la creación y análisis del M. A.	51
3.3	Construcción del Modelo Analítico (Modelo Representativo)	52
3.3.1	Identificación de Macroelementos	53
3.3.2	Análisis Discretizado	54
3.4	Condiciones de frontera del Modelo Analítico	56
3.5	Calibración del Modelo Analítico	57
3.5.1	Selección de puntos de estudio del Modelo Analítico	58
3.5.2	Medición de la vibración ambiental del Edificio	60
3.5.3	Procesamiento de datos de la medición de vibración ambiental	67
3.6	Propiedades mecánicas de los materiales (calibración del M. A.)	70

CAPITULO IV
ANALISIS DEL MODELO ANALITICO

4.1	Consideraciones del análisis del Modelo Analítico	72
4.2	Acelerograma utilizado en el análisis del Modelo Analítico	72
4.3	Características del sismo del 15 de junio de 1999 (Sismo de Tehuacán)	76
4.3.1	Mapa de curvas de isoaceleración del sismo de Tehuacán	76
4.3.2	Mapa de isosistas para el sismo de Tehuacán	77
4.3.3	Microzonificación sísmica para el Municipio de Tecamachalco, Pué.	78
4.3.4	Aceleraciones máximas del terreno, estimadas para el sismo del 15.06.1999, para el Municipio de Tecamachalco, Puebla	78
4.3.5	Ordenadas máximas estimadas para el sismo de Tehuacán, para el Municipio de Tecamachalco, Puebla	79
4.4	Análisis Modal del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"	80
4.4.1	Consideraciones del análisis del Modelo Analítico	80
4.4.2	Relación de participación de carga modal del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"	81
4.4.3	Formas modales del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"	81
4.4.4	Factores de participación modal del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"	83
4.4.5	Relación de participación modal de masas del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"	86
4.4.6	Formas modales del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"	90
4.4.7	Formas modales de los Macroelementos	96
4.4.7.1	Torre Campanario	96
4.4.7.2	Muros laterales (Norte y Sur)	96
4.4.7.3	Ábside	97
4.4.7.4	Fachada	97
4.4.7.5	Contrafuertes	97
4.4.7.6	Bóvedas	97
4.4.7.7	Arcos	97
4.4.8	Casos de carga y combinaciones aplicadas al Modelo Analítico	98

CAPITULO V

RESULTADOS

5.1	Esfuerzos en los macro-elementos con las diferentes combinaciones aplicadas al M. A. del Edificio del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"	99
5.2	Reacciones en la base del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"	103
5.3	Peso y masa del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"	103
5.4	Desplazamiento máximo en los elementos con la "Combinación 8"	104
5.5	Comparación de los resultados del análisis del Modelo Analítico y el estado actual del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"	105
5.5.1	Torre Campanario, comparación de resultados de la combinación 8	105
5.5.2	Fachada, comparación de resultados de la combinación 8	107
5.5.3	Muro Lateral Norte, comparación de resultados de la combinación 8	108
5.5.4	Muro Lateral Sur, comparación de resultados de la combinación 8	109
5.5.5	Bóvedas, comparación de resultados de la combinación 8	110

CAPITULO VI

CONCLUSIONES

Conclusiones	111
Glosario	112
Referencias	120

RESUMEN

En este trabajo, se realiza un estudio del comportamiento estructural del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco", Puebla, mediante un modelo representativo en computadora, que se somete a una excitación sísmica en su base (sismo del 15.06.1999; $M_w=7.0$), para calcular sus características dinámicas (periodos y formas modales), así como los efectos de estas en cada uno de sus elementos estructurales. El estudio considera el análisis lineal del modelo representativo aplicando el método del elemento finito. discretizando el Modelo Analítico y obteniendo el valor de esfuerzos en diferentes partes de la estructura.

Palabras Clave: Edificios Históricos, Comportamiento Estructural, Mampostería no confinada, Método del Elemento Finito

ABSTRACT

In it is carried out a study of the structural performance of the "Franciscan Ex-convent at Tecamachalco, Puebla"; using a computer model representative, which is subjected to a seismic excitation at its base (15.06.1999 earthquake, $M_w= 7.0$), to calculate its dynamic characteristics (periods and mode shapes), and the effects of these in each of its structural elements. The study considers the linear analysis of representative model using the finite element method, to later discretize the analytical Model and obtain the value of the stresses in different parts of the structure.

Key Words: Historic Buildings, Structural Behavior, Unconfined Masonry, Finite Element Method

Lista de Tablas

No. Tabla	Nombre de la Tabla	Pagina
Capítulo II		
Tabla 1	Fechas de construcción, trabajos de restauración y estudios realizados	20
Capítulo III		
Tabla 2	Bitácora de levantamiento de vibración ambiental del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"	58
Tabla 3	Graficas de periodos y frecuencias de la medición de vibración ambiental en los puntos de estudio	67-69
Tabla 4	Propiedades mecánicas de los materiales en la calibración del Modelo Analítico	71
Capítulo IV		
Tabla 5	Datos de registro del sismo CSER1999.06.15, Instituto de Ingeniería UNAM	74
Tabla 6	Relación de participación de carga modal para 110 Formas Modales	81
Tabla 7	Formas modales del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"	82
Tabla 8	Factores de participación modal	83-85
Tabla 9	Relación de participación modal de masas	86-89
Tabla 10	Casos de carga aplicados al Modelo Analítico del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"	98
Tabla 11	Combinaciones de cargas aplicadas al Modelo Analítico del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"	98
Capítulo V		
Tabla 12	Diagramas y esfuerzos en los Macroelementos	99-102
Tabla 13	Reacciones en la base	103
Tabla 1	Peso y Masa del Edificio del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"	103
Tabla 15	Desplazamientos máximos en los elementos, con la combinación 8	104

Lista de Figuras

No. de Figura	Nombre de la Figura	Pagina
Capítulo I		
Fig. 1	Vista satelital del Sitio de "Tecamachalco el Viejo	2
Fig. 2	Vista panorámica del Sitio de "Tecamachalco el Viejo"	2
Fig. 3	Fuente de la Plaza Principal en 1949 (ya no existe actualmente), al fondo el Portal y a la izquierda la base del kiosco, la niña María de Lourdes Moreno Castro, en la plaza principal.	3
Fig. 4	La Parroquia de Nuestra Sra. de la Asunción, (en 1921), vista del ábside norte y oriente, que en el año 2014 se reparó, después de los daños causados por el sismo de 1985.	3
Fig. 5	La Fundición, vista poniente	4
Fig. 6	La Fundición, vista noroeste	4
Fig. 7	Vista Panorámica del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"	5
Fig. 8	Vista de la Fachada y Atrio del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"	5
Fig. 9	Relaciones esfuerzo-deformación para el mortero, las unidades aisladas y los paneles de mampostería (Paulay y Priestley, 1992)	18
Capítulo II		
Fig. 10	Medición del Arco Triunfal y de la Cúpula del Altar Mayor	22
Fig. 11	Levantamiento de altimetría en la azotea	23
Fig. 12	Planta de Conjunto y colindancias del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"	24
Fig. 13	Planta Arquitectónica, Azotea, Cortes Longitudinal y Transversal	25
Fig. 14	Fachada Principal y Fachada Longitudinal Sur	25
Fig. 15	Fachada Principal y Atrio	26
Fig. 16	Fachada Sur	26
Fig. 17	Bóveda y Nervaduras de Altar Mayor	27
Fig. 18	Bóvedas 2 y 3 del Recinto del Templo	27

Fig. 19	Bóveda 4, del Recinto y Sotocoro	28
Fig. 20	Bóveda del Templo, vista interior	28
Fig. 21	Sotocoro	29
Fig. 22	Columna y arranque del Sotocoro	29
Fig. 23	Arco Triunfal y Columnas	30
Fig. 24	Arco Triunfal	30
Fig. 25	Fachada	31
Fig. 26	Portadas (Principal, Peregrinos y en Altar Mayor)	31
Fig. 27	Torre Campanario	32
Fig. 28	Torre campanario (vista frontal	32
Fig. 29	Escudo con atributos prehispánicos	32
Fig. 30	Vista aérea del punto norte de la Torre y el Cupulín	33
Fig. 31	Vista aérea, del punto noroeste de la Torre y la Fachada	33
Fig. 32	Arcada Tapiada	34
Fig. 33	Portal de Peregrinos en Muro Norte	34
Fig. 34	Portal de Peregrinos	34
Fig. 35	Bóveda de Altar Mayor	35
Fig. 36	Bóveda 2 en Recinto y Arco Triunfal	35
Fig. 37	Vista aérea de la Fachada y Capilla de la Tercer Orden	36
Fig. 38	Muro lateral sur y contrafuertes	36
Fig. 39	Escalera y Espadaña	36
Fig. 40	Atrio, ajardinado actualmente	36
Fig. 41	Fachada	36
Fig. 42	Detalles de la cimentación del Templo, Fotografías de la excavación	37
Fig. 43	Unión de Muro Sur y Ábside Sur	38
Fig. 44	Muro Sur y Contrafuertes	38

Fig. 45	Contrafuertes Norte, y Contrafuertes Sur	38
Fig. 46	Fachada	39
Fig. 47	Ábside, Vista noreste y vista sur	39
Fig. 48	Bóveda del Templo	40
Fig. 49	Recorte de aplanado en Bóveda 3	40
Fig. 50	Bóveda no 3	40
Fig. 51	Ladrillo de nervadura	41
Fig. 52	Nervaduras, apoyadas en el capitel de las columnas y en los muros laterales	41
Fig. 53	Torre, cuerpos 1,2, y 3	42
Fig. 54	Torre, cuerpos 1, 2, y 3	42
Fig. 55	Base de la Torre lado, vista oriente	42
Fig. 56	Torre, lado oriente	42
Fig. 57	Espadaña, vista sur	43
Fig. 58	Espadaña (Vista norte)	43
Fig. 59	Base de columna	43
Fig. 60	Fuste o Capitel, cargando los arcos y la pechina de la bóveda	43
Fig. 61	Arcos en el Claustro	44
Fig. 62	Vacio en apoyos de techo que se derrumbo	44
Fig. 63	Portada en Fachada	45
Fig. 64	Portada en Altar Mayor	45
Fig. 65	Tezontle en muros y contrafuertes	46
Fig. 66	Toba en Columnas de Arco Triunfal	46
Fig. 67	Xalnene en esquinas de torre campanario	47
Fig. 68	Xalnene en esquinas de torre campanario	47
Fig. 69	Piedra Braza en Muros	47
Fig. 70	Viga de Madera para soporte de campana	48

Fig. 71	Tabique en Pretil con la forma de la moldura de los arcos y nervaduras del recinto	48
Fig. 72	Tabique en pretil con la forma de la moldura en cornisa	48
Fig. 73	Mortero en juntas de piedra y aplanados	49
Capítulo III		
Fig. 74	Modelo Analítico (Metodología de construcción y estudio)	50
Fig. 75	Esquema de Flujo de construcción del Modelo Analítico	52
Fig. 76	Modelo Analítico con identificación de Macro-elementos	53
Fig. 77	Modelo Discretizado (Perspectiva Norte)	54
Fig. 78	Modelo Discretizado (Perspectiva Sur)	54
Fig. 79	Perspectivas de Planta y Frente del Modelo Analítico	55
Fig. 80	Perspectivas Posteriores del Modelo Analítico	55
Fig. 81	Puntos de medición de vibración ambiental en el Modelo Analítico	59
Fig. 82	Punto P-01 Medición de vibración ambiental en el centro de la base del cuerpo 3 de la Torre Campanario	60
Fig. 83	Punto P-02 Medición de vibración ambiental en el centro de la base del cuerpo 2 de la Torre Campanario	61
Fig. 84	Punto P-03 Medición de vibración ambiental en la base del cuerpo 1 de la Torre Campanario y sobre el muro lateral norte	61
Fig. 85	Punto P-04 Medición de vibración ambiental sobre la Cúpula 4 del Recinto	62
Fig. 86	Punto P-05 Medición de vibración ambiental sobre la Cúpula 3 del Recinto	62
Fig. 87	Punto P-06 Medición de vibración ambiental sobre la Cúpula 2 del Recinto	63
Fig. 88	Punto P-07 Medición de vibración ambiental sobre la cúpula del altar mayor	63
Fig. 89	Punto P-08 Medición de vibración ambiental en la azotea y sobre la esquina del Ábside Norte y el Ábside Oriente	64
Fig. 90	Punto P-09 Medición de vibración ambiental en la azotea y centro del Edificio, sobre el Muro Lateral Norte	64
Fig. 91	Punto P-10 Medición de vibración ambiental en la Azotea y sobre la esquina de la Fachada y el Muro Lateral Sur	65

Fig. 92	Punto P-11 Medición de vibración ambiental en el Atrio y el Eje central del Edificio	65
Fig. 93	Punto P-12 Medición de vibración ambiental en la Base de la Torre	66
Fig. 94	Punto P-13 Medición de vibración ambiental al centro del Edificio y en el interior del Templo	66
Capítulo IV		
Fig. 95	Ubicación de los puntos de estudio: Epicentro del sismo 15.06.1999; Estación sismológica Ciudad Serdán y Ex-convento Franciscano de Tecamachalco.	73
Fig. 96	Ubicación y coordenadas de los puntos de estudio	73
Fig. 97	Acelerogramas y espectros de Fourier (Sismo 15.06.1999)	75
Fig. 98	Acciones sísmicas (sismo 15.06.1999) [SAHC2014 – 9th	75
Fig. 99	Mapa de curvas de igual aceleración, cm/s^2 (Singh et al, 1999)	76
Fig.100	Mapa de isosistas por el sismo de Tehuacán (Gutiérrez, 1999) [1, 19].	77
Fig.101	Microzonificación sísmica y de isoperiodos para las tres zonas urbanas del Municipio de Tecamachalco, Pué.	78
Fig.102	Aceleraciones máximas del terreno, estimadas para el sismo 15.06.1999 ($M_w= 7.0$), para el Municipio de Tecamachalco, Pué.	78
Fig.103	Ordenada máxima del espectro lineal de aceleraciones, estimadas para el sismo del 15 de junio de 1999 ($MW=7.0$), del Municipio de Tecamachalco, Pué.	79
Fig.104	Ordenada espectral asociada al periodo estructural de $T= 0.2$ seg., estimadas para el sismo del 15 de junio de 1999 ($M_w= 7.0$), del Municipio de Tecamachalco, Puebla	79
Fig.105	Ordenada espectral asociada al periodo estructural de $T= 0.3$ seg., estimada para el sismo del 15 de junio de 1999 ($M_w= 7.00$), del Municipio de Tecamachalco, Puebla	79
Fig.106	Formas Modales, Periodos y Frecuencias del Edificio del Ex-convento Franciscano de Tecamachalco	90-95
Capitulo V		
Fig.107	Torre con desfases entre los cuerpos 1, 2, y 3	105
Fig.108	Esfuerzos de tensión en la Torre, causados por la torsión en los Modos 8,9 y 10.	105
Fig.109	Torre: agrietamiento vertical en los cuerpos 1 y 2, y esfuerzos a tensión en la unión de ambos cuerpos	106

Fig.110	Esfuerzos por el cierre y apertura de la Fachada, Modo 9	107
Fig.111	Fachada del Ex-convento Franciscano	107
Fig.112	Apertura y cierre de la Fachada, Modo 9	107
Fig.113	Perspectivas del Muro lateral norte, y figuras de la forma modal No. 9, en el Modelo Analítico, las flechas indican el sentido de los desplazamientos en el Modo 9	108
Fig.114	Perspectivas del Muro lateral Sur y figuras de la forma modal No. 9 en el Modelo Analítico, las flechas indican el sentido de los desplazamientos en el Modo 9	109
Fig.115	Vista panorámica de la azotea, se observa el agrietamiento diagonal y transversal de la bóvedas, a la derecha los esfuerzos observados en Z, en el Modelo Analítico (Sismo en Y, Modo 9) y (Sismo en X Modo 9)	110

Simbología

Símbolo	Significado
A	Área
β	Coefficiente sísmico
E	Modulo de elasticidad del material
E	Este
ϵ	Deformación unitaria
F	Fuerza
f	Frecuencia (hertz, ciclos por segundo)
f^{*cb}	Resistencia a la compresión de la pieza de mampostería
f^{*m}	Resistencia a la compresión de la mampostería
f^{*f}	Resistencia a la compresión del mortero
G	Modulo de cortante
Km.	Kilometro
K	Rigidez
m.	metros
N.	Norte
ρ	Densidad del material
S	Sur
Seg.	Segundo
σ	Esfuerzo
Ton.	Tonelada
μ	Coefficiente de Poissón

Abreviaturas

Abreviatura	Significado
BUAP	Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
DRAE	Diccionario de la Real Academia Española
E. N. C.. R. M. M. C. N.	Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía "Manuel del Castillo Negrete", I.N.A.H.,
I. N. A. H.	Instituto Nacional de Antropología e Historia
IPN	Instituto Politécnico Nacional
MEF	Método del Elemento Finito
M. A.	Modelo Analítico
Mw	Magnitud del sismo
R.C.D.F.	Reglamento de Construcción del Distrito Federal
Seg.	Segundo
S ²	Segundo al cuadrado
T	Periodo de tiempo (en segundos)
Ton	Tonelada
Tonf	Toneladas fuerza
UCOL	Universidad de Colima
UMSNH	Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
UPAEP	Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla
W	Oeste

Capítulo I

Introducción

1.1 Introducción

La humanidad desde su origen ha desarrollando soluciones de acuerdo a sus necesidades, un aspecto fundamental es el protegerse de los fenómenos naturales y de sus depredadores, es así como se crean espacios que en un principio fueron muy simples y con el tiempo se desarrollaron a la par de la sociedad, logrando no solo satisfacer las necesidades elementales de protección y abrigo, sino también expresar, el arte, la cultura, la tecnología de su tiempo, así como la influencia de su ubicación geográfica. Estos edificios del pasado generalmente han sido construidos de mampostería no reforzada, y de acuerdo a sus características artísticas y arquitectónicas, así como a la época en que se construyeron y a los hechos relevantes ocurridos en ellos, son nombrados monumentos históricos, ver [40, 54].

Las Construcciones del pasado se clasifican en Sitios y en Monumentos Históricos, se acompaña esa clasificación de acuerdo con el siglo en que se construyeron, los sitios y los monumentos históricos que existen en el mundo son una huella cultural del pasado, que aun cuando han perdurado a través de varios siglos si no se les atiende finalmente desaparecerán, ver [40].

Para preservar un monumento histórico, principalmente es necesario conocer y comprender sus características dinámicas, y su comportamiento estructural ante la acción de un sismo fuerte. Este estudio se desarrolla construyendo un modelo virtual en computadora, el cual es representativo del edificio en estudio, siendo una técnica confiable y no agresiva a la estructura, además, permite conocer su comportamiento actual ante diversos escenarios sísmicos, los resultados deben ser en lo futuro, la base técnica de ingeniería en trabajos de restauración, conservación e intervención del edificio, como se muestra en [43, 45, 47].

En la región del municipio de Tecamachalco, Pué., se encuentran vestigios de la época prehispánica y edificios de los siglos: XVI, XVII y XVIII, ver [8, 10, 30, 32].

Los principales sitios y monumentos históricos que se conservan en la zona son:

- Tecamachalco El Viejo: Sitio arqueológico, al oriente de Tecamachalco.
- El Ex-Convento Franciscano de Tecamachalco: Este edificio es un monumento colonial del siglo XVI, construido bajo la orden de los frailes franciscanos entre los años 1541 a 1591.
- La Fundición: Construcción de la época colonial para aprovechamiento del plomo.
- Las capillas de los barrios de Tecamachalco, que datan del siglo XVIII.

Sitio Arqueológico

Es el conjunto de monumentos históricos asentados en un lugar determinado, que representan una evidencia de la forma de vivir de una o varias etapas históricas y de una o más culturas que los ocuparon. Como ejemplo de un Sitio, tenemos a "Tecamachalco el Viejo", ubicado en el cerro del monumento, aproximadamente a 8 km. al oriente de la ciudad de Tecamachalco, Puebla., dentro del municipio de Yehualtepec, fundado y ocupado por tribus Popolocas. Aun cubierto por la maleza, se aprecian pirámides, una explanada y tételes distribuidos en una amplia zona, casi en el olvido y el abandono fue presa de saqueos que lo deterioraron, actualmente se encuentra en una etapa de estudio y rescate.

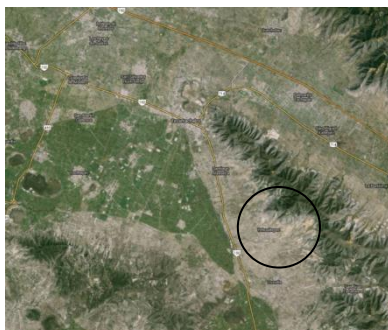


Fig. 1. Vista satelital del Sitio de "Tecamachalco el Viejo"



Fig. 2. Vista panorámica del Sitio de "Tecamachalco el Viejo"

Monumento histórico

Se llama monumento histórico a una construcción del pasado, que tiene un valor cultural por sí solo de acuerdo con la época en que se construyó, a los hechos relevantes ocurridos en él, y a las características arquitectónicas y artísticas que posea, como dice en [27, 28, 40, 55].

Como ejemplo de edificios y monumentos históricos, podemos observar en la región de Tecamachalco: al Portal, La Parroquia de Nuestra Sra. de la Asunción, las Capillas de los barrios, La Fundición y el Ex-convento Franciscano.



Fig. 3. Fuente de la Plaza Principal en 1949 (ya no existe actualmente), al fondo el Portal, a la izquierda la base del kiosco, y la niña María de Lourdes Moreno Castro, en la plaza principal.



Fig. 4. La Parroquia de Nuestra Sra. de la Asunción, (en 1921), vista del ábside norte y oriente, que en el año 2014 se reparó, después de los daños causados por los sismos de 1985 y 1999.



Fig. 5. La Fundición, vista poniente



Fig. 6. La Fundición, vista noroeste



Fig. 7. Vista Panorámica del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"



Fig. 8. Vista de la Fachada y Atrio del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"

Dentro de los monumentos históricos del siglo XVI, tenemos al edificio del “Ex-convento Franciscano de Tecamachalco”, asentado en la zona centro de la ciudad de Tecamachalco, en el Estado de Puebla, Méx., del cual trataremos en este estudio y desde un punto de vista de la ingeniería estructural. Sus coordenadas geográficas son: Latitud Norte 18°52'57” y Longitud Oeste 97°43'49” con una altitud sobre el nivel del mar de 2055.00 m., se localiza a 191 km. de la Cd. de México y a una distancia de 57 km. al sureste de la capital del estado. Este edificio es un monumento colonial del siglo XVI, construido bajo la orden de los frailes franciscanos entre los años 1541 a 1591, posee ciertas características arquitectónicas y ornamentales que hacen que el edificio sea declarado monumento nacional el día 14 de junio de 1934 mediante una declaración efectuada en la Dirección de Monumentos Coloniales y confirmada por el Secretario de Educación Pública el 10 de julio del mismo año. Esta declaración también fue ratificada por la ley federal sobre sus monumentos y zonas arqueológicas, artísticas e históricas del 6 de mayo de 1972, y en los artículos 35, 36-1 y tercero transitorio, ver en [8, 10, 30].

1.2 Planteamiento del Problema

Este edificio actualmente está en uso y recibe un gran número de visitantes, atraídos por las pinturas del sotocoro y por las características arquitectónicas del edificio, se ocupa para eventos culturales de carácter internacional, celebraciones religiosas y recibir peregrinaciones en honor al "Sr. del Desmayo". El lugar donde se encuentra ubicado ha sido adsorbido por la mancha urbana, destacando sus dimensiones (altura, volumen y peso), que lo hacen ser un alto riesgo para la seguridad de visitantes, de los edificios vecinos y de sus ocupantes, en caso de presentarse un sismo fuerte que lo colapsara. Algunas de sus partes han sido dañadas después de eventos sísmicos pasados, sin embargo no se cuenta con datos técnicos de los trabajos realizados, de información de daños, criterios y soluciones aplicadas en la reparación estructural y su vulnerabilidad actual.

1.3 Justificación

Se desconoce con exactitud el estado de daño actual del edificio, la degradación de sus materiales, el efecto causado por los sismos a que ha estado expuesto desde su construcción, y el daño estructural a sufrir ante un evento sísmico futuro, en resumen el grado de vulnerabilidad estructural del edificio actualmente.

Se han presentado casos de derrumbe súbito en edificios históricos, aun después de haber resistido sismos con anterioridad y sin aparentar daño y otros ante la acción de un sismo fuerte. Como ejemplo: La Torre Cívica de Pavía, del Siglo XII, ubicada en el norte de Italia, (planta cuadrada de 12.30 m., altura de 64.30 m. y muros de 2.30 m. de espesor), sin daño aparente, en un giro de pocos minutos se derrumbó en su totalidad el 17 de marzo de 1989, aprox. 10,000 ton. de escombros afectaron la catedral contigua y edificios vecinos, ver en [40].

1.4 Objetivo general

Estudiar el comportamiento estructural del edificio del “Ex–Convento Franciscano de Tecamachalco”, construyendo un modelo representativo en computadora, para conocer las características dinámicas de la estructura (formas modales, periodos y frecuencias) y su respuesta ante un sismo fuerte, el Modelo Analítico se somete a una excitación sísmica en su base (sismo 15.06.1999; Mw= 7.0).

1.5 Objetivos particulares

Obtener el valor de: aceleración, esfuerzos y desplazamientos en zonas y puntos de interés, elegidos estratégicamente: desde el inicio del estudio y de acuerdo con la observación preliminar del edificio, de las primeras corridas del modelo sin calibrar, y de los valores obtenidos durante la calibración del modelo representativo. Apoyándose en las consideraciones del comportamiento estructural para este tipo de edificios: propiedades mecánicas de los materiales, fallas tipo en sus elementos y la comparación de los resultados y del comportamiento del Modelo Analítico con el edificio real, ver en [34, 35, 39, 40].

1.6 Alcances

Este estudio, se limita al análisis lineal de un modelo representativo del Ex-convento Franciscano de Tecamachalco, Puebla, aplicando el MEF, discretizando el Modelo Analítico y obteniendo la solución aproximada mediante ecuaciones diferenciales utilizando herramientas computacionales. Considerando el edificio principal (Templo) y excluyendo (el claustro, la capilla de la tercer orden y muros colindantes), la geometría del edificio se obtiene mediante un estudio topográfico específico para este trabajo, no se realizan pruebas en sitio a los materiales, las propiedades de los materiales se asignan de acuerdo con resultados de otros investigadores y de la bibliografía existente sobre el tema, las mediciones de vibración ambiental se realizan en diferente tiempo, con un solo equipo.

1.7 Metodología

Analizar un edificio histórico mediante un modelo representativo en un programa de computadora, requiere de una consideración adecuada para conocer cuáles pueden ser los aspectos que permitan acercar o alejar al modelo representativo del edificio real. En este caso el “Ex-Convento Franciscano de Tecamachalco”, presenta un alto grado de dificultad para obtener su geometría, historia de la información técnica y la consideración adecuada de los siguientes aspectos:

- 1) La historia del edificio y los trabajos de intervención y restauración realizados
La fecha de construcción, el periodo de tiempo y las etapas en que se desarrolló la obra, son aspectos fundamentales para comprender la filosofía con la que se construyó y los criterios aplicados en cada etapa de intervención o restauración. En este caso, encontramos elementos estructurales con trabajos posteriores a su construcción, tales como vanos tapiados, contrafuertes reconstruidos o acondicionados como sustitución de la pérdida de apoyo de los muros al derrumbarse otros elementos como techos y bardas, no se encuentran datos sobre la fecha de estos trabajos y se carece de información técnica sobre los trabajos de restauración realizados.

Se busca información desde su construcción acerca de los fenómenos a que ha estado expuesto, a los daños que con anterioridad ha sufrido, de los trabajos efectuados para repararlo, principalmente en la reparación de grietas, (mapeo de daños, profundidad, espesor, dirección, longitud y procedimiento aplicado en su corrección). Al no contar con información clara y precisa en este aspecto, este estudio se limita a lo obtenido en la información histórica y la información general de los trabajos de restauración del edificio.

2) La geometría del edificio.

Para obtener la geometría del edificio, considerando la complejidad de sus formas y sus dimensiones, las zonas de difícil acceso y la dificultad para obtener las dimensiones de sus elementos, se realiza un levantamiento preliminar y un estudio topográfico a detalle: con equipo electrónico (Estación total, Nivel, Teodolito o Tránsito y Distanciómetro láser), para que los datos y dimensiones obtenidos sean con la mayor exactitud y se eviten errores que alejen al modelo representativo de la realidad.

3) Las propiedades mecánicas.

Debido a la importancia histórica del edificio, a las normas que rigen su conservación y a los recursos disponibles al proyecto, no es posible tomar muestras, especímenes o realizar pruebas en sitio a los materiales que constituyen los elementos estructurales del mismo, además de que éstas tendrían un efecto agresivo al edificio. Por lo tanto, para conocer las propiedades mecánicas de estos materiales, se realiza la observación física del edificio, identificando, ubicando y delimitando los materiales que lo constituyen. Apoyándose en la bibliografía existente en cuanto al tema de edificios históricos realizada por investigadores del país y del extranjero, se plantean las condiciones apropiadas de los materiales para el Modelo Representativo, y una vez calibrado, que éste sea adecuado para permitir una comparación técnica con lo observado del edificio en la realidad, ver [39, 40].

4) Las condiciones de frontera.

Se definen como los límites físico y mecánico que considera el Modelo Representativo. Para este caso de estudio, el alcance se limita al edificio principal y las condiciones de frontera son: el desplante de la cimentación y cómo consideramos las restricciones de la misma, así también la continuidad con elementos estructurales colindantes, como: bardas, muros, contrafuertes y techos lado sur, las cuales solo se consideran como puntos de restricción de movimiento en esa dirección y no se incluye el estudio de estas.

5) El Método de aplicación para el estudio

Se aplica el MEF, construyendo un Modelo Virtual con elementos finitos sólidos (tetraedros de 8 nudos), para una mejor representación de las características de la geometría de sus bóvedas y con la finalidad de contar con un Modelo Representativo y cercano a la realidad, aun considerando que este MA demanda mayores recursos (humanos, computacionales, tiempo) comparado con modelos formados de elementos finitos shell y barras [57, 59].

6) Construcción del Modelo Representativo

Una vez definida la sección a estudiar y contando con la medición y obtención de la geometría del edificio, se procede a construirlo virtualmente utilizando software de (dibujo, discretización, pre proceso, proceso y pos proceso), aplicando el método del elemento finito, ver en [47].

7) La calibración del Modelo Representativo

Se realizan mediciones de vibración ambiental en puntos estratégicos del edificio, que son elegidos estratégicamente de acuerdo con la observación inicial de edificio y son la base en la calibración del Modelo en cuanto a su periodo de vibración. Éstas mediciones se realizan utilizando un sismógrafo de tres canales y con un tiempo de medición de 10 minutos en cada estación, se ajusta el módulo de elasticidad de los materiales hasta que el periodo del Modelo Analítico coincida con el periodo medido en campo [14, 17].

8) El estudio analítico del Modelo Representativo

El Modelo Representativo se somete a una aceleración en su base, utilizando un acelerograma (sismo del 15.06.1999; Mw=7.0), se estudian sus formas modales y los efectos de estas en cada uno de sus elementos estructurales, a diferencia con las estructuras esqueléticas de acero y concreto, que tienen un periodo fundamental de vibración, los edificios históricos tienen varios periodos de vibración de interés así como de formas modales, por lo tanto, adoptamos 110 formas modales y 13 puntos de estudio, elegidos estratégicamente de acuerdo a las observaciones del recorrido del edificio.

1.8 Estado del arte de los edificios históricos en el mundo

1.8.1 ¿Qué ha sucedido?

En años anteriores, el desconocimiento y la falta de valoración a los edificios históricos los ha llevado a un estado de abandono, deterioro y finalmente a desaparecer. En general, los edificios históricos se han mantenido erguidos por varios siglos, y durante este periodo de tiempo han estado expuestos a diversos fenómenos naturales (sismos fuertes), daños causados por el hombre (guerras y vandalismo), y además al intemperismo (su exposición a la agresión del medio ambiente después de recibir un daño estructural considerable: agrietamientos y separación de algunos de sus elementos de refuerzo, sometidos a escurrimientos por la lluvia y humedades) [40]. Sin embargo, aun es tiempo para: conocerlos, estudiarlos, entenderlos, atenderlos y ayudarlos a su conservación. En los últimos años, el desarrollo de la tecnología ha proporcionado avances importantes en la preservación de edificios históricos, mediante la aplicación de diversas técnicas de restauración, basadas en los resultados de análisis de modelos representativos en computadora y de la información obtenida de la instrumentación de estos edificios, estos resultados han permitido conocer su comportamiento dinámico, sus formas modales y su estado de daño estructural actual para estimar la vulnerabilidad estructural de los edificios históricos [37].

1.8.2 ¿Qué se ha investigado?

Desde hace algunos años ha nacido un gran interés por analizar los aspectos del comportamiento estructural y los daños sufridos en edificios antiguos y coloniales, principalmente en países que cuentan con un gran número de este tipo de construcciones, en Europa (principalmente Italia, Francia, Alemania, Inglaterra y Portugal), en Asia (Turquía, Japón, China), en América también se han realizado investigaciones importantes (México, Perú, Chile y Colombia, entre otros).

Se han investigado y experimentado también las propiedades de los materiales y la filosofía y técnicas con que fueron construidos, el efecto del medio ambiente, la influencia de las características del suelo y del sitio donde están desplantados, para estimar su vulnerabilidad estructural principalmente a fenómenos sísmicos.

Actualmente, con ayuda de equipo electrónico de alta tecnología y programas avanzados de computadora, además de la instrumentación en los edificios históricos, se ha logrado la aplicación de técnicas que permiten conocer las características dinámicas de este tipo de edificios, así como el estudio de los resultados de análisis de modelos representativos y algunas consideraciones de falla estructural. Además el desarrollo de instrumentos que permiten escanear la estructura para obtener una mejor definición de sus dimensiones, espesores y distribución de los materiales de que están construidos, esto ha logrado avances importantes en la comprensión del porque de su comportamiento estructural, de su estado de daño y de su existencia actual [9, 63].

Dentro de las técnicas de investigación aplicadas para el estudio de los Edificios Históricos, desde el punto de vista estructural, tenemos: Historia y cronología de construcción y trabajos de restauración, Escaneo laser terrestre, Espectrometría, Estudios geoquímicos, Estudios geofísicos, Fluorescencia inducida por laser, Geomática, Modelos representativos, Radiometría, Termografía, Vibración ambiental, entre otros.

1.8.3 ¿Qué se está haciendo actualmente?

1.8.3.1 En la investigación

- a) En Europa, se han presentado los mayores avances utilizando programas de computadora en el manejo de modelos propuestos, para realizar análisis del comportamiento estructural de edificios históricos y estudios de los resultados obtenidos de la instrumentación de estos edificios, comprobando: que mediante un modelo representativo en computadora si es posible conocer las características dinámicas de un edificio histórico [4, 6, 11, 18, 22, 52, 58].
- b) En América, países como México, Perú, Colombia y Chile, entre otros, están desarrollando líneas de investigación sobre el tema de mampostería de edificios históricos, estudiando: materiales, modelos representativos virtuales, físicos a escala de estos edificios y técnicas de monitoreo [17, 38, 53, 56, 59, 63].
- c) En México, desde hace varios años también se han abierto líneas de investigación sobre este tema, enfocadas a desarrollar tanto la metodología de estudio, como el proponer modelos adecuados de análisis estructural, que permitan conocer el comportamiento estructural y las propiedades dinámicas de este tipo de edificios, así como los daños causados principalmente por sismos anteriores y futuros. Investigadores como el Dr. Roberto Meli Piralla, Dr. Fernando Peña Mondragón, M. Chávez, Julio Manzano, entre otros, e Instituciones como la UNAM, IPN, BUAP, UPAEP, UMSNH, UCOL, colaboran y cuentan con grupos de investigación y avances importantes en esta área. Entre los proyectos de investigación más importantes: el monitoreo y estudio de la Catedral Metropolitana [40], el estudio de monumentos coloniales [60] y de templos típicos: en la ciudad de Puebla [12,,42], en el estado de Oaxaca [7], en el estado de México [37] y lo aprendido por los daños en una amplia zona del país a causa del sismo del 15 de junio de 1999, ver [2, 5, 13, 15, 29, 31, 55].

1.8.3.2 De la información técnica del Edificio

El documento e información de mayor utilidad que se encontró es: "Teoría y Práctica en la conservación de un monumento: Ex-convento de Tecamachalco, Puebla", es una tesis de maestría de la Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía "Manuel del Castillo Negrete", I.N.A.H., en este documento, se publican los resultados de estudios de exploración y de los trabajos de restauración realizados al edificio en los años de 1979 y 1980, [10].

Dentro de la información de mayor interés a nuestra línea de investigación, se encuentran los siguientes aspectos:

- a) La forma, material y dimensiones de la cimentación del templo, en muros laterales, torre, columnas y contrafuertes (producto de la observación de las excavaciones realizadas), se cuenta con copia de las fotografías tomadas a las excavaciones junto a la cimentación.
- b) El material que constituyen las bóvedas, su forma y acomodo (actualmente se aprecia en el interior del edificio, el recorte de un cuadrado del aplanado inferior en la bóveda y puede apreciarse el tamaño, forma y acomodo del ladrillo que la constituye).
- c) El relleno de la bóveda-piso del sotocoro: Se encuentra la explicación de lo encontrado al derrumbarse un muro del lado sur y dejar expuesta la sección del sotocoro, se menciona que la parte inferior de dicha bóveda es de mampostería de ladrillo, sobre ésta descansa un acomodo de hojas de barro vacías y luego una cubierta o piso de ladrillo.
- d) La restauración de sus aplanados: Se explica el trabajo de fijación de los aplanados al muro mediante un cimbrado de triplay y un colado interior, ahora se entiende el porqué de que su apariencia no se vea regleada y uniforme.
- e) El relato de acontecimientos y fechas de otros trabajos de reconstrucción, así como de la historia y origen del pueblo de Tecamachalco y del edificio del "Ex-convento Franciscano".

1.8.3.3 En cuanto a los trabajos de restauración

En la mayoría de los casos, al menos en lo que se refiere al edificio de nuestro interés “El Ex-Convento Franciscano de Tecamachalco”, no se cuenta con información clara y precisa acerca de los daños sufridos: a) por los sismos y b) por el deterioro del tiempo aunado al abandono y los procesos de restauración llevados a cabo. Existe información histórica y una breve explicación de los trabajos realizados, pero esta información está dada en una forma general y no especifica técnicamente el daño encontrado en el edificio después de un sismo. Un ejemplo de esto, es que no existen datos claros del agrietamiento, tales como: ubicación, dimensión, forma, espesor, profundidad, inclinación y la sección de las grietas, el mapeo e información de los daños anteriores relacionado con la causa sería de gran utilidad para su restauración. Este estado de la información comprende sin excepción a todos sus elementos: bóvedas, cúpulas, arcos, torres, muros y contrafuertes, los cuales han sido restaurados en varias ocasiones y no se cuenta con la fecha y un registro técnico de los daños encontrados y del proceso o método de su reparación, así como de los criterios aplicados.

En la biblioteca del INAH, Puebla, existe un expediente técnico correspondiente al Ex-convento Franciscano de Tecamachalco, con información de los daños sufridos por el sismo del 15 de junio de 1999 y por el intemperismo hasta esa fecha, así como los elementos que se repararon. 1) Espadaña: En la parte superior, presenta fallas por cortante y desintegración del material, recomiendan desmontar la parte superior e integrarla nuevamente. 2) Acceso en forma de arco en azotea y escalera. Se encontró desfasado en uno de sus apoyos, se recomendó apuntalarlo y restituir la sección dañada. 3) Cupulín: Severamente dañado, se desmonta y reintegra. 4) Torre, bóvedas y muros, en el interior y exterior presentan agrietamientos y desprendimiento de material, se realiza rajueleo, inyección de grietas, integración de material, consolidación, resane y aplanado fino en los acabados. [30].

1.9 Métodos y teorías aplicadas para desarrollar este estudio

1.9.1 Método del Elemento Finito

Es un método numérico aproximado, para solucionar problemas de ecuaciones diferenciales utilizando programas de computadora, aplicándolo a problemas de ingeniería con geometrías complejas, en el área de la ingeniería, permite la simulación del elemento de estudio ante diversas condiciones y estados de carga, así como la modificación de las propiedades mecánicas del material [9, 26].

El método consiste en realizar la solución numérica de una estructura, cuerpo o dominio (medio continuo), del cual están definidas las ecuaciones diferenciales de forma débil o integral que caracteriza el comportamiento físico del problema, discretizando o dividiendo el modelo de estudio (dominio) en un número adecuado de elementos finitos (subdominios), la finura del mallado depende de: (los requerimientos del estudio, precisión requerida de los resultados, características físicas y geometría del edificio a estudiar, sobre todo de la demanda y disponibilidad de recursos humanos en cuanto a tiempo, además de la capacidad del sistema computacional empleado). Los elementos finitos pueden ser: (Barra, placa Shell y Sólido), estos elementos están unidos entre sí por puntos llamados nodos, para los cuales se determina su solución numérica empleando cálculo matricial, en el Modelo Analítico todos los nodos deberán estar unidos entre si y garantizar las condiciones de continuidad propuestas entre un elemento y otro, así como el valor mínimo y máximo de los ángulos internos entre la proyección de los vértices de cada elemento, la solución para la sección comprendida entre cada nodo deberá obtenerse por interpolación [9, 45].

Considerando las características de la geometría del edificio del Ex-convento Franciscano de Tecamachalco", adoptamos el empleo de elementos finitos sólidos (tetraedros de 8 nudos), por las ventajas en la representación virtual en 3D, de las bóvedas, arcos de la estructura y la continuidad de sus formas.

Aplicación del MEF (Etapas) [46]

1. Preproceso

Construcción de la geometría, discretización (generación de la malla), definición de las condiciones de frontera y aplicación de las propiedades mecánicas de los materiales.

2. Cálculo

El programa genera N ecuaciones y N incógnitas, que pueden resolverse con algoritmos para la solución de sistemas de ecuaciones lineales.

3. Postproceso

Cálculo de las magnitudes derivadas de los nodos, resultado de operaciones de suavizado, interpolación y errores de aproximación.

1.9.2 Análisis Dinámico

El Análisis Dinámico de una estructura, considera los efectos que tienen las vibraciones de alta frecuencia, los cambios considerables de carga y los efectos de inercia producidos en la estructura con respecto al tiempo. Debido a las características de la geometría de los edificios históricos, las técnicas de simplificación de masas y cargas no son aplicables como se realiza en las estructuras esqueléticas de concreto y acero. Los análisis dinámicos en una estructura de mampostería histórica son muy complejos, sin embargo recomendables para conocer las características dinámicas de la estructura, además de que ya se cuenta con la tecnología para desarrollar estos largos y complicados procesos, como podemos ver en: [14, 16, 21, 23, 33, 36, 49, 50, 51].

El análisis dinámico del edificio, se realiza mediante la aplicación de una excitación sísmica, utilizando un registro sísmico (sismo del 15.06.1999; MC=7.0), en la base del Modelo Analítico, aplicándolo en el programa SAP2000.

1.9.3 Teoría de la Elasticidad

Cuando un material se somete a esfuerzos de tracción presenta un alargamiento, este se prolonga de acuerdo con la magnitud de la fuerza y de las propiedades mecánicas del material, la deformación causada es proporcional a la fuerza aplicada e inversamente proporcional al área de la sección transversal.

Tenemos:
$$\Delta L \propto \frac{F \times L_0}{A} \quad (\text{Ec. 1})$$

Esta relación se conoce como Modulo de Young o Modulo de Elasticidad, inicialmente fue experimentada por Robert Hooke (1635-1703).

se expresa:
$$E \times \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{F}{A} \quad (\text{Ec. 2})$$

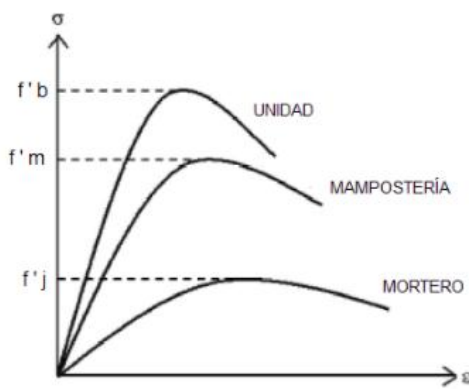
Tenemos que:

"E" es la constante característica del material del objeto, y se denomina Módulo de Young o Módulo de Elasticidad, también puede ser asignada la letra "Y".

El cociente F/A , se denomina esfuerzo (stress) y se representa por la letra griega sigma " σ ", con las mismas unidades de la presión Pa.

Al cociente $\Delta L / FL_0$, se denomina deformación unitaria (strain), se representa con la letra griega épsilon " ϵ ", que es adimensional (no tiene unidades y de acuerdo a esto la (Ec.1) puede escribirse como la (Ec. 3).

$$\sigma = E \times \epsilon = Y \times \epsilon \quad (\text{Ec. 3})$$



En la fig. 9, se observa la resistencia a compresión de los tres materiales

f^*cb = Resistencia de la pieza

f^*m = Resistencia de la mampostería

f^*j = Resistencia del mortero

Se observa que ante esfuerzos a compresión la mampostería trabaja en forma óptima, ya que interactúan las propiedades de ambos materiales, lo que supone un comportamiento elástico.

Fig. 9. Relaciones esfuerzo-deformación para el mortero, las unidades aisladas y los paneles de mampostería (Paulay y Priestley, 1992)

1.9.4 Coeficiente de Poisson o coeficiente de deformación transversal

Si una muestra cilíndrica o probeta de un material es sometido a una fuerza de tracción o a una fuerza de compresión, sus paredes tienden a estrecharse o a ancharse según sea el caso.

Existen esfuerzos de tensión, esfuerzos de compresión, esfuerzos de corte o cizalladora y esfuerzos de torsión, entre los más comunes.

Para los esfuerzos de tensión y esfuerzos de compresión, la deformación transversal se define como $\epsilon_T = \Delta d / d$, de esta manera tenemos:

$$\epsilon_T = \mu \epsilon \quad (\text{Ec. 4})$$

La constante μ se denomina coeficiente de deformación transversal, experimentalmente su valor varía de 0.25 a 0.50

Para los esfuerzos de Corte o Cizalla, tenemos la ecuación:

$$\sigma = G(\Delta L / L_0) = G \epsilon_c = G \tan \Theta \quad (\text{Ec. 5})$$

G es el modulo de corte o cizallamiento

Θ ángulo en que rota el lado vertical como consecuencia de la deformación

Modulo de cortante relacionado con el Modulo de Young, tenemos:

$$\sigma = E / (2(1+\mu)) \quad (\text{Ec. 6})$$

μ es el coeficiente de Poisson

Capítulo II

Estudio General del “Ex-convento Franciscano de Tecamachalco”

Para realizar un modelo representativo del edificio y además que sea confiable para el estudio del comportamiento estructural del mismo, es necesario conocer toda la información relacionada a su edad, los daños que ha sufrido, los trabajos de reparación efectuados, su estado físico actual, los materiales que lo constituyen y el estudio de su geometría. El edificio es un experimento escala uno a uno y con una duración igual a la edad del edificio, un estudio adecuado del mismo nos acerca a la realidad de su comportamiento estructural.

2.1 Descripción histórica en fechas de construcción y restauración

La construcción del Convento Franciscano de Tecamachalco. Se llevo a cabo entre los años de 1541 a 1591, como dice en [10, 30].

Fechas de construcción, trabajos de restauración y estudios realizados	
Año	Trabajos realizados
1541	Inicio de su construcción
1591	Termino de su construcción
1936	Resanes generales de revocos afectados por el salitre, aplicación de pintura de cal a las bóvedas y muros laterales, y el descubrimiento de la cantería que se encalada
1943	Ocurre el derrumbe de la pared y techo de uno de los cuartos
1973	A causa del sismo de 1973, se presentan daños en el claustro y la capilla de la tercer orden, interviene en su reparación la Secretaría del Patrimonio Nacional.
1979-1980	Se realiza una investigación más profunda además de trabajos de conservación, explorándose la cimentación, restauración de aplanados, pinturas y murales. E.N.C.R.M. Manuel del Castillo Negrete
1982	Se estudian y proponen soluciones de conservación del edificio (La mayor información técnica encontrada)
1999	A causa del sismo de Tehuacán, el 16 de junio de 1999, el edificio sufre daños en la nave, muros, arco triunfal, cúpulas, azotea, espadaña y capilla de la tercer orden. La Comisión Técnica Estatal coordina los trabajos de reparación
A la fecha	Se ha continuado con trabajos de resane, aplanados y encalado de muros, no se cuenta con información técnica de los daños sufridos posteriores a los sismos ocurridos y al intemperismo de la estructura, de las reparaciones realizadas o de los criterios aplicados en su ejecución

Tabla 2. Fechas de construcción, trabajos de restauración y estudios realizados

2.2 Estudio de la geometría del Edificio y metodología de levantamiento

La Geomática, que es la medición y estudio de la geometría del edificio, inicia con un recorrido de reconocimiento para identificar las áreas de interés y delimitar el área de estudio, ubicar puntos de apoyo de las mediciones, reconocer accesos a puntos críticos y formular una estrategia de levantamiento.

Utilizando equipo topográfico (Estación Total, Tránsito, Distanciómetro laser y Nivel), se procede a realizar un levantamiento topográfico para conocer las dimensiones del edificio y así obtener la planta arquitectónica de conjunto, alturas, perfiles y espesor de cada uno de sus elementos principales y del cuerpo principal del templo (objeto de estudio), sobre todo salvaguardando la integridad física del personal y las formas y materiales del edificio.

Metodología del Levantamiento Topográfico

El estudio topográfico se realiza en 3 etapas:

- A) Levantamiento del interior
- B) Levantamiento del exterior
- C) Dibujo y elaboración de planos (Productos obtenidos)

2.2.1 La medición del interior del Templo

- 1) Inicialmente, con apoyo del tránsito, se traza un eje longitudinal al centro del interior de la iglesia hacia el exterior, partiendo del altar mayor hacia el atrio, sobre el eje se marcan y numeran puntos que corresponden a los ejes centrales de cada columna y arco correspondiente, cada centro de bóveda y la cara interior de los muros laterales, muros del ábside y la cara interior y cara exterior del muro de la fachada. En el exterior, se traza un eje paralelo a la fachada y dos ejes paralelos a los muros laterales como base de referencia con el exterior.

- 2) Con apoyo de un nivel, se obtiene la cota de cada uno de los puntos marcados, tomando como banco de nivel la parte central del acceso principal del templo.
- 3) Se posiciona en cada uno de los puntos marcados sobre el eje interior de la iglesia, un tránsito, equipado con un distanciometro laser, verificándose el centro correspondiente y la altura del aparato, se procede a tomar lecturas de distancia en la dirección transversal hacia el muro o la columna, según corresponda, iniciando con el lado sur en dirección horizontal y así subir y tomar lectura de distancia a cada 5° hasta completar el giro de 180° terminando con la medición del lado norte.
- 4) Una vez terminada la medición en el sentido transversal y antes de pasar a otro punto, se gira el transito, 90° y 180° , y se toman referencias en la dirección longitudinal, iniciando con el lado oriente y terminando con el lado poniente, obteniendo la distancia inclinada del punto de apoyo hacia cada uno de los centros de arcos y cúpulas, tomando medidas cada 5° para conocer también el perfil inferior de las cúpulas y nervaduras.
- 5) Desde cada una de las estaciones se toman referencias de los vanos de las ventanas, así como del piso del área del altar mayor y accesos al recinto.



Fig. 10. Medición del Arco Triunfal y de la Cúpula del Altar Mayor

2.2.2. La medición del exterior del Templo

- 1) Utilizando una estación total y apoyándose en el trazo del eje principal que corre de manera longitudinal desde el altar mayor hacia el atrio, se trazan ejes y puntos de apoyo en los extremos del edificio y en la terminación norte del atrio.
- 2) Se inicia con la medición del muro de la fachada y la parte frontal de la torre campanario, iniciando con una lectura horizontal para ir subiendo tomando lecturas a cada 5° , así hasta encontrar el inicio o terminación de un elemento arquitectónico y hasta llegar al cupulín.
- 3) Se procede a levantar el muro norte y posteriormente el muro sur, con el mismo procedimiento que en la fachada.
- 4) Se colocan puntos de apoyo y se procede a realizar el levantamiento de la azotea, haciendo un barrido de altimetría para obtener la sección, la forma de las cúpulas, pretil, molduras y lecturas de cada cuerpo de la torres campanario, espadaña y pináculos.



Fig. 11. Levantamiento de altimetría en la azotea

2.2.3 Productos Obtenidos (elaboración de planos)

2.2.3.1 Planta de Conjunto y colindancias del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"

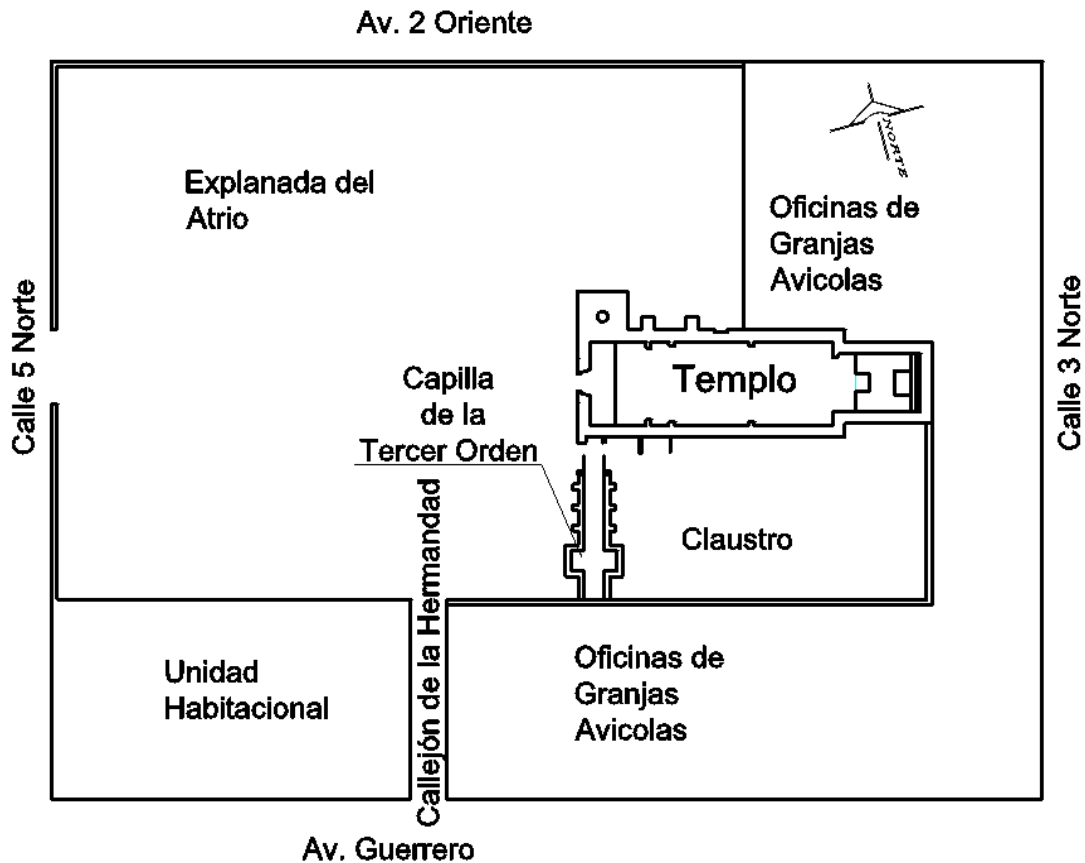


Fig. 12. Planta de Conjunto y colindancias del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"

2.2.3.2 Dimensiones del cuerpo principal del Templo (Área de estudio)

- Longitud del edificio = 55.71 m. (paños exteriores)
- Ancho de del edificio = 17.12 m. (paños exteriores).
- Espesor de los muros laterales y el ábside = 1.85 m.
- Espesor del muro de la fachada = 2.03 m.
- Altura máxima de la torre = 41.50 m.
(tomando como referencia el nivel de piso de la puerta principal).
- Altura de los muros laterales y el ábside = 16.70 m.
- Densidad estructural de planta: 28%

2.2.3.3 Planta Arquitectónica, Azotea, Cortes y Fachada

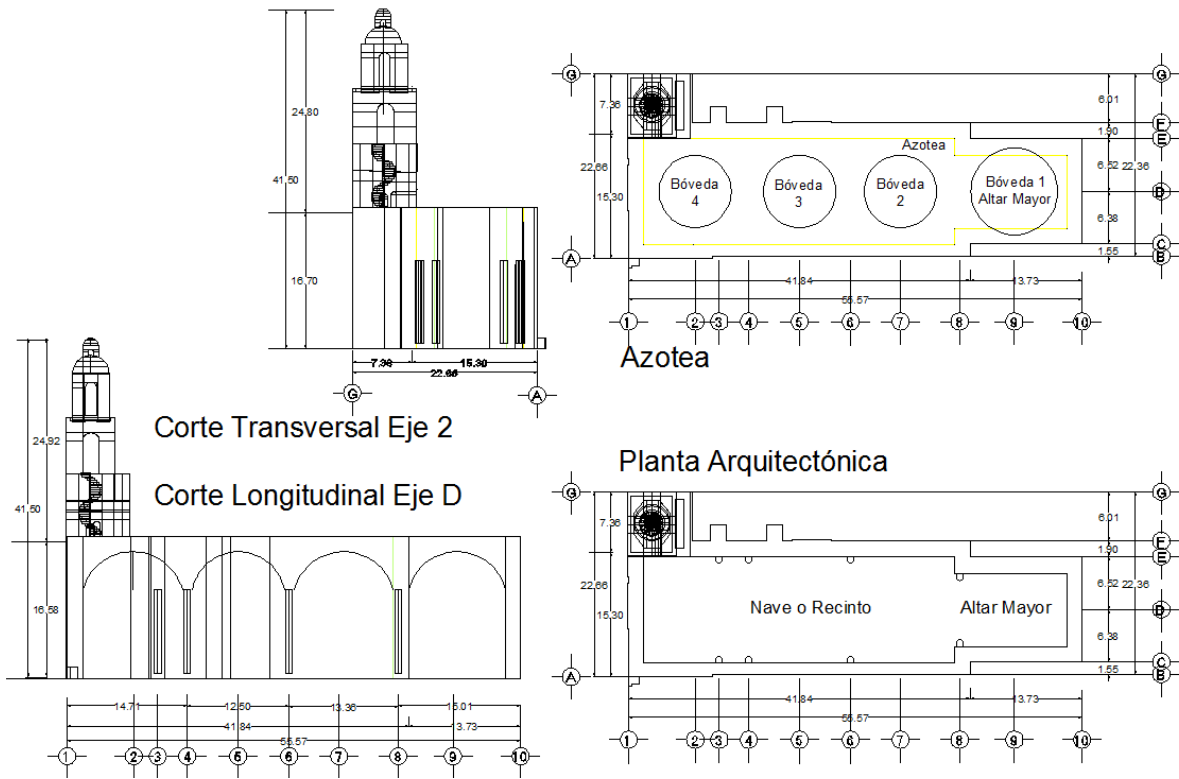


Fig. 13. Planta Arquitectónica, Azotea, Cortes Longitudinal y Transversal

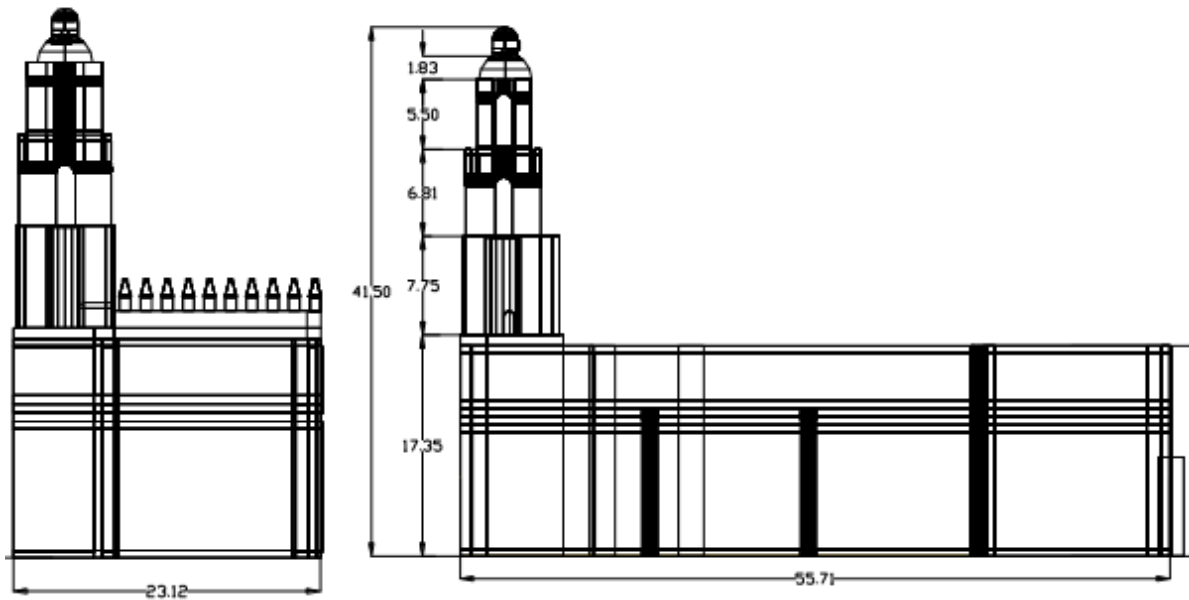


Fig. 14. Fachada Principal y Fachada Longitudinal Sur

2.3 Descripción arquitectónica de los elementos principales del Edificio

como se puede ver en [30]

1. El estilo arquitectónico es: Plateresco Purista (renacentista-gótico-flamígero).



Fig. 15. Fachada Principal y Atrio

2. El Templo: La estructura del edificio es medieval, pues se deriva de un trazo geométrico carolingio, orientado en un eje oriente-poniente y perpendicular a la pendiente natural de la ladera del cerro del Nacimiento.



Fig. 16. Fachada Sur

3. El templo es de una sola nave, (La bóveda se construyó entre los años de 1543-1557), aparentemente de cañón corrido, sin embargo es un conjunto de bóvedas continuas con ocho nervaduras diagonales o primarias, algunas perpendiculares a los arcos torales, al nivel de las claves ligando éstas con la clave central o maestra, las cargas se distribuyen en cuatro nervaduras, llegando a ocho puntos principales, dividiendo la bóveda en ocho paños y una sola clave.



Fig. 17. Bóveda y Nervaduras de Altar Mayor

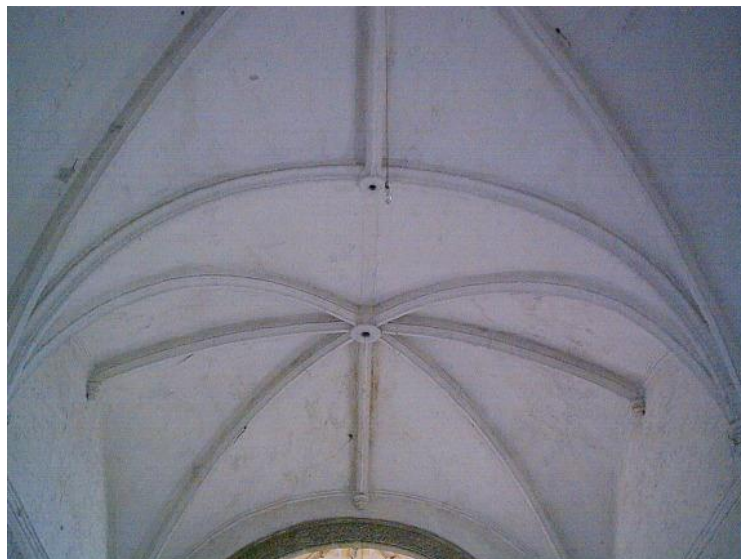


Fig. 18. Bóvedas 2 y 3 del Recinto del Templo



Fig. 19. Bóveda 4, del Recinto y Sotocoro



Fig. 20. Bóveda del Templo, vista interior

4. El soto coro como el presbiterio tiene nervaduras de una variante compleja en forma de flor, en la que las nervaduras de los pétalos ayudan a distribuir las cargas; datan del año 1560, el sotocoro además está decorado con pinturas de Juan Gerson, que presentan escenas como el Éxodo y el Apocalipsis. Estructuralmente no tiene un relleno macizo, aunque su espesor es considerable, su relleno es a base de hojas huecas para aligerar su peso y que alguna vez fueron rotas por saqueadores, ver en [8, 10, 44].



Fig. 21. Sotocoro

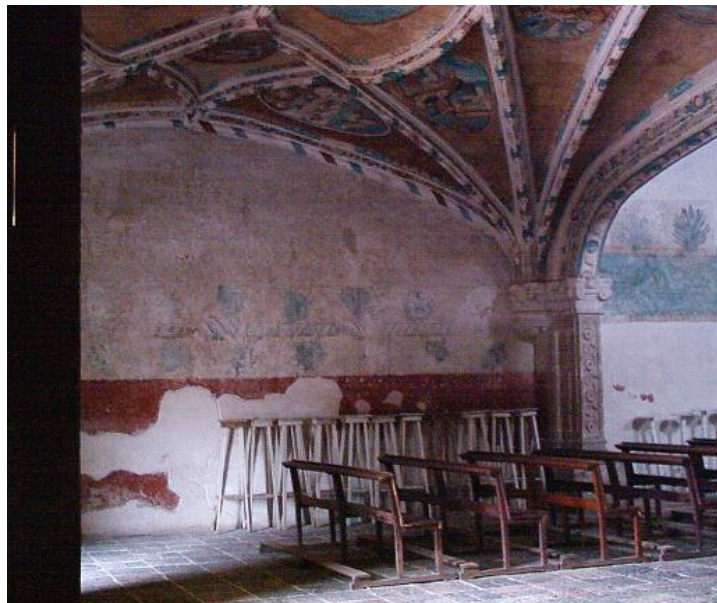


Fig. 22. Columna y arranque del Sotocoro

5. Cuenta con un arco triunfal, hecho de cantería y ábside cuadrangular con balanquino estilo neoclásico, existe un sagrario con moldura estilo barroco, probablemente pertenecientes al retablo original.



Fig. 23. Arco Triunfal y Columnas y balanquino cubriendo al altar mayor



Fig. 24. Arco Triunfal

6. La fachada está orientada al poniente, es sobria y con acceso enmarcado por cantería, alfiz que asemeja el cordón franciscano, al centro el escudo heráldico de la orden en relieve con los estigmas de san Francisco, arco poli lobulado y ventana coral rematada por una cruz de cantería, una cornisa sobre la que se desplanta un pretil almenado.



Fig. 25. Fachada



Fig. 26. Portadas (Principal, Peregrinos y en Altar Mayor)

7. Torre campanario, al noroeste del edificio, que consta de base, tres cuerpos y remate en forma de cupulín; en el extremo de la base existe un águila de piedra con los atributos prehispánicos; copali en la cabeza y el símbolo del canto saliendo del pico.



Fig. 27. Torre Campanario



Fig. 29. Escudo con atributos prehispánicos



Fig. 28. Torre campanario (vista frontal)



Fig. 30. Vista aérea, del punto norte de la Torre y el Cupulín



Fig. 31. Vista aérea, del punto noroeste de la Torre y la Fachada

8. Al norte se observa una arcada tapiada en lo que fue la capilla abierta, hoy en día ocupada por oficinas del sector agropecuario.



Fig. 32. Arcada Tapiada

9. En el muro norte del Templo, está enmarcado el acceso que en sus inicios era el portal de peregrinos.



Fig. 33. Portal de Peregrinos en Muro Norte

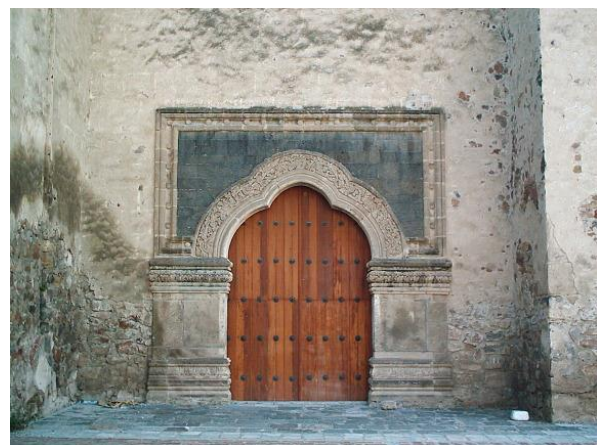


Fig. 34. Portal de Peregrinos

10. Tiene bóveda de aristas, crucero con bóveda octagonal, y presbiterio de forma cuadrangular.



Fig. 35. Bóveda de Altar Mayor



Fig. 36. Bóveda 2 en Recinto y Arco Triunfal

11. Al sur encontramos la capilla de la tercer orden, el claustro y las huertas de las cuales solo se conservan los muros y arcadas pues la techumbre se perdió debido a la falta de mantenimiento y agentes de deterioro.



Fig. 37. Vista aérea de la Fachada y Capilla de la Tercer Orden

12. Muro Lateral Sur y Espadaña



Fig. 38. Muro lateral sur y contrafuertes



Fig. 39. Escalera y Espadaña

13. Atrio



Fig. 40. Atrio ajardinado actualmente



Fig. 41. Fachada

2.4 Descripción de los elementos estructurales que constituyen el Edificio

1) Suelo

Levantándose el edificio a la falda del cerro del “Nacimiento”, compuesto por roca y tepetate, se trazo el eje central del conjunto apoyándose en el eje central oriente-poniente del trazo del Templo, se excavó al norte de dicho eje y con el material extraído se construyó una terracería del lado sur del mismo eje, compuesta por materiales producto de la excavación del cerro, el Templo esta cimentado sobre la roca madre y tepetate.

2) Cimentación

Los cimientos se hicieron en forma de prisma rectangular, aumentando (10, 20, 30 cm.) la corona con respecto al espesor del muro, en la parte interior se encuentra un escarpio invertido, también eran acomodados sin forma hasta rellenar la excavación. El conjunto del convento de Tecamachalco, está construido: En la parte norte sobre la excavación del cerro y por lo tanto los cimientos no son muy profundos (Muro norte: 1.40, Muro Sur: 1.75, Fachada: 1.75, Torre: 1.90: En la parte sur (área conventual), sobre un terraplén con el relleno producto de la excavación, por lo tanto los cimientos son más profundos, ver [10].

Fotos de la cimentación del templo

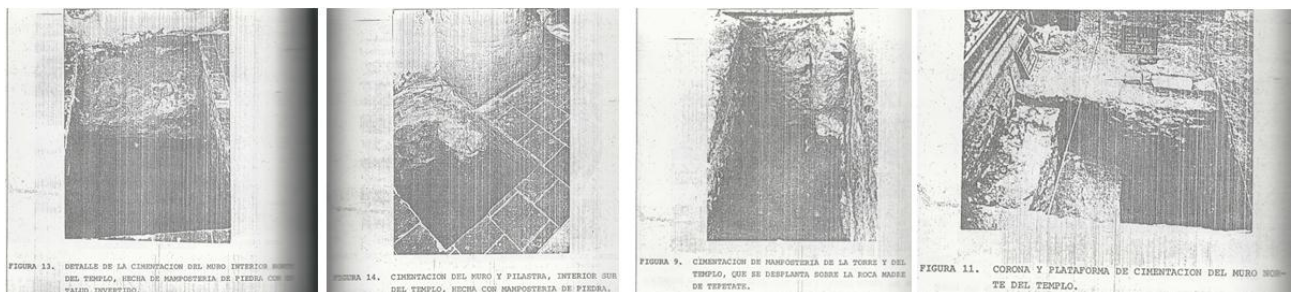


Fig. 42. Detalles de la cimentación del Templo, Fotografías de la excavación. [10]

3) Muros

Están contruidos por piedras de menor tamaño que en la cimentación, las cuales tienen labrada la cara exterior, en el interior del muro se encuentra una combinación de piedras pequeñas, pedacería de ladrillo, todas unidas con mortero de cal-arena.



Fig. 44. Muro Sur y Contrafuertes



Fig. 43. Unión de Muro Sur y Ábside Sur

4) Contrafuertes

Están contruidos al igual que los muros, por piedras de menor tamaño que en la cimentación, las cuales tienen labrada la cara exterior, en el interior del muro se encuentra una combinación de piedras pequeñas, pedacería de ladrillo, todas unidas con mortero de cal-arena.



Fig. 45. Contrafuertes Norte, y Contrafuertes Sur

5) Fachada

La fachada se construyó entre los años 1551-1557, su fachada es de estilo gótico florido; La portada es sustancialmente más gruesa en corte que los muros de la fachada reforzada. Está construida de igual manera que los muros y los contrafuertes, por piedras de menor tamaño que en la cimentación, las



Fig. 46. Fachada

cuales tienen labrada la cara exterior, en el interior del muro se encuentra una combinación de piedras pequeñas, pedacería de ladrillo, todas unidas con mortero de cal-arena. En el tercer cuarto del siglo XVI varias iglesias importantes retornaron a la fachada llana, abandonando los contrafuertes diagonales y presentando una fachada carente de formas estructurales.

6) Ábside

Está construido al igual que los muros, por piedras de menor tamaño que en la cimentación, las cuales tienen labrada la cara exterior, en el interior del muro se encuentra una combinación de piedras pequeñas, unidas con mortero de cal-arena.



Fig. 47. Ábside, Vista noreste y vista sur

7) Bóveda

Las pocas iglesias completamente abovedadas pertenecen a la segunda mitad del siglo XVI; De hecho en la Nueva España solo se conocen 15 templos de los cuales solo de cuatro se conoce la fecha exacta de construcción de la bóveda, Cholula (1549-1552), Tula (1550-1554), Tecamachalco (1551-1557) y Huejotzingo concluido en 1571).



Fig. 48. Bóveda del Templo

La clasificación tipológica de los templos cubiertos completamente con bóvedas, se basa en el peso de dichas planchas de la bóveda; En Tecamachalco la bóveda está dividida en 4 partes, son convexas en el extradós y el riñón de la bóveda que lo soporta, los tramos entre nervaduras también están hechos de ladrillo. Hay que mencionar que en Tecamachalco, los tramos entre nervaduras también están hechos de ladrillo, como se aprecia en el recorte cuadrado del aplanado de la bóveda (Fig. 48), lado superior derecho de la (Fig. 49).



Fig. 49. Recorte de aplanado en Bóveda 3



Fig. 50. Bóveda no 3

8) Nervaduras de la Bóveda

En el convento de Tecamachalco, las nervaduras son de ladrillo, esto se comprueba por que la dimensión y forma de las nervaduras coincide con la forma de los ladrillos sobrantes que fueron ocupados para completo del pretil en la azotea (Fig. 49 y Fig. 50).



Fig. 51. Ladrillo de nervadura

Probablemente construidas como aportación de resistencia y soporte de la cúpula, por los preceptos de la época; sin embargo no se han realizado pruebas in situ.



Fig. 52. Nervaduras, apoyadas en el capitel de las columnas y en los muros laterales

9) Torre Campanario

Está construida al igual que los muros y la fachada, por piedras de menor tamaño que en la cimentación, las cuales tienen labrada la cara exterior, en el interior del muro se encuentra una combinación de piedras pequeñas, unidas con mortero de cal-arena, el cuerpo 3 y cupulín es de mampostería de ladrillo.



Fig. 53. Torre, cuerpos 1, 2, y 3



Fig. 54. Torre, cuerpos 1, 2, y 3

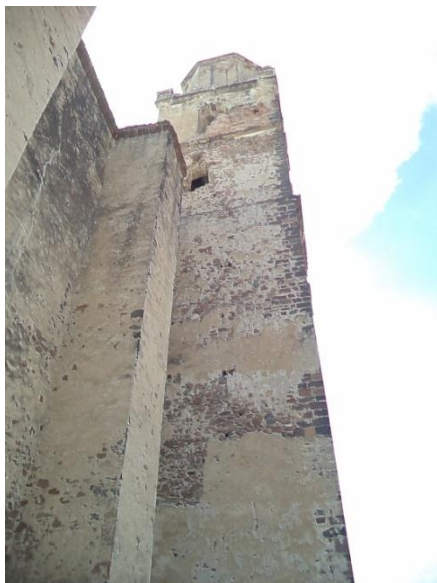


Fig. 55. Torre, lado oriente

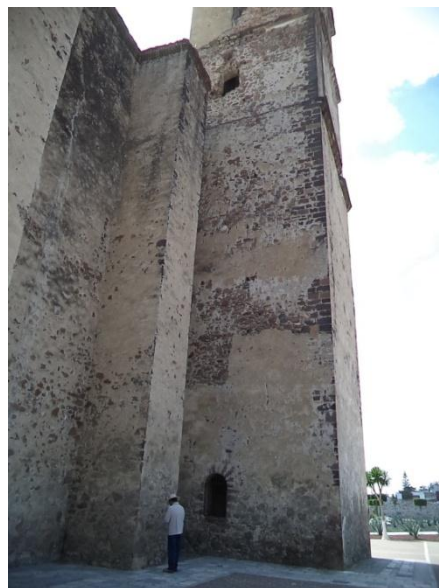


Fig. 56. Base de la Torre lado, vista oriente

10) Espadaña

Está construida con una combinación de piedras pequeñas, pedacería de ladrillo en la parte superior, unidas con mortero de cal-arena.



Fig. 57. Espadaña, vista sur



Fig. 58. Espadaña (Vista norte)

11) Columnas o Pilares

Construidas por piedras grandes, con una forma similar en la base y el capitel, se observa la carencia de galibo en el fuste de las columnas.



Fig. 59. Base de columna



Fig. 60. Fuste o Capitel, cargando los arcos y la pechina de la bóveda

12) Arcos del Claustro

Los arcos de los nichos procesionales del claustro bajo, están trazados por cinco lóbulos, la circunferencia del arco está apoyada en una curva imaginaria, compuestos cada uno por siete dovelas y la transmisión de esfuerzos es desarrollada sobre una línea



Fig. 61. Arcos en el Claustro

que sigue los centros de gravedad de cada dovela haciendo que la línea de esfuerzos no descansa directamente sobre las jambas sino sobre el muro. Las juntas de las dovelas no están trazadas al azar, puesto que concurren a tres centros sobre una línea vertical al centro del arco, lo que garantiza la estabilidad de cada una de las piezas puesto que trabajan a forma de cuñas.

13) Entrepisos

Su sistema está basado en las cargas estáticas de las vigas y estas a su vez penetrando y apoyándose en los muros, sobre ellas se encontraba colocado un entarimado, sobre éste, un relleno de tierra, un entortado de cal-arena y para terminar con un enladrillado.



Fig. 62. Vacio en apoyos de techo que se derrumbo

14) Portadas

La decoración arquitectónica del convento de Tecamachalco, es sorprendentemente homogénea y presenta la ventaja de estar fechada con exactitud, pero difiere mucho de Huejotzingo y Xochimilco.

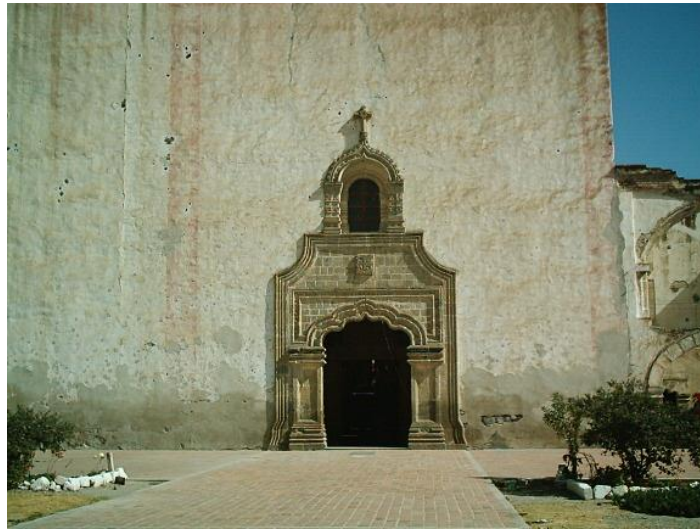


Fig. 63. Portada en Fachada



Fig. 64. Portada en Altar Mayor

2.5 Identificación de los materiales de construcción del edificio

1) Tepetate y roca madre

Se utilizó para desplantar la cimentación y en los muros secundarios, el tepetate también se apisonaba y colocaba en los pisos de los patios para darle mayor resistencia al terreno.

2) Tezontle

Utilizado en la cimentación, en muros y en implementos de bóvedas, tiene ligereza, buena adherencia y buena resistencia.



Fig. 65. Tezontle en muros y contrafuertes

3) Toba

La toba o piedra de cantera, se encuentra en columnas, pilastras, enmarcados de vanos (jambas, dinteles, platabandas), arcos, cruces, cornisas y otro tipo de molduras, se encuentra en acabado aparente, enlucido de cal y también acabado en color gris



Fig. 66. Toba en Columnas de Arco Triunfal

4) Xalnene

Se utilizaba en la construcción de muros, combinándose con el adobe, la piedra y la pedacería de tabique, se encuentra como amarre en esquinas.



Fig. 67. Xalnene en esquinas de torre campanario



Fig. 68. Xalnene en esquinas de torre campanario

5) Piedra Braza

Utilizada en la cimentación y en el relleno de muros, unida con mortero de cal y polvo de piedra

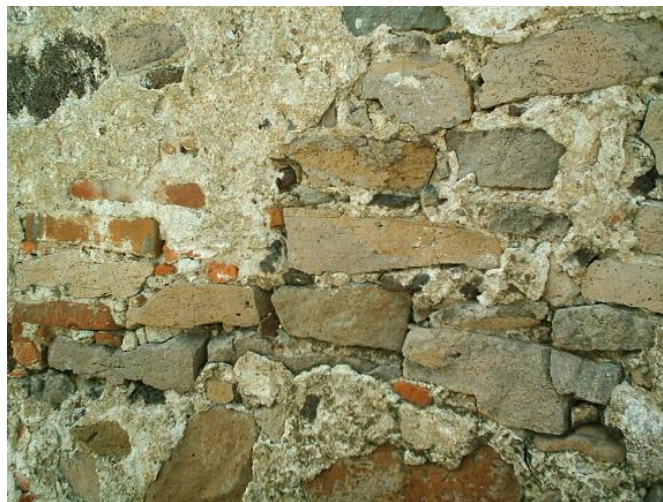


Fig. 69. Piedra Braza en Muros

6) Madera

Empleada en entrepisos, cubiertas, pisos, gualdras, alacenas, canes, artesonados, entramados, tapancos, duelas, emparrillados, pilotes, etc. Debido a sus propiedades geométricas con la madera se podían salvar claros considerables aunque en algunas ocasiones eran colocadas en el sentido largo del claro y no en el sentido corto como lo hacemos en la actualidad, también se encuentra en forma de cuñas que probablemente se utilizaron para plomear las piedras que forman las columnas.



Fig. 70. Viga de Madera para soporte de campana

7) Ladrillo

Utilizado en arcos, bóvedas, cerramientos de vanos, arcos de paso, arcos de carga, drenajes, pisos, molduras, cornisas, impostas, barandas, balaustres, mechinales de los muros y recubrimientos de azotea, en el pretil se observan ladrillos sobrantes de los arcos que corresponden con su forma de moldura.



Fig. 72. Tabique en pretil con la forma de la moldura en cornisa



Fig. 71. Tabique en Pretil con la forma de la moldura de los arcos y nervaduras del recinto

8) Yeso

Utilizado para fabricar yeserías policromas de influencia Sevillana.

9) Cal apagada

Utilizada en la elaboración de mortero y pinturas.

10) Mortero

Usado para unir la mampostería y la sillería, también para recubrir la fabrica mediante un aplanado o revoco. Compuesto por cal apagada y baba de nopal macho, tiene buenas propiedades para resistir la intemperie y la humedad además de tener buena plasticidad, que lo hace ser muy manejable y consistente al momento de trabajarse.



Fig. 73. Mortero en juntas de piedra y aplanados

Capítulo III

CONSTRUCCION DEL MODELO ANALITICO

3.1 Descripción del Modelo Analítico (Modelo Representativo)

El modelo a estudiar contiene solo el Templo, que es el cuerpo principal del "Ex-convento Franciscano", excluyendo los elementos correspondientes a las demás áreas del conjunto (capilla de la tercer orden, claustro y arcadas norte).

Es el resultado de un proceso de retroalimentación de la información obtenida en: (1) Investigación histórica, técnica y Marco Teórico. (2) Estudio de su geometría, (3) Construcción virtual del modelo en 3D, (4) Condiciones de frontera. (5) Método de aplicación (MEF) (sólidos de 8 nodos), (6) Calibración con la medición de vibración ambiental. (7) Propiedades mecánicas, de acuerdo con la observación física, la identificación y ubicación de los materiales encontrados y los valores finales en la calibración, (8) Análisis del modelo, cálculo de sus Formas Modales, no considerando el agrietamiento de los elementos, (9) Resultados y prospectivas.

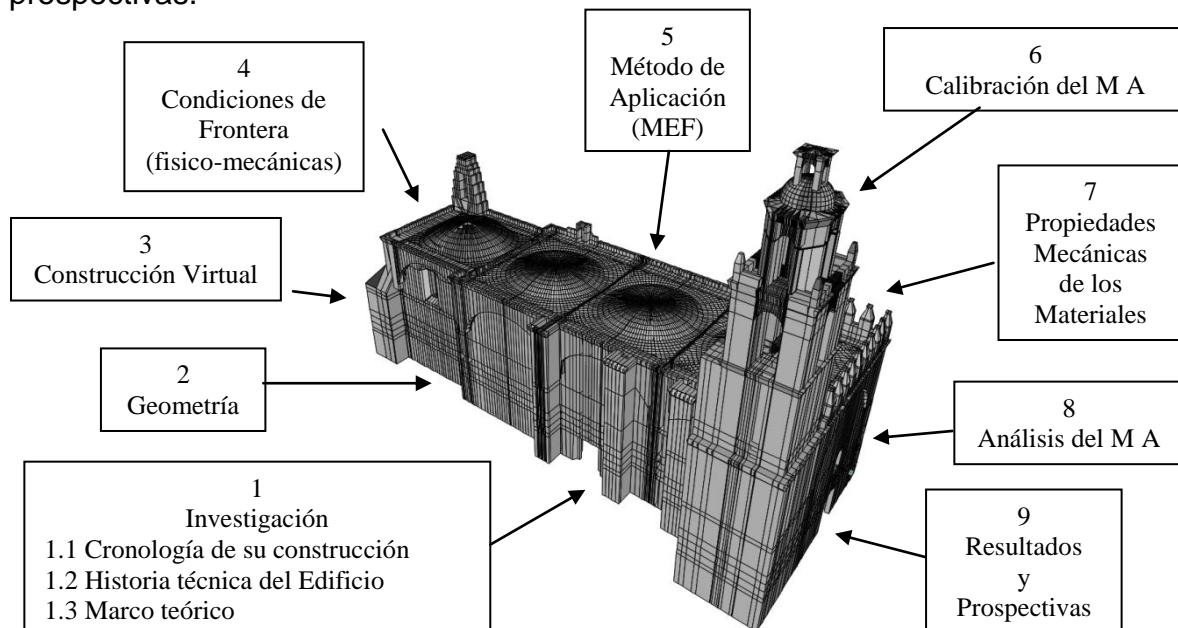


Fig. 74. Modelo Analítico (Metodología de construcción y estudio)

3.2 Herramientas de aplicación en la creación y análisis del Modelo Analítico

Una vez obtenida la geometría del edificio, se realiza el proceso de modelado utilizando el siguiente software:

1. Un programa de dibujo CAD (Autocad 2000)

Se crea la geometría inicial (planta arquitectónica, cortes transversales, cortes longitudinales, isométricos y detalles necesarios para representar la geometría del edificio. Se construye una planta arquitectónica general utilizando líneas, se extruye de líneas a áreas y de áreas a sólidos con la forma requerida, estos elementos sólidos se explotan, el archivo se guarda con extensión dxf.

2. Un programa de Pre-proceso (GID)

El archivo proveniente de Autocad en extensión dxf, se importa, se discretiza inicialmente con un mallado grueso para identificar los posibles Macroelementos y posteriormente se realiza un mallado más fino de acuerdo con nuestros requerimientos, el archivo se guarda con extensión dxf.

3. Un programa de Apoyo (DECTRA) y (GEOPSY)

Para leer y procesar los datos obtenidos de la medición ambiental, la información para la calibración del Modelo Representativo, la información necesaria del sismo a emplear para el programa de análisis SAP 2000.

4. Un programa de Análisis, Proceso y Pos proceso (SAP 2000)

En este programa realizamos los cálculos del proceso del análisis estructural que desarrollamos en este estudio, importamos el archivo discretizado en GID que tiene una extensión dxf, para realizar el análisis con elemento finito podemos elegir tres tipos de elemento (barra, placa Shell o solido), en este caso utilizamos sólidos tetraedro de 8 nudos, asignamos las propiedades mecánicas de los materiales, establecemos las condiciones de frontera y aplicamos la información para el escenario sísmico a estudiar.

En el caso de SAP 2000, es un programa de (Pre-Proceso, Proceso y Pos-Proceso), con la capacidad y herramientas necesarias para construir directamente el Modelo Analítico, Procesarlo y Analizar la información.

5. Un programa de Pos-proceso (SAP 2000 ó GID)

Aquí se observa y se interpretan los datos obtenidos, los resultados pueden verse en 3D y en una realidad virtual dinámica, podemos observar claramente los esfuerzos tanto del edificio en conjunto como también de cada uno de sus macro-elementos, y en los puntos de interés obtener el valor de los desplazamientos, aceleraciones, velocidades, frecuencias y formas modales. Además los resultados obtenidos pueden ser observados en tablas, diagramas y resultados gráficos dinámicos para una mejor comprensión del caso.

3.3 Construcción del Modelo Analítico (Modelo Representativo)

El Modelo Analítico, se construye virtualmente con dos procedimientos:

- A) Indirecto: Preproceso (Autocad)-Discretizando (Gid)
 - Proceso Analizando (SAP 2000)
 - Posproceso (SAP 2000)

- B) Directo: Construirlo y analizarlo directamente en SAP 2000

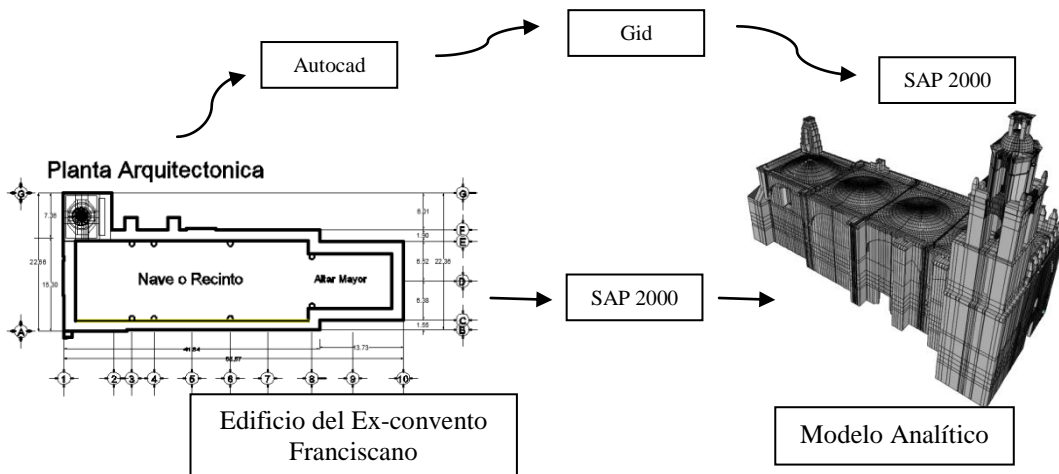


Fig. 75. Esquema de Flujo de construcción del Modelo Analítico

Definida la sección a estudiar y contando con la medición y obtención de la geometría del edificio, se construye directamente en SAP2000 v.16, aplicando el método del elemento finito.

Para la construcción del Modelo Analítico, se requieren dos etapas de observación: Identificación de los Macroelementos y la discretización del Modelo Analítico.

3.3.1 Identificación de Macroelementos

Es la primera etapa de observación del edificio, aquí se define el alcance físico del estudio, determinando las condiciones de frontera, discretizando el Modelo Analítico con una malla gruesa, y observando el comportamiento dinámico para identificar los Macroelementos de la estructura de acuerdo con las diferencias de su comportamiento modal [Brencich y Lagomarsino, 1998]. Las características constructivas de los edificios históricos, tienen la particularidad de tener un espesor considerable además de que sus elementos estructurales (macroelementos) tienen un cambio de dirección y posición, y de contar entre ellos con una unión no suficientemente estable, esto los lleva a presentar movimientos y desplazamientos diferentes entre sí, permitiendo identificarlos.

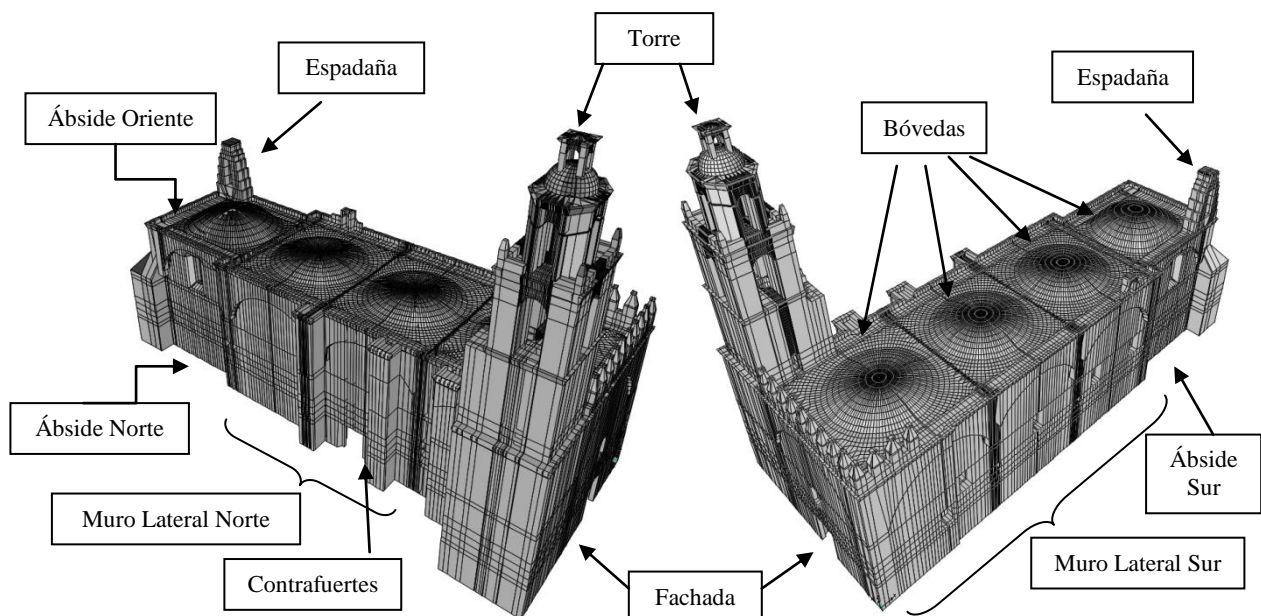


Fig. 76. Modelo Analítico con identificación de Macro-elementos

3.3.2 Análisis Discretizado

Esta etapa considera un mallado del modelo y a su vez un mallado de los Macroelementos, el tamaño de la malla depende del grado de detalle requerido para el análisis, además del tipo de elemento finito utilizado de acuerdo al método del elemento finito, estos elementos pueden ser: sólidos, elementos shell y barras.

En el caso del Edificio del Ex-convento Franciscano de Tecamachalco, observamos que el espesor y la geometría de las bóvedas varía considerablemente, comparando el punto de arranque en la terminación de las columnas con el espesor de la misma en la cima de la bóveda, por lo que elegimos trabajar con elementos sólidos (tetraedros de 8 nudos), aun considerando que utilizar elementos sólidos requiere una mayor demanda de tiempo y herramientas computacionales, buscamos obtener mejores resultados en la respuesta del comportamiento dinámico de la estructura.

Obteniendo finalmente un total de: 41448 elementos sólidos y 63,903 nodos.

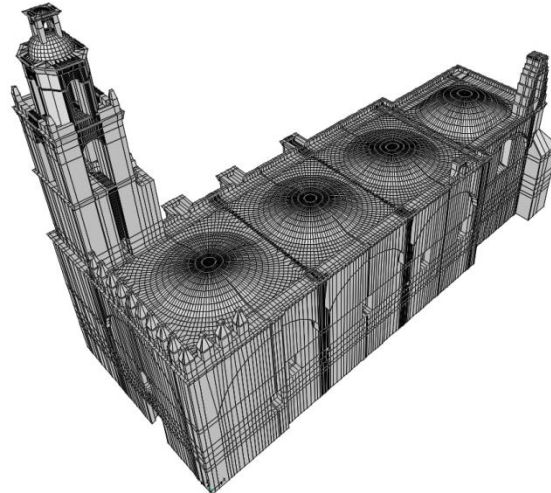
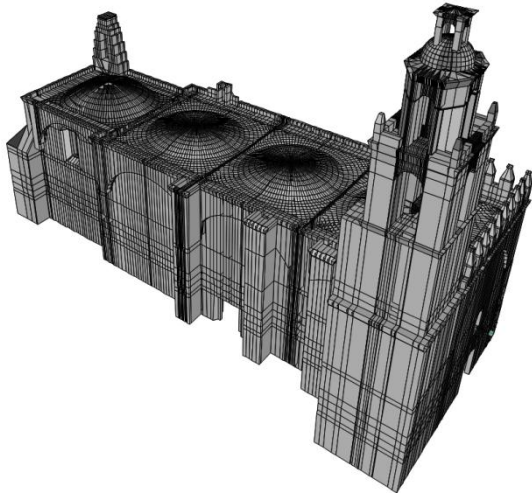


Fig. 77. Modelo Discretizado (Perspectiva Norte) Fig. 78. Modelo Discretizado (Perspectiva Sur)

Una vez construido en 3D el Modelo Analítico, en el programa SAP 2000, tenemos:

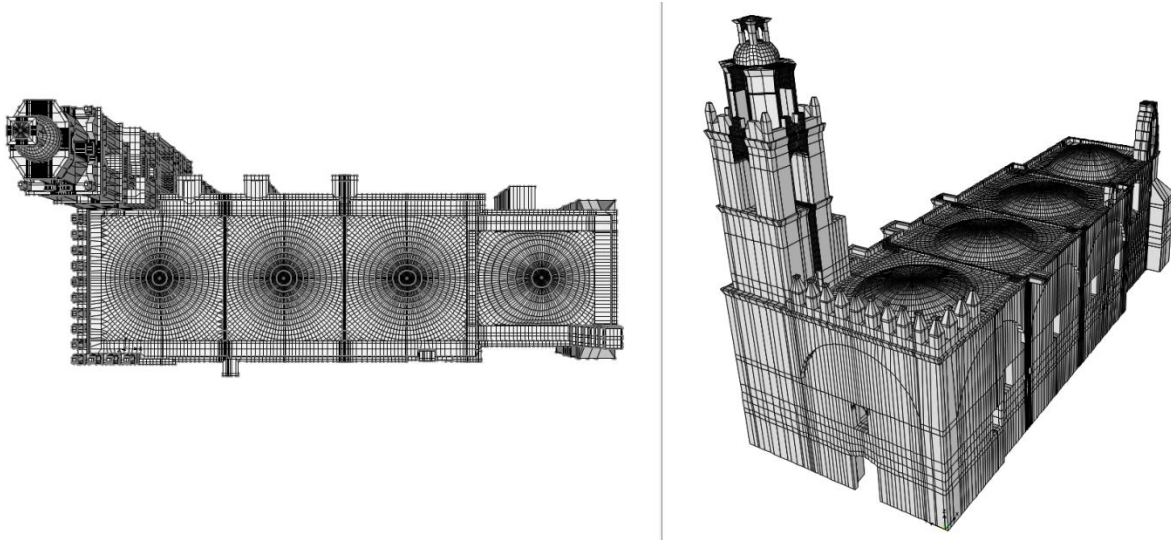


Fig. 79. Perspectivas de Planta y Frontal-sur del Modelo Analítico

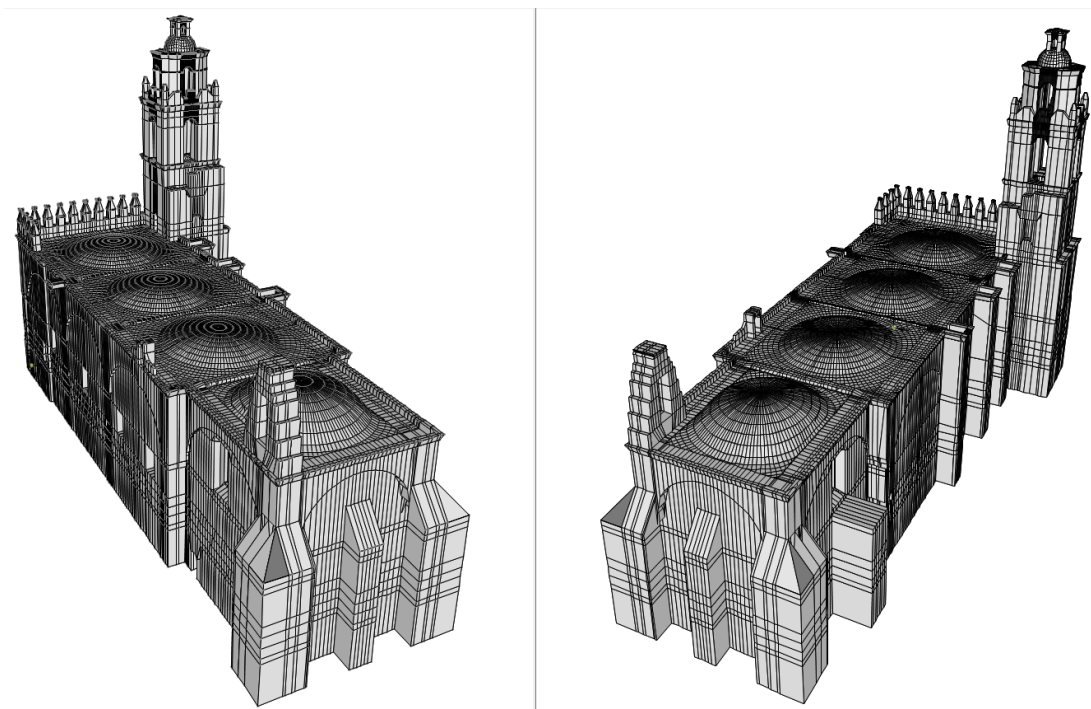


Fig. 80. Perspectivas Posteriores del Modelo Analítico

3.4. Condiciones de frontera del Modelo Analítico

Una vez construido el Modelo Analítico en 3D, determinamos las condiciones de frontera, estas se definen, como el límite físico y mecánico que considera el modelo representativo, para este caso, el alcance se limita al estudio del edificio principal (Templo) y las condiciones de frontera son: el desplante de la cimentación y cómo consideramos las restricciones de la misma, así también la continuidad con elementos estructurales no considerados dentro del estudio, como son: bardas, muros, contrafuertes lado sur y techos lado sur, no se considera interacción suelo estructura.

a) Condiciones de Frontera para la cimentación.

Apoyándose en los resultados publicados de los trabajos de exploración realizados en 1980, ver en [10], en donde se menciona, que los cimientos del templo están asentados sobre una capa firme de roca y desplantados a una profundidad de: (Muro norte:1.40 m., Muro Sur: 1.75 m., Fachada: 1.75 m., Torre:1.90 m.), además del recorrido de inspección física del edificio, observando que la estructura no presenta asentamientos, esto confirma que esta desplantado sobre roca sana y que no se presentan hundimientos en la cimentación. Por lo tanto en los nodos correspondientes a la cimentación del Modelo Analítico, se restringen los desplazamientos en las tres direcciones; X, Y, Z, se dejan libres los giros en estas tres direcciones respectivamente.

b) Condiciones de Frontera para las bardas y muros colindantes.

En la continuidad con los muros, techos y elementos estructurales vecinos del edificio, los cuales no se consideran en este estudio, y que si participan en el comportamiento estructural del edificio, se realizan dos pruebas: 1) solo se restringe el desplazamiento de los nodos correspondientes del modelo analítico en la dirección de dichos elementos, 2) Adicionando un elemento mas según corresponda, con dimensiones de acuerdo a una parte proporcional del mismo, según su grado de influencia en la participación modal de la estructura.

3.5 Calibración del Modelo Analítico

En el análisis del Modelo Analítico de la estructura, existen varias interrogantes e incertidumbres a despejar, sobre todo el estado actual de sus materiales y de las propiedades mecánicas de los mismos, esto se refleja en como considerar la no uniformidad en cuanto al acomodo de la mampostería, la irregularidad de la mano de obra en su colocación, el desconocimiento del estado actual de degradación del material, el valor de las propiedades mecánicas del material en la actualidad, ya que el edificio ha estado expuesto a diversas condiciones físicas y mecánicas que degradan las propiedades originales de cuando fue construido y de que para este estudio no se realizaron pruebas en sitio de los materiales, estas pruebas, si bien serian muy interesantes en cuanto a sus resultados, también serian muy agresivas a la estructura. Por lo tanto, el análisis del comportamiento estructural del edificio, requiere una técnica no destructiva como la medición de la vibración ambiental del edificio, para con esta información calibrar el Modelo Analítico y determinar sus propiedades mecánicas de acuerdo a sus formas modales.

Este procedimiento de verificación de las propiedades mecánicas actuales y de su comportamiento dinámico, es el estudio de la vibración ambiental del Edificio, y consiste en elegir estratégicamente puntos de estudio, para este trabajo se eligen 13 puntos de análisis de acuerdo con el recorrido de reconocimiento del edificio y de la observación del primer Modelo Analítico construido, se plantea una estrategia de levantamiento de señales, el equipo a utilizar y el tiempo necesario para cada lectura, sobre estos puntos se ubica un equipo de medición (acelerómetro triaxial), tomando lecturas en cada estación durante 10 minutos, se procesa la información, obteniendo el periodo y frecuencia de los puntos de estudio y con estos resultados se calibran las propiedades mecánicas de los materiales, ajustando el valor del modulo de elasticidad del material hasta que el periodo del modelo coincida con el periodo obtenido en las mediciones, finalmente obteniendo las propiedades finales de los materiales del Modelo Analítico.

3.5.1 Selección de Puntos de estudio del Modelo Analítico

Asignados los materiales iniciales al Modelo Analítico, utilizando el programa SAP 2000, se realiza una primera corrida, observando e identificando las zonas con esfuerzos y desplazamientos importantes, se identifican, ordenan, numeran y se define la ubicación de cada punto de estudio, manejando coordenadas globales de la estructura y determinando la estrategia de levantamiento de la medición.

Bitácora de Levantamiento de Vibración Ambiental					
Punto	No. Nodo	Coordenadas Globales			Localización
		X	Y	Z	
P-01	77542	3.04	18.10	31.49	Torre Campanario Cuerpo III (centro de base)
P-02	76088	3.04	19.00	25.37	Torre Campanario Cuerpo II (centro de base)
P-03	73835	4.04	14.95	17.90	Torre Campanario Cuerpo I
P-04	30707	8.39	8.40	17.90	Bóveda 4 (centro transversal en azotea)
P-05	7751	21.2	8.40	17.90	Bóveda 3 (centro transversal en azotea)
P-06	11460	33.917	8.40	17.90	Bóveda 2 (centro transversal en azotea)
P-07	15302	47.52	8.40	19.15	Bóveda 1 (centro transversal en azotea)
P-08	20409	53.64	14.39	16.70	Ábside (esquina Ábside Norte y Ábside Oriente)
P-09	22695	27.45	15.52	16.70	Muro Lateral Norte (centro longitudinal en azotea)
P-10	3972	2.00	0.99	16.70	Fachada y Muro Lateral Sur (esquina en azotea)
P-11	A	-32.00	8.40	0.00	Atrio de la Iglesia (En el eje central, a 32 m. De la entrada principal)
P-12	B	-0.20	14.95	0.00	Torre Campanario Cuerpo III (base de la torre)
P-13	C	27.45	8.40	0.00	Recinto del Templo (Eje central, bajo el arco 2)

Tabla 3. Bitácora de levantamiento de vibración ambiental del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"

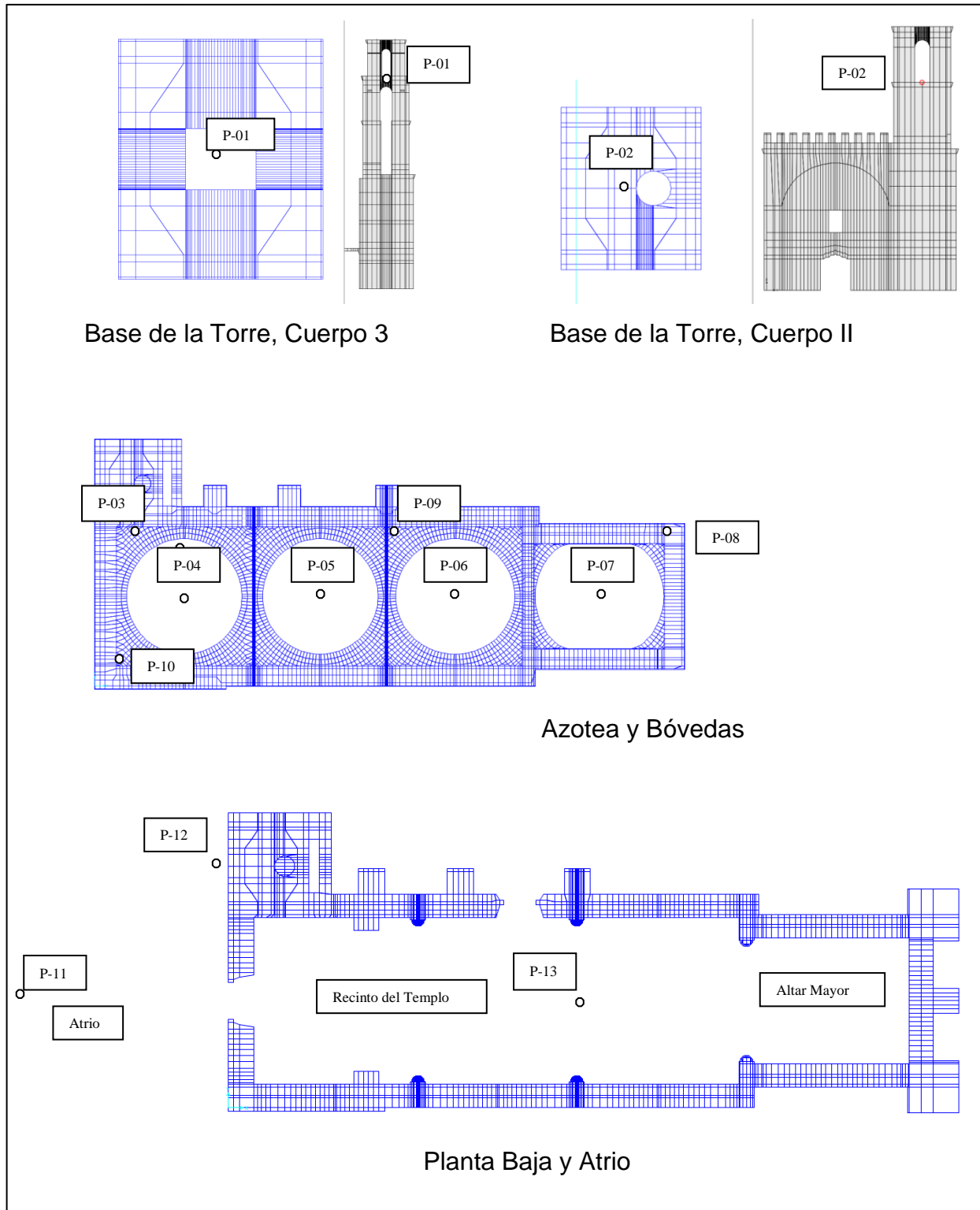


Fig. 81. Puntos de medición de vibración ambiental en el Modelo Analítico

3.5.2 Medición de vibración ambiental del Edificio

La medición de la vibración ambiental se realiza de acuerdo a una estrategia de levantamiento y con un orden establecido, basado a las necesidades del análisis y a la disponibilidad del equipo.

El equipo utilizado es un acelerómetro triaxial BASALT marca KINEMATRICS, GPS para posicionar cada punto y una LAP, se ubica el acelerómetro alineado con la longitud del edificio y orientado en dirección este-oeste, el tiempo de medición en cada estación es de 10 minutos, teniendo la desventaja de contar con un solo equipo, que los puntos que se miden son en diferente tiempo.



Fig. 82. Punto P-01 Medición de vibración ambiental en el centro de la base del cuerpo 3 de la Torre Campanario



Fig. 83. Punto P-02 Medición de vibración ambiental en el centro de la base del cuerpo 2 de la Torre Campanario



Fig. 84. Punto P-03 Medición de vibración ambiental en la base del cuerpo 1 de la Torre Campanario y sobre el muro lateral norte



Fig. 85. Punto P-04 Medición de vibración ambiental sobre la Bóveda 4 del Recinto



Fig. 86. Punto P-05 Medición de vibración ambiental sobre la Bóveda 3 del Recinto



Fig. 87. Punto P-06 Medición de vibración ambiental sobre la Bóveda 2 del Recinto



Fig. 88. Punto P-07 Medición de vibración ambiental sobre la Bóveda del altar mayor



Fig. 89. Punto P-08 Medición de vibración ambiental en la azotea y sobre la esquina del Ábside Norte y el Ábside Oriente



Fig. 90. Punto P-09 Medición de vibración ambiental en la azotea y centro del Edificio, sobre el Muro Lateral Norte



Fig. 91. Punto P-10 Medición de vibración ambiental en la Azotea y sobre la esquina de la Fachada y el Muro Lateral Sur



Fig. 92. Punto P-11 Medición de vibración ambiental en el Atrio y sobre el Eje central del Edificio



Fig. 93. Punto P-12 Medición de vibración ambiental en la Base de la Torre

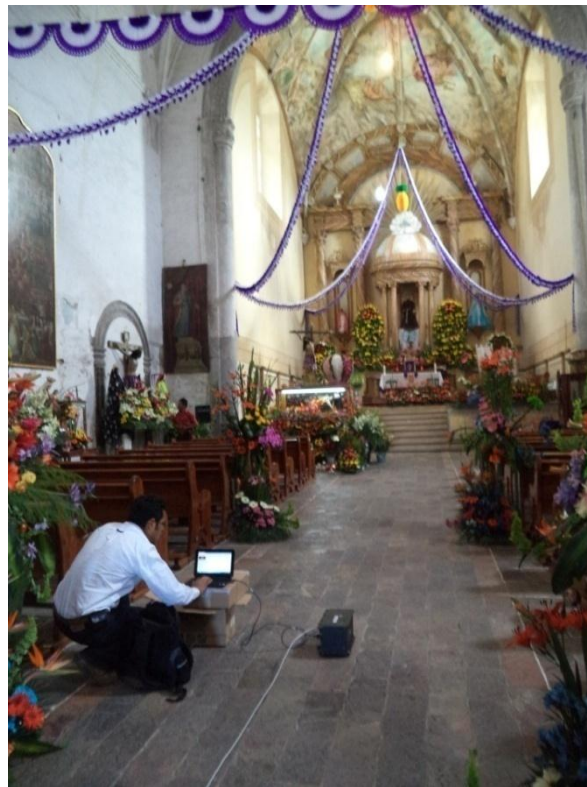
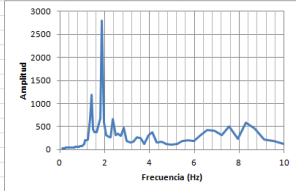
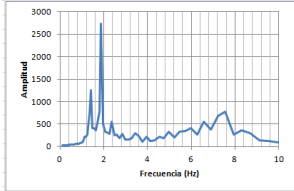
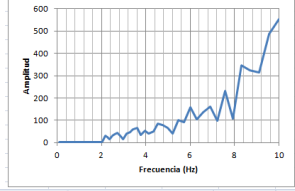
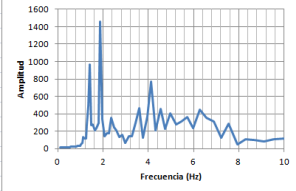
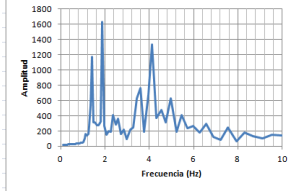
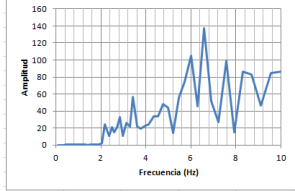
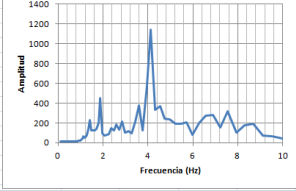
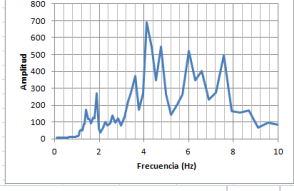
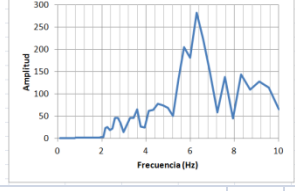
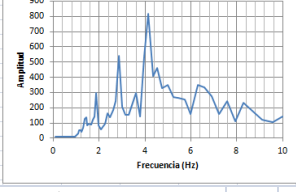


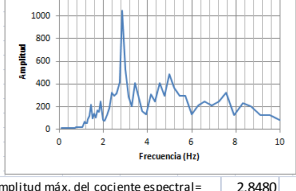


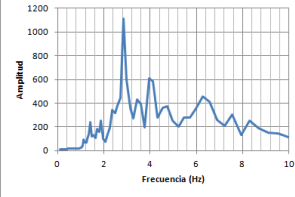
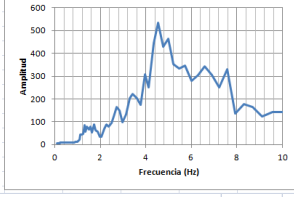
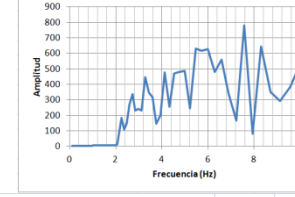
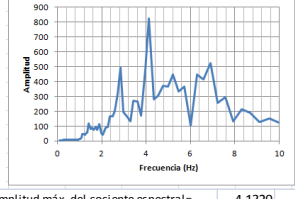

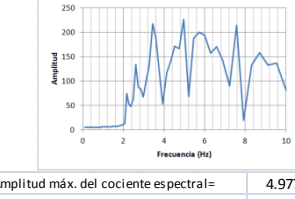
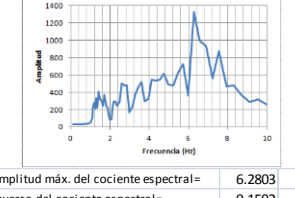
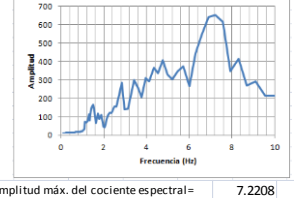
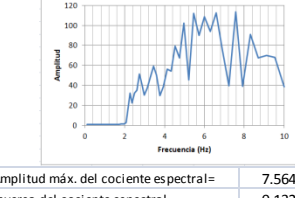
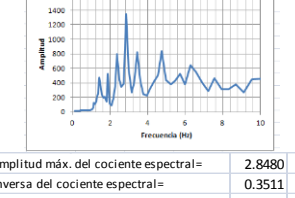
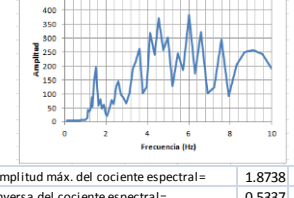
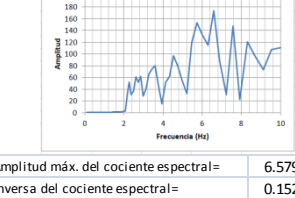
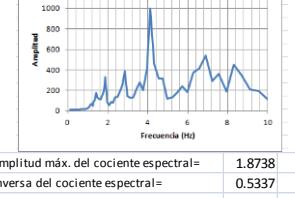
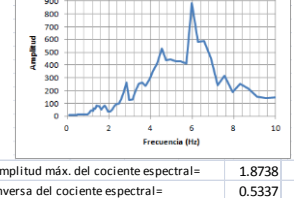

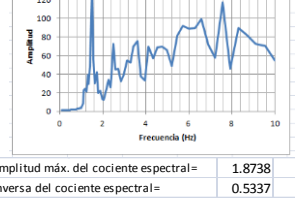
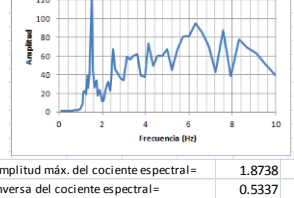
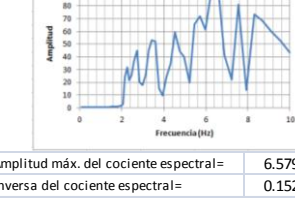


Fig. 94. Punto P-13 Medición de vibración ambiental al centro del Edificio y en el interior del Templo

3.5.3 Procesamiento de datos de la medición de vibración ambiental

Gráficas de periodos y frecuencias de la medición de vibración ambiental en los puntos de estudio																					
Punto	Dirección transversal (N-S)	Dirección Longitudinal (E-W)	Dirección Vertical (Z)																		
P-01	 <table border="1"> <tr> <td>Amplitud máx. del cociente espectral=</td> <td>1.8738</td> </tr> <tr> <td>Inversa del cociente espectral=</td> <td>0.5337</td> </tr> <tr> <td>Periodo=</td> <td>0.5337 seg.</td> </tr> </table>	Amplitud máx. del cociente espectral=	1.8738	Inversa del cociente espectral=	0.5337	Periodo=	0.5337 seg.	 <table border="1"> <tr> <td>Amplitud máx. del cociente espectral=</td> <td>1.8738</td> </tr> <tr> <td>Inversa del cociente espectral=</td> <td>0.5337</td> </tr> <tr> <td>Periodo=</td> <td>0.5337 seg.</td> </tr> </table>	Amplitud máx. del cociente espectral=	1.8738	Inversa del cociente espectral=	0.5337	Periodo=	0.5337 seg.	 <table border="1"> <tr> <td>Amplitud máx. del cociente espectral=</td> <td>10.0000</td> </tr> <tr> <td>Inversa del cociente espectral=</td> <td>0.1000</td> </tr> <tr> <td>Periodo=</td> <td>0.1000 seg.</td> </tr> </table>	Amplitud máx. del cociente espectral=	10.0000	Inversa del cociente espectral=	0.1000	Periodo=	0.1000 seg.
Amplitud máx. del cociente espectral=	1.8738																				
Inversa del cociente espectral=	0.5337																				
Periodo=	0.5337 seg.																				
Amplitud máx. del cociente espectral=	1.8738																				
Inversa del cociente espectral=	0.5337																				
Periodo=	0.5337 seg.																				
Amplitud máx. del cociente espectral=	10.0000																				
Inversa del cociente espectral=	0.1000																				
Periodo=	0.1000 seg.																				
P-02	 <table border="1"> <tr> <td>Amplitud máx. del cociente espectral=</td> <td>1.8738</td> </tr> <tr> <td>Inversa del cociente espectral=</td> <td>0.5337</td> </tr> <tr> <td>Periodo=</td> <td>0.5337 seg.</td> </tr> </table>	Amplitud máx. del cociente espectral=	1.8738	Inversa del cociente espectral=	0.5337	Periodo=	0.5337 seg.	 <table border="1"> <tr> <td>Amplitud máx. del cociente espectral=</td> <td>1.8738</td> </tr> <tr> <td>Inversa del cociente espectral=</td> <td>0.5337</td> </tr> <tr> <td>Periodo=</td> <td>0.5337 seg.</td> </tr> </table>	Amplitud máx. del cociente espectral=	1.8738	Inversa del cociente espectral=	0.5337	Periodo=	0.5337 seg.	 <table border="1"> <tr> <td>Amplitud máx. del cociente espectral=</td> <td>6.5793</td> </tr> <tr> <td>Inversa del cociente espectral=</td> <td>0.1520</td> </tr> <tr> <td>Periodo=</td> <td>0.1520 seg.</td> </tr> </table>	Amplitud máx. del cociente espectral=	6.5793	Inversa del cociente espectral=	0.1520	Periodo=	0.1520 seg.
Amplitud máx. del cociente espectral=	1.8738																				
Inversa del cociente espectral=	0.5337																				
Periodo=	0.5337 seg.																				
Amplitud máx. del cociente espectral=	1.8738																				
Inversa del cociente espectral=	0.5337																				
Periodo=	0.5337 seg.																				
Amplitud máx. del cociente espectral=	6.5793																				
Inversa del cociente espectral=	0.1520																				
Periodo=	0.1520 seg.																				
P-03	 <table border="1"> <tr> <td>Amplitud máx. del cociente espectral=</td> <td>4.1320</td> </tr> <tr> <td>Inversa del cociente espectral=</td> <td>0.2420</td> </tr> <tr> <td>Periodo=</td> <td>0.2420 seg.</td> </tr> </table>	Amplitud máx. del cociente espectral=	4.1320	Inversa del cociente espectral=	0.2420	Periodo=	0.2420 seg.	 <table border="1"> <tr> <td>Amplitud máx. del cociente espectral=</td> <td>4.1320</td> </tr> <tr> <td>Inversa del cociente espectral=</td> <td>0.2420</td> </tr> <tr> <td>Periodo=</td> <td>0.2420 seg.</td> </tr> </table>	Amplitud máx. del cociente espectral=	4.1320	Inversa del cociente espectral=	0.2420	Periodo=	0.2420 seg.	 <table border="1"> <tr> <td>Amplitud máx. del cociente espectral=</td> <td>6.2803</td> </tr> <tr> <td>Inversa del cociente espectral=</td> <td>0.1592</td> </tr> <tr> <td>Periodo=</td> <td>0.1592 seg.</td> </tr> </table>	Amplitud máx. del cociente espectral=	6.2803	Inversa del cociente espectral=	0.1592	Periodo=	0.1592 seg.
Amplitud máx. del cociente espectral=	4.1320																				
Inversa del cociente espectral=	0.2420																				
Periodo=	0.2420 seg.																				
Amplitud máx. del cociente espectral=	4.1320																				
Inversa del cociente espectral=	0.2420																				
Periodo=	0.2420 seg.																				
Amplitud máx. del cociente espectral=	6.2803																				
Inversa del cociente espectral=	0.1592																				
Periodo=	0.1592 seg.																				
P-04	 <table border="1"> <tr> <td>Amplitud máx. del cociente espectral=</td> <td>4.1320</td> </tr> <tr> <td>Inversa del cociente espectral=</td> <td>0.2420</td> </tr> <tr> <td>Periodo=</td> <td>0.2420 seg.</td> </tr> </table>	Amplitud máx. del cociente espectral=	4.1320	Inversa del cociente espectral=	0.2420	Periodo=	0.2420 seg.	 <table border="1"> <tr> <td>Amplitud máx. del cociente espectral=</td> <td>5.9948</td> </tr> <tr> <td>Inversa del cociente espectral=</td> <td>0.1668</td> </tr> <tr> <td>Periodo=</td> <td>0.1668 seg.</td> </tr> </table>	Amplitud máx. del cociente espectral=	5.9948	Inversa del cociente espectral=	0.1668	Periodo=	0.1668 seg.	 <table border="1"> <tr> <td>Amplitud máx. del cociente espectral=</td> <td>5.9948</td> </tr> <tr> <td>Inversa del cociente espectral=</td> <td>0.1668</td> </tr> <tr> <td>Periodo=</td> <td>0.1668 seg.</td> </tr> </table>	Amplitud máx. del cociente espectral=	5.9948	Inversa del cociente espectral=	0.1668	Periodo=	0.1668 seg.
Amplitud máx. del cociente espectral=	4.1320																				
Inversa del cociente espectral=	0.2420																				
Periodo=	0.2420 seg.																				
Amplitud máx. del cociente espectral=	5.9948																				
Inversa del cociente espectral=	0.1668																				
Periodo=	0.1668 seg.																				
Amplitud máx. del cociente espectral=	5.9948																				
Inversa del cociente espectral=	0.1668																				
Periodo=	0.1668 seg.																				
P-05	 <table border="1"> <tr> <td>Amplitud máx. del cociente espectral=</td> <td>2.8480</td> </tr> <tr> <td>Inversa del cociente espectral=</td> <td>0.3511</td> </tr> <tr> <td>Periodo=</td> <td>0.3511 seg.</td> </tr> </table>	Amplitud máx. del cociente espectral=	2.8480	Inversa del cociente espectral=	0.3511	Periodo=	0.3511 seg.	 <table border="1"> <tr> <td>Amplitud máx. del cociente espectral=</td> <td>5.9948</td> </tr> <tr> <td>Inversa del cociente espectral=</td> <td>0.1668</td> </tr> <tr> <td>Periodo=</td> <td>0.1668 seg.</td> </tr> </table>	Amplitud máx. del cociente espectral=	5.9948	Inversa del cociente espectral=	0.1668	Periodo=	0.1668 seg.	 <table border="1"> <tr> <td>Amplitud máx. del cociente espectral=</td> <td>4.7508</td> </tr> <tr> <td>Inversa del cociente espectral=</td> <td>0.2105</td> </tr> <tr> <td>Periodo=</td> <td>0.2105 seg.</td> </tr> </table>	Amplitud máx. del cociente espectral=	4.7508	Inversa del cociente espectral=	0.2105	Periodo=	0.2105 seg.
Amplitud máx. del cociente espectral=	2.8480																				
Inversa del cociente espectral=	0.3511																				
Periodo=	0.3511 seg.																				
Amplitud máx. del cociente espectral=	5.9948																				
Inversa del cociente espectral=	0.1668																				
Periodo=	0.1668 seg.																				
Amplitud máx. del cociente espectral=	4.7508																				
Inversa del cociente espectral=	0.2105																				
Periodo=	0.2105 seg.																				

P-06	 Amplitud máx. del cociente espectral= 2.8480 Inversa del cociente espectral= 0.3511 Periodo= 0.3511 seg.	 Amplitud máx. del cociente espectral= 4.5349 Inversa del cociente espectral= 0.2205 Periodo= 0.2205 seg.	 Amplitud máx. del cociente espectral= 7.5646 Inversa del cociente espectral= 0.1322 Periodo= 0.1322 seg.
P-07	 Amplitud máx. del cociente espectral= 4.1320 Inversa del cociente espectral= 0.2420 Periodo= 0.2420 seg.	 Amplitud máx. del cociente espectral= 7.2208 Inversa del cociente espectral= 0.1385 Periodo= 0.1385 seg.	 Amplitud máx. del cociente espectral= 4.9770 Inversa del cociente espectral= 0.2009 Periodo= 0.2009 seg.
P-08	 Amplitud máx. del cociente espectral= 6.2803 Inversa del cociente espectral= 0.1592 Periodo= 0.1592 seg.	 Amplitud máx. del cociente espectral= 7.2208 Inversa del cociente espectral= 0.1385 Periodo= 0.1385 seg.	 Amplitud máx. del cociente espectral= 7.5646 Inversa del cociente espectral= 0.1322 Periodo= 0.1322 seg.
P-09	 Amplitud máx. del cociente espectral= 2.8480 Inversa del cociente espectral= 0.3511 Periodo= 0.3511 seg.	 Amplitud máx. del cociente espectral= 1.8738 Inversa del cociente espectral= 0.5337 Periodo= 0.5337 seg.	 Amplitud máx. del cociente espectral= 6.5793 Inversa del cociente espectral= 0.1520 Periodo= 0.1520 seg.
P-10	 Amplitud máx. del cociente espectral= 1.8738 Inversa del cociente espectral= 0.5337 Periodo= 0.5337 seg.	 Amplitud máx. del cociente espectral= 1.8738 Inversa del cociente espectral= 0.5337 Periodo= 0.5337 seg.	 Amplitud máx. del cociente espectral= 10.0000 Inversa del cociente espectral= 0.1000 Periodo= 0.1000 seg.
P-11	 Amplitud máx. del cociente espectral= 1.8738 Inversa del cociente espectral= 0.5337 Periodo= 0.5337 seg.	 Amplitud máx. del cociente espectral= 1.8738 Inversa del cociente espectral= 0.5337 Periodo= 0.5337 seg.	 Amplitud máx. del cociente espectral= 6.5793 Inversa del cociente espectral= 0.1520 Periodo= 0.1520 seg.

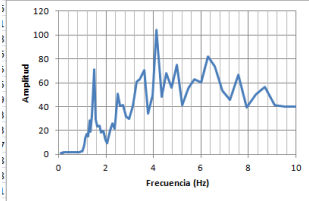
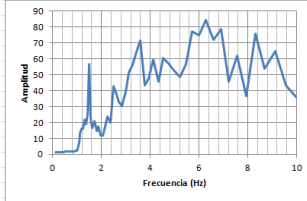
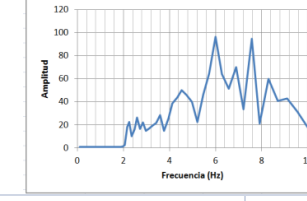
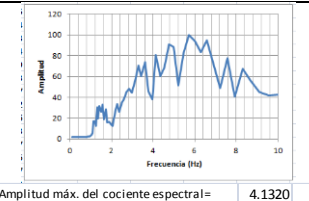
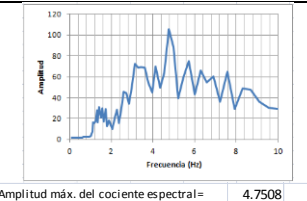
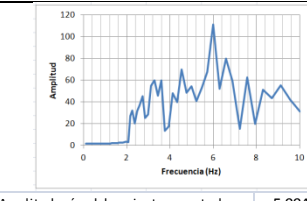
P-12	 <table border="1" data-bbox="316 430 641 493"> <tr> <td>Amplitud máx. del cociente espectral=</td> <td>4.1320</td> </tr> <tr> <td>Inversa del cociente espectral=</td> <td>0.2420</td> </tr> <tr> <td>Periodo=</td> <td>0.2420 seg.</td> </tr> </table>	Amplitud máx. del cociente espectral=	4.1320	Inversa del cociente espectral=	0.2420	Periodo=	0.2420 seg.	 <table border="1" data-bbox="673 430 998 493"> <tr> <td>Amplitud máx. del cociente espectral=</td> <td>6.2803</td> </tr> <tr> <td>Inversa del cociente espectral=</td> <td>0.1592</td> </tr> <tr> <td>Periodo=</td> <td>0.1592 seg.</td> </tr> </table>	Amplitud máx. del cociente espectral=	6.2803	Inversa del cociente espectral=	0.1592	Periodo=	0.1592 seg.	 <table border="1" data-bbox="1031 430 1388 493"> <tr> <td>Amplitud máx. del cociente espectral=</td> <td>5.7224</td> </tr> <tr> <td>Inversa del cociente espectral=</td> <td>0.1748</td> </tr> <tr> <td>Periodo=</td> <td>0.1748 seg.</td> </tr> </table>	Amplitud máx. del cociente espectral=	5.7224	Inversa del cociente espectral=	0.1748	Periodo=	0.1748 seg.
Amplitud máx. del cociente espectral=	4.1320																				
Inversa del cociente espectral=	0.2420																				
Periodo=	0.2420 seg.																				
Amplitud máx. del cociente espectral=	6.2803																				
Inversa del cociente espectral=	0.1592																				
Periodo=	0.1592 seg.																				
Amplitud máx. del cociente espectral=	5.7224																				
Inversa del cociente espectral=	0.1748																				
Periodo=	0.1748 seg.																				
P-13	 <table border="1" data-bbox="316 703 641 756"> <tr> <td>Amplitud máx. del cociente espectral=</td> <td>4.1320</td> </tr> <tr> <td>Inversa del cociente espectral=</td> <td>0.2420</td> </tr> <tr> <td>Periodo=</td> <td>0.2420 seg.</td> </tr> </table>	Amplitud máx. del cociente espectral=	4.1320	Inversa del cociente espectral=	0.2420	Periodo=	0.2420 seg.	 <table border="1" data-bbox="673 703 998 756"> <tr> <td>Amplitud máx. del cociente espectral=</td> <td>4.7508</td> </tr> <tr> <td>Inversa del cociente espectral=</td> <td>0.2105</td> </tr> <tr> <td>Periodo=</td> <td>0.2105 seg.</td> </tr> </table>	Amplitud máx. del cociente espectral=	4.7508	Inversa del cociente espectral=	0.2105	Periodo=	0.2105 seg.	 <table border="1" data-bbox="1031 703 1388 756"> <tr> <td>Amplitud máx. del cociente espectral=</td> <td>5.9948</td> </tr> <tr> <td>Inversa del cociente espectral=</td> <td>0.1668</td> </tr> <tr> <td>Periodo=</td> <td>0.1668 seg.</td> </tr> </table>	Amplitud máx. del cociente espectral=	5.9948	Inversa del cociente espectral=	0.1668	Periodo=	0.1668 seg.
Amplitud máx. del cociente espectral=	4.1320																				
Inversa del cociente espectral=	0.2420																				
Periodo=	0.2420 seg.																				
Amplitud máx. del cociente espectral=	4.7508																				
Inversa del cociente espectral=	0.2105																				
Periodo=	0.2105 seg.																				
Amplitud máx. del cociente espectral=	5.9948																				
Inversa del cociente espectral=	0.1668																				
Periodo=	0.1668 seg.																				

Tabla 4. Graficas de periodos y frecuencias de la medición de vibración ambiental en los puntos de estudio

Con los resultados de la medición de vibración ambiental, se procesa la información con los siguientes pasos:

1. Se utiliza un software de procesamiento de señales (Geopsy), con el cual se filtra la señal para disminuir el ruido, aplicando el Espectro de Amplitudes de Fourier, transformamos la información inicial (De: Aceleración-Tiempo a Amplitud-Frecuencia).
2. Aplicando el Método de Cocientes Espectrales, se obtienen los periodos y las formas modales de cada punto así como de todo el edificio.
3. La calibración es realizada partiendo de una propiedad inicial de los materiales, en el proceso, el modulo de elasticidad del Modelo Analítico se va degradando hasta que el periodo (T) del punto a calibrar en el Modelo Analítico sea igual al periodo obtenido en los puntos de la medición.

3.6 Propiedades mecánicas de los materiales (Proceso de la calibración)

La calibración de este Modelo Analítico, inicia con la comparación de los resultados de la medición de vibración ambiental y las primeras observaciones de las formas modales del Modelo Analítico inicial. Partiendo de los valores del modulo de elasticidad y las propiedades mecánicas de los materiales de acuerdo con la bibliografía sobre edificios históricos [10, 39]. Inicialmente se consideran dos tipos de mampostería de conjunto: Mampostería de piedra y Mampostería de ladrillo (Tabla 4), finalmente como resultado de la calibración, se consideran siete grupos de mampostería de piedra y cinco grupos de mampostería de ladrillo (Tabla 4). Apoyado en el recorrido de reconocimiento, se identificaron y ubicaron los materiales que constituyen el edificio, y así fueron asignados respectivamente a cada elemento del Modelo Analítico, el valor del módulo de elasticidad para cada material, se fue cambiando hasta hacer coincidir los periodos de vibración del Modelo Analítico con las lecturas obtenidas en campo.

Las consideraciones durante el proceso de calibración son las siguientes:

a) Junta constructiva entre la torre y la fachada

Considerando una separación vertical entre la Torre y la Fachada, con una profundidad igual al espesor del muro de la fachada, (se requieren más estudios para conocer la profundidad real)

b) Las condiciones de frontera con respecto a la continuidad de los muros

Los muros se prolongan en una longitud hasta que dejan de influir significativamente en el periodo del cuerpo principal.

c) Las características de la estructura de la bóveda del sotocoro

Se considera compuesta por dos partes, la parte inferior por una estructura de mampostería de ladrillo, la parte superior por una estructura compuesta de una delgada capa de mampostería de ladrillo correspondiente al piso del coro y un relleno de menor resistencia correspondiente a la tierra y hoyas que lo componen.

Elementos y Propiedades Mecánicas del Modelo Analítico del Ex convento Franciscano de Tecamachalco									
Macroelementos		Total de Nodos	Total de Sólidos	Material en conjunto	Propiedades Mecánicas de los Materiales asignadas para la calibración del modelo				
Clave	Grupo	63903	41448	Mampostería	Modulo de Elasticidad E Ton/m ²	Coefficiente de Poissón μ	Peso Volumétrico Ton/m ³	Resistencia a la Compresión kg/cm ²	Resistencia a la Tensión kg/cm ²
		Total de nodos por elemento		Propiedades Iniciales de la mampostería de conjunto					
				M. de Piedra 1	200000	0.2	2.2	30	0.6
				M. de Ladrillo 1	52500	0.2	1.6	15	0.3
Propiedades Calibradas de la mampostería de conjunto									
1.1	Torre Base	2598	2080	M. de Piedra 1	156375	0.2	2	30	0.6
1.2	Torre Cuerpo 1	2409	1552	M. de Piedra 1	156375	0.2	2	30	0.6
1.2.1	Torre Cuerpo 1-L	42	29	M. de Ladrillo 2	46500	0.2	1.6	15	0.3
1.3	Torre Cuerpo 2	3096	1908	M. de Piedra 1	156375	0.2	2	30	0.6
1.4	Torre Cuerpo 3	1690	1212	M. de Ladrillo 2	46500	0.2	1.6	15	0.3
1.5	Cupulín	1055	532	M. de Ladrillo 2	46500	0.2	1.6	15	0.3
2.1	Muro Fachada	1992	1252	M. de Piedra 3	158900	0.2	2	30	0.6
2.2	Muro Norte	5180	3533	M. de Piedra 2	178120	0.2	2	30	0.6
2.3	Muro Sur	4634	3099	M. de Piedra 2	178120	0.2	2	30	0.6
3.1	Ábside Norte	2007	1374	M. de Piedra 2	178120	0.2	2	30	0.6
3.2	Ábside Oriente	1468	688	M. de Piedra 4	178290	0.2	2	30	0.6
3.3	Ábside Sur	1858	1282	M. de Piedra 2	178120	0.2	2	30	0.6
4	Arco Triunfal	765	352	M. de Piedra 6	190000	0.2	2	30	0.6
4.1	Arco Triunfal Muro Sup.	454	328	M. de Ladrillo 5	46800	0.2	1.6	15	0.3
4.2	A T Columna Norte	287	150	M. de Piedra 5	180000	0.2	2	30	0.6
4.3	A T Columna Sur	287	150	M. de Piedra 5	180000	0.2	2	30	0.6
4.4	A T Muro Norte	511	336	M. de Piedra 2	178120	0.2	2	30	0.6
4.5	A T Muro Sur	429	270	M. de Piedra 2	178120	0.2	2	30	0.6
5.1	Arco 2	1990	1248	M. de Ladrillo 1	48050	0.2	1.6	15	0.3
5.2	A2 Columna Norte	1456	1050	M. de Piedra 5	180000	0.2	2	30	0.6
5.3	A2 Columna Sur	1456	1050	M. de Piedra 5	180000	0.2	2	30	0.6
5.4	A2 Muro Norte	511	336	M. de Piedra 2	178120	0.2	2	30	0.6
5.5	A2 Muro Sur	527	1248	M. de Piedra 2	178120	0.2	2	30	0.6
6.1	Arco 3	1871	1248	M. de Ladrillo 1	48050	0.2	1.6	15	0.3
6.2	A3 Columna Norte	1454	1050	M. de Piedra 5	180000	0.2	2	30	0.6
6.3	A3 Columna Sur	1454	1050	M. de Piedra 5	180000	0.2	2	30	0.6
6.4	A3 Muro Norte	822	640	M. de Piedra 2	178120	0.2	2	30	0.6
6.5	A3 Muro Sur	612	512	M. de Piedra 2	178120	0.2	2	30	0.6
7	Sotocoro Arco 4	117	96	M. de Piedra 6	190000	0.2	2	30	0.6
7.1	Sotocoro Muro/Arco	398	188	M. de Ladrillo 5	46800	0.2	1.6	15	0.3
7.2	Sotocoro Columna Nte.	36	10	M. de Piedra 1	180000	0.2	2	30	0.6
7.3	Sotocoro Columna Sur	36	10	M. de Piedra 1	180000	0.2	2	30	0.6
7.4	Sotocoro Muro Norte	0	0	M. de Piedra 2	178120	0.2	2	30	0.6
7.5	Sotocoro Muro Sur	0	0	M. de Piedra 2	178120	0.2	2	30	0.6
7.6	Sotocoro Bóveda	1962	918	M. de Ladrillo 1	48050	0.2	1.6	15	0.3
7.7	Coro piso	1962	918	M. de Ladrillo 3	8700	0.2	1.6	15	0.3
8.1	Bóveda 1 Altar Mayor	2239	1096	M. de Ladrillo 1	48050	0.2	1.6	15	0.3
8.2	Bóveda 2 Recinto	3240	1648	M. de Ladrillo 1	48050	0.2	1.6	15	0.3
8.3	Bóveda 3 Recinto	3240	1648	M. de Ladrillo 1	48050	0.2	1.6	15	0.3
8.4	Bóveda 4 Recinto	3240	1648	M. de Ladrillo 1	48050	0.2	1.6	15	0.3
9.1	Espadaña	455	284	M. de Piedra 2	178120	0.2	2	30	0.6
9.1.2	Espadaña Escalera	70	32	M. de Ladrillo 2	46500	0.2	1.6	15	0.3
9.2	Contrafuertes	1468	711	M. de Piedra 7	178200	0.2	2	30	0.6
9.3	Pináculos	741	290	M. de Ladrillo 2	46500	0.2	1.6	15	0.3
9.3.1	Pináculos torre 3	860	260	M. de Ladrillo 2	46500	0.2	1.6	15	0.3
9.4	Pretil	702	363	M. de Ladrillo 2	46500	0.2	1.6	15	0.3
9.5.1	Moldura Pretil	912	454	M. de Ladrillo 2	46500	0.2	1.6	15	0.3
9.5.2	Moldura Torre 1	300	75	M. de Ladrillo 2	46500	0.2	1.6	15	0.3
9.5.3	Moldura Torre 2	352	176	M. de Ladrillo 2	46500	0.2	1.6	15	0.3
9.5.4	Moldura Torre 3	831	208	M. de Ladrillo 2	46500	0.2	1.6	15	0.3
9.5.5	Moldura Cupulín	320	80	M. de Ladrillo 2	46500	0.2	1.6	15	0.3
9.9.2	Frontera	1489	776	M. de Piedra 2	178120	0.2	2	30	0.6

Tabla 5. Propiedades mecánicas de los materiales en la calibración del Modelo Analítico

Capítulo IV

Análisis del Modelo Analítico

4.1 Consideraciones del análisis del Modelo Analítico

El análisis del Modelo Analítico, obliga a conocer las propiedades mecánicas de los materiales y el comportamiento de la mampostería histórica, planteando que las estructuras de mampostería se construyeron pensando que trabajaran como sistemas de gravedad, transmitiendo sus cargas hacia el suelo mediante esfuerzos a compresión y con poca resistencia a esfuerzos de tensión, reconociendo que en la realidad el comportamiento de las estructuras de edificios históricos es no lineal, y que un análisis lineal del edificio no es suficiente para conocer el comportamiento real de las mismas, ya que éste análisis no considera la baja resistencia a la tensión del mortero de la mampostería histórica así como los desplazamientos que producen agrietamientos en los elementos estructurales bajo ciertas condiciones de carga. Sin embargo se ha comprobado, que el análisis lineal es el punto de partida y la base para realizar el análisis no lineal de dichas estructuras, que mediante el se conoce el comportamiento dinámico y sus formas modales, las zonas críticas donde se presentan los mayores esfuerzos a tensión y compresión, y a su vez las partes de mayor vulnerabilidad de la estructura.

4.2 Acelerograma utilizado en el Análisis del Modelo Analítico

El Modelo Analítico una vez calibrado, se somete a una excitación sísmica (sismo 15.06.1999; $M_w = 7.0$), también llamado sismo de Tehuacán. Este sismo se elige de acuerdo a su importancia, por los efectos causados en una vasta región en los estados de Puebla y Oaxaca principalmente [1, 2, 5, 15, 19, 29, 31], ya que sus características sísmicas (frecuencia y amplitud) coinciden con las formas modales de este tipo de edificios históricos, y que la distancia entre el origen del sismo y la estación sísmica es aproximada a la distancia entre el origen del sismo y nuestro punto de estudio, así como el tipo de suelo.

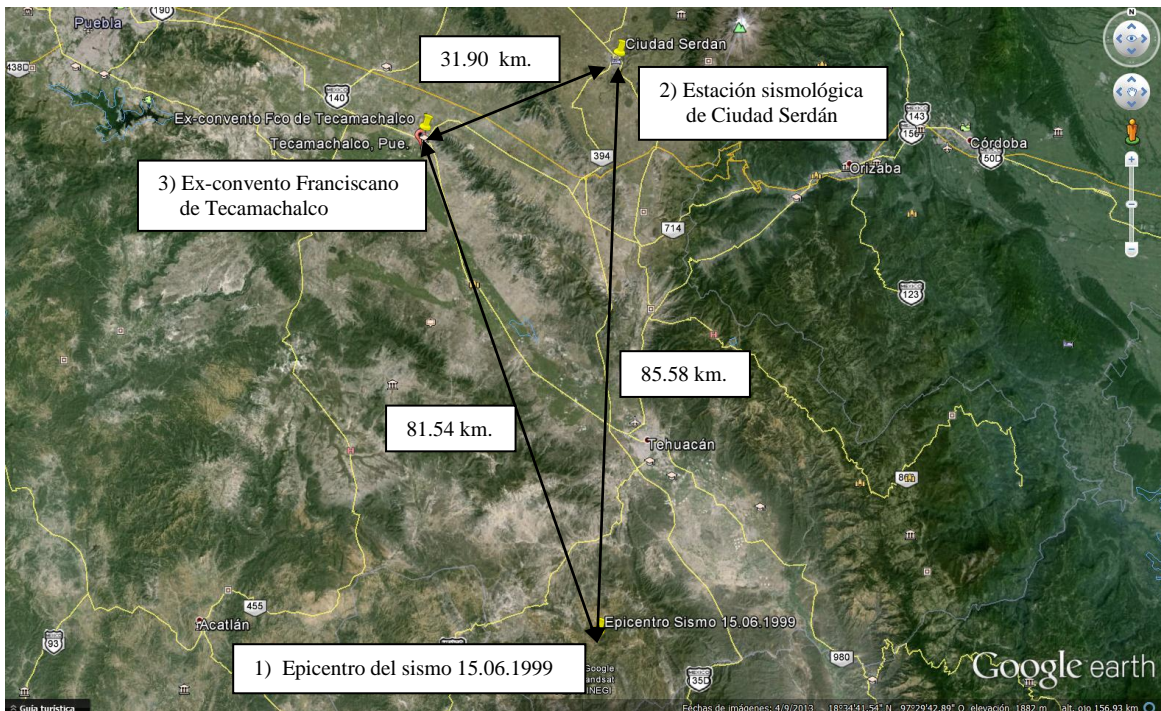


Fig. 95. Ubicación de los puntos de estudio: Epicentro del sismo 15.06.1999, Estación sismológica Ciudad Serdán y Ex-convento Franciscano de Tecamachalco.

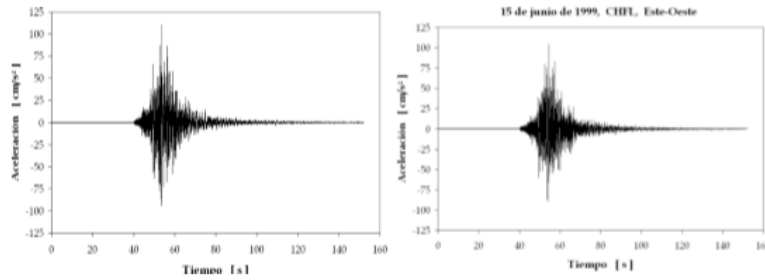
Ubicación y coordenadas de los puntos de estudio					
Punto	Nombre del punto de estudio	Coordenadas			
		Latitud	Longitud	Altitud	Tipo de Suelo
1	Epicentro del sismo 15.06.1999	18°18' Lat. N	97°51' Long. W	69 Km. profundidad focal	Roca
2	Estación sismológica de Ciudad Serdán	18°60'31'' Lat. N	97°38'04'' Long. W	2900 m.s.n.m.	Roca
3	Ex-convento Franciscano de Tecamachalco	18°52'57'' Lat. N	97°43'49'' Long. W	2055 m.s.n.m.	Roca

Fig. 96. Ubicación y coordenadas geográficas de los puntos de estudio

Datos de registro del sismo (CSER9906.15) INSTITUTODE "INGENIERIA," UNAM	
INSTITUTO DE "INGENIERIA," UNAM Coordinación de Instrumentación Sísmica Ciudad "Universitaria," Apartado Postal 70-472, "Coyoacan" 04510, "México," D.F. Tel. (52-5) 622-3414 Fax. (52-5) 616-1514 e-mail: isismica@pumas.ingen.unam.mx	
ARCHIVO ESTANDAR DE ACELERACION:	
VERSION DEL FORMATO :	2
NOMBRE DEL ARCHIVO :	CSER9906.151
FECHA Y HORA DE CREACION :	Mon Sep 27 18:44:08 1999
REF. CATALOGO "ACELEROGRAMAS," SMIS 1995 :	REGISTRO NO. /PAG.
DATOS DE LA ESTACION:	
NOMBRE DE LA ESTACION :	CIUDAD SERDAN
CLAVE DE LA ESTACION :	CSER
LOCALIZACION DE LA ESTACION :	Cerro "Lomatel," Ciudad "Serdán," : Puebla
COORDENADAS DE LA ESTACION :	18.991 LAT. N: 97.384 LONG.W
ALTITUD (msnm) :	2900
TIPO DE SUELO :	ROCA
INSTITUCION RESPONSABLE :	INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM
DATOS DEL ACELEROGRAFO:	
MODELO DEL ACELEROGRAFO :	DCA-333
NUMERO DE SERIE DEL ACELEROGRAFO :	120
NUMERO DE CANALES :	3
ORIENTACION C1-C6 (rumbo; orientación) :	/V/N90E/N00E
ORIENTACION C7-C12 (rumbo; orientación) :	
VEL. DE "MUESTREO," C1-C6 (muestras/s) :	/100/100/100
VEL. DE "MUESTREO," C7-C12 (muestras/s) :	
ESC. COMPLETA DE "SENSORES," "C1-C6," (g) :	/2/2/2
ESC. COMPLETA DE "SENSORES," C7-C12 (g) :	
FREC. NAT. DE "SENSORES," "C1-C6," (Hz) :	/27.0/30.0/30.0
FREC. NAT. DE "SENSORES," C7-C12 (Hz) :	
AMORTIGUAMIENTO DE "SENSORES," C1-C6 :	/0.61/0.66/0.66
AMORTIGUAMIENTO DE "SENSORES," C7-C12 :	
INTERVALO DE "MUESTREO," C1-C6 (s) :	/0.01/0.01/0.01
INTERVALO DE "MUESTREO," C7-C12 (s) :	
UMBRAL DE "DISPARO," C1-C6 (Gal) * :	///
UMBRAL DE "DISPARO," C7-C12 (Gal) :	
MEMORIA DE PREEVENTO (s) :	4
TIEMPO DE POSEVENTO (s) :	15
DATOS DEL SISMO:	
FECHA DEL SISMO [GMT] :	15 de Junio de 1999
HORA EPICENTRO (GMT) :	42:07.1
MAGNITUD (ES) :	/Mb=6.4/Ms=6.5/Ma=6.3/Me=7.0
COORDENADAS DEL EPICENTRO :	18.18 LAT. N : 97.51 LONG. W
PROFUNDIDAD FOCAL (Km) :	69
FUENTE DE LOS DATOS EPICENTRALES :	Instituto de "Geofísica," UNAM: SSN
DATOS DE ESTE REGISTRO:	
HORA DE LA PRIMERA MUESTRA (GMT) :	20:43:18
EXACTITUD DEL TIEMPO (s) :	0.5
DURACION DEL REGISTRO "(s)," C1-C6 :	/134.41/134.41/134.41
DURACION DEL REGISTRO "(s)," C7-C12 :	
NUM. TOTAL DE "MUESTRAS," C1-C6 :	/13441/13441/13441
NUM. TOTAL DE "MUESTRAS," C7-C12 :	
ACEL. "MAX.(Gal)," C1-C6 :	/-108.06/199.13/-171.19
ACEL. "MAX.," "C1-C6," EN LA MUESTRA :	/2285/2339/2060
ACEL. "MAX.(Gal)," C7-C12 :	
ACEL. "MAX.," "C7-C12,EN" LA MUESTRA :	
UNIDADES DE LOS DATOS :	Gal (cm/s/s)
FACTOR DE DECIMACION :	1
FORMATO DATOS "(FORTRAN,10" campos/dato) :	3F10.2
CALIDAD DEL ACELEROGRAMA:	
REGISTRO DIGITAL "COMPLETO," CON TIEMPO ABSOLUTO CORRECTO.	
COMENTARIOS: Se desconoce el umbral en el momento del registro.	

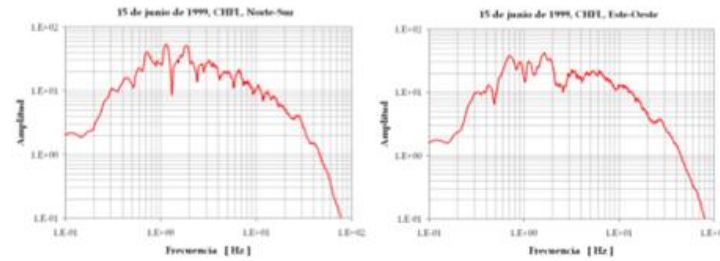
Tabla 6. Datos de registro del sismo CSER1999.06.15, Instituto de Ingeniería UNAM

ACELEROGRAMAS REGISTRADOS EN CHFL DURANTE EL SISMO DEL 15 DE JUNIO DE 1999.



ELABORADO POR GRUPO DE INGENIERÍA UNAM.

ESPECTROS DE FOURIER DE LAS SEÑALES REGISTRADAS EN LA ESTACIÓN CHFL, SISMO DEL 15 DE JUNIO DE 1999.



ELABORADO POR GRUPO DE INGENIERÍA UNAM.

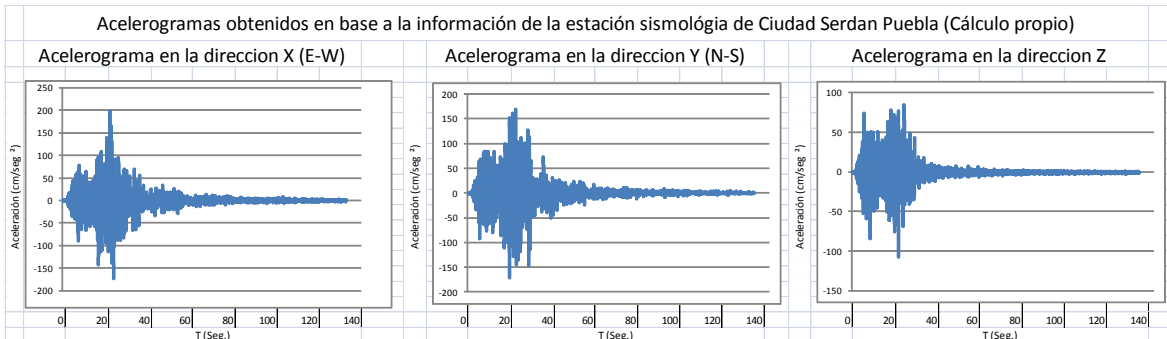


Fig. 97. Acelerogramas y espectros de Fourier (Sismo 15.06.1999), ver en [1]

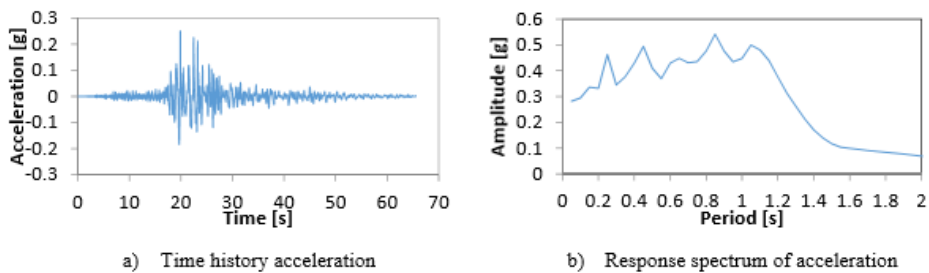


Fig. 98. Acciones sísmicas (sismo 15.06.1999) [SAHC2014 – 9th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, F. Peña & M. Chavez (eds.) México City, México, 14–17 October 2014]

4.3 Características del sismo del 15 de junio de 1999 (sismo de Tehuacán)

El estudio de los sismogramas registrados en Ciudad Serdán, a 85 km. del epicentro, demuestra que las replicas fueron muy pequeñas, tanto en magnitud como en número, ya que en la semana siguiente se registraron 33 eventos con magnitud 2.3 a 3.7. (Singh et al, 1999) [1].

4.3.1 Mapa de curvas de isoaceleración del sismo de Tehuacán (Singh et al., 1999)

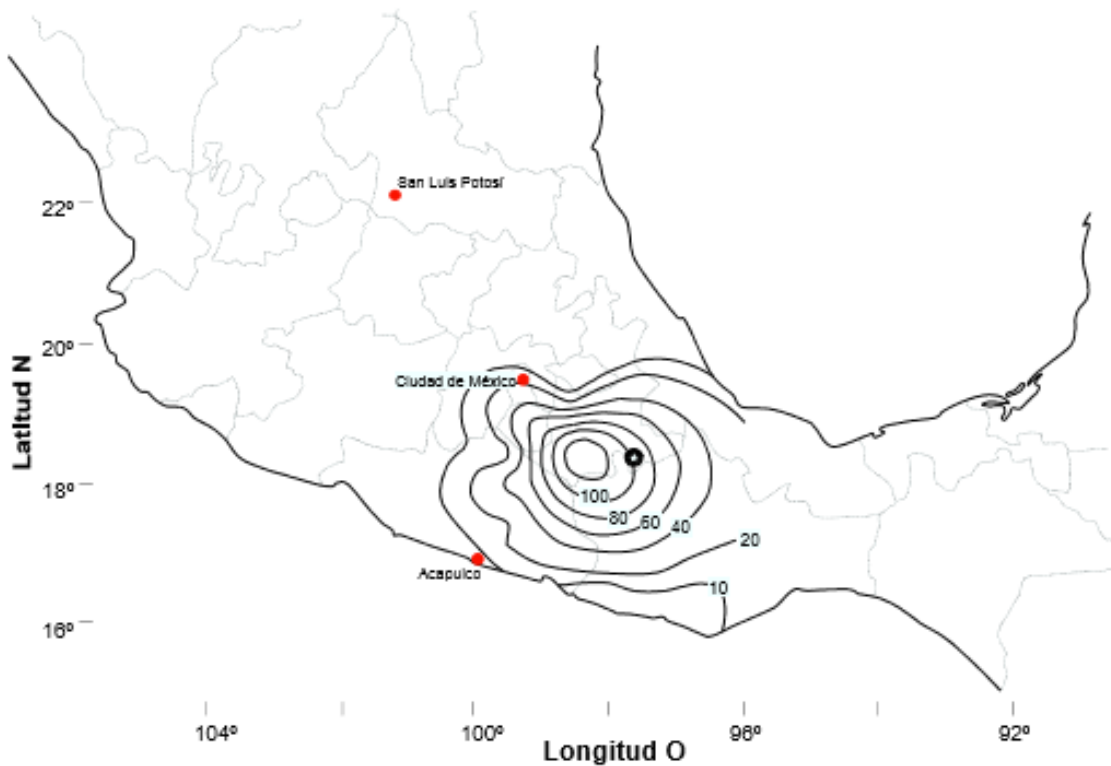


Fig. 99. Mapa de curvas de igual aceleración, cm/s² (Singh et al, 1999) [1]

En el mapa de curvas de isoaceleración se observan las zonas de igual intensidad

4.3.2 Mapa de isosistas, para el sismo de Tehuacán

La forma de las curvas, alargadas al NO-SE, sugiere directividad de la intensidad, adicional a la del movimiento.

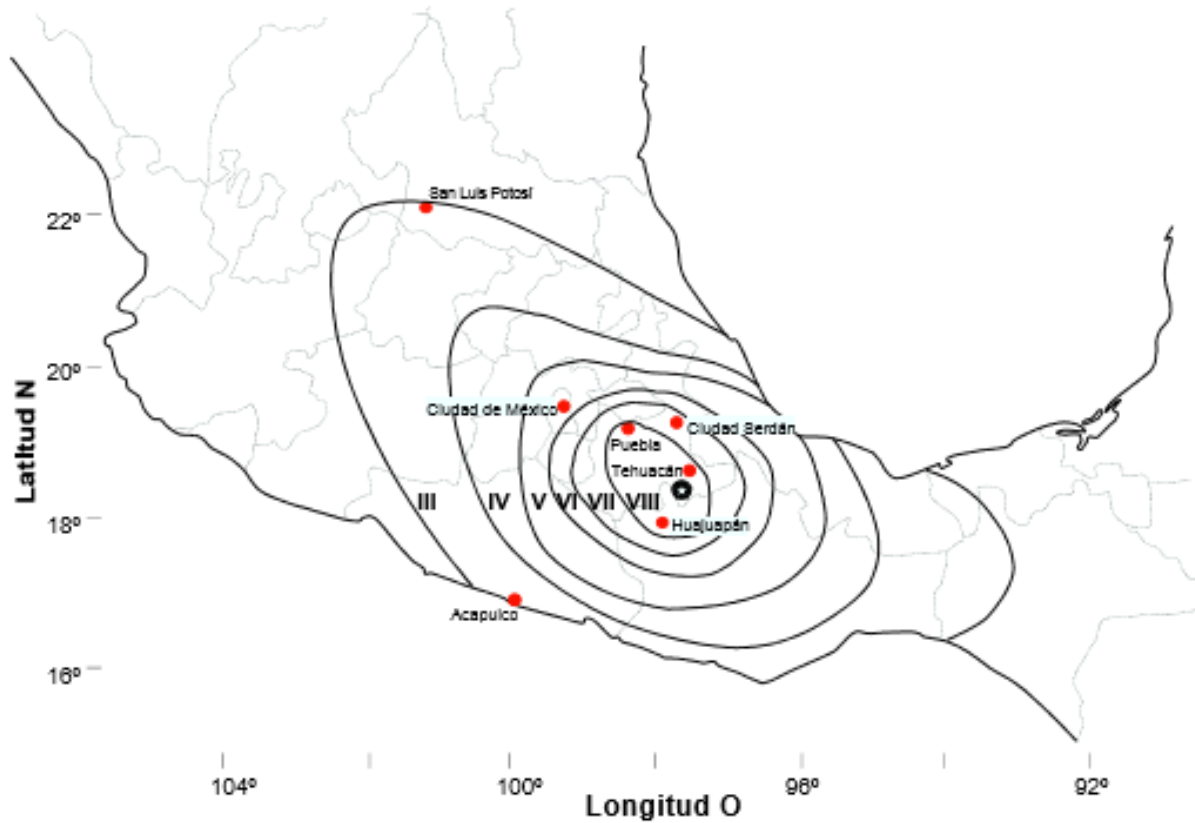
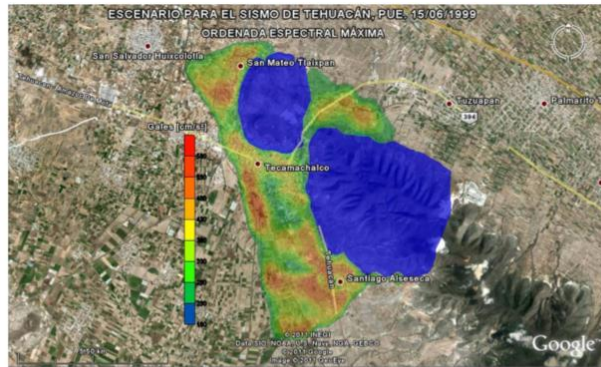


Fig. 100. Mapa de isosistas por el sismo de Tehuacán (Gutiérrez, 1999) [1, 19].

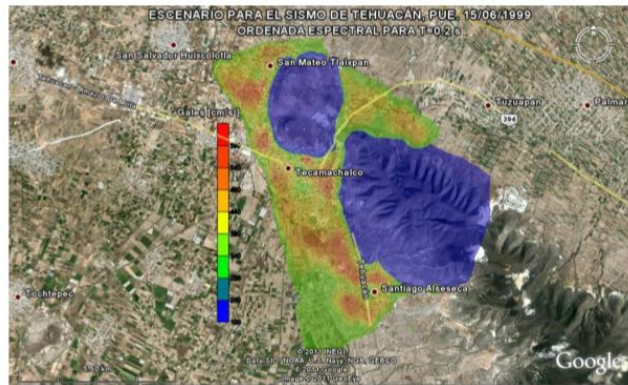
Un aspecto importante es que aun para distancia focales medias en formaciones rocosas, se registraron aceleraciones máximas relativamente más altas en la dirección vertical, que las que se registran usualmente con sismos provenientes de la costa [1, 19].

4.3.5 Ordenadas máximas estimadas para el sismo de Tehuacán, para el Municipio de Tecamachalco, Puebla [1].



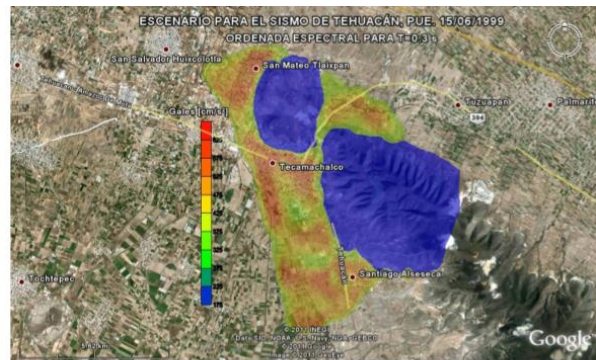
CONSIDERANDO QUE EL HIPOCENTRO SE LOCALIZA A 60 KILÓMETROS DE PROFUNDIDAD DEL MUNICIPIO. ELABORACIÓN: GRUPO DE INGENIERÍA SÍSMICA UNAM, SOBRE UNA IMAGEN DE GOOGLE. 2011.

Fig. 103. Ordenada máxima del espectro lineal de aceleraciones, estimadas para el sismo del 15 de junio de 1999 ($M_w=7.0$), del Municipio de Tecamachalco, Pué.



CONSIDERANDO QUE EL HIPOCENTRO SE LOCALIZA A 60 KILÓMETROS DE PROFUNDIDAD DEL MUNICIPIO. ELABORACIÓN: GRUPO DE INGENIERÍA SÍSMICA UNAM, SOBRE UNA IMAGEN DE GOOGLE. 2011.

Fig. 104. Ordenada espectral asociada al periodo estructural de $T=0.2$ seg., estimadas para el sismo del 15 de junio de 1999 ($M_w=7.0$), del Municipio de Tecamachalco, Puebla



CONSIDERANDO QUE EL HIPOCENTRO SE LOCALIZA A 60 KILÓMETROS DE PROFUNDIDAD DEL MUNICIPIO. ELABORACIÓN: GRUPO DE INGENIERÍA SÍSMICA UNAM, SOBRE UNA IMAGEN DE GOOGLE. 2011.

Fig. 105. Ordenada espectral asociada al periodo estructural de $T=0.3$ seg., estimada para el sismo del 15 de junio de 1999 ($M_w=7.0$), del Municipio de Tecamachalco, Puebla

4.4 Análisis Modal del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"

4.4.1 Consideraciones del análisis del Modelo Analítico

A diferencia de las estructuras esqueléticas de acero y concreto, que tienen un periodo fundamental de vibración, los edificios históricos no tienen una forma modal determinante, esto se debe a las características de su geometría, la ubicación de su masa y al peso volumétrico de sus elementos, de aquí la importancia del detallado en todos los aspectos que involucran la creación del Modelo Analítico, pues de la calidad de la información procesada depende la calidad de los resultados obtenidos, como dice en [51, 55].

Los edificios históricos tienen varios periodos de vibración de interés, de acuerdo con Las Normas Técnicas Complementarias para Diseño Sísmico del Reglamento de Construcciones del D.F. (NTC- Sismo del RCDF, 2004), establecen que para el análisis modal espectral de cualquier estructura deben incluirse el número de modos necesarios para que la suma de los pesos efectivos en las direcciones de análisis sea por lo menos el 90% del total de la estructura [37]. por lo tanto, adoptamos 110 formas modales para analizar y 13 puntos de estudio, estos se eligen estratégicamente de acuerdo con las observaciones del modelo inicial y de los puntos que se consideran de apoyo para la calibración del Modelo Analítico.

En la observación realizada en este estudio, encontramos que el Edificio tiende a sufrir afectaciones para diferentes formas modales y diferentes periodos, al inicio de la excitación sísmica algunos elementos inician con una respuesta significativa inmediata y otros elementos en periodos posteriores. Unos elementos disminuyen su respuesta en determinada forma modal, para después volver a responder considerablemente en una forma modal posterior. Las primeras 12 formas modales presentan respuestas significativas de los elementos, en las siguientes ya casi no se aprecia la participación de los elementos estructurales solo un menor desplazamiento y una menor influencia de un elemento sobre otro.

4.4.2 Relación de participación de carga modal del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"

Relación de participación de carga modal para 110 Formas Modales				
Tipo de caso	Tipo de información	Dirección	Estático	Dinámico
			%	%
MODAL	Aceleración	UX	99.6183	90.1863
MODAL	Aceleración	UY	99.8129	90.4301
MODAL	Aceleración	UZ	93.7528	74.7175

Tabla 7. Relación de participación de carga modal para 110 Formas Modales

Contando con 110 formas modales estudiadas, da como resultado el 90% de participación de la carga en las direcciones: "X" (E-W) y "Y" (N-S), y en la dirección vertical "Z" se alcanza aprox. el 75%.

Con este porcentaje de participación de la carga modal en las direcciones "X" y "Y", se cumple con Las Normas Técnicas Complementarias para Diseño Sísmico del Reglamento de Construcciones del D.F. (NTC- Sismo del RCDF, 2004). Así como se obtiene la información necesaria para la observación del comportamiento del Modelo Analítico.

4.4.3 Formas modales del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"

Para todas y cada una de las 110 formas modales estudiadas, calculamos los modos de vibrar y las frecuencias naturales del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco", durante la vibración libre.

Los valores los tenemos en la siguiente tabla:

Formas Modales del "Exconvento Franciscano de Tecamachalco"														
Caso de estudio	Tipo de Caso	No. de Modo	Periodo	Frecuencia	Caso de estudio	Tipo de Caso	No. de Modo	Periodo	Frecuencia	Caso de estudio	Tipo de Caso	No. de Modo	Periodo	Frecuencia
			Seg.	Ciclos/seg.				Seg.	Ciclos/seg.				Seg.	Ciclos/seg.
MODAL	Modo	1	0.5337	1.8738	MODAL	Modo	38	0.1106	9.0420	MODAL	Modo	75	0.0790	12.6660
MODAL	Modo	2	0.5168	1.9351	MODAL	Modo	39	0.1084	9.2268	MODAL	Modo	76	0.0788	12.6950
MODAL	Modo	3	0.3642	2.7460	MODAL	Modo	40	0.1066	9.3825	MODAL	Modo	77	0.0782	12.7840
MODAL	Modo	4	0.3511	2.8479	MODAL	Modo	41	0.1051	9.5181	MODAL	Modo	78	0.0778	12.8470
MODAL	Modo	5	0.2520	3.9675	MODAL	Modo	42	0.1039	9.6227	MODAL	Modo	79	0.0773	12.9410
MODAL	Modo	6	0.2254	4.4371	MODAL	Modo	43	0.1034	9.6673	MODAL	Modo	80	0.0769	13.0010
MODAL	Modo	7	0.2227	4.4908	MODAL	Modo	44	0.1032	9.6936	MODAL	Modo	81	0.0767	13.0320
MODAL	Modo	8	0.2153	4.6440	MODAL	Modo	45	0.1004	9.9644	MODAL	Modo	82	0.0755	13.2380
MODAL	Modo	9	0.2079	4.8112	MODAL	Modo	46	0.1000	10.0040	MODAL	Modo	83	0.0750	13.3410
MODAL	Modo	10	0.1971	5.0740	MODAL	Modo	47	0.0993	10.0730	MODAL	Modo	84	0.0748	13.3670
MODAL	Modo	11	0.1910	5.2360	MODAL	Modo	48	0.0988	10.1260	MODAL	Modo	85	0.0745	13.4220
MODAL	Modo	12	0.1905	5.2494	MODAL	Modo	49	0.0981	10.1900	MODAL	Modo	86	0.0738	13.5570
MODAL	Modo	13	0.1765	5.6671	MODAL	Modo	50	0.0975	10.2590	MODAL	Modo	87	0.0735	13.6030
MODAL	Modo	14	0.1648	6.0666	MODAL	Modo	51	0.0960	10.4190	MODAL	Modo	88	0.0731	13.6890
MODAL	Modo	15	0.1644	6.0843	MODAL	Modo	52	0.0947	10.5630	MODAL	Modo	89	0.0727	13.7530
MODAL	Modo	16	0.1590	6.2881	MODAL	Modo	53	0.0936	10.6860	MODAL	Modo	90	0.0722	13.8420
MODAL	Modo	17	0.1512	6.6130	MODAL	Modo	54	0.0930	10.7480	MODAL	Modo	91	0.0718	13.9290
MODAL	Modo	18	0.1443	6.9279	MODAL	Modo	55	0.0927	10.7820	MODAL	Modo	92	0.0716	13.9710
MODAL	Modo	19	0.1425	7.0166	MODAL	Modo	56	0.0922	10.8500	MODAL	Modo	93	0.0711	14.0640
MODAL	Modo	20	0.1417	7.0564	MODAL	Modo	57	0.0913	10.9590	MODAL	Modo	94	0.0708	14.1240
MODAL	Modo	21	0.1409	7.0952	MODAL	Modo	58	0.0903	11.0770	MODAL	Modo	95	0.0705	14.1870
MODAL	Modo	22	0.1386	7.2147	MODAL	Modo	59	0.0900	11.1090	MODAL	Modo	96	0.0703	14.2230
MODAL	Modo	23	0.1341	7.4557	MODAL	Modo	60	0.0894	11.1880	MODAL	Modo	97	0.0699	14.3140
MODAL	Modo	24	0.1331	7.5152	MODAL	Modo	61	0.0889	11.2510	MODAL	Modo	98	0.0696	14.3730
MODAL	Modo	25	0.1319	7.5828	MODAL	Modo	62	0.0879	11.3830	MODAL	Modo	99	0.0691	14.4740
MODAL	Modo	26	0.1311	7.6251	MODAL	Modo	63	0.0873	11.4580	MODAL	Modo	100	0.0689	14.5210
MODAL	Modo	27	0.1290	7.7517	MODAL	Modo	64	0.0868	11.5170	MODAL	Modo	101	0.0684	14.6240
MODAL	Modo	28	0.1287	7.7729	MODAL	Modo	65	0.0856	11.6770	MODAL	Modo	102	0.0682	14.6570
MODAL	Modo	29	0.1264	7.9088	MODAL	Modo	66	0.0855	11.6950	MODAL	Modo	103	0.0677	14.7620
MODAL	Modo	30	0.1254	7.9724	MODAL	Modo	67	0.0852	11.7300	MODAL	Modo	104	0.0672	14.8800
MODAL	Modo	31	0.1245	8.0324	MODAL	Modo	68	0.0843	11.8690	MODAL	Modo	105	0.0670	14.9180
MODAL	Modo	32	0.1206	8.2933	MODAL	Modo	69	0.0833	11.9980	MODAL	Modo	106	0.0666	15.0040
MODAL	Modo	33	0.1197	8.3514	MODAL	Modo	70	0.0830	12.0520	MODAL	Modo	107	0.0663	15.0840
MODAL	Modo	34	0.1164	8.5936	MODAL	Modo	71	0.0823	12.1560	MODAL	Modo	108	0.0661	15.1220
MODAL	Modo	35	0.1157	8.6430	MODAL	Modo	72	0.0812	12.3090	MODAL	Modo	109	0.0659	15.1860
MODAL	Modo	36	0.1152	8.6819	MODAL	Modo	73	0.0803	12.4540	MODAL	Modo	110	0.0658	15.2080
MODAL	Modo	37	0.1127	8.8753	MODAL	Modo	74	0.0798	12.5390					

Tabla 8. Formas modales del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"

4.4.4 Factores de participación modal del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"

Calculamos el factor de la masa en cada dirección y la rigidez por modo.

Factores de participación modal								
Caso de estudio	Tipo de caso	No. De Modo	Periodo	Dirección			Masa Modal	Rigidez Modal
				UX	UY	UZ		
			Segundo	Tonf-s ²	Tonf-s ²	Tonf-s ²	Tonf-m-s ²	Tonf-m
MODAL	Modo	1	0.5337	7.0911	-13.5894	0.4670	1.0000	138.6177
MODAL	Modo	2	0.5168	-9.9963	-8.4964	-0.1679	1.0000	147.8247
MODAL	Modo	3	0.3642	0.0466	0.1843	-2.6861	1.0000	297.6796
MODAL	Modo	4	0.3511	0.6784	19.6266	-0.0276	1.0000	320.1934
MODAL	Modo	5	0.2520	-1.2136	-1.9758	0.2782	1.0000	621.4424
MODAL	Modo	6	0.2254	-12.1553	-2.0381	-0.8931	1.0000	777.2597
MODAL	Modo	7	0.2227	0.7407	-1.9722	0.1609	1.0000	796.1680
MODAL	Modo	8	0.2153	-4.3274	-12.5516	0.9146	1.0000	851.4138
MODAL	Modo	9	0.2079	10.8332	-5.7772	-0.1770	1.0000	913.8214
MODAL	Modo	10	0.1971	-6.0808	0.9838	-1.8927	1.0000	1016.3890
MODAL	Modo	11	0.1910	-3.8283	-0.0396	-2.5166	1.0000	1082.3320
MODAL	Modo	12	0.1905	-4.0743	0.3548	-1.4587	1.0000	1087.8582
MODAL	Modo	13	0.1765	-2.0327	-0.4721	0.3398	1.0000	1267.8810
MODAL	Modo	14	0.1648	-13.2643	2.0914	-0.2442	1.0000	1452.9690
MODAL	Modo	15	0.1644	-8.9583	-2.1602	-0.6101	1.0000	1461.4581
MODAL	Modo	16	0.1590	-7.3751	-3.0930	0.9650	1.0000	1560.9991
MODAL	Modo	17	0.1512	1.3517	-1.2744	0.3438	1.0000	1726.4522
MODAL	Modo	18	0.1443	-3.7541	-3.2534	-0.6667	1.0000	1894.8116
MODAL	Modo	19	0.1425	-1.5970	1.7313	2.1503	1.0000	1943.6206
MODAL	Modo	20	0.1417	-6.2596	3.9255	-0.0778	1.0000	1965.7268
MODAL	Modo	21	0.1409	2.0022	0.2203	0.0496	1.0000	1987.3966
MODAL	Modo	22	0.1386	6.6922	3.7946	-0.9441	1.0000	2054.9333
MODAL	Modo	23	0.1341	0.6586	5.1802	-1.6090	1.0000	2194.5182
MODAL	Modo	24	0.1331	-11.1863	3.6470	1.2905	1.0000	2229.6861
MODAL	Modo	25	0.1319	-0.6739	2.0600	-0.6852	1.0000	2269.9528
MODAL	Modo	26	0.1311	0.6779	-0.4281	-3.5620	1.0000	2295.3812
MODAL	Modo	27	0.1290	-2.7249	3.9931	1.1484	1.0000	2372.1921
MODAL	Modo	28	0.1287	2.1016	2.0853	3.3189	1.0000	2385.2170
MODAL	Modo	29	0.1264	-0.5202	-1.3327	10.0089	1.0000	2469.3461
MODAL	Modo	30	0.1254	1.2411	-3.1849	-13.8036	1.0000	2509.2362
MODAL	Modo	31	0.1245	3.5315	0.6748	2.6153	1.0000	2547.1476
MODAL	Modo	32	0.1206	0.5144	-4.0733	-3.8783	1.0000	2715.2622

MODAL	Modo	33	0.1197	1.8553	4.5678	-1.0857	1.0000	2753.4645
MODAL	Modo	34	0.1164	0.8517	-5.8323	4.7584	1.0000	2915.5109
MODAL	Modo	35	0.1157	1.3759	2.8303	-0.5078	1.0000	2949.1185
MODAL	Modo	36	0.1152	3.4125	-2.4974	-3.1257	1.0000	2975.6881
MODAL	Modo	37	0.1127	-0.7091	0.8553	-2.9604	1.0000	3109.7801
MODAL	Modo	38	0.1106	0.9759	2.6681	2.1722	1.0000	3227.6841
MODAL	Modo	39	0.1084	-0.9110	-1.5733	1.5004	1.0000	3360.9770
MODAL	Modo	40	0.1066	-2.0950	-0.6313	-2.7163	1.0000	3475.3173
MODAL	Modo	41	0.1051	-1.2412	2.1219	-1.0277	1.0000	3576.4985
MODAL	Modo	42	0.1039	-0.4005	-0.9546	-2.1575	1.0000	3655.5340
MODAL	Modo	43	0.1034	-2.6330	0.8433	1.3704	1.0000	3689.5181
MODAL	Modo	44	0.1032	-0.0221	-0.2791	0.1399	1.0000	3709.6119
MODAL	Modo	45	0.1004	-0.7716	-0.3558	-0.3268	1.0000	3919.7740
MODAL	Modo	46	0.1000	2.4913	1.8528	1.0285	1.0000	3951.1021
MODAL	Modo	47	0.0993	-0.9175	-0.0361	1.7705	1.0000	4005.5151
MODAL	Modo	48	0.0988	-0.2836	-4.0362	0.7928	1.0000	4047.6553
MODAL	Modo	49	0.0981	-0.1892	3.5177	1.3522	1.0000	4099.0761
MODAL	Modo	50	0.0975	0.3223	0.9934	-2.3396	1.0000	4154.6422
MODAL	Modo	51	0.0960	1.0838	2.5554	-1.7504	1.0000	4285.4122
MODAL	Modo	52	0.0947	-1.0530	-1.2169	1.6154	1.0000	4405.0563
MODAL	Modo	53	0.0936	-4.1171	-2.8740	0.5769	1.0000	4507.8411
MODAL	Modo	54	0.0930	-0.6648	3.1109	-1.1645	1.0000	4560.7998
MODAL	Modo	55	0.0927	0.5864	-2.1352	0.1248	1.0000	4589.2974
MODAL	Modo	56	0.0922	0.2523	0.3550	-1.1720	1.0000	4647.2650
MODAL	Modo	57	0.0913	1.1319	0.5201	1.7247	1.0000	4740.9935
MODAL	Modo	58	0.0903	-0.9638	4.8695	1.0848	1.0000	4844.0919
MODAL	Modo	59	0.0900	-0.7033	-1.3176	1.9816	1.0000	4871.9451
MODAL	Modo	60	0.0894	-0.1035	-0.1325	-1.5938	1.0000	4941.8563
MODAL	Modo	61	0.0889	0.7003	-1.3313	0.6521	1.0000	4997.4604
MODAL	Modo	62	0.0879	-0.5168	-1.9659	2.3832	1.0000	5115.0822
MODAL	Modo	63	0.0873	1.9071	0.4962	-2.9321	1.0000	5182.8762
MODAL	Modo	64	0.0868	1.7982	-2.6087	0.5378	1.0000	5236.4103
MODAL	Modo	65	0.0856	0.7277	0.5523	2.3754	1.0000	5382.8436
MODAL	Modo	66	0.0855	0.5002	1.7854	-6.9048	1.0000	5399.1536
MODAL	Modo	67	0.0852	-0.4486	1.6013	1.5920	1.0000	5432.2668
MODAL	Modo	68	0.0843	-0.8494	-2.0711	0.7179	1.0000	5561.7913
MODAL	Modo	69	0.0833	-1.3775	-1.1496	2.2827	1.0000	5683.1744
MODAL	Modo	70	0.0830	1.3644	1.0621	3.4263	1.0000	5734.7359
MODAL	Modo	71	0.0823	-0.0078	0.9483	6.2407	1.0000	5833.6838
MODAL	Modo	72	0.0812	-0.2633	0.5482	-1.4699	1.0000	5981.3934

MODAL	Modo	73	0.0803	0.5737	0.9215	1.9530	1.0000	6123.0657
MODAL	Modo	74	0.0798	-2.0752	-0.7820	0.9335	1.0000	6207.1951
MODAL	Modo	75	0.0790	-1.1007	0.3193	-1.6412	1.0000	6333.0878
MODAL	Modo	76	0.0788	0.3800	-0.8009	1.6056	1.0000	6362.7724
MODAL	Modo	77	0.0782	-0.1478	0.3190	-0.3559	1.0000	6451.8988
MODAL	Modo	78	0.0778	-0.6023	1.5472	2.9621	1.0000	6515.5687
MODAL	Modo	79	0.0773	-0.2368	0.4747	2.1716	1.0000	6611.3385
MODAL	Modo	80	0.0769	0.1363	-0.4159	-0.9385	1.0000	6672.5323
MODAL	Modo	81	0.0767	0.7965	-1.0321	-3.7852	1.0000	6704.7303
MODAL	Modo	82	0.0755	-3.7397	-0.0094	0.2632	1.0000	6917.8706
MODAL	Modo	83	0.0750	0.1882	0.3615	0.5878	1.0000	7026.1807
MODAL	Modo	84	0.0748	2.8704	-0.1306	-6.7369	1.0000	7053.3746
MODAL	Modo	85	0.0745	-1.5576	1.3780	-5.9744	1.0000	7112.0203
MODAL	Modo	86	0.0738	-0.3604	0.0485	8.8625	1.0000	7255.9464
MODAL	Modo	87	0.0735	-0.3776	0.5955	-1.6890	1.0000	7305.2865
MODAL	Modo	88	0.0731	-0.5292	1.0121	2.0388	1.0000	7398.0245
MODAL	Modo	89	0.0727	0.8434	-0.5232	-2.5577	1.0000	7467.4142
MODAL	Modo	90	0.0722	2.1140	0.1552	-3.9339	1.0000	7563.8978
MODAL	Modo	91	0.0718	1.8267	-0.1073	-3.7088	1.0000	7659.8610
MODAL	Modo	92	0.0716	2.1203	0.2502	3.6550	1.0000	7705.3441
MODAL	Modo	93	0.0711	2.0331	-1.4361	5.1235	1.0000	7808.5080
MODAL	Modo	94	0.0708	1.3656	-0.3894	-2.0811	1.0000	7875.1504
MODAL	Modo	95	0.0705	1.9865	0.3698	4.0560	1.0000	7946.3181
MODAL	Modo	96	0.0703	0.0864	0.2027	2.9582	1.0000	7986.4554
MODAL	Modo	97	0.0699	2.8051	-0.0022	3.4852	1.0000	8088.4889
MODAL	Modo	98	0.0696	-0.4232	-0.0971	-0.9895	1.0000	8155.9866
MODAL	Modo	99	0.0691	-0.1250	1.4810	1.2707	1.0000	8271.1449
MODAL	Modo	100	0.0689	0.0682	-0.8723	-3.8626	1.0000	8324.4383
MODAL	Modo	101	0.0684	0.5731	-0.4583	2.5845	1.0000	8442.9815
MODAL	Modo	102	0.0682	-1.3708	0.3007	2.3047	1.0000	8480.5670
MODAL	Modo	103	0.0677	-0.8799	2.5306	-4.5711	1.0000	8602.7751
MODAL	Modo	104	0.0672	1.4109	-0.0612	2.6776	1.0000	8741.5598
MODAL	Modo	105	0.0670	0.1289	0.4838	-1.8825	1.0000	8786.1056
MODAL	Modo	106	0.0666	0.9575	0.3835	-1.6387	1.0000	8887.5929
MODAL	Modo	107	0.0663	-0.3279	-0.1788	0.0723	1.0000	8982.3520
MODAL	Modo	108	0.0661	-0.0987	-0.0583	5.1593	1.0000	9028.1788
MODAL	Modo	109	0.0659	0.5436	0.2124	2.2531	1.0000	9103.9529
MODAL	Modo	110	0.0658	-0.1476	-0.0974	0.1362	1.0000	9130.4364

Tabla 9. Factores de participación modal

4.4.5 Relación de participación modal de masas del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"

Observaciones	Relación de participación modal de masas										Dirección predominante
	Caso de estudio	Tipo de caso	No. De Modo	Periodo	Dirección			Acumulado en Dirección			
					UX	UY	UZ	UX	UY	UZ	
				Seg.	%	%	%	% Acum.	% Acum.	% Acum.	
MODAL	Modo	1	0.5337	3.70%	13.59%	0.02%	3.70%	13.59%	0.02%	Y	
MODAL	Modo	2	0.5168	7.35%	5.31%	0.00%	11.06%	18.91%	0.02%	X	
MODAL	Modo	3	0.3642	0.00%	0.00%	0.53%	11.06%	18.91%	0.55%	Z	
MODAL	Modo	4	0.3511	0.03%	28.35%	0.00%	11.09%	47.26%	0.55%	Y	
MODAL	Modo	5	0.2520	0.11%	0.29%	0.01%	11.20%	47.55%	0.55%	Y	
MODAL	Modo	6	0.2254	10.87%	0.31%	0.06%	22.07%	47.85%	0.61%	X	
MODAL	Modo	7	0.2227	0.04%	0.29%	0.00%	22.11%	48.14%	0.62%	Y	
MODAL	Modo	8	0.2153	1.38%	11.60%	0.06%	23.49%	59.74%	0.68%	Y	
MODAL	Modo	9	0.2079	8.64%	2.46%	0.00%	32.13%	62.19%	0.68%	X	
MODAL	Modo	10	0.1971	2.72%	0.07%	0.26%	34.85%	62.26%	0.94%	X	
MODAL	Modo	11	0.1910	1.08%	0.00%	0.47%	35.93%	62.26%	1.41%	X	
MODAL	Modo	12	0.1905	1.22%	0.01%	0.16%	37.15%	62.27%	1.57%	X	
MODAL	Modo	13	0.1765	0.30%	0.02%	0.01%	37.46%	62.29%	1.57%	X	
MODAL	Modo	14	0.1648	12.95%	0.32%	0.00%	50.41%	62.61%	1.58%	X	
MODAL	Modo	15	0.1644	5.91%	0.34%	0.03%	56.31%	62.96%	1.61%	X	
MODAL	Modo	16	0.1590	4.00%	0.70%	0.07%	60.32%	63.66%	1.67%	X	
MODAL	Modo	17	0.1512	0.13%	0.12%	0.01%	60.45%	63.78%	1.68%	X	
MODAL	Modo	18	0.1443	1.04%	0.78%	0.03%	61.49%	64.56%	1.72%	X	
MODAL	Modo	19	0.1425	0.19%	0.22%	0.34%	61.67%	64.78%	2.06%	Y	
MODAL	Modo	20	0.1417	2.88%	1.13%	0.00%	64.56%	65.91%	2.06%	X	
MODAL	Modo	21	0.1409	0.30%	0.00%	0.00%	64.85%	65.92%	2.06%	X	
MODAL	Modo	22	0.1386	3.30%	1.06%	0.07%	68.15%	66.98%	2.12%	X	
MODAL	Modo	23	0.1341	0.03%	1.98%	0.19%	68.18%	68.95%	2.31%	Y	
MODAL	Modo	24	0.1331	9.21%	0.98%	0.12%	77.39%	69.93%	2.44%	X	
MODAL	Modo	25	0.1319	0.03%	0.31%	0.03%	77.43%	70.24%	2.47%	Y	

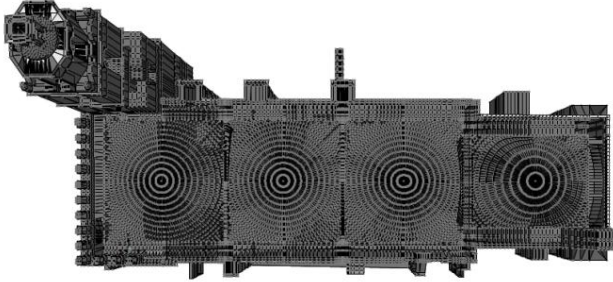
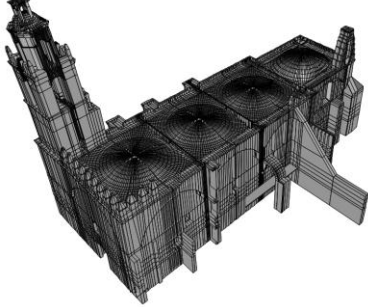
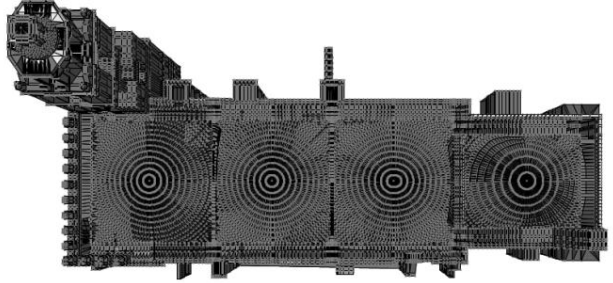
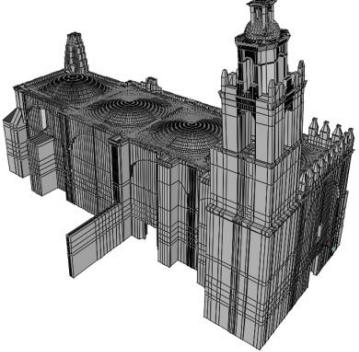
MODAL	Modo	26	0.1311	0.03%	0.01%	0.93%	77.46%	70.26%	3.40%	Z
MODAL	Modo	27	0.1290	0.55%	1.17%	0.10%	78.01%	71.43%	3.50%	Y
MODAL	Modo	28	0.1287	0.33%	0.32%	0.81%	78.33%	71.75%	4.31%	Z
MODAL	Modo	29	0.1264	0.02%	0.13%	7.37%	78.35%	71.88%	11.69%	Z
MODAL	Modo	30	0.1254	0.11%	0.75%	14.02%	78.46%	72.63%	25.71%	Z
MODAL	Modo	31	0.1245	0.92%	0.03%	0.50%	79.38%	72.66%	26.21%	X
MODAL	Modo	32	0.1206	0.02%	1.22%	1.11%	79.40%	73.88%	27.32%	Y
MODAL	Modo	33	0.1197	0.25%	1.54%	0.09%	79.65%	75.42%	27.41%	Y
MODAL	Modo	34	0.1164	0.05%	2.50%	1.67%	79.71%	77.92%	29.07%	Y
MODAL	Modo	35	0.1157	0.14%	0.59%	0.02%	79.85%	78.51%	29.09%	Y
MODAL	Modo	36	0.1152	0.86%	0.46%	0.72%	80.70%	78.97%	29.81%	X
MODAL	Modo	37	0.1127	0.04%	0.05%	0.65%	80.74%	79.02%	30.46%	Z
MODAL	Modo	38	0.1106	0.07%	0.52%	0.35%	80.81%	79.55%	30.80%	Y
MODAL	Modo	39	0.1084	0.06%	0.18%	0.17%	80.87%	79.73%	30.97%	Y
MODAL	Modo	40	0.1066	0.32%	0.03%	0.54%	81.20%	79.76%	31.51%	Z
MODAL	Modo	41	0.1051	0.11%	0.33%	0.08%	81.31%	80.09%	31.59%	Y
MODAL	Modo	42	0.1039	0.01%	0.07%	0.34%	81.32%	80.16%	31.93%	Z
MODAL	Modo	43	0.1034	0.51%	0.05%	0.14%	81.83%	80.21%	32.07%	Y
MODAL	Modo	44	0.1032	0.00%	0.01%	0.00%	81.83%	80.22%	32.07%	Y
MODAL	Modo	45	0.1004	0.04%	0.01%	0.01%	81.87%	80.23%	32.08%	X
MODAL	Modo	46	0.1000	0.46%	0.25%	0.08%	82.33%	80.48%	32.16%	X
MODAL	Modo	47	0.0993	0.06%	0.00%	0.23%	82.39%	80.48%	32.39%	Z
MODAL	Modo	48	0.0988	0.01%	1.20%	0.05%	82.40%	81.68%	32.43%	Y
MODAL	Modo	49	0.0981	0.00%	0.91%	0.13%	82.40%	82.59%	32.57%	Y
MODAL	Modo	50	0.0975	0.01%	0.07%	0.40%	82.41%	82.66%	32.97%	Y
MODAL	Modo	51	0.0960	0.09%	0.48%	0.23%	82.50%	83.14%	33.20%	Y
MODAL	Modo	52	0.0947	0.08%	0.11%	0.19%	82.58%	83.25%	33.39%	Z
MODAL	Modo	53	0.0936	1.25%	0.61%	0.02%	83.83%	83.86%	33.41%	X
MODAL	Modo	54	0.0930	0.03%	0.71%	0.10%	83.86%	84.57%	33.51%	Y
MODAL	Modo	55	0.0927	0.03%	0.34%	0.00%	83.88%	84.91%	33.51%	Y
MODAL	Modo	56	0.0922	0.00%	0.01%	0.10%	83.89%	84.92%	33.62%	Z

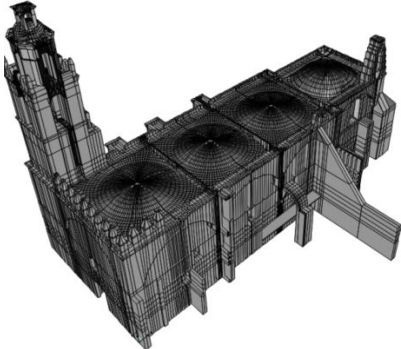
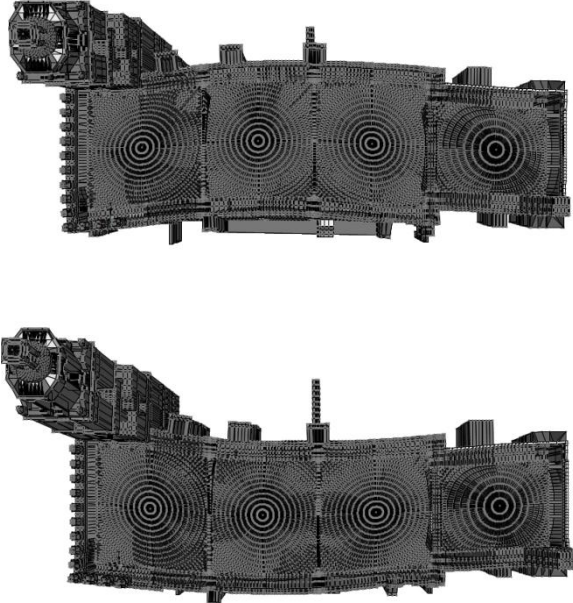
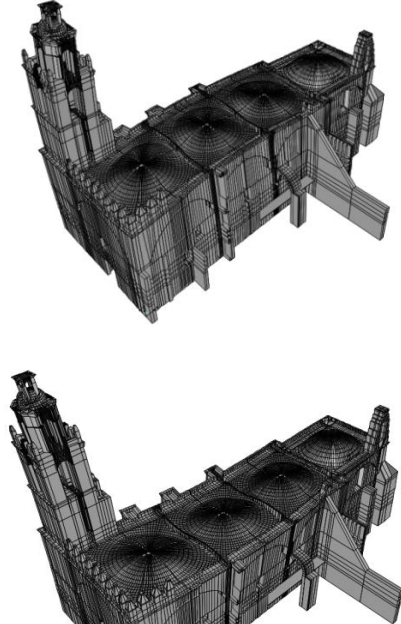

MODAL	Modo	57	0.0913	0.09%	0.02%	0.22%	83.98%	84.94%	33.83%	Z
MODAL	Modo	58	0.0903	0.07%	1.75%	0.09%	84.05%	86.68%	33.92%	Y
MODAL	Modo	59	0.0900	0.04%	0.13%	0.29%	84.09%	86.81%	34.21%	Z
MODAL	Modo	60	0.0894	0.00%	0.00%	0.19%	84.09%	86.81%	34.40%	Z
MODAL	Modo	61	0.0889	0.04%	0.13%	0.03%	84.12%	86.94%	34.43%	Y
MODAL	Modo	62	0.0879	0.02%	0.28%	0.42%	84.14%	87.23%	34.85%	Y
MODAL	Modo	63	0.0873	0.27%	0.02%	0.63%	84.41%	87.24%	35.48%	X
MODAL	Modo	64	0.0868	0.24%	0.50%	0.02%	84.65%	87.74%	35.50%	Y
MODAL	Modo	65	0.0856	0.04%	0.02%	0.42%	84.69%	87.77%	35.92%	Z
MODAL	Modo	66	0.0855	0.02%	0.23%	3.51%	84.71%	88.00%	39.43%	Z
MODAL	Modo	67	0.0852	0.01%	0.19%	0.19%	84.72%	88.19%	39.61%	Y, Z
MODAL	Modo	68	0.0843	0.05%	0.32%	0.04%	84.77%	88.51%	39.65%	Y
MODAL	Modo	69	0.0833	0.14%	0.10%	0.38%	84.91%	88.60%	40.03%	Z
MODAL	Modo	70	0.0830	0.14%	0.08%	0.86%	85.05%	88.69%	40.90%	Z
MODAL	Modo	71	0.0823	0.00%	0.07%	2.87%	85.05%	88.75%	43.76%	Z
MODAL	Modo	72	0.0812	0.01%	0.02%	0.16%	85.06%	88.77%	43.92%	Z
MODAL	Modo	73	0.0803	0.02%	0.06%	0.28%	85.08%	88.84%	44.20%	Y
MODAL	Modo	74	0.0798	0.32%	0.05%	0.06%	85.40%	88.88%	44.27%	X
MODAL	Modo	75	0.0790	0.09%	0.01%	0.20%	85.49%	88.89%	44.47%	Z
MODAL	Modo	76	0.0788	0.01%	0.05%	0.19%	85.50%	88.94%	44.66%	Z
MODAL	Modo	77	0.0782	0.00%	0.01%	0.01%	85.50%	88.94%	44.66%	Y, Z
MODAL	Modo	78	0.0778	0.03%	0.18%	0.65%	85.53%	89.12%	45.31%	Z
MODAL	Modo	79	0.0773	0.00%	0.02%	0.35%	85.53%	89.14%	45.66%	Z
MODAL	Modo	80	0.0769	0.00%	0.01%	0.06%	85.53%	89.15%	45.72%	Z
MODAL	Modo	81	0.0767	0.05%	0.08%	1.05%	85.58%	89.23%	46.78%	Z
MODAL	Modo	82	0.0755	1.03%	0.00%	0.01%	86.61%	89.23%	46.78%	X
MODAL	Modo	83	0.0750	0.00%	0.01%	0.03%	86.61%	89.24%	46.81%	Z
MODAL	Modo	84	0.0748	0.61%	0.00%	3.34%	87.22%	89.24%	50.15%	Z
MODAL	Modo	85	0.0745	0.18%	0.14%	2.63%	87.39%	89.38%	52.77%	Z
MODAL	Modo	86	0.0738	0.01%	0.00%	5.78%	87.40%	89.38%	58.56%	Z
MODAL	Modo	87	0.0735	0.01%	0.03%	0.21%	87.42%	89.40%	58.77%	Z

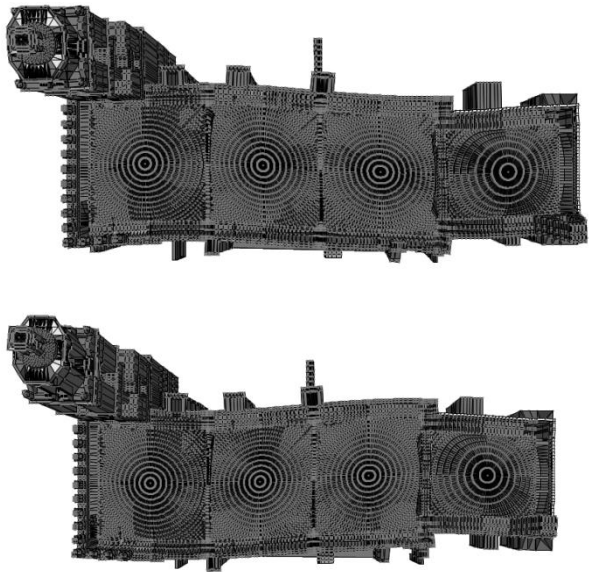
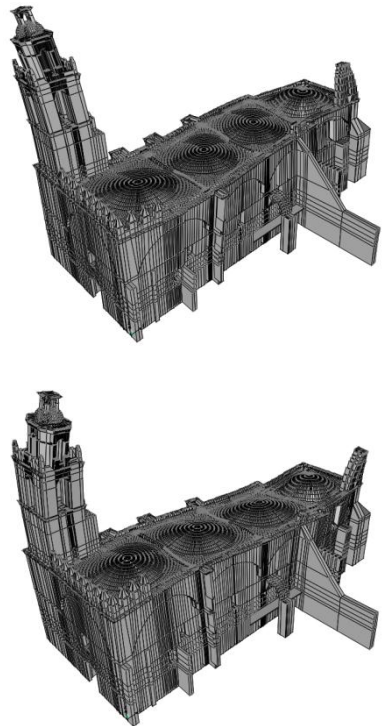
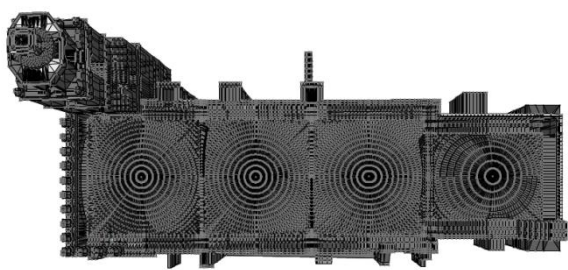
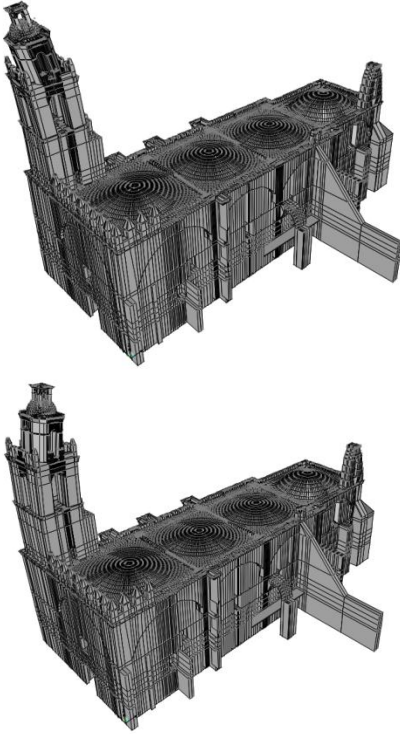
MODAL	Modo	88	0.0731	0.02%	0.08%	0.31%	87.44%	89.48%	59.07%	Z
MODAL	Modo	89	0.0727	0.05%	0.02%	0.48%	87.49%	89.50%	59.55%	Z
MODAL	Modo	90	0.0722	0.33%	0.00%	1.14%	87.82%	89.50%	60.69%	Z
MODAL	Modo	91	0.0718	0.25%	0.00%	1.01%	88.06%	89.50%	61.70%	Z
MODAL	Modo	92	0.0716	0.33%	0.00%	0.98%	88.39%	89.51%	62.69%	Z
MODAL	Modo	93	0.0711	0.30%	0.15%	1.93%	88.70%	89.66%	64.62%	Z
MODAL	Modo	94	0.0708	0.14%	0.01%	0.32%	88.83%	89.67%	64.94%	X
MODAL	Modo	95	0.0705	0.29%	0.01%	1.21%	89.13%	89.68%	66.15%	Z
MODAL	Modo	96	0.0703	0.00%	0.00%	0.64%	89.13%	89.68%	66.79%	Z
MODAL	Modo	97	0.0699	0.58%	0.00%	0.89%	89.71%	89.68%	67.69%	Z
MODAL	Modo	98	0.0696	0.01%	0.00%	0.07%	89.72%	89.68%	67.76%	Z
MODAL	Modo	99	0.0691	0.00%	0.16%	0.12%	89.72%	89.85%	67.88%	Y
MODAL	Modo	100	0.0689	0.00%	0.06%	1.10%	89.72%	89.90%	68.98%	Z
MODAL	Modo	101	0.0684	0.02%	0.02%	0.49%	89.74%	89.92%	69.47%	Z
MODAL	Modo	102	0.0682	0.14%	0.01%	0.39%	89.88%	89.92%	69.86%	Z
MODAL	Modo	103	0.0677	0.06%	0.47%	1.54%	89.94%	90.40%	71.40%	Y
MODAL	Modo	104	0.0672	0.15%	0.00%	0.53%	90.09%	90.40%	71.92%	Z
MODAL	Modo	105	0.0670	0.00%	0.02%	0.26%	90.09%	90.41%	72.19%	Z
MODAL	Modo	106	0.0666	0.07%	0.01%	0.20%	90.15%	90.42%	72.38%	Z
MODAL	Modo	107	0.0663	0.01%	0.00%	0.00%	90.16%	90.43%	72.38%	X
MODAL	Modo	108	0.0661	0.00%	0.00%	1.96%	90.16%	90.43%	74.34%	Z
MODAL	Modo	109	0.0659	0.02%	0.00%	0.37%	90.18%	90.43%	74.72%	Z
MODAL	Modo	110	0.0658	0.00%	0.00%	0.00%	90.19%	90.43%	74.72%	

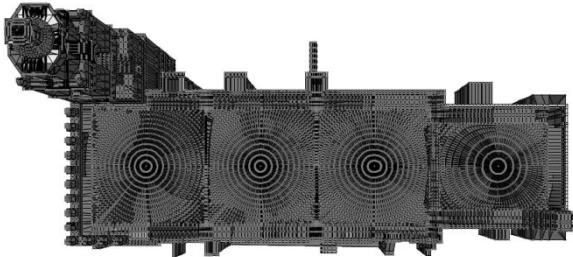
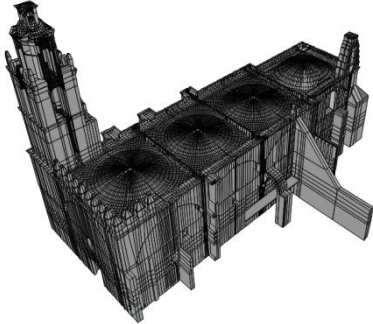
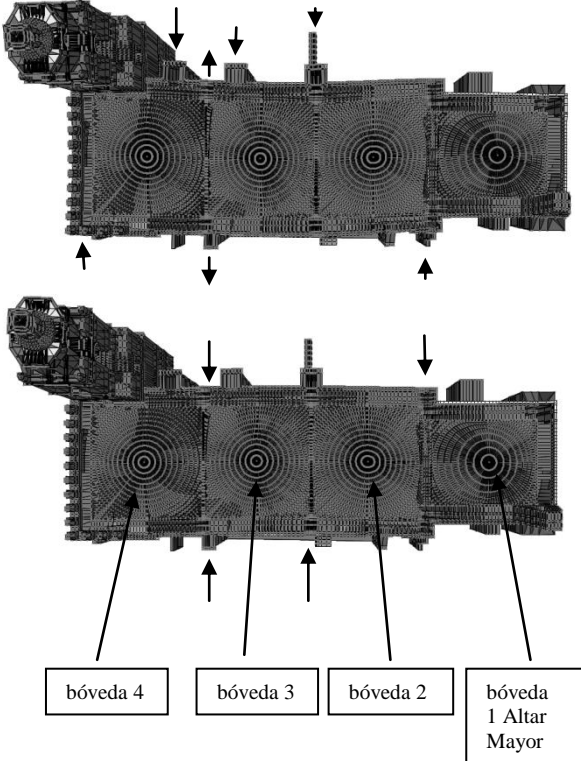
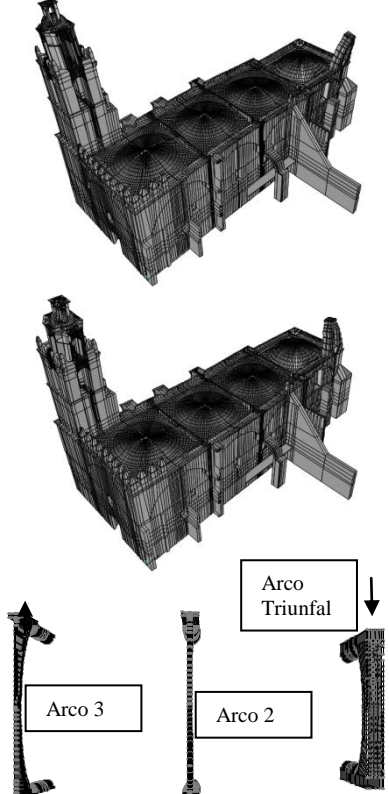
Tabla 10. Relación de participación modal de masas

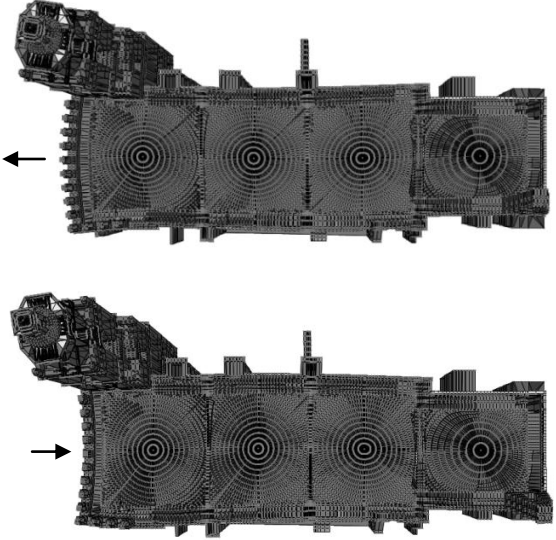
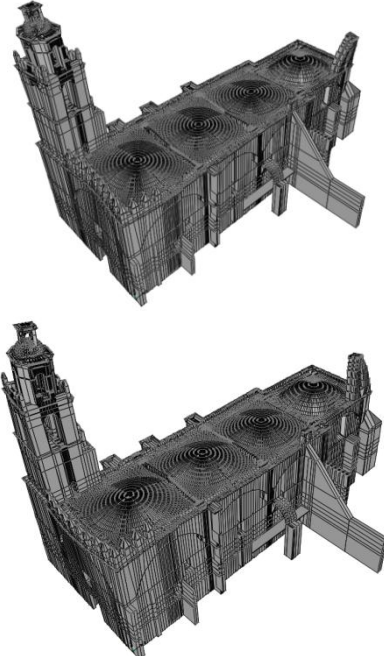
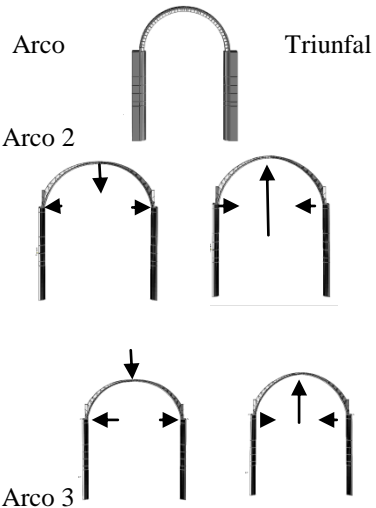
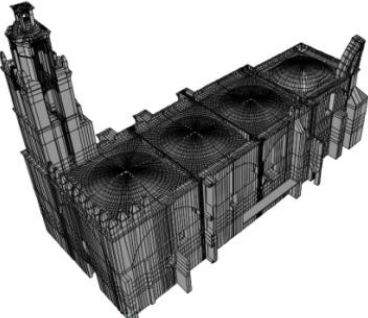
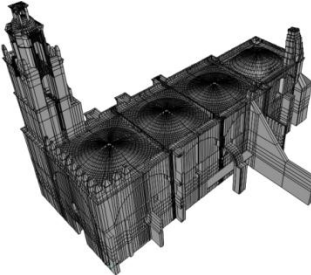
4.4.6 Formas modales del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"

12 Formas Modales, Periodos y Frecuencias del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"	
Modo	Esquema y descripción
1	<div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <p style="text-align: center;">Periodo T=0.53367, Frecuencia f=1.87383</p> <p>Bóvedas 2, 3, y 4: Presentan un ligero movimiento en la dirección (N-S).</p> <p>Contrafuertes: Se mueven conjuntamente con los muros.</p> <p>Espadaña: Oscila ligeramente de norte a sur.</p> <p>Fachada presenta un movimiento transversal (N-S).</p> <p>Muros Laterales: Por la influencia del movimiento de la torre desplazan transversalmente en forma coordinada.</p> <p>Torre: Presenta una oscilación con una trayectoria diagonal de noroeste a sureste.</p> <p>Con este periodo calibramos los puntos P-01, P-02, P-03 y P-10 del Modelo Analítico</p>
2	<div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <p style="text-align: center;">Periodo T=0.51678, Frecuencia f=1.93506</p> <p>Torre: Teniendo una oscilación con una trayectoria diagonal de noreste a suroeste, afectando a la fachada y Bóveda 4 con un ligero movimiento en dirección (N-S).</p>

<p>3</p>		
	<p>Periodo T=0.36417, Frecuencia f=2.74596 Torre: Presenta una ligera vibracion en la parte superior, Cuerpo 3 y Cupulin, el resto del edificio no presenta respuesta.</p>	
<p>4</p>		
	<p>Periodo T=0.35112, Frecuencia f=2.848 El cuerpo principal del edificio: Torre, Bóvedas, Arcos, Contrafuertes, Fachada, Muros: Responden con un movimiento transversal (N-S), la parte que mayor desplazamiento tiene es la parte central, el ábside oriente se mantiene firme Los Arcos: Presentan efectos de torsión fuera del plano debido a los efectos de torsión del edificio, además de pequeñas deformaciones. Con este periodo, se calibran los puntos P-04 y P-05.</p>	

<p>5</p>		
	<p>Periodo T=0.25204, Frecuencia f=3.96766 Todo el cuerpo principal participa y con una menor respuesta al Modo 4, bóvedas, arcos, contrafuertes, torre, fachada, muros</p>	
<p>6</p>		
	<p>Periodo T=0.22537, Frecuencia f=4.43715</p> <p>Abside: presenta un movimiento de Norte a Sur, en forma cordinada, no presenta apertura y cierre.</p> <p>Bóvedas: inician un ligero movimiento vertical en el centro</p> <p>Espadaña: oscila ligeramente de Norte a Sur</p> <p>Muros laterales: inician un ligero movimiento de apertura y cierre sin coordinación, , por la influencia del inicio del movimiento vertical de las bóvedas</p> <p>Torre: presenta menor torsión y el cuerpo 3 y el cupulín inician un desplazamiento en la dirección X.</p>	

<p>7</p>		
	<p>Periodo T=0.22268, Frecuencia f=4.49079</p> <p>Torsión en el cuerpo superior de la torre y la espadaña, ligero desplazamiento lateral del Arco Triunfal</p>	
<p>8</p>		
	<p>Periodo T=0.21533, Frecuencia f=4.64399</p> <p>Bóvedas y arco 3: Se observa un desplazamiento vertical en la bóveda No. 4, influye la torsión de la torre y participa en la apertura y cierre de muros de esta sección y de la Fachada, el resto de las bóvedas y arcos se desplazan aun en forma coordinada y con una poco de torsión lateral.</p> <p>Espadaña: Cabeceo transversal (N-S).</p> <p>Fachada: Pandeo en la parte superior, apertura y cierre.</p> <p>Muros Laterales: Apertura y cierre en la sección de la bóveda No. 4 junto a la torre, igual que el arco No. 3</p> <p>Torre: cabeceo transversal (N-S), de la parte superior (Cuerpo 3 y Cupulín), y en el Cuerpo 1 se observa una ligera torsión.</p>	

<p>9</p>		 
<p>10</p>		
<p style="text-align: center;">Periodo $T=0.20785$, Frecuencia $f=4.81126$</p> <p>Ábside: No hay apertura y cierre de muros, solo se desplazan en forma coordinada, la bóveda que soportan (Altar Mayor), no presenta movimientos verticales.</p> <p>Arco Triunfal, Arco 2 y Arco 3: En el centro de los arcos, influye la torsión de la torre y participa en la apertura y cierre de muros y de la Fachada, el resto de las bóvedas y con una poco de torsión lateral.</p> <p>Bóvedas: Se observa un desplazamiento vertical en las bóvedas No. 2, 3 y 4.</p> <p>Columnas: Se observa un efecto de apertura y cierre en la parte superior de las columnas del arco 2 y el arco 3.</p> <p>Espadaña: Cabeceo transversal (N-S).</p> <p>Fachada: Presentando apertura y cierre en la parte superior, en esta forma modal se aprecia la mayor respuesta.</p> <p>Muros Laterales: Apertura y cierre en toda su longitud.</p> <p>Torre: Se observa un efecto de torsión importante, en toda la torre, influye en la apertura y cierre de la fachada y el muro lateral norte.</p>		<p style="text-align: center;">Periodo $T=0.19708$, Frecuencia $f=5.07406$</p>

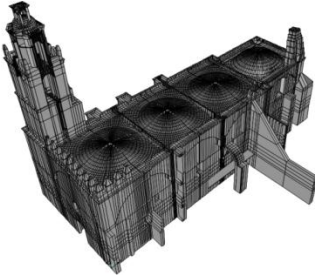
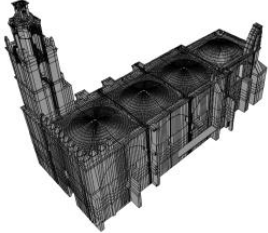
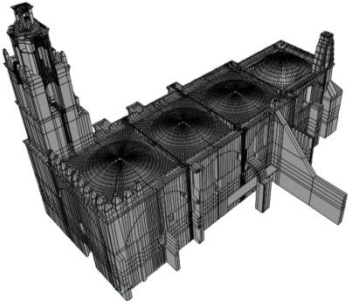
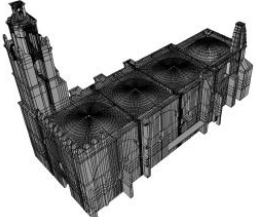
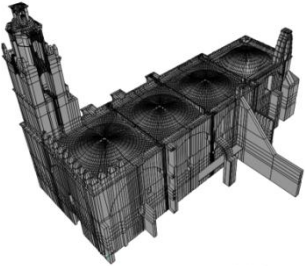
	<p>Ábside: Inicia la apertura y cierre del ábside norte con respecto al ábside sur, el ábside oriente presenta torsión.</p> <p>Espadaña, Aumenta el cabeceo (N-S),</p> <p>Bóvedas y Arcos: Disminuye el movimiento vertical en el centro así como sus desplazamientos laterales de apertura y cierre en la parte superior.</p> <p>Fachada: Disminuye el pandeo en la parte superior.</p> <p>Muros Laterales: Disminuye descoordinación de los muros laterales y contrafuertes, cada contrafuerte se mueve conjuntamente con el muro que apoya.</p> <p>Torre: Disminuye la torsión con respecto al periodo 9.</p>	
11	 <p>Periodo T=0.19098, Frecuencia f=5.23604</p> <p>Ábside: Inicia la apertura y cierre del ábside norte con respecto al ábside sur, el ábside oriente con ligera torsión.</p> <p>Bóvedas y Arcos: Aumenta el movimiento vertical en el centro así como sus desplazamientos laterales de apertura y cierre en la parte superior.</p> <p>Espadaña, Aumenta el cabeceo (N-S).</p> <p>Fachada: Disminuye el pandeo en la parte superior.</p> <p>Muros Laterales: Disminuye descoordinación de los muros laterales y contrafuertes, cada contrafuerte se mueve conjuntamente con el muro que apoya.</p> <p>Torre: Disminuye la torsión con respecto al periodo 9.</p>	
12	 <p>Periodo T=0.19050, Frecuencia f=5.24938</p> <p>Ábside: Inicia la apertura y cierre del ábside norte con respecto al ábside sur, el ábside oriente presenta una ligera torsión.</p> <p>Bóvedas y Arcos: Disminuye el movimiento vertical en el centro así como sus desplazamientos.</p> <p>Espadaña, Aumenta el cabeceo (N-S),</p> <p>Fachada: Disminuye el pandeo en la parte superior.</p> <p>Muros Laterales: Disminuye descoordinación de los muros laterales y contrafuertes, cada contrafuerte se mueve conjuntamente con el muro que apoya.</p> <p>Torre: Disminuye la torsión con respecto al periodo 9</p>	

Fig. 106. 12 Formas Modales, periodos y frecuencias del Edificio del Ex-convento Franciscano de Tecamachalco

4.4.7 Formas modales de los Macroelementos

4.4.7.1 Torre Campanario

Este elemento no tiene una forma modal determinante, ya que es sujeto a la afectación de varios periodos, de los doce periodos estudiados en este trabajo siempre se observa la participación de la torre, en el modo 1 con un periodo de $T=0.53367$ segundos, observamos la oscilación en forma diagonal, en dirección noreste-suroeste. En el modo 2 con un periodo de $T=0.51678$ segundos, la torre oscila en forma diagonal pero ahora en dirección noroeste-sureste, este comportamiento inicial en forma de cruz nos indica que la Torre no está completamente separada del Cuerpo principal del Templo, ya que sus movimientos son coordinados con la parte unida del muro lateral norte y la esquina de la Fachada. En el modo 3, con un periodo de 0.36, la oscilación disminuye, en el modo 4 se repite la oscilación en la misma dirección del modo 1 y 2 y ahora con un efecto de torsión, además se acentúa el jalón a la fachada, en el modo 5 la torre en la parte superior inicia con efectos de torsión y estos continúan hasta el modo 10 aunque en menor proporción, en el modo 11 y 12, continua oscilando y casi con una torsión inapreciable pero que aún existe

4.4.7.2 Muros Laterales (Norte y Sur)

La respuesta de la excitación sísmica se puede observar a partir del modo 3, la oscilación se da en forma coordinada en dirección norte-sur, provocando una pequeña influencia en los arcos y cúpulas, continua en el modo 4 y se acentúa en el modo 5, aquí se observa la torsión a lo largo de todo el edificio y continua la oscilación en forma coordinada hasta el modo 10, en el modo 11 y 12 la oscilación con respecto del muro sur y el muro norte ya no es coordinada y esto afecta el comportamiento de los arcos y cúpulas con movimientos de abrir y cerrar

4.4.7.3 Ábside

Los muros del ábside, presentan efectos de oscilación a partir del modo 3, este movimiento continua y es hasta el modo 5 donde se ve su mayor respuesta pero aun sigue siendo coordinada, en el modo 11 y 12 ya se aprecia la descoordinación de sus movimientos y el movimiento de abertura que transmite al arco triunfal y a la cúpula del altar mayor.

4.4.7.4 Fachada

Esta inicia su respuesta en el modo 1 y modo 2, con una leve oscilación en dirección este-oeste, o sea la dirección longitudinal del edificio, se ve afectada por la forma modal de la torre y el comportamiento de cabeceo de las bóvedas a partir del modo 5, esta oscilación en el sentido longitudinal provoca las grietas verticales que presenta el edificio en el centro superior de la fachada, ya que en la parte interior existe la losa-bóveda del coro que contribuye con la estabilidad en la parte inferior de la fachada

4.4.7.5 Contrafuertes

Inician su respuesta desde los primeros modos, siempre en forma coordinada con los muros laterales y el ábside, no se aprecian efectos de torsión

4.4.7.6 Bóvedas

Estás inician su respuesta desde los primeros modos, pero es hasta el modo 5 y modo 6 donde se aprecian ya esfuerzos considerable en la parte inferior, estos corresponden con las aéreas de agrietamiento observadas en la azotea del edificio

4.4.7.7 Arcos

Están inician su respuesta desde los primeros modos, pero es hasta el modo 5 y modo 6 donde se aprecian ya esfuerzos considerable en la parte inferior, su respuesta se acentúa en el modo 5, modo 6 y modo 10, modo 11 y modo 12, que es donde se presenta la descoordinación de la oscilación de los muros laterales y del ábside.

4.4.8 Casos de carga y combinaciones aplicadas al Modelo Analítico

Casos de carga aplicados al Modelo Analítico del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"		
Carga	Tipo de caso	Tipo de carga
C M	Lineal estático	Muerta
C V	Lineal estático	Viva
MODAL	Modal	
SISMO X	Lineal modal Historia de tiempo	Aceleración
SISMO Y	Lineal modal Historia de tiempo	Aceleración
SISMO Z	Lineal modal Historia de tiempo	Aceleración

Tabla 11. Casos de carga aplicados al Modelo Analítico del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"

Combinaciones de cargas aplicadas al Modelo Analítico del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"		
Combinación	Cargas consideradas por combinación	Abreviaturas
1	CM	CM=Carga muerta CV=Carga Viva Distribuida en azotea 100 kg./m2 SX=Sismo en "X" dirección (Este-Oeste) SY=Sismo en "Y" dirección (Norte-Sur) SZ=Sismo en "Z" dirección (Vertical)
2	CM + CV	
3	CM + CV + SX	
4	CM + CV + SY	
5	CM + CV + SZ	
6	CM + CV + SX + 0.30 SY + SZ	
7	CM + CV + 0.30 SX + SY + SZ	
8	CM + CV + SX + SY + SZ	

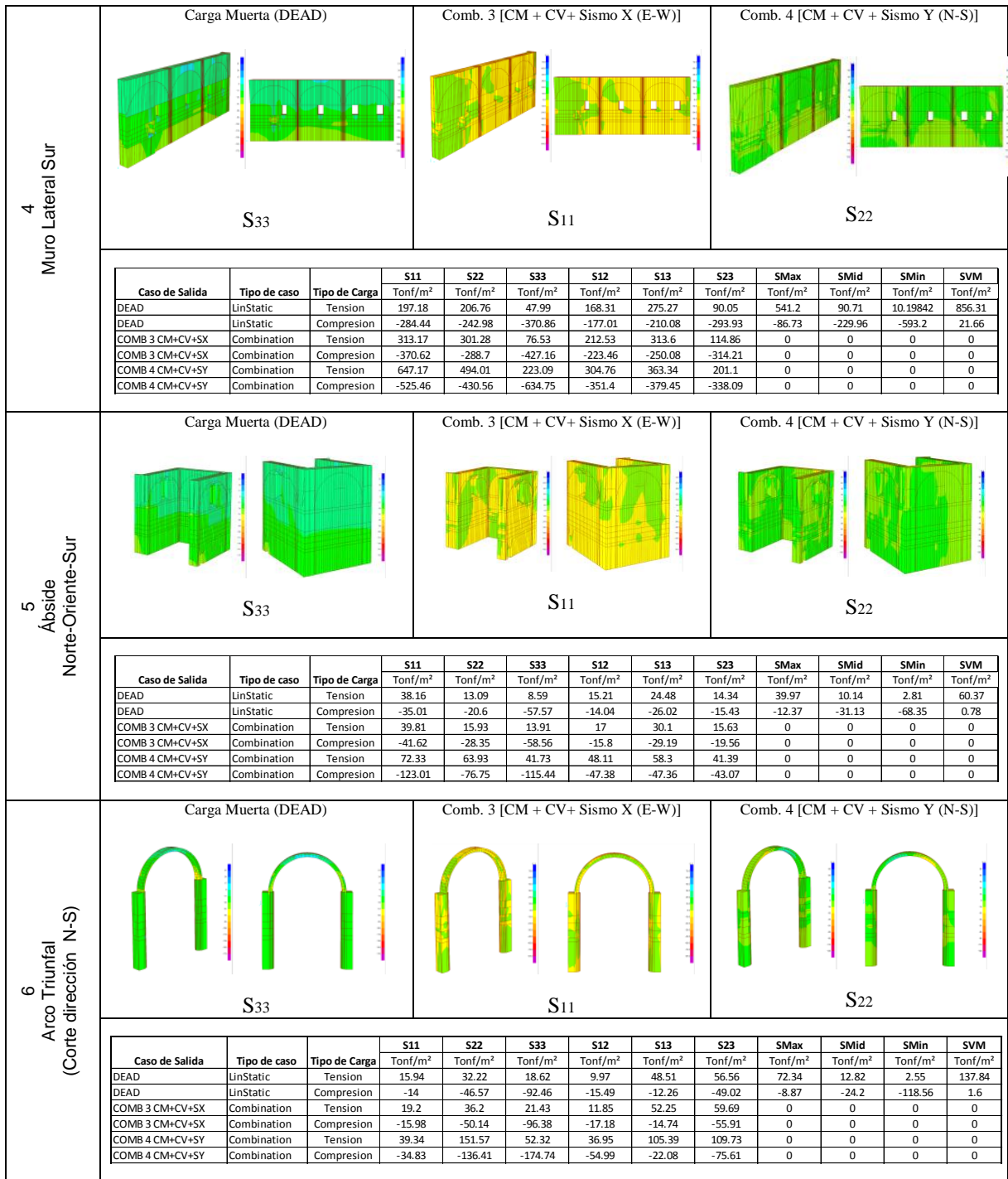
Tabla 12. Combinaciones de cargas aplicadas al Modelo Analítico del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"

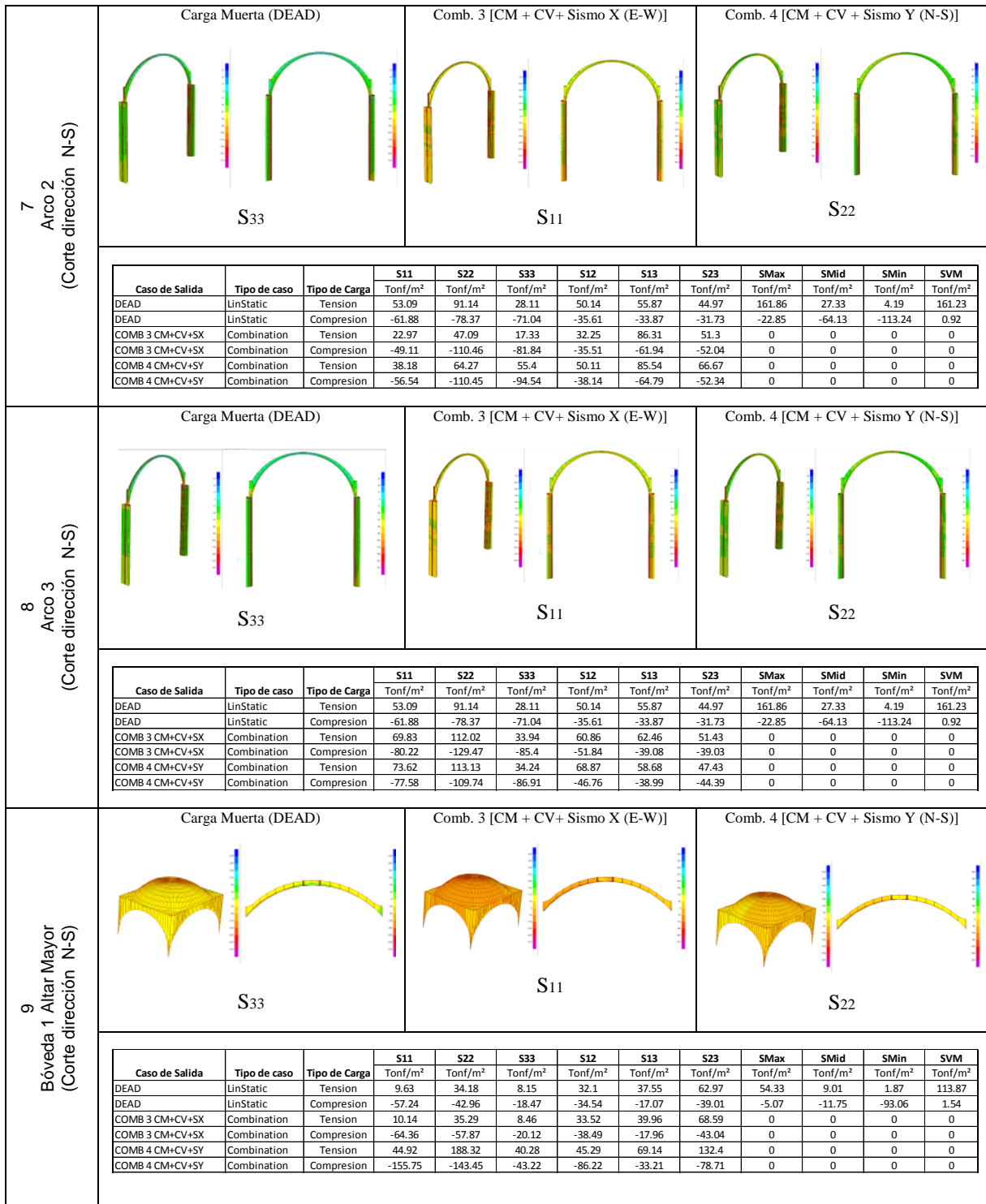
CAPITULO V

RESULTADOS

5.1 Esfuerzos en los macro-elementos, con las diferentes combinaciones aplicadas al M. A. del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"

Esfuerzos máximos en los Macroelementos													
Elemento	Esquema y descripción												
1 Torre (Corte dirección N-S)	Carga Muerta (DEAD)			Comb. 3 [CM + CV + Sismo X (E-W)]					Comb. 4 [CM + CV + Sismo Y (N-S)]				
	S33			S11					S22				
	Caso de Salida	Tipo de caso	Tipo de Carga	S11	S22	S33	S12	S13	S23	SMax	SMid	SMin	SVM
	DEAD	LinStatic	Tension	76.45	68.62	132.59	33.26	113.7	123.34	224.31	61.67	17.13	353.62
DEAD	LinStatic	Compresion	-71.71	-93.73	-299.61	-38.48	-110.12	-129.72	-45.44	-70.16	-358.76	35.08	
COMB 3 CM+CV+SX	Combination	Tension	446.15	237.22	454.8	182.35	330.77	353.58	0	0	0	0	
COMB 3 CM+CV+SX	Combination	Compresion	-441.98	-342.24	-738.85	-188.67	-324.65	-318.95	0	0	0	0	
COMB 4 CM+CV+SY	Combination	Tension	308.7	578.65	524.12	205.16	461.63	447.18	0	0	0	0	
COMB 4 CM+CV+SY	Combination	Compresion	-398.21	-497.56	-939.29	-215.79	-497.93	-401.34	0	0	0	0	
2 Fachada (Corte dirección N-S)	Carga Muerta (DEAD)			Comb. 3 [CM + CV + Sismo X (E-W)]					Comb. 4 [CM + CV + Sismo Y (N-S)]				
	S33			S11					S22				
	Caso de Salida	Tipo de caso	Tipo de Carga	S11	S22	S33	S12	S13	S23	SMax	SMid	SMin	SVM
	DEAD	LinStatic	Tension	17.33	20.54	34.29	20.46	38.91	40.09	161.17	16.36	11.58	240.45
DEAD	LinStatic	Compresion	-25.3	-52.54	-72.81	-18.83	-25.21	-135.43	-16.04	-22.66	-172.95	0.84	
COMB 3 CM+CV+SX	Combination	Tension	65.13	111.65	119.44	161	52.03	50.27	0	0	0	0	
COMB 3 CM+CV+SX	Combination	Compresion	-89.95	-270.07	-175.58	-125.5	-46.96	-361.78	0	0	0	0	
COMB 4 CM+CV+SY	Combination	Tension	143.37	565.68	158.04	74.18	42	161.92	0	0	0	0	
COMB 4 CM+CV+SY	Combination	Compresion	-98.27	-339.42	-176.93	-87.12	-42.21	-308.39	0	0	0	0	
3 Muro Lateral Norte	Carga Muerta (DEAD)			Comb. 3 [CM + CV + Sismo X (E-W)]					Comb. 4 [CM + CV + Sismo Y (N-S)]				
	S33			S11					S22				
	Caso de Salida	Tipo de caso	Tipo de Carga	S11	S22	S33	S12	S13	S23	SMax	SMid	SMin	SVM
	DEAD	LinStatic	Tension	140.5	74.66	35.33	60.39	250.16	136.66	273.85	37.76	4.2	559.6
DEAD	LinStatic	Compresion	-140.42	-107.09	-225.55	-49.63	-212.79	-164.36	-46.33	-86.09	-428.12	3.66	
COMB 3 CM+CV+SX	Combination	Tension	244.83	120.42	47.81	93.86	323.45	152.4	0	0	0	0	
COMB 3 CM+CV+SX	Combination	Compresion	-219.52	-123.73	-301.51	-82.24	-246.28	-225.07	0	0	0	0	
COMB 4 CM+CV+SY	Combination	Tension	498.61	223.53	104.62	153.27	304.18	179.96	0	0	0	0	
COMB 4 CM+CV+SY	Combination	Compresion	-369.53	-187.84	-313.98	-137.5	-337.52	-213.64	0	0	0	0	





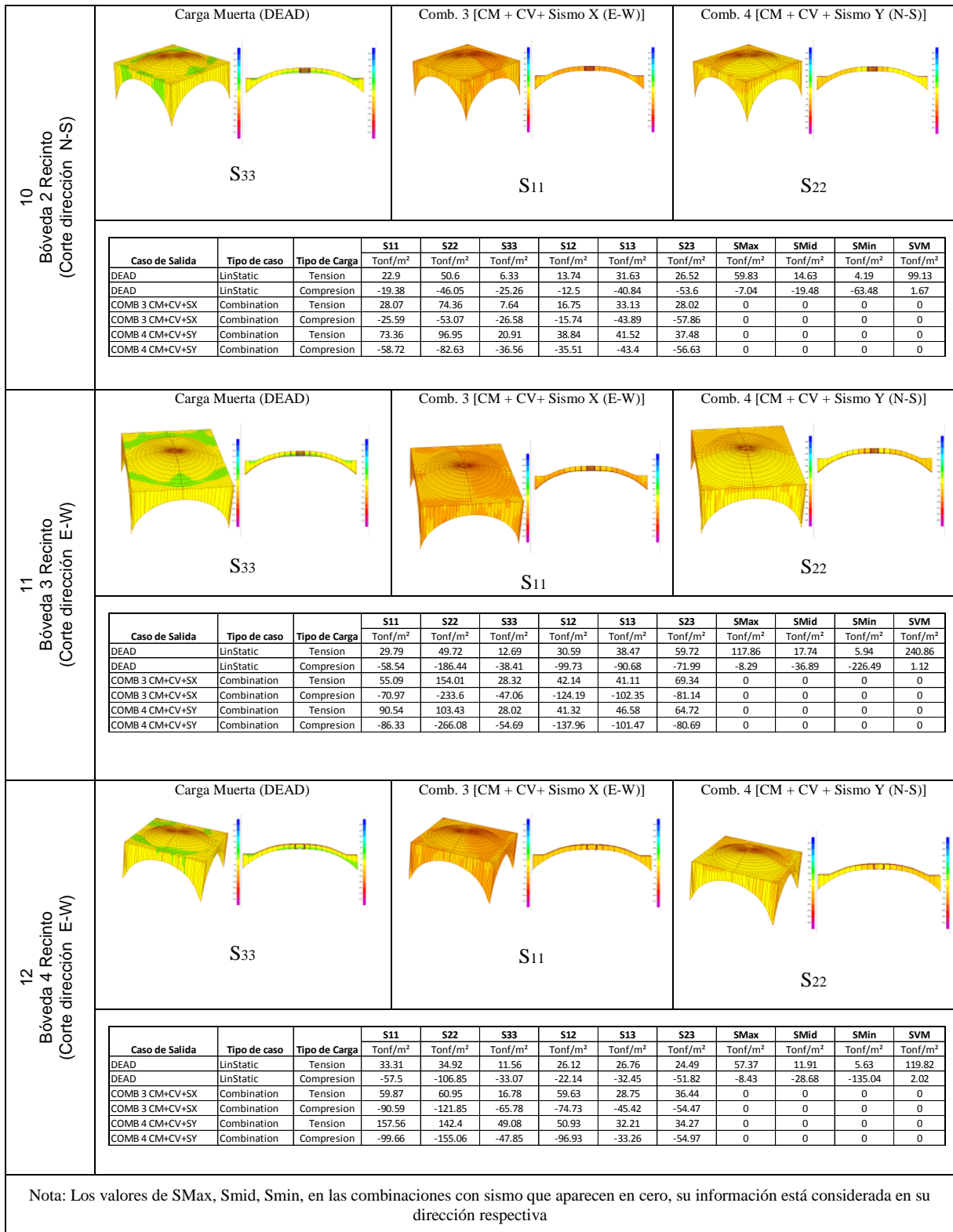


Tabla 13. Diagramas y esfuerzos en los Macroelementos

5.2 Reacciones en la base del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"

Reacciones en la base del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"					
Combinación	Tipo de caso	Sentido	Global FX	Global FY	Global FZ
			Tonf.	Tonf.	Tonf.
COMB 1 CM	Combinación		0.00	0.00	14798.72
COMB 2 CM+CV	Combinación		0.03	0.02	14847.87
COMB 3 CM+CV+SX	Combinación	Max	2314.58	154.58	14957.48
COMB 3 CM+CV+SX	Combinación	Min	-1534.67	-123.30	14774.43
COMB 4 CM+CV+SY	Combinación	Max	146.02	1413.60	14951.70
COMB 4 CM+CV+SY	Combinación	Min	-179.88	-2016.63	14752.93
COMB 5 CM+CV+SZ	Combinación	Max	79.54	103.86	15957.10
COMB 5 CM+CV+SZ	Combinación	Min	-75.79	-94.92	13191.70
COMB 6 (CM+CV+SX+.3SY+SZ)	Combinación	Max	2437.88	682.49	16097.86
COMB 6 (CM+CV+SX+.3SY+SZ)	Combinación	Min	-1664.47	-823.24	13089.78
COMB 7 (CM+CV+SY+.3SX+SZ)	Combinación	Max	919.89	1563.80	16093.82
COMB 7 (CM+CV+SY+.3SX+SZ)	Combinación	Min	-716.12	-2148.57	13074.73
COMB 8 CM+CV+SX+SY+SZ	Combinación	Max	2540.07	1671.99	16170.55
COMB 8 CM+CV+SX+SY+SZ	Combinación	Min	-1790.41	-2234.90	13023.32
Observaciones:					
1) Con la combinación 1 calculamos el peso de la estructura, considerando los elementos de frontera					
2) Los valores máximo y mínimo, corresponden al sentido o dirección de la reacción					

Tabla 14. Reacciones en la base

5.3 Peso y masa del Ex-convento Franciscano de Tecamachalco

Peso y Masa del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"				
Grupo		Peso (Ton)	Masa (Tonf-s ² m)	Nota
1	Torre	3112.35	317.36	Nota: Los valores de peso y de masa, se obtienen en base a las dimensiones obtenidas del estudio de la geometría del edificio y de las propiedades mecánicas asignadas a los materiales del Modelo Analítico ya calibrado, difiere el peso total de la reacción de la base en la dirección z (Tabla 13), debido a que en la Tabla 13 el modelo considera los elementos de frontera.
2	Fachada y Pináculos	1079.60	110.09	
3	Muro Norte	2235.69	227.97	
4	Muro Sur	2461.53	251.00	
5	Ábside	2295.95	234.12	
6	4 Arco Triunfal	153.70	15.68	
7	5 Arco 2	49.48	5.04	
8	6 Arco 3	49.48	5.04	
9	Bóveda	920.81	93.90	
10	Contrafuertes	1300.09	132.57	
11	Espadañas	72.75	7.42	
12	Pretil y Molduras	50.35	5.14	
13	Sotocoro	209.84	21.40	
Total		13991.63	1426.73	

Tabla 15. Peso y Masa del Edificio del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"

5.4 Desplazamiento máximo en los elementos con la "Combinación 8"

DESPLAZAMIENTOS MAXIMOS EN LOS ELEMENTOS, COMBINACION 8							
ELEMENTO		MAXIMO			MINIMO		
		X	Y	Z	X	Y	Z
		(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
1	TORRE BASE	0.00431	0.00806	-0.00083	-0.00709	-0.00498	-0.00836
2	TORRE CUERPO 1	0.00679	0.01539	0.00280	-0.01413	-0.00765	-0.01514
3	TORRE CUERPO 2	0.01376	0.03101	0.00390	-0.02427	-0.01558	-0.01715
4	TORRE CUERPO 3	0.02904	0.04908	0.00339	-0.03545	-0.02798	-0.01725
5	TORRE CUPULIN	0.03892	0.05958	-0.00277	-0.04043	-0.03479	-0.01203
6	FACHADA	0.00594	0.00697	-0.00032	-0.00724	-0.00298	-0.00625
7	MURO LATERAL NORTE	0.00258	0.01557	0.00000	-0.00513	-0.01759	-0.00542
8	MURO LATERAL SUR	0.00234	0.01412	-0.00033	-0.00349	-0.01774	-0.00373
9	ABSIDE NORTE	0.00218	0.01121	-0.00037	-0.00267	-0.00911	-0.00317
10	ABSIDE ORIENTE	0.00212	0.00398	-0.00001	-0.00257	-0.00331	-0.00279
11	ABSIDE SUR	0.00222	0.00977	-0.00025	-0.00271	-0.00786	-0.00374
12	ARCO TRIUNFAL (APOYO COLUMNA)	0.00071	0.00692	0.00025	-0.00111	-0.00452	-0.00328
	ARCO TRIUNFAL (CENTRO)	0.00100	0.00988	-0.00261	-0.00047	-0.00814	-0.00484
13	ARCO 2 RECINTO (APOYO COLUMNA)	0.00094	0.00694	0.00086	-0.00111	-0.00866	-0.00435
	ARCO 2 RECINTO (CENTRO)	0.00100	0.01360	-0.00465	-0.00189	-0.01684	-0.00992
14	ARCO 3 RECINTO (APOYO COLUMNA)	0.00138	0.00751	0.00035	-0.00240	-0.00914	-0.00365
	ARCO 3 RECINTO (CENTRO)	0.00177	0.01308	-0.00442	-0.00230	-0.01378	-0.01325
15	BOVEDA 1, ALTAR MAYOR (PERIMETRO)	0.00116	0.01085	-0.00047	-0.00172	-0.00901	-0.00537
	BOVEDA 1, ALTAR MAYOR (CENTRO)	0.00065	0.00719	-0.00312	-0.00152	-0.00640	-0.00450
16	BOVEDA 2, RECINTO (PERIMETRO)	0.00070	0.01248	-0.00089	-0.00115	-0.01584	-0.00413
	BOVEDA 2, RECINTO (CENTRO)	0.00081	0.01104	-0.00258	-0.00207	-0.01142	-0.01294
17	BOVEDA 3, RECINTO (PERIMETRO)	0.00235	0.01526	0.00080	-0.00371	-0.01757	-0.01382
	BOVEDA 3, RECINTO (CENTRO)	0.00150	0.01251	-0.00379	-0.00256	-0.01484	-0.01450
18	BOVEDA 4, RECINTO (PERIMETRO)	0.00385	0.01407	-0.00047	-0.00496	-0.01468	-0.01382
	BOVEDA 4, RECINTO (CENTRO)	0.00315	0.00847	-0.00550	-0.00264	-0.00675	-0.01363
19	CONTRAFUERTE NORTE 1	0.00490	0.01086	-0.00071	-0.00654	-0.00913	-0.00417
20	CONTRAFUERTE NORTE 2	0.00255	0.01533	0.00103	-0.00329	-0.01609	-0.00471
21	CONTRAFUERTE NORTE 3	0.00202	0.01462	0.00172	-0.00252	-0.01710	-0.00486
22	ESPADAÑA	0.00466	0.02674	0.00229	-0.00643	-0.01777	-0.00483
23	ESPADAÑA ESCALERA	0.00124	0.01080	-0.00124	-0.00120	-0.00978	-0.00280
24	PINACULOS	0.00991	0.01506	-0.00046	-0.01130	-0.01044	-0.00561

Nota: Se considera el desplazamiento de los nodos en la parte superior del elemento

Tabla 16. Desplazamientos máximos en los elementos, con la combinación 8

5.5 Comparación de los resultados del análisis del Modelo Analítico y el estado actual del "Ex-convento Franciscano de Tecamachalco"

Se considera la combinación 8 (por ser la más desfavorable).

5.5.1 Torre Campanario, comparación de resultados de la combinación 8.

- a) En el edificio, se aprecia un pequeño desfase entre los cuerpos 1, 2 y 3 de la torre, estos cuerpos se ven afectados ante la acción sísmica en las direcciones: "X" (E-W) y "Y" (N-S), con desplazamientos en diagonal en las siguientes formas modales: (FM:1, T=0.5337 seg.), (FM:2, T=0.5168 seg.), y efectos importantes de torsión en las siguientes formas modales: (FM: 8, T=0.2153 seg.), (FM: 9, T: 0.2079 seg.) y (FM: 10, T= 0.1971 seg.).



Fig. 107. Torre con desfases

En el Modelo Analítico, se observan esfuerzos de tensión importantes, que corresponden con la franja de unión de cada cuerpo de la torre, los valores no superan la resistencia a tensión de la mampostería, sin embargo a través del tiempo esto ha llevado al desfase actual entre los cuerpos 1, 2 y 3 respectivamente.

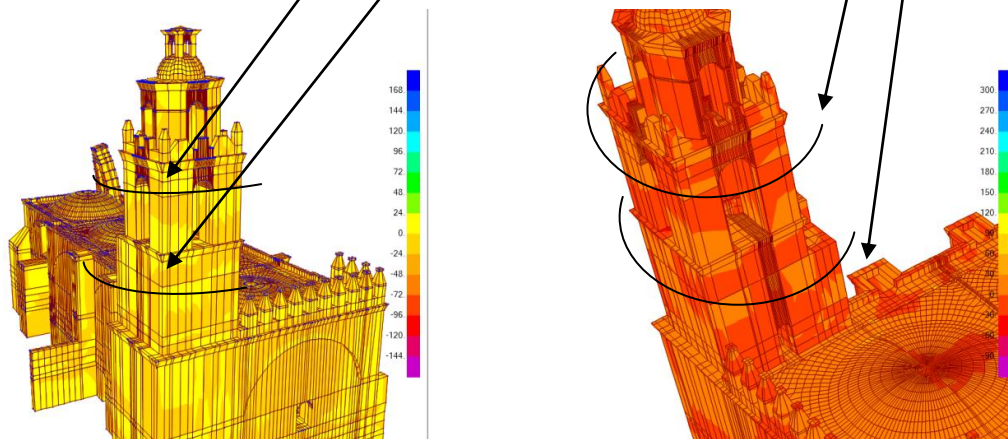


Fig. 108. Esfuerzos de tensión en la Torre, causados por la torsión en los Modos 8,9 y 10.

- b) En el edificio, se aprecian agrietamientos verticales entre la franja de unión de los cuerpos (1-2) y (2-3), principalmente en la parte superior del cuerpo que carga al elemento siguiente, aun cuando no es superado el valor de los esfuerzos a compresión y a tensión, esta franja se ve afectada ante la acción sísmica en las direcciones: "X" (E-W) y "Y" (N-S), con desplazamientos en diagonal en las siguientes formas modales: (FM:1, T=0.5337 seg.), (FM:2, T=0.5168 seg.), y efectos importantes de torsión en las siguientes formas modales: (FM:8, T=0.215 seg.), (FM:9, T: 0.207 seg.) y (FM:10, T= 0.197 seg.).

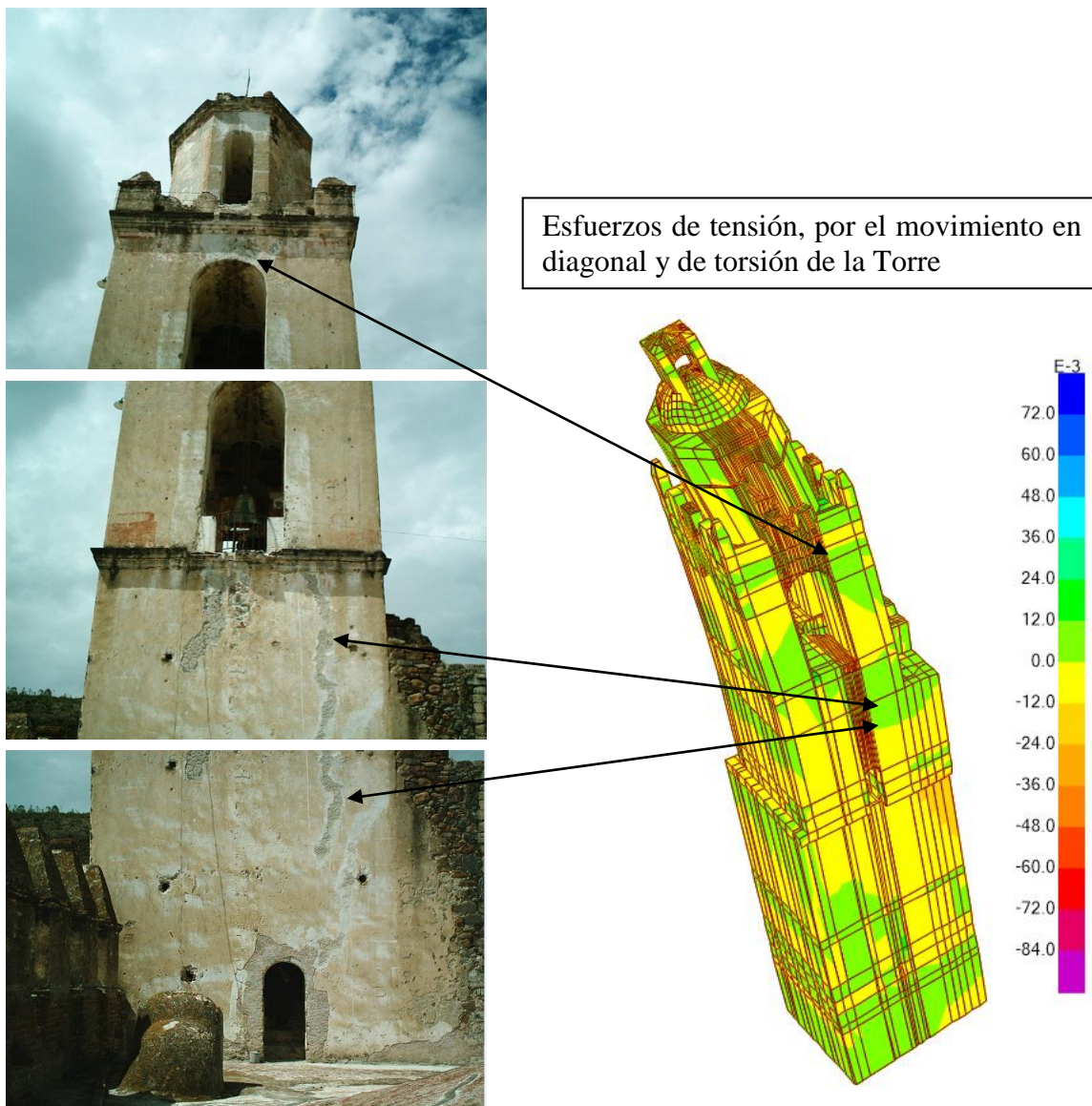


Fig. 109. Torre: agrietamiento vertical en los cuerpos 1 y 2, y esfuerzos a tensión en la unión de ambos cuerpos

5.5.2. Fachada, comparación de resultados de la combinación 8

En el edificio, se observan 2 agrietamientos verticales importantes, estos en la parte superior y central de la Fachada, a la altura donde coincide en la cara interior la unión con la bóveda. En el Modelo Analítico, se observa que la Fachada aunque participa en todas las formas modales, se ve afectada por la acción sísmica en el sentido longitudinal dirección Este-Oeste y principalmente en la forma modal No. 9, que es donde se involucra la torsión de la Torre y la acción vertical de la Bóveda, produciendo el movimiento descoordinado de los muros laterales al igual que la apertura y cierre de la parte superior de la Fachada.



Fig. 111. Fachada del Ex-convento Franciscano

Junta constructiva con la Torre, no se aprecian agrietamientos

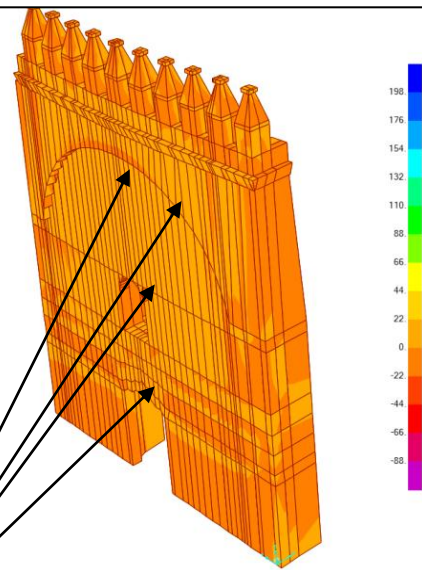


Fig. 110. Esfuerzos por el cierre y apertura de la Fachada, Modo 9

Agrietamientos verticales en la fachada

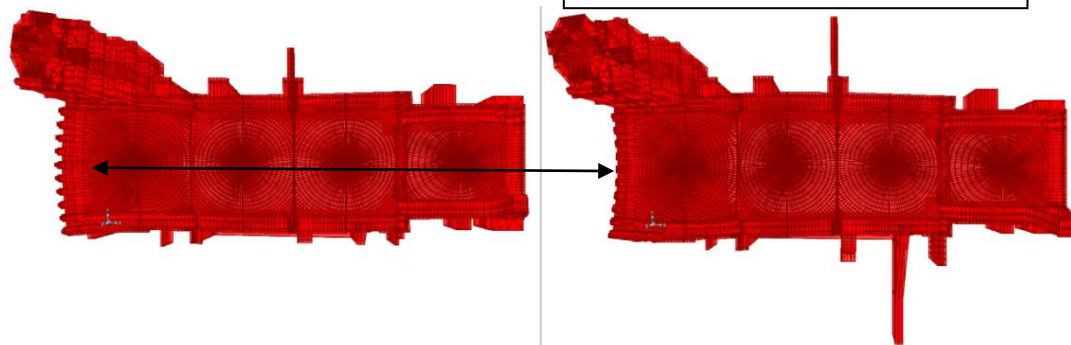


Fig. 112. Apertura y cierre de la Fachada, Modo 9

5.5.3 Muro Lateral Norte, comparación de resultados de la combinación 8

Se observa una grieta vertical, causada por el movimiento lateral del muro en la forma modal 9, que es donde se presenta la apertura y cierre de los muros laterales, influye la torsión de la torre, la acción vertical de las bóvedas 3 y 4, y principalmente la geometría, ya que la grieta observada coincide con el centro del claro entre los contrafuertes en la cara externa y en el interior la ubicación de las columnas y el arco no. 3, que soporta a las bóvedas 3 y 4, esto ocasiona esfuerzos de tensión en la cara externa del muro, en el interior no se observan agrietamientos.

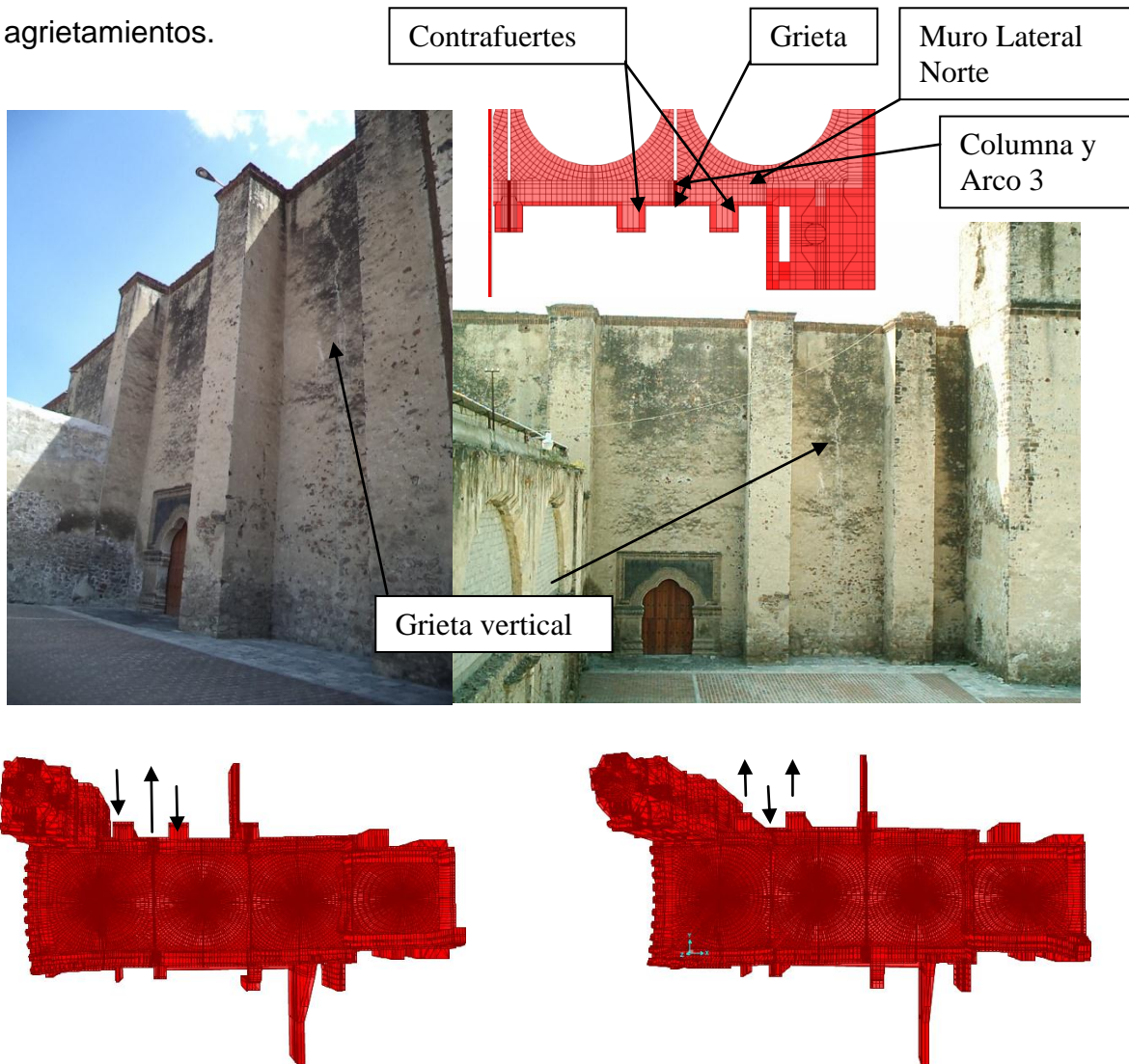


Fig. 113. Perspectivas del Muro lateral norte, y figuras de la forma modal No. 9, en el Modelo Analítico las flechas indican el sentido de los desplazamientos en el Modo 9

5.5.4 Muro Lateral Sur, comparación de resultados de la combinación 8

Se observan dos zonas de agrietamiento importante, esto causado por el comportamiento del muro en la forma modal 9.

1) En la zona donde se perdió el contrafuerte de arbotante, al carecer de este elemento se presenta un pandeo longitudinal del muro y agrietamiento vertical en la cara exterior.

2) A los costados del contrafuerte y escalera, se aprecian dos grietas verticales desde la azotea hasta la mitad de altura del muro, por la resistencia del contrafuerte y escalera al oponerse al desplazamiento lateral del muro.

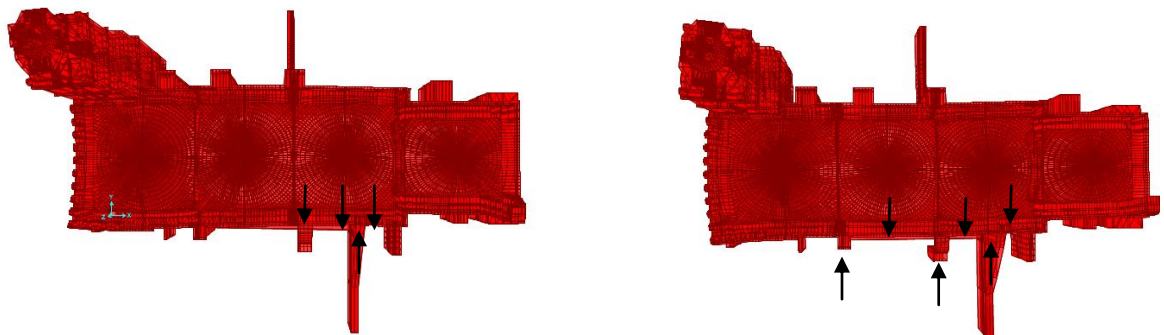
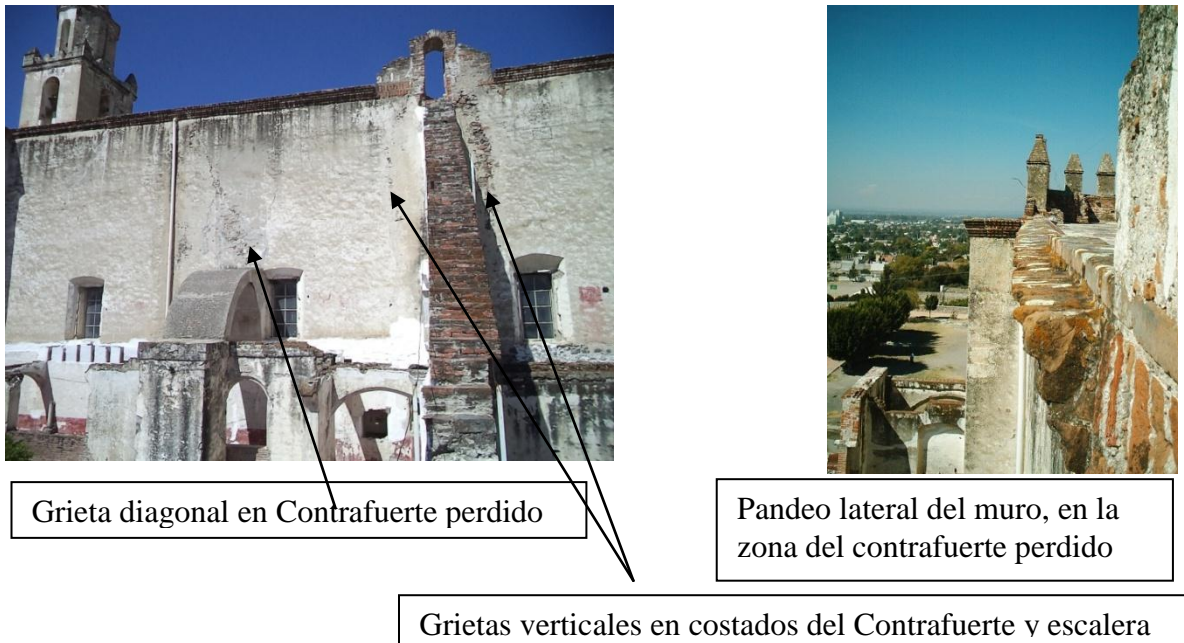


Fig. 114. Perspectivas del Muro lateral Sur y figuras de la forma modal No. 9 en el M. A., las flechas indican el sentido de los desplazamientos en el Modo 9

5.5.5 Bóvedas, comparación de resultados de la combinación 8

En la azotea, se observan líneas de agrietamiento en las bóvedas, que coinciden con la ubicación de las nervaduras longitudinales, transversales y diagonales, además en el perímetro de apoyo con los muros, causadas por el efecto sísmico en las direcciones X, Y, Z, y en las formas modales: FM:4, FM:5 y principalmente la FM:9, esto nos indica que este agrietamiento es causado por la apertura y cierre de los muros laterales, que las nervaduras aun cuando no sea fundamental su aportación de resistencia y soporte a las bóvedas, ya que incluso se pueden caer y la bóveda se sigue sosteniendo, si tienen una función estructural debido a que las nervaduras están fabricadas con ladrillos con la forma de las nervaduras y están anclados en la bóveda, al menos 20 cm. (ver Fig. 70 Y Fig. 104).

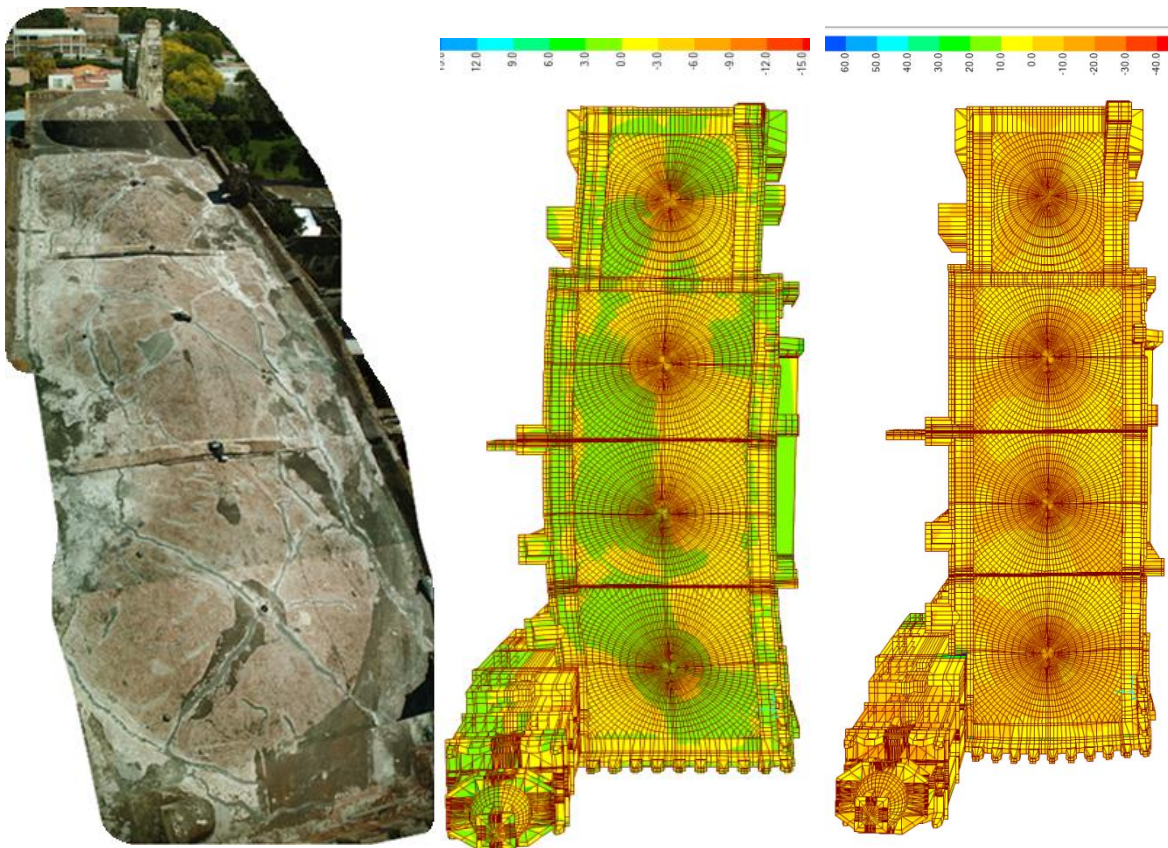


Fig. 115. Vista panorámica de la azotea, se observa el agrietamiento diagonal y transversal de la bóvedas, a la derecha los esfuerzos observados en Z, en el Modelo Analítico (Sismo en Y, Modo 9) (Sismo en X Modo 9)

CAPITULO VI

CONCLUSIONES

Con respecto a los parámetros e incertidumbres, que definen los resultados del estudio del comportamiento estructural de un edificio histórico, cada caso tiene sus particularidades, y el grado de simplificación y detallado del Modelo Analítico, dependerá de las necesidades del estudio además de los tiempos propuestos a la investigación.

En este trabajo se comprueba, que la construcción de un Modelo Analítico con elementos finitos sólidos, producto de un estudio topográfico detallado y una distribución de las propiedades mecánicas de los materiales de acuerdo con su identificación y ubicación en campo, permite una mejor representación del edificio real, esto se refleja en el proceso de calibración del modelo analítico, logrando un mejor ajuste de los valores en la calibración, ya que se disminuye el factor de error que se presenta comúnmente al homogenizar las propiedades mecánicas del modelo.

Aun cuando el análisis considera sólo el estudio del comportamiento lineal, el Modelo Analítico con elementos finitos sólidos, permite conocer las propiedades dinámicas de la estructura, identificar la distribución de esfuerzos en cada una de sus partes y analizar con mayor detalle las zonas de interés, principalmente en la continuidad de sus elementos con formas geométricas complejas.

El Modelo Analítico, puede utilizarse para realizar estudios de vulnerabilidad de la estructura ante diversos escenarios sísmicos, diferentes casos de carga, condiciones y tipos de falla en sus elementos y macro-elementos, además de ser en un futuro la base para un análisis no lineal del edificio.

El estudio del comportamiento no lineal del mismo, brindará un mayor acercamiento a su comportamiento real.

GLOSARIO

A. Términos Históricos

1. Barroco

El arte barroco en la Nueva España, permitió a los artistas novohispanos experimentar en la creación de formas expresivas, contrastantes y realistas, creando manifestaciones artísticas con gran aceptación entre la sociedad novohispana. Destacan, esculturas talladas y polisaturadas que muestran las habilidades técnicas de los artesanos, reflejan la expresividad y los contrastes de color propios del barroco novohispano. (Wikipedia). Se dice de un estilo de ornamentación caracterizado por la profusión de volutas, roleos y otros adornos en que predomina la línea curva, y que se desarrollo principalmente, en los siglos XVII Y XVIII [DRAE].

2. Flamígero

El gótico flamígero (*flamboyant*) fue la última etapa del arte gótico (gótico final o tardío), que se desarrolló en Europa desde la última parte del siglo XIV y los principios del XV. El flamígero supone una fase de exaltación barroca dentro de un estilo ya de por sí barroco. Se caracteriza por no contar con un centro difusor, por lo que impera la diversidad. Coincide con el desarrollo de la escuela flamenca. Estilo ojival caracterizado por la decoración de calados asimétricos, semejantes a las ondulaciones de las llamas [DRAE].

3. Gótico

La arquitectura gótica es la forma artística sobre la que se formó la definición del arte Gótico, el estilo artístico comprendido entre el Románico y el Renacimiento, que se desarrolló en Europa Occidental —cristiandad latina— en la Baja Edad Media, desde finales del siglo XII hasta el siglo XV, aunque más allá de Italia las pervivencias góticas continuaron hasta los comienzos del siglo XVI [DRAE].

4. Neoclásico

Este estilo se desarrollo y expreso en todas las artes, a mediados del siglo XVIII y a principios del siglo XX, como respuesta a los excesos decorativos del rococó y Barroco

5. Plateresco

También llamado gótico plateresco, Protorrenacimiento, estilo Isabel, estilo Reyes Católicos (estos dos últimos en referencia a su primera fase) y estilo Príncipe Felipe (referido a su fase renacentista), fue una corriente artística, especialmente arquitectónica, tradicionalmente tenida por exclusiva de España y sus territorios, que apareció entre el último Gótico y el Renacimiento, a finales del siglo XV, extendiéndose durante los dos siglos siguientes. Resulta de una modificación del espacio gótico y de una fusión ecléctica de componentes decorativos mudéjares, del gótico flamígero y lombardos, así como primerizos elementos renacentistas de origen toscano. Ejemplos son la inclusión de escudos y pináculos, las fachadas divididas en

tres cuerpos y las columnas de tradición renacentista. Llegó a su máxima expresión durante el reinado de Carlos I, especialmente en Salamanca, aunque también floreció notablemente en otras ciudades de la península Ibérica como León y Burgos y en el territorio de Nueva España.

6. Renacentista

Pertenciente a la época del renacimiento, que es el nombre dado a un amplio movimiento cultural en Europa Occidental durante los siglos XV y XVI. Fue un período de transición entre la Edad Media y el mundo moderno. Sus principales exponentes se hallan en el campo de las artes, aunque también se produjo una renovación en las ciencias, tanto naturales como humanas. La ciudad de Florencia, en Italia, fue el lugar de nacimiento y desarrollo de este movimiento.

B. Términos Arquitectónicos

1. Ábside.

El Ábside, es la prolongación abovedada de una nave por fuera de la planta del templo, terminándose en forma semicircular, cuadrada ó poligonal, que ofrece exteriormente el aspecto de un torreón pegado al muro, corresponde a los muros que enmarcan al altar mayor y el presbiterio de un templo [DRAE].

2. Adarve

El Adarve, es un pasillo situado en lo alto de una muralla, detrás de las almenas de una fortificación, en el terraplén que queda después de construido el parapeto [DRAE].

3. Alfiz

Es la moldura o marco que rodea la parte exterior de un arco. Es un ornamento arquitectónico de origen etrusco, muy frecuente en el arte románico, islámico hispano y en el mozárabe. Es por esto que el alfiz se asocia habitualmente con el arco de herradura. Normalmente la moldura es rectangular y su interior está ricamente decorado [Wikipedia, DRAE].

4. Almenado

De Almena, cada uno de los pequeños prismas, que en la fortificación antigua se levantaban sobre el adarve, en lo alto de las torres ó muros de mampostería, generalmente equidistantes el cuerpo de uno ó dos hombres, para tirar por el claro y cubrirse con el macizo. Hacia fines del siglo XIII empezaron á emplearse como simple adorno en las coronaciones de edificios, tanto religiosos como civiles. guarnecido o coronado de adornos o almenas [DRAE].

5. Arco Triunfal

El arco que separa el presbiterio de la nave o del crucero, se conoce como arco triunfal y suele presentar los capiteles de decoración más cuidada [Wikipedia].

6. Arcos Torales

Es un elemento arquitectónico transversal a la nave que sustenta a la bóveda. En las bóvedas de cañón es puramente un refuerzo. También se llama así a cada uno de los arcos sobre los que descansa una cúpula. Los arcos torales de una misma iglesia se encuentran rara vez exactamente iguales en elevación en el estilo románico, apareciendo como un arco de refuerzo (se les ha llamado cinchos) [Wikipedia].

7. Arco Polilobulado

En arquitectura se define como el tipo de arco formado por una sucesión de lóbulos; entendiéndose por lóbulo, según el Diccionario de la Real Academia Española cada una de las partes, a manera de ondas, que sobresalen en el borde de una cosa; como en la hoja de una planta o en el intradós de un arco [ciclopaedia.net].

8. Balanquino

Es el templete formado por cuatro columnas que sostienen una cúpula y cobijan al altar mayor, que cobijan el altar mayor. [Wikipedia], Pabellón que cubre el altar [DRAE].

9. Bóveda.

Es un elemento constructivo construido en mampostería o fábrica, en el que sus piezas y componentes *trabajan* a compresión. Las bóvedas poseen una forma geométrica generada por el movimiento de un arco generatriz a lo largo de un eje. Por regla general este elemento constructivo sirve para cubrir el espacio comprendido entre dos muros o una serie de pilares alineados. Su problemática constructiva consiste en averiguar el grosor, o resistencia de los muros adyacentes, con el objeto de que puedan soportar el empuje lateral de las bóvedas que soportan. En muchos casos su superficie posee nervios en los que se dirigen y concentran las líneas de empuje. A pesar de su uso extendido en la construcción, su funcionamiento no fue comprendido y explicado por la ciencia hasta bien entrados en el siglo XIX. [Wikipedia], o también la obra de fábrica curvada, que sirve para cubrir el espacio comprendido entre dos muros o pilares [DRAE].

10. Cantería

La cantería es el oficio y arte de labrar la piedra para su empleo en construcciones, también se reconoce como el material producto de esta [DRAE].

11. Capitel o Fuste

Es un elemento arquitectónico que se dispone en el extremo superior de la columna, pilar o pilastra para transmitir a estas piezas estructurales verticales las cargas que recibe del entablamento horizontal o del arco que se apoya en él. Además de esta misión estructural cumple otra de índole compositiva, pues actúa como pieza de transición entre dos partes constructivas tan diferentes como aquellas entre las que se interpone. La parte superior de las tres que componen una columna ó pilastra, á quienes corona, colocada inmediatamente sobre sus fustes y sosteniendo el arquitrabe, constituyendo así una transición entre el apoyo y el cornisamento [Wikipedia, DRAE].

12. Carolingio

Fue el punto de partida para el desarrollo de la arquitectura medieval, reinterpretando el estilo románico más que el bizantino y expresándolo en los edificios religiosos (catedrales y monasterios), construidos en la época reinado de Carlomagno [DRAE].

13. Contrafuerte.

Un contrafuerte también llamado estribo, es un engrosamiento puntual en el lienzo de un muro, normalmente hacia el exterior, usado para transmitir las cargas transversales a la cimentación. Los contrafuertes, que permiten al muro resistir empujes, se conocen desde tiempos antiguos y han sido profusamente usados en todo tipo de construcciones, siendo elementos característicos del arte románico y gótico [Wikipedia, DRAE].

14. Clave

La clave es la dovela central de un arco, o una bóveda. Suele ser de mayores dimensiones que las demás dovelas, y a menudo está decorada, pero no por razones funcionales sino estéticas., al igual que las dovelas, se sustenta debido a la forma de éstas piezas, pues sus caras laterales, cortadas en ángulo, transmiten lateralmente parte de las tensiones, equilibrándolo, y evitando que se desplomen bajo una carga vertical. La tensión horizontal de la dovela inferior se transmite al muro o a otro arco, y la vertical se transmite al muro o a un pilar. La última pieza que se coloca en la construcción de un arco es la clave. Hasta que ésta no se encuentra colocada en su lugar es necesario apeara (sostener) las dovelas del arco, puesto que se encuentra inestable. Para ello se utiliza una cimbra, una estructura de madera, o metal, con forma de arco, que sustenta las dovelas, y sólo se retira una vez completado el arco, al colocarse la clave [Wikipedia, DRAE].

15. Cornisa

Es la parte superior y más saliente de una edificación. Tiene como función principal evitar que el agua de lluvia incida directamente sobre el muro o se deslice por el mismo, además de rematar el edificio y está compuesta de varias molduras; se distinguen dos tipos: de cincha (rodea el edificio marcando la división entre las plantas), y denticulada (decorada por denticulos o sustentada por modillones). Además de sus funciones prácticas, históricamente ha representado una pieza clave como decoración arquitectónica. En la construcción moderna, la cornisa se realiza utilizando los nuevos métodos que ofrecen los modernos materiales mediante moldes de poliestireno expandido que son colocados como parte de los encofrados para verter hormigón [Wikipedia, DRAE].

16. Espadaña.

La espadaña es una estructura que se prolonga verticalmente como un campanario de una sola pared, sobresaliendo del resto de la edificación, y suele acabar en un pináculo. Puede disponer de uno o más vanos para albergar campanas, formando parte de algunas iglesias, donde hace funciones de campanario o campanil, diferenciándose de estos en que su acceso no se alberga en el interior [Wikipedia, DRAE].

17. Extradós

Extradós, es la cara o superficie superior o exterior de un arco, de una bóveda o de una cúpula, tiene forma convexa [DRAE].

18. Fachada.

La fachada es el muro o paramento exterior de un edificio [DRAE].

19. Fabrica

Fabrica, es el sistema constructivo a base de mampostería de ladrillo o de piedra [DRAE].

20. Galibo

Buen aspecto de una columna por la acertada proporción de sus dimensiones [DRAE].

21. Gualdra

Viga y tablón de madera en los techos [DRAE].

22. Intradós

Intradós, cara o superficie inferior de un arco, de una bóveda o de una cúpula [DRAE].

23. Imposta

La imposta, es una saliente horizontal en los muros, que define o separa un elemento arquitectónico de otro que lo sustenta, puede ser en forma de moldura [DRAE].

24. Mechinal

El mechinal, es un vano incrustado en la pared o muro, para recibir vigas de madera de los andamios o cimbras, al retirar estas solo quedan los agujeros cuadrados [DRAE].

25. Nervadura.

Arco que se cruza con otro o con otros para formar una bóveda de crucería; también es el conjunto de los nervios de una bóveda o de una estructura arquitectónica [DRAE].

26. Pináculo

El pináculo, es un elemento arquitectónico utilizado en la arquitectura gótica, utilizado como remate de fachadas, muros y torres, tiene forma piramidal o cónica [DRAE].

27. Portada

Una portada es el conjunto de elementos arquitectónicos que forman la puerta y su ornamentación y en el cual aparece impreso, con sus peculiares caracteres, el estilo del edificio. Se dice principalmente de los monumentos arquitectónicos religiosos, la portada se compone a menudo de columnas superpuestas adosadas a la pared o poco salientes y dispuestas a ambos lados de las puertas a las cuales encuadran sin enmascarar [DRAE].

28. Presbiterio

Es el espacio que en un templo o catedral católicos, precede al altar mayor hasta el pie de las gradas por donde se sube a él, que regularmente suele estar cercado con una grada o barandilla. Estaba, hasta el Concilio Vaticano II, reservado al clero y puede quedar separado de la nave central por gradas, escalinatas o una barandilla llamada comulgatorio. Suele ser el lugar destinado al coro, aunque no necesariamente. En las basílicas los presbiterios estaban flanqueados por púlpitos, denominados también ambores¹. En los estilos románico y gótico, es el tramo de nave que une la capilla absidal con la nave o el crucero, lo que suele coincidir con la definición anterior. El arco que separa el presbiterio de la nave o del crucero, sobre todo en el primer estilo, se conoce como arco triunfal y suele presentar los capiteles de decoración más cuidada [DRAE].

29. Retablo

Es la estructura arquitectónica, pictórica y escultórica que se sitúa detrás del altar en las iglesias católicas (en las ortodoxas no hay una función semejante, dada la presencia del iconostasio, y en las protestantes suele optarse por una gran reducción de la decoración). La palabra proviene de la expresión latina *retro tabula* ("tras el altar"). El término "tabla" hace referencia al soporte de las pinturas (que también puede ser el lienzo), es el conjunto o colección de figuras pintadas o de talla, que representan en serie una historia o suceso [DRAE].

30. Torre

En un templo, la torre es un elemento que sobresale por encima de la bóveda, de mucha más altura que superficie, es utilizada como campanario [DRAE].

C. Conceptos Técnicos

1. Agrietamiento

Es una abertura larga y estrecha producto de la separación de dos materiales, en el caso de los elementos de mampostería, estas son producto de la degradación del mortero o de la separación de las piezas a causa de diversos efectos mecánicos internos en los elementos, como respuesta a la aplicación de una acción externa.

2. Formas Modales

Son el comportamiento de la estructura como respuesta a una excitación dinámica, en éstas se observa el sentido en el que se desplaza, el tiempo en completar un ciclo (periodo "T") y su inversa que es el número de ciclos en un tiempo determinado (frecuencia "f").

3. Análisis Modal

Es parte de la mecánica estructural para observar las frecuencias naturales y modos de vibrar de una estructura mediante vibración libre.

4. Discretización

Es el primer paso del procedimiento numérico, es la división o mallado de un elemento (continuo) dividido en pequeñas subregiones o nodos, para los cuales se da una solución exacta y en el espacio entre ellos la solución es aproximada por interpolación, se emplea en la aplicación del MEF.

5. Esfuerzo

Es la carga interna de un elemento sometido a una carga externa, puede ser por tracción o compresión, y de acuerdo con su dirección pueden ser esfuerzos de: corte, flexión y torsión.

6. Frecuencia

Número de ciclos de oscilación realizados por una estructura en un tiempo T.

7. Geomática

Es el conjunto de acciones y procesos sistematizados de ciencia, ingeniería y arte, realizados en el proceso de obtención, medición y referencia espacial, geográfica y de sistemas estructurales, fundamentada en la topografía y actualmente apoyada en todos los avances tecnológicos.

8. Macroelementos de un edificio histórico

Es un elemento estructural que forma parte del edificio, se identifica por su forma, función estructural, posición, orientación y principalmente por su comportamiento modal, Ejemplo: Fachada, Torre, Muro lateral, Arcos, Ábside, y Bóvedas.

9. Mampostería de conjunto

Es una consideración de los valores promedio de la pieza de mampostería y del mortero que la une, para las propiedades mecánicas de ambos materiales en conjunto aplicada al Modelo Analítico.

10. Periodo

Es el tiempo (T) en el que la estructura realiza un ciclo de oscilación.

11. Vibración ambiental de un edificio

Son movimientos de muy baja amplitud (<1 Gal), imperceptibles para el ser humano, presentes y de manera permanente en las estructuras, causados por el tránsito de vehículos, personas, maquinaria, viento, y otros factores ambientales, su medición y análisis permite conocer las propiedades dinámicas de la estructura.

12. Vulnerabilidad sísmica

La vulnerabilidad sísmica de una edificación, es un conjunto de parámetros capaz de predecir el tipo de daño estructural, el modo de falla y la capacidad resistente de una estructura bajo condiciones probables de sismo, no solo depende del edificio de estudio en cuestión, sino también del lugar.

D. Glosario de Materiales

1. Piedra braza

El basalto o piedra braza, es una roca ígnea extrusiva, de color gris oscuro, de grano fino y muy resistente, peso volumétrico = 2,200 K/ m³, peso específico = 3.4 gr/cm³.

2. Tepetate

El Tepetate es una toba volcánica producto de un proceso de consolidación (sedimentándose y cementándose), de color amarillo, muy resistente.

3. Tezontle

El tezontle es una roca de origen volcánico (ígneo extrusiva), de colores rojo a negro; el color rojo se debe a la oxidación del fierro de los minerales que componen la roca, su composición es a partir de bióxido de hierro, es ligero, poroso y poco resistente. peso volumétrico = 1, 400 a 1, 700 kg/m³, peso específico = de 0.7 a 1.5 gr/cm³.

4. Toba

Roca ígnea, ligera, de consistencia porosa, maleable y resistente.

5. Xalnene

Piedra porosa, ligera, de origen volcánico y color gris oscuro.

REFERENCIAS

1. **Atlas de Riesgo de Tecamachalco Puebla, (2011).** H. Ayuntamiento de Tecamachalco, Puebla, 2011
2. **Alcocer, S. Aguilar, G. Flores, L., (1999).** El sismo de Tehuacán del 15 de Junio de 1999. Centro Nacional de Prevención de Desastres, Julio de 1999
3. **Bazán, E., Meli, R., (2003).** Diseño Sísmico de Edificios. Limusa, Noriega Editores
4. **Binda L., Lualdi M., Saisi A., (2007).** Testing Techniques Applied for Diagnostic Investigation: Syracuse Cathedral in Sicily, Italy a Department of Structural Engineering, Politécnico of Milan, Milan, Italy International Journal of Architectural Heritage Conservation, Analysis, and Restoration Publication details, including instructions for authors and subscription information, Online Publication Date: 01 October 2000
5. **Bitrán, D. Reyes, C., (1999).** Evaluación del impacto del sismo ocurrido el 15 de Junio de 1999 sobre los estados de Puebla, Oaxaca y estados vecinos. . Centro Nacional de Prevención de Desastres, Octubre de 1999
6. **Casolo, C., (2004).** Modelling in-plane micro-structure of masonry wall by rigid elements, Artículo, International Journal of Solids and Structures 41 (2004) 3625–3641
7. **Castellanos, H., Meli, R., Peña, F., (2004).** "EFECTO DEL AGRIETAMIENTO EN LA RESPUESTA SÍSMICA DE UN TEMPLO COLONIAL TÍPICO, Tesis de Maestría, UNAM.
8. **Celestino, E., Reyes, L., (1992).** Anales de Tecamachalco", CIESAS-FCE, Gobierno del Estado de Puebla (Colección Puebla), México 1992.
9. **CERVANTES, BELTRÁN, (1982).** Introducción al método del elemento finito. México. D.E.P.F.I. UNAM. D.C., ZIENKIEWICZ. (1980): Métodos de los elementos finitos. México. Ed. Reverte. T.C., YANG. (2003): Análisis de elemento finito. México. Ed. Prentice Hall Int. BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA P., SHAMES Y M. (2003): Energy and finite element. Methods in structural mechanics. México. Ed. Mc Graw Hill.

10. **Chico, P., González, J., Hules, G., Siller, J., y Zavala, J., (1980).** Teoría y Práctica en la conservación de un monumento: Ex-convento de Tecamachalco, Puebla., Tesis de Maestría, ENCRM, INAH.
11. **Castellazzi, G., Gentilini C., and L. Nobile, (2013).** Research Article Seismic Vulnerability Assessment of a Historical Church: Limit Analysis and Nonlinear Finite Element Analysis, Department of Civil, Chemical, Environmental, and Materials Engineering, University of Bologna, v.le Risorgimento 2, 40136 Bologna, Italy
12. **De Gante, J. Serrano, S. Ávila, B. Flores, O., (2003).** Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificios históricos de la ciudad de Puebla. XIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica Guadalajara, Méx.
13. **De la Torre, O., López, R., Salazar, A. y Roldán J. C., (2004).** EVALUACION ESTRUCTURAL Y COMPORTAMIENTO DE LAS REPARACIONES EFECTUADAS A EDIFICACIONES HISTÓRICAS, Revista de Ingeniería Sísmica No. 70 1-26 (2004)
14. **Domínguez, A., Muriá, D, Sánchez, H., (2012).** Determinación de las propiedades dinámicas y efecto de interacción suelo-estructura de un edificio en la ciudad de México mediante un estudio de vibración ambiental, Tesis de maestría, IPN.
15. **EERI, (1999).** The Tehuacán, Mexico, earthquake of June 15,1999. EERI Special earthquake report. (September 1999).
16. **Esquivel, Y., Lourenco, P., Milani, G., (2012).** Characterization of the response of quasi-periodic masonry: Geometrical investigation, homogenization and structural application. Thesis Master´s. University of Minho, Portugal.
17. **Franco, C., (2012).** Calibración del modelo numérico existente de una edificación de valor histórico, mediante mediciones de vibración ambiental, caso de estudio: Templo de San Francisco de Asís de Bucaramanga, Tesis profesional. UIS, Bucaramanga
18. **Gambarotta, L., Lagomarsino S., (1997).** DAMAGE MODELS FOR THE SEISMIC RESPONSE OF BRICK MASONRY SHEAR WALLS. PART I: THE MORTAR JOINT MODEL AND ITS APPLICATIONS, EARTHQUAKE ENGINEERING AND STRUCTURAL DYNAMICS, VOL. 26, 423—439 (1997). Department of Structural

and Geotechnical Engineering, University of Genoa, via Montallegro 1, 16145 Genoa, Italy

19. **Gutiérrez, C., (1999).** Mapa de intensidades sísmicas del evento del 15 de junio de 1999, Mw= 7.0 Tehuacán, Puebla. XII Congreso Nacional de Ingeniería sísmica, pp. 736-743. Morelia, México.1999
20. **Guzmán, M., Roeder-Carbo, G. y Ayala, G., (2002).** Modelado del comportamiento no lineal de una estructura histórica de mampostería mediante elementos finitos, Artículo, XIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural Puebla, Pué., México 2002
21. **Henao, D. Á., Botero, P., J. C., (2013).** IDENTIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE UNA ESTRUCTURA SOMETIDA A VIBRACIÓN AMBIENTAL EMPLEANDO ANÁLISIS ESPECTRAL, Tesis de maestría, UNIVERSIDAD EAFIT ESCUELA DE INGENIERÍA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL MEDELLÍN
22. **Heyman, J., Herrera de, J., (1999).** The stone skeleton, Cambridge University Press, 1995. El esqueleto de piedra, Madrid (CEHOPU)
23. **Hernández, R., (2002).** LA INGENIERÍA ESTRUCTURAL COMO PARTE DE LA RESTAURACIÓN DE EDIFICIOS HISTÓRICOS, Artículo, XIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Puebla, Pué. 2002
24. **Huerta, S., Aroca, R., (1990).** DISEÑO ESTRUCTURAL DE ARCOS, BÓVEDAS Y CÚPULAS EN ESPAÑA ca.1500~ca.1800, Tesis profesional, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Octubre de 1990
25. **Huerta, S., Fuentes, P., (2010).** Informe sobre la estabilidad de las bóvedas y el sistema de contrarresto de la nave y el crucero de la Iglesia de La Peregrina (convento de San Francisco) en Sahagún, Ayuntamiento de Sahagún TRYCSA, Madrid, España, marzo de 2010
26. **Hughes, Thomas, J. R., (2000).** The finite element method, linear static and Dynamic Finite element analysis: Publication : Englewood Cliffs, N. J: Prentice-Hall International
27. **ICOMOS, (1931).** "La carta de Atenas para la restauración de monumentos históricos", ICOMOS.

28. **ICOMOS, (1964).** "Carta internacional sobre la conservación y restauración de monumentos y sitios (Carta de Venecia)", ICOMOS.
29. **Iglesias, J., (1999).** Et al. Mapa de Intensidades del sismo del 15 de Junio de 1999. XII Congreso Nacional de Ingeniería sísmica, pp. 744-753. Morelia, México.1999
30. **INAH, (2000).** Libro blanco, carpeta referente al Ex-convento Franciscano de Tecamachalco, Afectaciones por el sismo del 15-06.1999 y reparación.
31. **Juárez, H. Et al., (1999).** Intensidad y daños asociados al sismo del 15 de Junio de 1999. XII Congreso Nacional de Ingeniería sísmica, pp. 310-318. Morelia, México.1999
32. **Kuble, George., (1948).** *Arquitectura mexicana del siglo XVI.* Universidad de Yale, Connecticut, Estados Unidos.
33. **León, J., (2000).** Criterios para la caracterización estructural de edificios históricos, Grupo Español de IABSE / Fundación COAM 13 de noviembre de 2000
34. **López, J., Oller, S., Oñate, E., (1998).** Cálculo del comportamiento de la mampostería mediante elementos finitos, Centro internacional de métodos numéricos en ingeniería, monografía CIMNE no 46, diciembre 1998
35. **Lozano, J., (2008).** "Estudio de la respuesta de un templo antiguo ante acciones sísmicas mediante macro-elementos", tesis doctoral. UAEM.
36. **Lozano, J., Ramírez, H., Flores, O., (2004).** ESTADO DEL ARTE DEL ANÁLISIS DE MAMPOSTERÍAS SIN REFUERZO EN CONSTRUCCIONES ANTIGUAS Congreso Nacional de Ingeniería Estructural Acapulco, Gro., 2004
37. **Manzano, J., Peña, F., (2014).** Caracterización dinámica elástica de templos coloniales mexicanos, Artículo, XIX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural Puerto Vallarta, Jalisco, 2014
38. **Meli, R., Rivera, D., Sánchez, R., Miranda, E., (2005).** Artículo XIII-25. INSTRUMENTACION SISMICA DE LA CATEDRAL METROPOLITANA. RESULTADOS 1997-2000. CNIS, MEXICO, 2005
39. **Meli, Roberto. Reyes, A., 1968).** Propiedades Mecánicas de la mampostería, Instituto de Ingeniería, UNAM, México, D.F. (1968)
40. **Meli, Roberto.** Ingeniería Estructural de los Edificios Históricos, Fundación ICA 1998

41. **Meli, R., Sánchez, A., (2001).** LA REABILITACION DE LA CATEDRAL METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MEXICO, Revista Digital Universitaria, Vol. 2, No. 2, UNAM, México.
42. **Mendoza, A., Lozano, J., (2008).** "Índices de daño y vulnerabilidad sísmica en templos antiguos" (Centro histórico de la ciudad de Puebla), tesis profesional. BUAP.
43. **Meza, J. M., Orduña, A. y Ayala, A. G., (2008).** Método simplificado para la evaluación de la capacidad sísmica de edificios históricos de mampostería. XVI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. Veracruz, Ver. Méx. (2008)
44. **Moissen, J., (1964).** Tecamachalco y el pintor indígena Juan Gerson, Anales del Instituto de Investigaciones Estéticas, Vol. 9, No. 33, UNAM, México 1964.
45. **Muñoz, F., López, J., (2000).** Una Contribución a la Modelización y Vitalización Numérica de Estructuras Arquitectónicas, (Una aplicación práctica a la estructura del Sagrario de la Catedral de la Ciudad de México). Tesis Doctoral, UPC, España, 2000
46. **Muñoz, F., Carreras, M., (1999).** Pre y Postprocesadores para el Cálculo de Estructuras. Interface GID-Sap90. CIMNE, 1999 Primera Edición
47. **Muñoz, Salinas, Francisco, Maristany i Carreras Jordi.** Modelización Numérica y Virtualización de Edificios Históricos. Interface GiD-Sap2000-VRML
48. **Navarro, J. C., (2004).** BÓVEDAS VALENCIANAS DE CRUCERÍA DE LOS SIGLOS XIV AL XVI. TRAZA Y MONTEA UNIVERSITAT DE VALENCIA, Tesis doctoral, Servei de Publicacions 2004
49. **Orduña, B., A. y Lourenço, Paulo, (2002).** ANÁLISIS LÍMITE EN 3D PARA LA EVALUACIÓN Y REFUERZO DE ESTRUCTURAS HISTÓRICAS DE MAMPOSTERÍA. Artículo, XIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural Puebla, Pué., México 2002
50. **Orduña, A., Peña, F., Roeder, G., (2004).** Un estado del arte del análisis estructural de edificios históricos de mampostería, parte 1: Comportamiento mecánico y modelos constitutivos. Artículo, XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Acapulco, Gro. Méx. (2004)
51. **Orduña, A., Roeder, G., Peña, F., (2007).** EVALUACIÓN SÍSMICA DE CONSTRUCCIONES HISTÓRICAS DE MAMPOSTERÍA: COMPARACIÓN DE

- TRES MODELOS DE ANÁLISIS, Artículo, Revista de Ingeniería Sísmica No. 77 71-88 (2007)
52. **Peña, F. y 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, Artículo, Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Guanajuato-León, México, noviembre de 2003
53. **Peña, F.,** Correlation between tensile strength and the collapse mechanism of brick masonry constructions, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
54. **Peña, F., (2010).** ESTRATEGIAS PARA EL MODELADO Y EL ANÁLISIS SÍSMICO DE ESTRUCTURAS HISTÓRICAS, Revista de Ingeniería Sísmica No. 83 43-63 (2010)
55. **Peña, F., Lourenco, P., (2012).** "Criterios para el refuerzo antisísmico de estructuras históricas". Artículo, Revista de ingeniería sísmica No. 87, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica A. C.
56. **Peña, F., Chavez, M., (2014).** "ASSESSMENT OF THE SEISMIC VULNERABILITY OF TYPICAL MEXICAN COLONIAL CHURCHES ". SAHC2014 – 9th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions F. Peña & M. Chavez (eds.) México City, México, 14–17 October 2014
57. **Peña, F., Chavez, M., Choudhury, T., Milani, G., Acito, M., Chesi, C., Carla Di Francesco, Carabellese, I., Martines, G., Vincenzo De Simone, (2014).** DAMAGE SURVEY AND STRUCTURAL ASSESSMENT OF THE ROSARIO CHURCH IN FINALE EMILIA AFTER THE MAY 2012 EARTHQUAKE IN EMILIA-ROMAGNA, ITALY. SAHC2014 – 9th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions F. Peña & M. Chavez (eds.) México City, México, 14–17 October 2014
58. **Romano, A., (2005).** Modelling, Analysis and Testing of Masonry Structures, Doctoral Thesis, Università degli Studi di Napoli Federico II Facoltà di Ingegneria, Italia
59. **Sánchez, A., Meli, R., Peña, F., Rodríguez G., (1998).** El uso del modelo del elemento finito en el proyecto de rehabilitación de la Catedral y el Sagrario de la

- ciudad de México. XI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, pp. 890-899. Nuevo León México.1998
60. **Sanchez, A., Meli, R., Rivera, D., (1998).** Aspectos básicos del comportamiento estructural de monumentos coloniales. XI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, pp. 890-899. Nuevo León México.1998
61. **SAP2000** Integrated Software for Structural Analysis & Design (Software Integrado para el Análisis y Diseño Estructural.), Manual de Aplicación del Programa SAP2000 v14, Ing. Eliud Hernández
62. **Wilson, Ed. (2011).** Análisis Estático y Dinámico de Estructuras en Español. Un Enfoque Físico con énfasis en la Ingeniería Estructural, Universidad de California en Berkeley. Traducción al español por Morrison Ingenieros.
63. **Zavala, C., Vásquez, L., Salinas, R., Pruaño, R., Huaco, G., (2003).** EXPERIENCIAS RECIENTES DE EVALUACION ESTRUCTURAL DE EDIFICACIONES HISTORICAS, XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Iquitos 2003, Perú