



UNIVERSIDAD MICHOACÁNA DE SÁN NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



MAESTRÍA EN INGENIERÍA EN EL ÁREA DE ESTRUCTURAS

TESIS:

**ÍNDICES DE VULNERABILIDAD SÍSMICA PARA EDIFICIOS
CONVENTUALES MEXICANOS.**

PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRA EN INGENIERÍA EN EL ÁREA DE ESTRUCTURAS

PRESENTA:
ING. LIDIA MEJIA OLMOS

ASESOR:
DR. GUILLERMO MARTINEZ RUÍZ

Morelia, Mich., agosto 2019



AGRADECIMIENTOS.

Doy gracias a dios por permitirme concluir esta etapa en mi vida, gracias a mis padres Virgilio y Lidia por ser quienes me impulsan a hacer realidad mis metas, por siempre estar apoyándome en todo momento y estar siempre a mi lado alentándome a ser mejor persona y profesionista, agradezco de igual forma mis hermanos Virgilio, Fernando y Adriana. No ha sido sencillo el camino y sé que han hecho sacrificios por mí, pero gracias a su amor esta meta se ha podido cumplir, les agradezco y hago presente mi afecto hacia ustedes, mi hermosa familia, dedicándoles con mucho cariño la realización de esta tesis.

Gracias Fernando Manzo por tu infinito apoyo incondicional, amor y comprensión. Fuiste una gran parte importante durante esta etapa, se que has trabajado mucho por mi para que yo pueda realizar mis sueños, siempre me inspiras a superarme, te dedico esta tesis con mucho amor ya que este logro es de ambos, te has convertido en un gran pilar de mi vida. Te amo mucho.

Gracias a mi asesor el Dr. Guillermo Martínez, quien ha sido parte fundamental en mi formación como ingeniera civil y ahora como maestra, alentándome a ser mejor profesionista cada día.

A mi querida amiga Karlita que ha estado a mi lado todo este tiempo, agradezco por tu desinteresada ayuda, por apoyarme y hasta cuidar de mí, el mundo necesita más amigas como tú, te quiero.

Gracias a mis amigos de la maestría Esteban, Lalo y Axel que estuvieron presentes durante la realización y el desarrollo de esta tesis.



INDICE

INDICE.....	II
RESUMEN	1
ABSTRAC.....	2
OBJETIVO.....	3
1. INTRODUCCION.....	4
1.1. Conceptos generales.....	6
1.1.1. Vulnerabilidad sísmica.....	6
1.1.2, Índices de Vulnerabilidad o de Daño.....	7
2. ANTECEDENTES	9
3. EDIFICIOS EN ESTUDIO	19
3.1 Tipología arquitectónica y estructural de los edificios conventuales mexicanos.....	21
3.2 Descripción de los edificios en estudio.....	28
3.2.1 Templo y exconvento de San Agustín.....	29
3.2.2 Templo y exconvento franciscano de San Buenaventura.....	31
3.2.3 Templo de Guadalupe y exconvento de San Diego.....	32
3.2.4. Templo y exconvento de la Merced (1736)	34
4. DAÑOS OBSERVADOS TRAS LOS SISMOS DE SEPTIEMBRE DE 2017	36
4.1 Sismicidad en México.....	36
4.2 Sismos del 7 y 19 de septiembre del 2017 en México.....	39
5. VULNERABILIDAD SISMISCA CALCULADA.....	47
5.1 Método de Elementos Rígidos.....	47
5.2 Programa de análisis estructural RIGID V0.4.1.....	49
5.2.1 Modelos constitutivos.....	50
5.3 Construcción de modelos.....	54
5.4 Definición de parámetros.....	62
5.5 Demanda sísmica	63
5.6 Resultados obtenidos.....	63
6. INDICES DE VULNERABILIDAD	108
6.1 Curvas de capacidad.....	110
6.2 Índices de daño calculados.....	113



ÍNDICES DE VULNERABILIDAD SÍSMICA PARA EDIFICIOS CONVENTUALES MEXICANOS

7.	ESCENARIO DE DAÑO PARA EL CENTRO HISTORICO DE MORELIA	123
7.1	Comportamiento estructural	123
8.	CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.....	129
	BIBLIOGRAFIA.....	131



RESUMEN

Como en toda estructura el conocimiento del comportamiento sísmico de estas permite definir los mecanismos y acciones de refuerzo requeridos para la reducción de los efectos provocados por los movimientos del terreno, de modo que al tener el entendimiento adecuado de la amenaza sísmica existente en los edificios de tipo histórico, por lo que es importante encontrar la manera adecuada de evaluar dichas edificaciones que permitan evaluar su comportamiento estructural correctamente, contribuyendo a una adecuada preservación de los monumentos históricos y evitando que se tengan grandes pérdidas de este patrimonio cultural. Se puede observar claramente que las zonas de daño en este tipo de estructuras si presentan un patrón recurrente, y se pueden corroborar con la información observada en campo, por lo que hacer este tipo de análisis si es viable para darnos de los mecanismos de falla y el grado de daño que este tipo de estructuras puede tener puede tener. , de esta manera con la información obtenida se pueden realizar los trabajos adecuados de restauración encaminados a conservar y proteger de manera correcta nuestro patrimonio.

Palabras clave: índice de daño, macroelemento, convento, dinámico, escenario de daño.



ABSTRAC

As in any structure, the knowledge of the seismic behavior of these allows to define the mechanisms and reinforcement actions required for the reduction of the effects caused by the movements of the land, so that having the adequate understanding of the seismic threat existing in the buildings of historical type, so it is important to find the appropriate way to evaluate various modifications that evaluate their correct structural behavior, contributing to an adequate preservation of historical monuments and preventing them from having large losses of this cultural heritage. It can be clearly seen that the areas of damage in these types of structures do have a recurring pattern, and can be corroborated with the information observed in the field, so do this type of analysis if it is feasible to give us the failure mechanisms and the degree of damage that this type of structures can have can have. In this way, with the information obtained, adequate restoration work can be carried out aimed at preserving and protecting our heritage correctly.



OBJETIVO.

Determinar índices de vulnerabilidad sísmica en estructuras históricas que se encuentren en el territorio mexicano, en base al sismo ocurrido el 19 de septiembre del 2017, logrando así conocer el grado de daño que experimenta una estructura de este tipo cuando se ve sometida a un sismo de determinada intensidad.



1. INTRODUCCION.

En muchas partes del mundo existen los monumentos históricos los cuales se encuentran expuestos a un riesgo sísmico potencial real, ya que la ocurrencia de un sismo ocasiona daños en una menor o mayor medida, este fenómeno no es exclusivo de las zonas con una alta actividad sísmica , ya que en zonas de sismicidad moderada o baja un sismo “poco común” puede producir daños materiales considerables, debido a que este tipo de edificaciones fueron construidas sin considerar una normativa sismorresistente.

En México el patrimonio histórico está formado por casi 85,000 edificios distribuidos aproximadamente en 20 estados, de los cuales tras los pasados sismos de Septiembre del 2017 gran parte de ese patrimonio se vio afectado, debido a que en México (a diferencia de países Europeos) las líneas de investigación actuales sobre riesgo sísmico se han enfocado principalmente al estudio del comportamiento sísmico de estructuras de concreto, acero, mampostería reforzada o confinada, empezando a implementarse hasta hace poco en estructuras de mampostería antigua, causando que la información relativa al comportamiento estructural de este tipo de edificaciones, con el fin de realizar un diagnóstico correcto para fines de intervención estructural sea escasa, por lo tanto, dentro del contexto multidisciplinario que implica el estudio, conservación, restauración y rehabilitación de estos edificios, la parte correspondiente a la ingeniería sísmica y estructural representa un reto muy particular, ya que la mayor parte de los métodos existentes para evaluar la vulnerabilidad sísmica de edificios han sido planteados para estructuras modernas.

La problemática que esto nos plantea a diferencia de las estructuras modernas, donde los análisis estructurales han alcanzado un importante desarrollo gracias a los métodos de análisis estructural y a las técnicas experimentales que permiten conocer las características mecánicas de los edificios construidos, los análisis de vulnerabilidad sísmica en construcciones históricas implica una evaluación



profunda y detallada debido a las características constructivas en este tipo de edificaciones, tales como la variabilidad en la propiedades de los materiales, los procedimientos constructivos utilizados, el tiempo de ejecución de la estructura, las irregularidades en planta y elevación, etc., ocasionando que este tipo de estructuras sean complejas para realizar un análisis estructural detallado cuyos resultados sean del todo confiables y realistas.

Como en toda estructura el conocimiento del comportamiento sísmico de estas permite definir los mecanismos y acciones de refuerzo requeridos para la reducción de los efectos provocados por los movimientos del terreno, de modo que al tener el entendimiento adecuado de la amenaza sísmica existente en los edificios de tipo histórico, se podrán definir de forma adecuada las acciones que se deben considerar para realizar una intervención adecuada sobre la vulnerabilidad de en este tipo de estructuras, por lo que es importante encontrar la manera adecuada de evaluar dichas edificaciones que permitan evaluar su comportamiento estructural correctamente, contribuyendo a una adecuada preservación de los monumentos históricos y evitando que se tengan grandes pérdidas de este patrimonio cultural.

De esta manera con la información obtenida se realizarán los trabajos adecuados de restauración encaminados a conservar y proteger de manera correcta nuestro patrimonio, ya que al conservar este tipo de edificaciones preservamos nuestra cultura e historia heredada de nuestros antepasados, así como nuestra identidad en el presente, asegurando así que las futuras generaciones tengan el placer de apreciar tan emblemáticas y magnificas obras de arte de la ingeniería y arquitectura.



1.1. Conceptos generales.

1.1.1. Vulnerabilidad sísmica.

La vulnerabilidad sísmica se define como la propensión de una estructura, grupo de estructuras o de una zona urbana completa de ser susceptible a sufrir un cierto grado de daño, ante la ocurrencia de movimientos sísmicos de cierta intensidad.

Es una característica propia de las estructuras que está asociada directamente con sus características físicas y estructurales de diseño y a su vez es independiente de la peligrosidad sísmica del sitio donde estén ubicadas. Podría decirse que cada estructura tiene su propia función de vulnerabilidad y la determinación de esta última variará para comportamientos estructurales distintos.

El concepto de vulnerabilidad sísmica es indispensable para estudios sobre riesgo sísmico y para la mitigación de desastres por sismos. Se entiende por riesgo sísmico, al grado de pérdidas esperadas que sufren las estructuras durante el lapso de tiempo que permanecen expuestas a la acción sísmica, y mitigación de desastres a la totalidad de las acciones que tienen como objetivo mejorar el comportamiento sísmico de los edificios de cierta zona, a fin de reducir los costos de los daños esperados durante un sismo, por lo que es evidente que para mitigar el riesgo sísmico de una zona, es necesario disminuir la amenaza, la vulnerabilidad y el costo de reparación de las estructuras afectadas.

Un punto decisivo en el análisis de vulnerabilidad es la selección de un indicador apropiado que permita cuantificar la respuesta calculada a partir del análisis del modelo mecánico para un grupo de movimientos sísmicos, el cual representa el grado de daño sufrido por un miembro y/o de toda la estructura. Estos indicadores usualmente se denominan índices o indicadores de daño y pueden involucrar una o más variables.

La vulnerabilidad sísmica según sea obtenida puede clasificarse como:



- Vulnerabilidad observada. Es derivada de la observación de daños posteriores a un terremoto y del análisis estadístico de los mismos para algún tipo de estructura definido.
- Vulnerabilidad calculada. Se obtiene en base a un análisis matemático mediante un modelo estructural analítico, o a partir de ensayos en laboratorio de modelos a escala y cuyos resultados han sido expresados en términos probabilísticos.

1.1.2, Índices de Vulnerabilidad o de Daño.

Los índices de vulnerabilidad constituyen parámetros relativos que permiten cuantificar la susceptibilidad de una estructura de sufrir daños. Su empleo de manera directa permite comparar diferentes estructuras de una misma tipología, donde se consideren los mismos factores en la evaluación.

Estos índices proporcionan una medida relativa de la vulnerabilidad sísmica de una tipología de edificaciones de una región y son muy limitados para comparar diferentes tipos de edificaciones, es decir de mampostería sin confinar con mampostería confinada, con concreto armado o de acero, debido a los diferentes factores considerados en la evaluación.

Para definir los índices de daño, generalmente es necesario desarrollar un modelo que represente las características de la tipología estructural, las propiedades de los materiales involucrados, las características de las acciones aplicadas y el tipo de fallo que presenta la estructura. Por lo tanto, la definición de un índice de daño es un problema complejo y para el cual aún no existe un criterio unificado.

Park-Ang definen como índices de daño a la cuantificación de daño en términos numéricos que una estructura puede sufrir ante un sismo. Estos pueden basarse en los resultados de un análisis dinámico no lineal, en la respuesta medida de una estructura durante un terremoto, etc. En la mayoría de los casos, los índices de daño son parámetros adimensionales que pueden variar entre 0 para un estado no



dañado (elástico) y 1 para un estado de colapso de una estructura, con valores intermedios que dan alguna medida del grado de daño.

El valor de un índice de daño por sí solo no representa ningún tipo de evaluación de la vulnerabilidad sísmica, para que estos índices puedan ser interpretados es necesario establecer una relación entre su rango de variación y los estados de daño, los cuales describen de forma cualitativa, los daños físicos que se producen en los elementos de una estructura, el riesgo al que se encuentran expuestos los ocupantes y la forma como afectan los daños a la funcionalidad de una estructura.



2. ANTECEDENTES

En México se cuentan con pocos antecedentes sobre el comportamiento estructural de este tipo de edificaciones, la información de sus características y modificaciones que se les a realizado a través del tiempo es escasa, por lo que la mayoría de las restauraciones que se hacen en estas construcciones son con el mínimo conocimiento adecuado para una correcta intervención estructural, lo que implica que las reparaciones que se logran hacer la mayoría de veces son de manera local, enfocándose más a la parte estética, descuidando la parte estructural.

Lagomarsino et al., 2004 menciona que la respuesta sísmica de las iglesias puede describirse de acuerdo con comportamientos recurrentes, trazables a los modos de daño y mecanismos del colapso de las diferentes partes llamados macroelementos (como son la fachada, el campanario, el ábside, las capillas laterales) los cuales demuestran un comportamiento estructural que es casi autónomo. Este enfoque, que no es adecuado para el análisis de edificios complejos como palacios o conventos, permite una interpretación cualitativa muy efectiva para las iglesias.

La metodología propuesta por Lagomarsino et al., 2004 para la evaluación de daños y vulnerabilidad de las iglesias está basada en una forma que considera 18 posibles mecanismos de daño y colapso en los macroelementos (**figura 1 y tabla 1**), dejando de lado la clasificación de las iglesias en términos de estilo arquitectónico, edad y tipologías regionales, ya que se observó que desde el punto de vista estructural hay una clara similitud en el comportamiento sísmico en todas las regiones italianas.

Este método no se enfoca en un estudio detallado de las grietas, sino que requiere identificar la activación de diferentes mecanismos de colapso sísmico. En el cual se utiliza la subdivisión de cinco niveles de daño proporcionado por la Escala macrosómica europea EMS-98 , que considera las siguientes descripciones: (1)



daño insignificante a leve, (2) daño moderado, (3) daño sustancial a fuerte, (4) daño muy fuerte, y (5) destrucción, permitiendo la implementación de la metodología de la Matriz de Probabilidad de Daño (DPM), bien establecida para edificios comunes, en el análisis de vulnerabilidad de las iglesias.

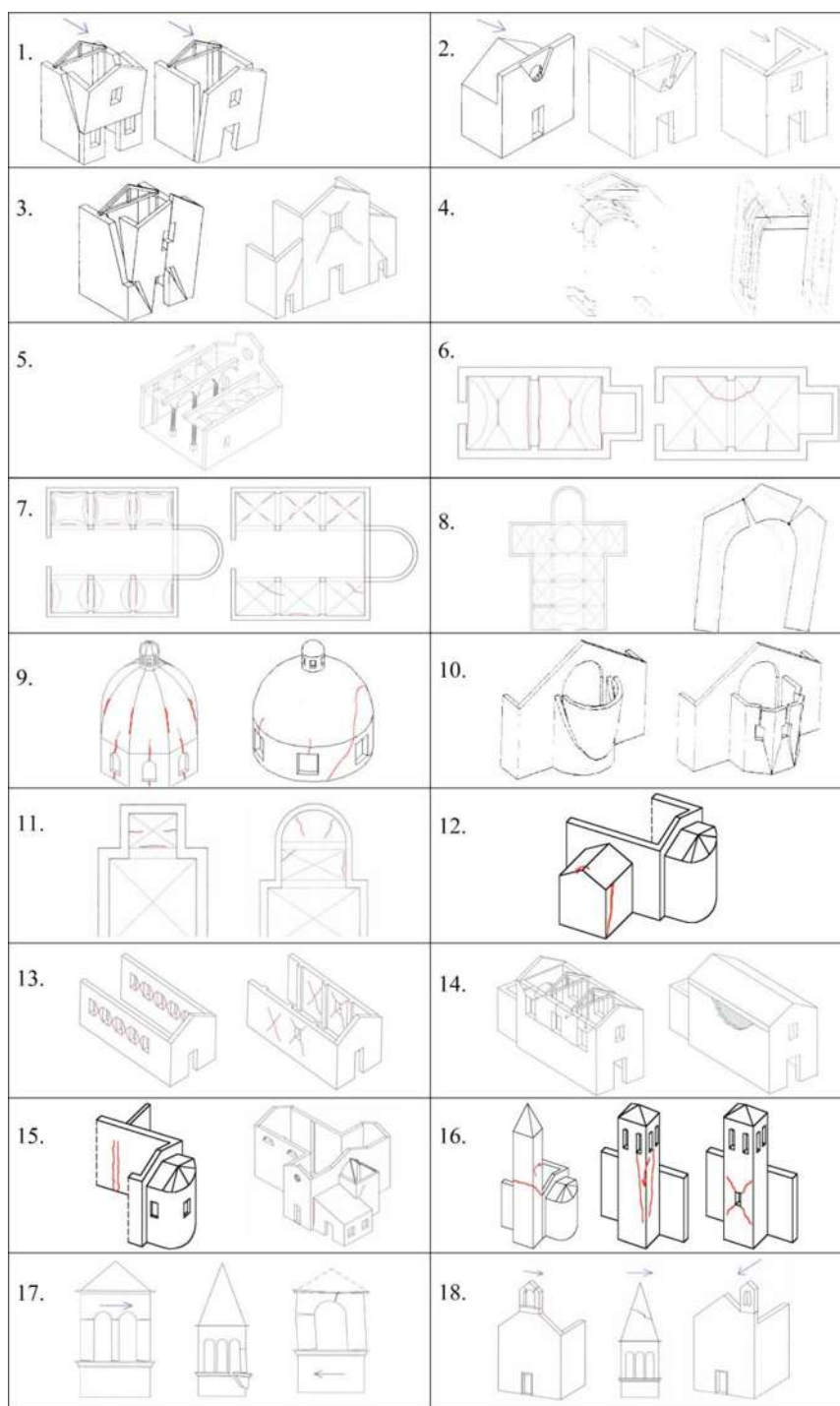




Figura 1. Mecanismos de falla de los diferentes macroelementos que componen una iglesia de tipología italiana (Lagomarsino et al., 2006).

Tabla 1. Descripción de los diferentes mecanismos de falla de macroelementos que componen una iglesia (Lagomarsino et al., 2004).

FACHADA
1. VUELCO DE LA FACHADA • daño: separación de la fachada de los muros laterales, en la proximidad de la esquina o con grietas curvas en las los muros laterales • vulnerabilidad: 1. mala conexión entre la fachada y las los muros laterales 2. falta de tirantes longitudinales o contrafuertes
2. VUELCO DEL FRONTON • daño: separación de la parte superior de la fachada en partes • vulnerabilidad: 1. presencia de aberturas anchas que debilitan la fachada (rosetón) 2. falta de conexión con el techo que cubre (golpeteo de la viga de la cumbrera)
3. MECANISMOS DE CORTE EN LA FACHADA • daño: grietas en la fachada con tendencia X; grieta vertical central; grieta arqueada cerca de la esquina • vulnerabilidad: 1. presencia de aberturas anchas, incluso si está cerrada con mampostería 2. empuje del techo en las los muros laterales y falta de tirantes transversales
NAVE Y TRANSEPTO
4. VIBRACIÓN TRANSVERSAL DE NAVE O TRANSEPTO • daño: grietas en los arcos estructurales; rotación de las los muros laterales, con aplastamiento o grietas abiertas cerca de la base de los pilares • vulnerabilidad: 1. los muros laterales demasiado delgadas 2. falta de tirantes transversales o contrafuertes
5. VIBRACIÓN LONGITUDINAL DE LA NAVE CENTRAL • daño: grietas en los arcos longitudinales; aplastamiento o grietas abiertas en la base de las columnas; grietas de corte diagonal en los pasillos • vulnerabilidad: 1. columnas esbeltas y nave central muy alta con respecto a las laterales 2. falta de tirantes longitudinales
6. BOVEDAS DE LA NAVE CENTRAL



• daño: daño en las bóvedas, con desarticulación de los arcos de refuerzo • vulnerabilidad: 1. bóvedas demasiado bajas y demasiado delgadas 2. presencia de fuerzas concentradas desde el techo (debido a los puntales de madera del techo)
7. NAVE LATERAL Y BOVEDAS DEL TRANSEPTO • daño: daño en las bóvedas, con desarticulación de los arcos de refuerzo • vulnerabilidad: 1. bóvedas demasiado bajas y demasiado delgadas 2. presencia de acciones concentradas desde el techo (debido a los puntales de madera del techo)
ARCO TRIUNFAL
8. MECANISMOS EN LOS ARCOS TRIUNFALES • daño: formación de articulaciones en el arco, con grietas abiertas, aplastamiento de mampostería y deslizamiento de piedra sillar • vulnerabilidad: 1. espesor del arco demasiado delgado o presencia de mampostería de mala calidad 2. falta de tirantes o mal posicionados; insuficiente apuntalamiento por las los muros laterales
CUPULA
9. COLAPSO DE LA CUPULA • daño: formación de una grieta arqueada continua en el domo; grietas en el tambor • vulnerabilidad: 1. tambor muy alto y delgado (con grandes aberturas) 2. falta de bastidores y de contrafuertes externos
APSIDE
10. VUELCO DEL APSIDE • daño: grietas verticales en correspondencia con las ventanas; grietas arqueadas inclinadas • vulnerabilidad: 1. falta de bastidores o de tirantes longitudinales 2. golpeando el techo o debilitamiento del techo como resultado de la presencia de grandes aberturas 11. BOVEDAS DEL APSIDE Y DEL PRESBITERIO • daño: daño en las bóvedas • vulnerabilidad: 1. bóvedas demasiado bajas y demasiado delgadas 2. presencia de acciones concentradas desde el techo (debido a los puntales de madera)



del techo)
MECANISMOS EXTENDIDOS
12. VUELCO DE OTROS MUROS (TRANSCEPTO FACHADA, CAPILLAS) • daño: separación del muro final de los muros ortogonales • vulnerabilidad: 1. mala conexión entre el muro del extremo y los muros ortogonales 2. falta de tirantes o contrafuertes
13. FALLA DE CORTANTE EN MUROS • daño: grietas inclinadas en mampostería; desunión en la falta de continuidad (ventanas cerradas) • vulnerabilidad: 1. mampostería de mala calidad o demasiado delgada 2. debilitamiento como resultado de la presencia de demasiadas aberturas
14. GOLPETEO Y DAÑOS EN LA CUBIERTA DEL TECHO • daño: grietas en la proximidad del soporte de la viga; desarticulación del extremo de la viga y la mampostería • vulnerabilidad: 1. golpeteo del techo, con ausencia de un vínculo entre la viga de madera y la mampostería 2. aumento del peso y la rigidez del techo (sustitución con una losa)
15. INTERACCIÓN ENTRE ELEMENTOS DE COMPORTAMIENTO DIFERENTE • daño: grietas debido al golpeteo entre diferentes partes • vulnerabilidad: 1. diferencia significativa en la rigidez global de las dos partes del elemento 2. falta de una buena conexión entre la mampostería en las dos partes o de las barras de acoplamiento
TORRE DEL CAMPANARIO
16. COLAPSO GLOBAL DE LA TORRE DEL CAMPANARIO • daño: grietas cerca de la conexión con la iglesia; grietas verticales debajo del campanario • vulnerabilidad: 1. campanario demasiado delgado y hecho de muros de espesor limitado 2. mampostería de mala calidad y falta de conexión entre las los muros
17. MECANISMOS EN EL CAMPANARIO • daño: grietas en los arcos; rotación y deslizamiento de los pilares • vulnerabilidad: 1. falta de tirantes o amarres 1. pilares demasiado delgados y techo demasiado pesado y / o empujado



GABLE DEL CAMPANARIO, CAPITEL, Y PROYECCIONES

18. VUELCO DE LOS ELEMENTOS DE PROYECCIÓN

- daño: rotación permanente global o deslizamiento; grietas en la base del elemento
- vulnerabilidad:
 1. falta de una conexión efectiva con la iglesia
 2. elemento demasiado delgado

En trabajos previos referentes a edificios históricos de México Gaytán et al., 2010 estudió la fragilidad sísmica para las torres y portadas de la catedral de Morelia, Michoacán utilizando modelos tridimensionales de elementos finitos, en este trabajo también se evaluó la vulnerabilidad de las naves obteniendo grados de daño de moderados a extensivos, a diferencia de las torres que presentaron daños ligeros ante periodos de retorno de 475 y 975 años. Observaron que según análisis temporales paso a paso los daños se concentraron mayormente sobre las naves laterales.

Derivado de los resultados obtenidos anteriormente , se estudió la fragilidad sísmica de las naves en su dirección corta (Martínez *et al.*, 2011) empleando modelos de Elementos Rígidos (Peña, 2010) sobre modelos bidimensionales de los macroelementos que conforman los pórticos transversal o tipo y los de la zona del transepto; encontrándose que los macroelementos pórtico transversal son los más vulnerables esperándose a futuro daños de moderados a extensivos corroborando el estudio de Gaytán *et al.*, 2010.

Con la idealización y los criterios considerados en las investigaciones ya mencionadas (Gaytán et al., 2010 y Martínez *et al.*, 2011), las naves de la catedral de Morelia presentaron un aceptable desempeño ante las demandas sísmicas de 475 y 975 años, sin embargo, se planteó la necesidad de conocer el comportamiento de dichas naves considerando ahora la componente vertical del movimiento sísmico actuando simultáneamente a la horizontal (Martínez et al., 2012), estableciendo un primer referente de la influencia de las dos componentes del movimiento sísmico en el desempeño de estructuras de mampostería antigua.



Se analizaron cuatro pórticos tipo y dos pórticos de la zona del transepto, así como dos pórticos en la dirección longitudinal (**figura 2**), los cuales se modelaron como macroelementos bidimensionales que se analizaron empleando Elementos Rígidos (Casolo y Peña, 2007, Peña, 2010) (**figura 3**).

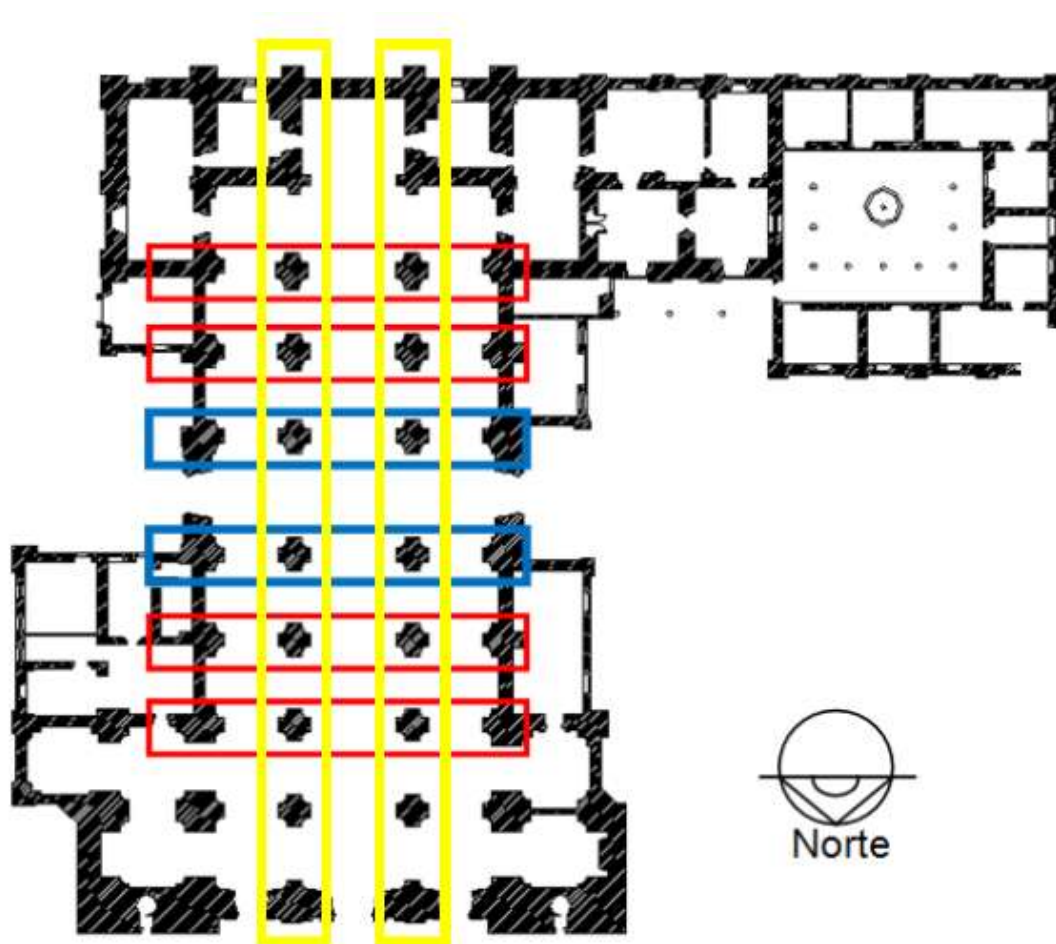


Figura 2. Planta general y posición de macroelementos pórtico tipo (rojo), pórtico transepto (azul) y pórtico longitudinal amarillo (Martínez et al., 2012).

Se realizaron análisis no lineales en el tiempo, en un primer análisis se consideró solo la componente horizontal del movimiento para finalmente hacer actuar en un segundo análisis la acción vertical. En la **figura 4** se muestran algunas



configuraciones relevantes de desplazamiento en la falla observados, así como los daños por tensión y cortante para los diferentes macroelementos.

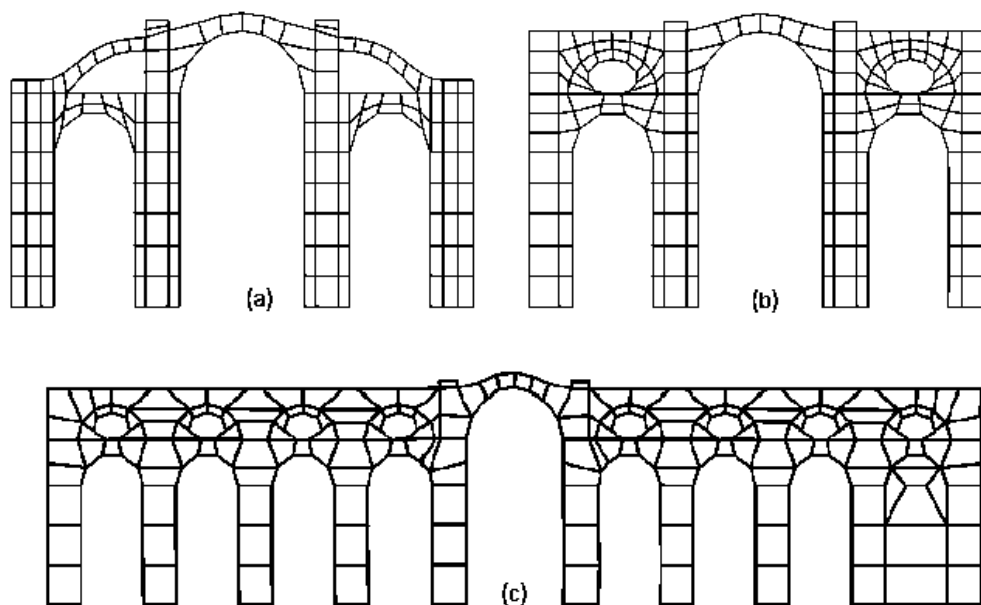


Figura 3. Macroelementos pódico transversal (a), pódico transepto (b) y pódico longitudinal (c) (Martínez et al., 2012).

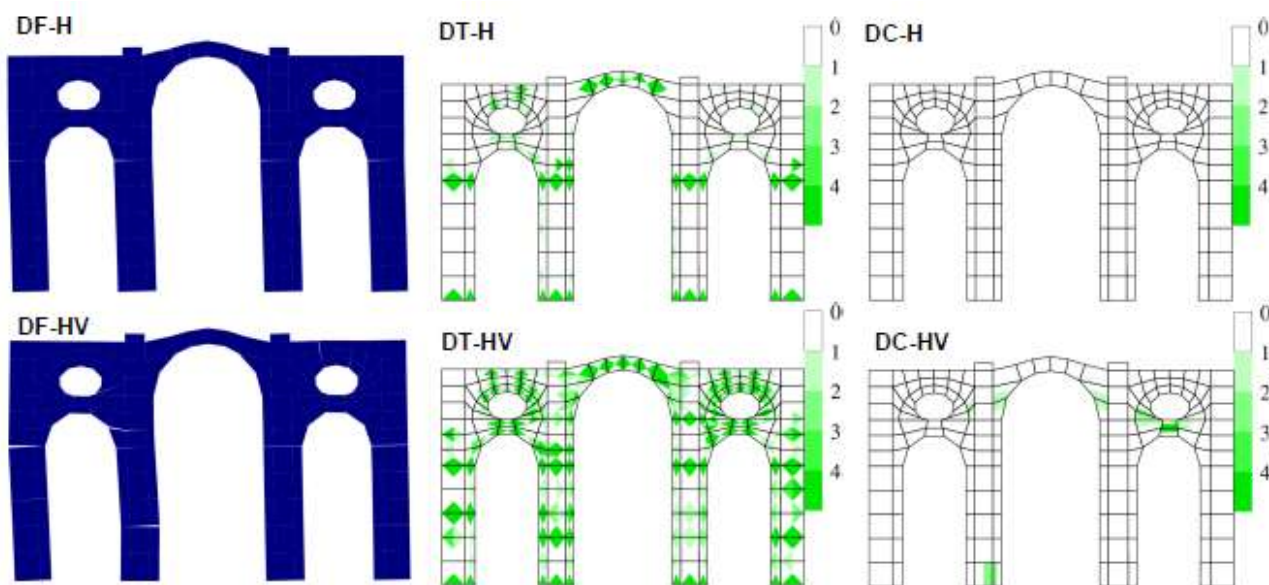




Figura 4. Macroelementos pórtico transversal (a), pórtico transepto (b) y pórtico longitudinal (c) (Martínez et al., 2012).

En la figura 4 se puede observar que no se presenta daño en compresión, pero daños a tensión se perciben en las naves. Los daños por cortante no aparecen para sismo horizontal, y se concentran mayormente sobre la nave lateral derecha con un grado de daño igual a 4 (recurrencia de 975 años), y de manera más reducida (daño 2) sobre pilares principales y riñones del arco de la bóveda central (daño 1) cuando actúa la componente vertical.

También se pudo evaluar el efecto de la componente vertical en las histéresis calculadas (**figura 5**), para la componente horizontal del sismo se muestran lazos esbeltos estables por tratarse de mampostería simple, con una pequeña reducción de resistencia, situación que cambia ligeramente al involucrar la acción vertical, donde la energía disipada aumenta y aparecen degradaciones menores de rigidez adicionalmente a las de resistencia.

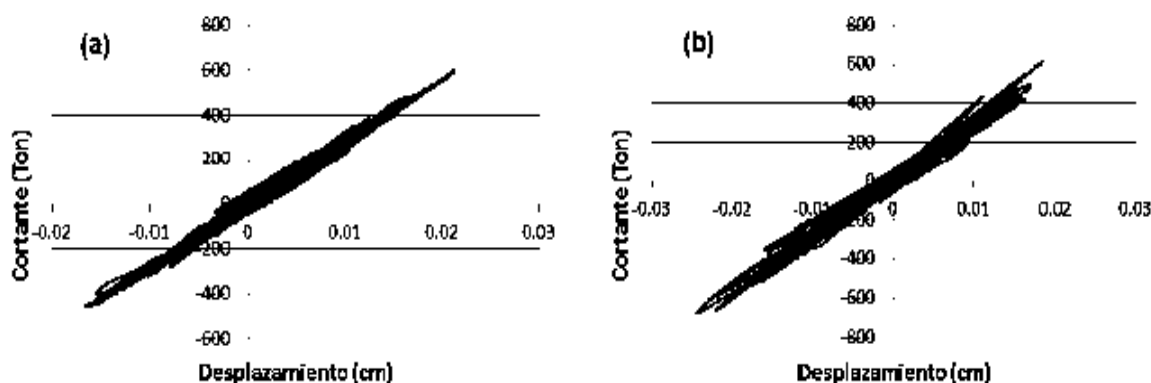


Figura 5. Histéresis para el macroelemento pórtico transepto ante el terremoto de Tehuacán del 15 de junio de 1999 escalado a 975 años. Componente horizontal (a) y componentes horizontales más vertical (b) (Martínez et al., 2012).

Como un indicador adicional de los grados de daño, en términos de energía histerética disipada, en todos los casos y macroelementos ésta se vio



incrementada cuando actúa la componente vertical sísmica; en los macroelementos pórtico tipo los rangos globales observados para este incremento van de 2.21 a 7.68 veces la energía disipada ante acción sísmica horizontal solamente, en los pórticos transepto de 2.08 a 25.43 y en los pórticos longitudinales de 1.98 a 12.81 veces, considerando las dos recurrencias de 475 y 975 años. Llegando a la conclusión de que el daño se incrementa significativamente al considerar actuando simultáneamente la componente vertical del sismo, prevaleciendo una gran vulnerabilidad de estas estructuras ante sismos de campo cercano, en los cuales las componentes verticales de aceleración suelen ser significativas.



3. EDIFICIOS EN ESTUDIO

El conjunto a analizar de edificios históricos se ubica en Morelia, Michoacán, la cual por ser una ciudad que cuenta con un magnifico centro histórico considerado uno de los atractivos turísticos más importantes del estado y del país, se considera que es de gran trascendencia el estudio del patrimonio histórico que se ubica en esta ciudad.

La ciudad de Morelia se localiza al noreste del estado de Michoacán (**Figura 6**) y es la ciudad más poblada y extensa del estado, fue fundada en el año de 1541 por el virrey Don Antonio de Mendoza. El 12 de diciembre de 1991 el centro histórico de la ciudad (**Figura 7**) fue declarado patrimonio cultural de la humanidad por la UNESCO, llegando a ser una de las ciudades mexicanas con más edificios catalogados como monumentos arquitectónicos, en su declaración la UNESCO consideró que algunas de las perspectivas urbanas del Centro Histórico de Morelia constituyen “un modelo único en América” dado que la arquitectura monumental de la ciudad se caracteriza por un estilo calificado como “barroco moreliano”, por la originalidad de sus expresiones locales que se plasman en sus diversos estilos arquitectónicos que van desde tipologías de finales del siglo XVI, donde el aspecto de fortaleza medieval con elementos renacentistas, barrocos y el neoclásico hasta llegar al eclecticismo y afrancesamiento del periodo de Porfirio Díaz.

Como es sabido la ciudad de Morelia está asentada en una zona de alta sismicidad, ocasionando que el centro histórico corra riesgo de sufrir daños estructurales importantes por lo que es preciso conocer el comportamiento de estas estructuras ante un sismo de magnitudes importantes, pretendiendo alcanzar con esta información acciones encaminadas a conservar y proteger de manera correcta el patrimonio cultural.



Figura 6. Localización geográfica de la ciudad de Morelia, Michoacán.
(https://es.wikipedia.org/wiki/Municipio_de_Morelia)

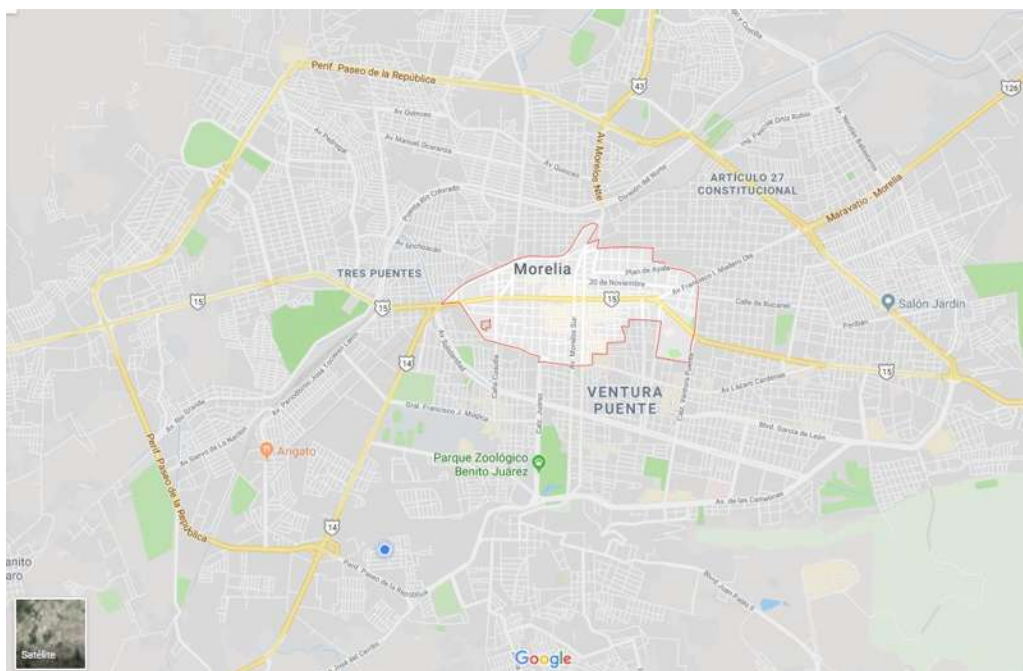


Figura 7. Localización geográfica del centro histórico de la ciudad de Morelia.



3.1 Tipología arquitectónica y estructural de los edificios conventuales mexicanos.

Se pueden distinguir dos tipologías arquitectónicas de edificios históricos que son el modelo claustral (monasterio) y el modelo parroquial.

Los monasterios o claustros estaban compuestos por la iglesia de una nave de planta rectangular, el atrio y el convento, como se mencionó anteriormente la estructura era similar a los conventos europeos, sin embargo, a estas edificaciones se les agregó más elementos característicos de la Nueva España como la cruz atrial, la capilla abierta, el portal de peregrinos y las capillas posas (figura 8).

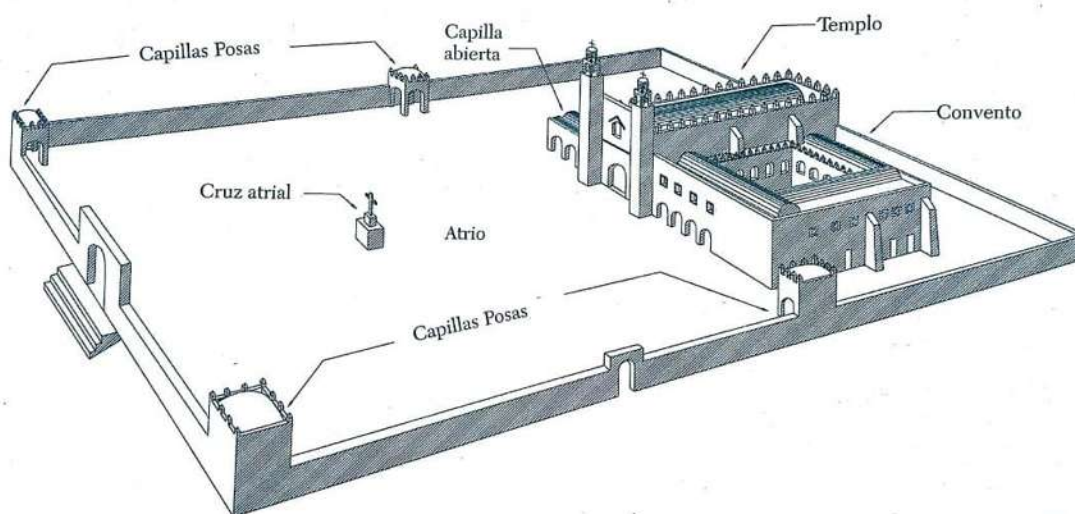


Figura 8. Elementos principales de un convento mexicano. (Los conventos mexicanos del siglo XVI: construcción, ingeniería estructural y conservación; autor: Roberto Meli Piralla.)

Los atrios son patios de gran superficie de forma rectangular rodeados por muros de gran espesor y altura con o sin almenas, dándole apariencia de fortificación. En él se situaban la capilla abierta, las capillas posas y la cruz atrial. Su función principal era el de servir como espacio para oficiar la santa misa y congregar a las multitudes en los días de fiesta.



Las cruces atriales están colocadas en el centro de los atrios (**figura 9**), simbolizan la consumación del triunfo de la fe cristiana sobre la idolatría politeísta de los nativos, presentan en su superficie gravados y detalles que representan de manera simbólica la Pasión de Cristo, de tal forma que ante los ojos de los nativos no fuera a parecer la redención un sacrificio humano.



Figura 9. Cruz atrial. (<http://jaimeramosmendez.blogspot.com/2018/04/cruz-atrinal-en-la-parroquia-de-san.html>)

Los templos comúnmente son de una nave con planta rectangular y ábside trapezoidal, cuadrado o semicircular (también se pueden encontrar en forma de basílica y otros con planta en forma de cruz latina), con muros gruesos y con tendencia a omitir los claros de luz, a su vez estos se reforzaban en su exterior con contrafuertes o arbotantes. Las portadas fueron el mejor elemento para poner en juego la gran emulación decorativa, en ellas se hicieron confluir varios estilos, siendo ejemplares de manufactura popular con iconografía cristiana y mestiza.



La capilla abierta surge de la necesidad de celebrar la misa ante grandes multitudes de fieles llegados los domingos y días de fiesta de todos los pueblos cercanos faltos de conventos (**figura 10**). En estos casos, el atrio fungía como nave de la iglesia y la capilla era el presbiterio. Cabe mencionar que de esta forma se denota la habilidad de los frailes predicantes con la que llevaron a cabo la evangelización sin alterar excesivamente las costumbres indígenas al conservar la tradición prehispánica de presenciar al aire libre las ceremonias religiosas mediante el empleo de este elemento, llegando a ser el tipo de edificio más característico del siglo XVI.

Las Capillas procesionales o posas se encuentran en las esquinas del atrio, su forma es generalmente cúbica, con una cubierta de bóveda (**figura 11**), en muchos casos ya han desaparecido parcial o totalmente y en otros no las construyeron, pero la mayoría de los conventos mexicanos cuentan con ellas; en su interior había un altar dedicado a un santo y cubierto por una bóveda. En estas capillas solamente el sacerdote y sus acólitos podían entrar; los fieles asistían a la misa a cielo abierto, reunidos en el atrio.

El claustro o convento es el elemento cubierto alrededor de un patio y separado de él por columnas o arcadas, este se comunicaba con el templo ubicándolo generalmente al sur de la iglesia (aunque también se pueden encontrar claustros situados al norte), el conjunto se complementaba con la huerta, en la parte posterior del convento. Este tenía función habitacional de los frailes y centro de servicios sociales para los nativos. En la planta baja y alrededor de un pórtico estaban la portería, la sala capitular, la sacristía, el refectorio, la cocina y despensas, así como la escalera y en la planta alta se ubicaban las celdas de los frailes y del prior, la biblioteca y los sanitarios. Todos estos lugares eran de una gran sobriedad, estaban decorados únicamente con pinturas murales, los corredores recibieron un tratamiento especial en lo que a ornamentación se refiere. La pintura al fresco, formando frisos y composiciones de escenas al fondo de los pasillos, llegó a un gran desarrollo, lo mismo que las bóvedas, en las que se solía pintar un encasetonado que era imposible construir con los procedimientos



usados. Sin embargo, en la actualidad estos elementos son los que más han desaparecido por la falta de una adecuada restauración.



Figura 10. Capilla abierta. (<http://michoacan.travel/es/lugares/exconvento-de-santa-ana-y-capilla-abierta-tzintzuntzan.html>)

En el modelo parroquial se distinguen tres tipos de construcciones (**figura 12**), las de planta en forma de cruz la cual se forma con una nave principal longitudinal y otra transversal, las de planta rectangular formadas por una sola nave y de tres naves, aunque estas no son muy comunes.



Figura 11. Capillas posas. (https://es.wikipedia.org/wiki/Capilla_posa)

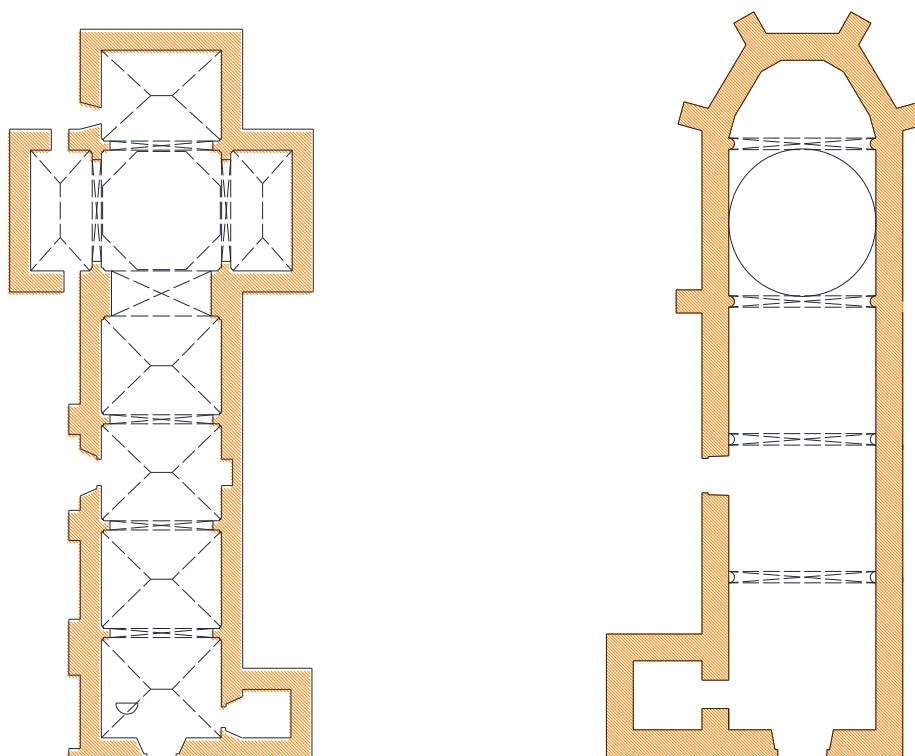


Figura 12. Plantas de los diferentes modelos parroquiales. Derecha nave de planta en de cruz latina, izquierda nave de planta rectangular.



Las naves de pueden ser de cañón corrido con o sin pilastras, de lunetos o nervadas (**figura 13**). Las iglesias de una nave carecen de crucero, y generalmente su ábside es poligonal, aunque también las hay con ábside semicircular o trapezoidal. Las de planta en cruz en la parte del crucero se apoya en los cuatro vértices una cúpula comúnmente de tipo octagonal, apoyada sobre un tambor con ventanillas (**figura 14**). Este tipo de edificaciones ya sea de cruz o rectangular cuentan con una portada o fachada más o menos elaborada dada su función de reflejar por fuera la importancia del santuario e invitar a los fieles a ingresar al interior. Sobre el eje longitudinal de la nave se encuentra la entrada del templo y en la parte alta de esta se ubica el coro; para que los fieles pudieran ingresar a la nave se contaba con una segunda puerta lateral llamada “de porciúncula” con importante ornamentación al exterior; remataba el eje en el altar único, colocado en el ábside y a mayor altura que el piso de la nave, para darle más importancia y visibilidad. Las iglesias de tres naves se distinguen de las anteriores en tener la nave flanqueada por las capillas, de mayor o menor profundidad, comprendidas entre los contrafuertes laterales.

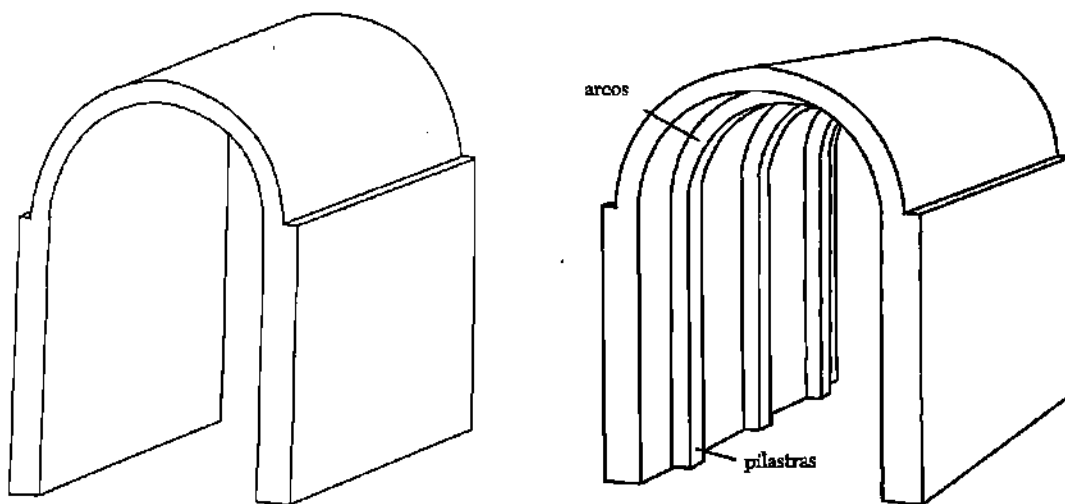


Figura 13a. Naves de cañón corrido izquierda sin pilastras, derecha con pilastras. (Los conventos mexicanos del siglo XVI: construcción, ingeniería estructural y conservación; autor: Roberto Meli Piralla.)

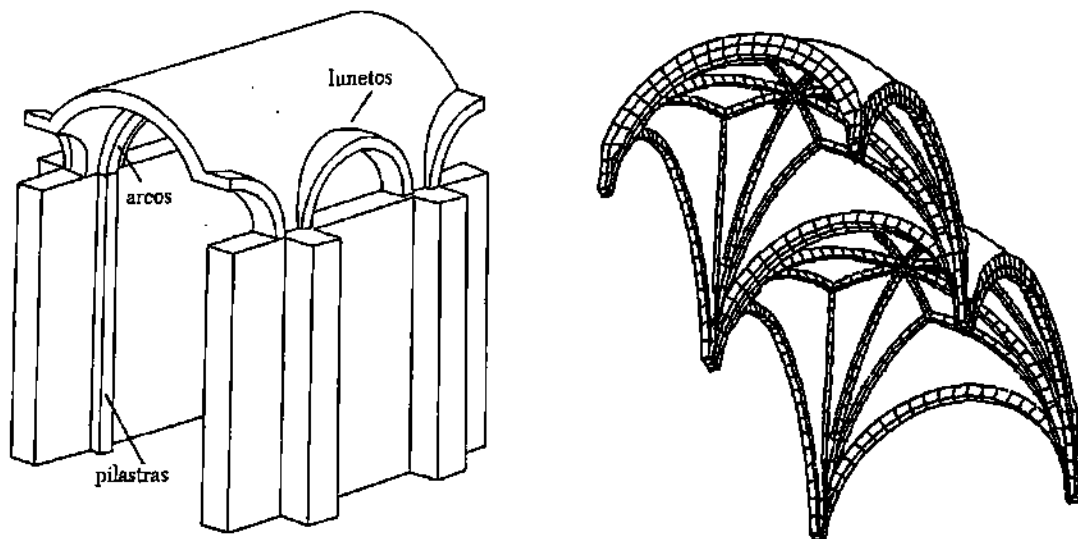


Figura 13 b. Izquierda nave con lunetos, derecha nave nervadas. (Los conventos mexicanos del siglo XVI: construcción, ingeniería estructural y conservación; autor: Roberto Meli Piralla.)



Figura 14. Cúpula tipo octagonal apoyada sobre un tambor con ventanillas, catedral de Morelia.

Exteriormente, los empujes de las bóvedas se contrarrestaban por medio de contrafuertes en forma de prisma cuadrangular (**figura 15**). Los franciscanos



solían colocarlos dispuestos con toda regularidad, mientras que los agustinos prestaban poca atención por estos elementos. En ocasiones, el fuerte empuje de algunas bóvedas obligo a colocar arbotantes.



Figura 15. Contrafuertes y arbotante, convento de Capula, Michoacán.

3.2 Descripción de los edificios en estudio.

Para el análisis se eligieron un conjunto de 4 estructuras de tipo conventual las cuales son parte del patrimonio histórico de la ciudad de Morelia, dichas construcciones fueron edificadas entre los siglos XVI y XVIII, considerándoseles de los edificios más emblemáticos de la ciudad de Morelia.

A continuación, se enlistan los 4 edificios por orden cronológico:

1. Templo y exconvento de San Agustín (1550)



2. Templo y exconvento franciscano de San Buenaventura (1585)

3. Templo de Guadalupe y exconvento de San Diego (1708)

4. Templo y exconvento de la Merced (1736)

En la **figura 16** se muestra la localización de cada uno de los templos estudiados con la misma numeración en que se encuentran enlistados anteriormente.

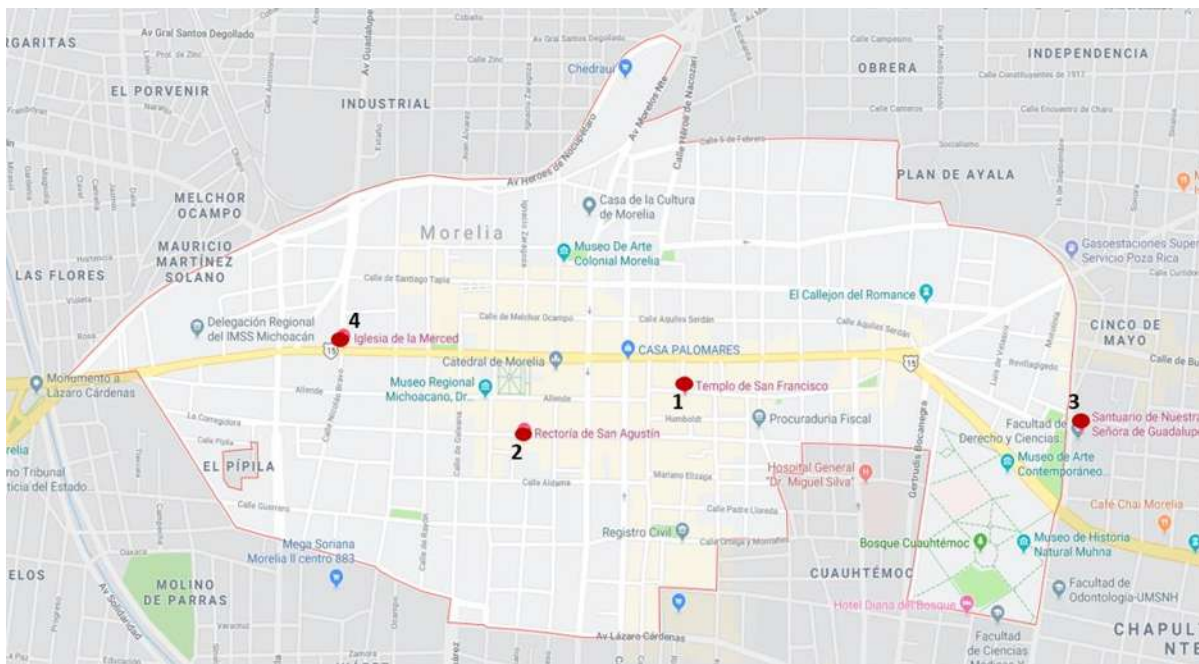


Figura 16. Localización geográfica de los templos estudiados del centro histórico de la ciudad de Morelia.

3.2.1 Templo y exconvento de San Agustín.

Es uno de los primeros edificios que se construyeron en Morelia en el año de 1550 (s. XVI) (**Figura 17**), su portada principal es de estilo barroco destacando el emblema de la orden Agustina (un corazón atravesado por flechas), la imagen de San Agustín en la ventana del coro y una escultura de San Miguel Arcángel; en el lado norte de la fachada se levanta una torre de tres cuerpos (mediados del siglo XVII).



En el interior de la iglesia se puede observar una gran ornamentación característica de siglo XIX. Aquí se venera a la Virgen del Socorro, imagen donada a los padres agustinos por Santo Tomás de Villanueva, arzobispo de Valencia, antes de su muerte en 1565.

A un lado del templo se encuentra el convento, de influencia gótica, en su interior se puede observar que la bóveda está cubierta por pinturas y en sus muros se encuentran diversos óleos de personajes ilustres de la época virreinal.



Figura 17. Exconvento de San Agustín. (<http://www.moreliainvita.com/www/wp-content/uploads/2016/08/convento-san-agustin-morelia-invita.jpg>)

Actualmente el templo sigue abierto al culto católico, mientras que los claustros conventuales son utilizados como casa de estudiantes.



3.2.2 Templo y exconvento franciscano de San Buenaventura.

Los inicios de este templo datan de 1531 con la llegada de los Franciscanos al valle de Guayangareo (actualmente Morelia). El templo y el convento (**figura 18**) se fundó en 1536 planeándolo a semejanza de los de España, es el más antiguo de la ciudad y se cree que a partir de este sitio se fundó la ciudad de Valladolid, hoy Morelia.



Figura 18. Exconvento franciscano de San Buenaventura.

(http://www.cambiodemichoacan.com.mx/fotos/_8be74b66774704b01b3ee952ec5bdb55,san.jpg)

La fachada conserva el diseño barroco (una nave rectangular cuyos muros soportan la bóveda), no obstante, su estilo es plateresco ya que cuenta con elementos decorativos del estilo gótico medieval, como los arcos conopiales en las ventanas, con algunos elementos mudéjares, sin embargo, al ser construido por etapas se puede observar diferentes estilos de construcción.

La entrada principal del templo cuenta con una alta puerta en forma de arco, flanqueada por columnas, arriba de la puerta se encuentra la ventana del coro,



también con columnas a los lados; en la parte alta del arco de la puerta hay una escultura de la Virgen con el niño saliendo de una flor, esta escultura se considera que es la más antigua de Morelia.

La torre del templo se construyó posteriormente mostrando elementos arquitectónicos del barroco del siglo XVIII.

El área conventual se desarrolla en torno a un patio central de forma cuadrada, resaltando los corredores y la arquería de medio punto, es de dos niveles, en el interior se puede observar la austeridad y sencillez que caracteriza los franciscanos respecto a la ornamentación del claustro.

Actualmente el templo sigue abierto al culto católico, mientras que el claustro es el Instituto del artesano Michoacano también conocido como “la Casa de las Artesanías”

3.2.3 Templo de Guadalupe y exconvento de San Diego

Su construcción inició en 1708, pero concluyó en 1716. En la última etapa de su edificación este templo fue dado a un grupo de franciscanos que pertenecían a la Orden de San Diego.

Entre 1729 y 1737 se construyó una casa adosada al templo, para que hicieran uso de ello los eclesiásticos, en 1760 se hizo entrega tanto del templo como del edificio anexo a los frailes Franciscanos Descalzos (**figura 19**).

El crucero y el presbiterio del templo se ampliaron en 1777, y para octubre de 1785 pasó por un proceso de restauración, a cargo de Fray Antonio de San Miguel.

El templo tiene una torre de dos cuerpos con imafronte piramidal y cúpula, fusionando un estilo arquitectónico de corriente europea con la mexicana del siglo XVIII de estilo barroco.



Figura 19. Exconvento de San Diego. (<https://www.espejel.com/wp-content/uploads/2017/04/santuario20guadalupe.jpg>)

El interior del templo fue decorado por el artesano Joaquín Orta en el año de 1915, con diversas formas florales donde predominan los colores rosa, rojo y dorado; esta decoración se puede observar en muros, bóvedas y cúpulas y es una combinación de la técnica de escultura en barro de la tradición indígena con la técnica europea de yesería.

En 1859 los religiosos fueron exclaustrados abandonando el convento, dándole diferentes usos al inmueble hasta que en el 1967 se ubicó la Facultad de Derecho y Ciencias Sociales de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), teniendo actualmente este uso; la parte del templo sigue abierto al culto católico.

3.2.4. Templo y exconvento de la Merced (1736)

La "Gloriosa, Real y Militar Orden de Nuestra Señora de la Merced y del Rescate, Redención de los cautivos" o "mercedarios" llegaron a la Nueva España durante la última década del siglo XVI y a Valladolid (hoy Morelia) en el año de 1604.



Figura 20. Exconvento de la Merced.

(https://live.staticflickr.com/2793/4137762584_f3a8d00a5e_z.jpg)

La construcción del templo y convento (**figura 20**) se dio de manera lenta y paulatina, por lo que no se sabe cuándo se terminó el convento, pero el templo, según un periódico de la época seguía construyéndose en 1736.

Debido a que la construcción del templo no fue de manera constante se puede observar que consta de diferentes estilos arquitectónicos, mientras que la portada lateral resulta de estilo barroco, la fachada principal nos muestra un churrigueresco; la torre hace juego con la portada lateral en cuanto a sus simplicidad y armonía y consta de cuatro cuerpos bien separados entre sí, un casquete semiesférico remata el conjunto y sobre él hay una linternilla que sirve de base para la cruz que corona la iglesia; El templo tiene una sola nave y su cúpula construida en el siglo XVIII es de estilo barroco la cual sobresale de la



construcción por ser el elemento más rico del conjunto religioso ya que octogonal alberga las figuras en relieve de cuatro religiosos mercedarios. La parte del convento es muy austera.

Tiempo después en el año 1858 debido a las leyes de Reforma y las políticas anticlericales del Estado, el convento fue ocupado por el gobierno teniendo diferentes funciones.

Actualmente el templo sigue abierto para el culto católico y la parte del convento es una escuela primaria.



4. DAÑOS OBSERVADOS TRAS LOS SISMOS DE SEPTIEMBRE DE 2017

4.1 Sismicidad en México.

México se encuentra situado en una de las regiones donde se concentra la mayor actividad sísmica del planeta conocida como cinturón circumpacífico o “cinturón de fuego” la cual rodea casi totalmente el Pacífico, se extiende a lo largo de las costas del pacífico del continente americano que va desde Argentina hasta Alaska; después continúa por las islas Aleutianas, antes de dirigirse hacia el sur a través de Japón y las Indias orientales (**figura 21**). La mayor parte de la energía sísmica se libera en esta región, libera entre 80 y 90% de la energía sísmica anual de la Tierra.



Figura 21. Cinturón circumpacífico o “cinturón de fuego”.

(<https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Sismologia-de-Mexico.html>)

La sismicidad en México es ocasionada principalmente por la interacción entre las placas de Norteamérica, la de Cocos, la del Pacífico, la de Rivera y la del



Caribe (**figura 22**) así como algunas fallas locales que corren a lo largo de varios estados. La Placa Norteamericana se separa de la del Pacífico, pero roza con la del Caribe y choca contra las de Rivera y Cocos, de aquí la incidencia de los sismos ocurridos en el país.

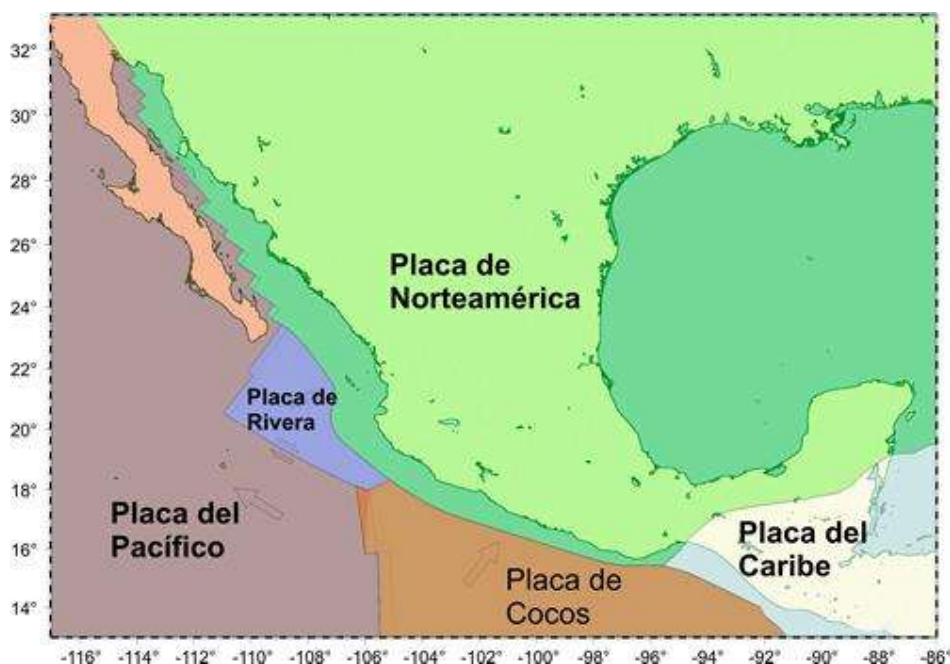


Figura 22. Placas tectónicas donde se ubica la república mexicana
(<https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Evolucion-tectonica-Mexico.htm>)

Debido a la interacción de las placas de Cocos y Rivera que subducen con las de Norteamérica y del Caribe los estados con mayor sismicidad en el país son Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Michoacán, Colima y Jalisco, en menor incidencia, pero también por esta misma acción son afectados los estados de Veracruz, Tlaxcala, Morelos, Puebla, Nuevo León, Sonora, Baja California, Baja California Sur.

En el caso de la ciudad de México, aunque no se encuentra sobre la costa también es considerado uno de los lugares con actividad sísmica intensa debido a la naturaleza de su terreno, causando que los sismos sean más dañinos y destructivos en esta zona que en otros lugares de la república.



Para fines de diseño estructural por sismo, el Manual de diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad en la sección de diseño por sismo divide la República Mexicana en cuatro zonas sísmicas (**figura 23**):

- **Zona A.** Es una zona donde no se tienen registros históricos de sismos, no se han reportado sismos en los últimos 80 años y no se esperan aceleraciones del suelo mayores a un 10% de la aceleración de la gravedad a causa de temblores.
- **Zonas B y C.** Son zonas intermedias, donde se registran sismos no tan frecuentemente o son zonas afectadas por altas aceleraciones pero que no sobrepasan el 70% de la aceleración del suelo.
- **Zona D.** Es una zona donde se han reportado grandes sismos históricos, donde la ocurrencia de sismos es muy frecuente y las aceleraciones del suelo pueden sobrepasar el 70% de la aceleración de la gravedad.



Figura 23. Zonificación sísmica de la República Mexicana de acuerdo al Manual de diseño de Obras Civiles (Diseño por Sismo) de la Comisión Federal de Electricidad.



Esta división se ha realizado en base a los registros históricos de la actividad sísmica del país desde inicios de siglo.

4.2 Sismos del 7 y 19 de septiembre del 2017 en México.

En septiembre del 2017 ocurrieron dos sismos de los cuales han sido considerados de los más importantes en la historia de México. El primero tuvo acontecimiento el día 7 a las 23:49:18 horas con una magnitud de 8.2 ubicándose el epicentro a 133 km al suroeste de Pijijiapan, Chiapas, en la Latitud: 14.85°. Longitud: -94.11°, con una profundidad de 58 km, afectando principalmente en los estados de Chiapas y Oaxaca (**figura 24**), este evento aconteció como resultado de una falla normal a una profundidad intermedia.

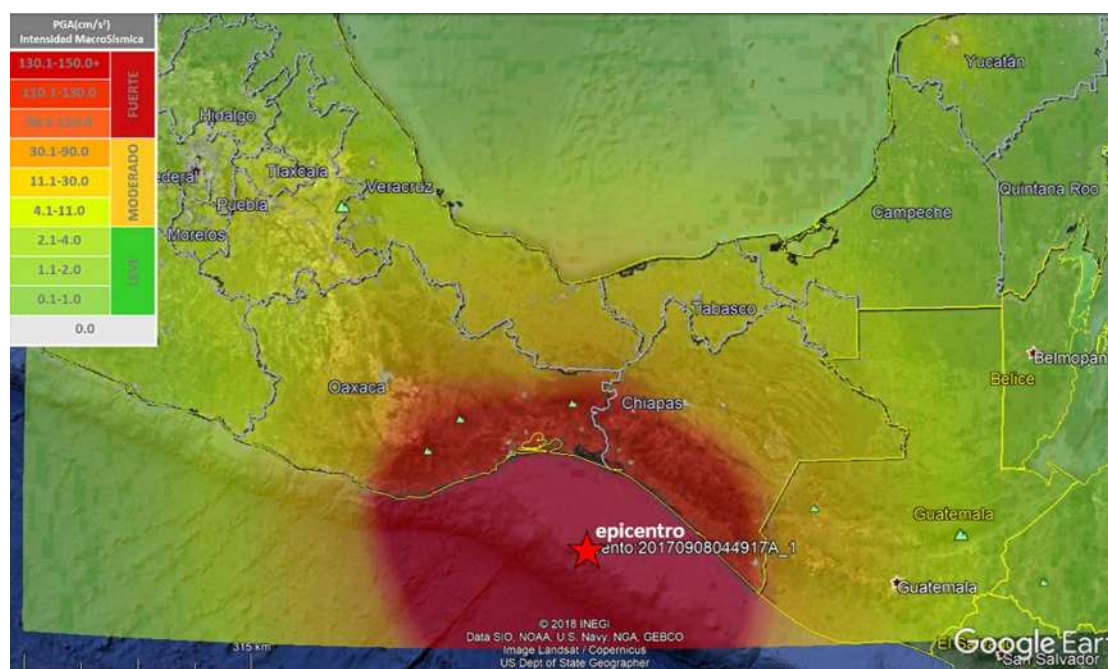


Figura 24. Localización del epicentro y estados con mayor afectación del sismo del 8 de septiembre del 2017.

Doce días después, el día 19 a las 13:14:40 horas ocurre el segundo sismo con magnitud 7.1 localizándose el epicentro a 12 km al sureste de Axochiapan,



ÍNDICES DE VULNERABILIDAD SÍSMICA PARA EDIFICIOS CONVENTUALES MEXICANOS

Morelos, y a 120 km de la Ciudad de México, con una profundidad de 57 km, con Latitud 18.4° y Longitud -98.72° , el cual afectó principalmente a la CDMX, estado de México, Puebla, Morelos, Tlaxcala (**figura 25**), ocurrió como resultado de una falla normal a una profundidad media. Este terremoto ocurrió en el aniversario del devastador terremoto de magnitud 8.0 con epicentro Michoacán de 1985, que causó grandes daños a la Ciudad de México y la región circundante.

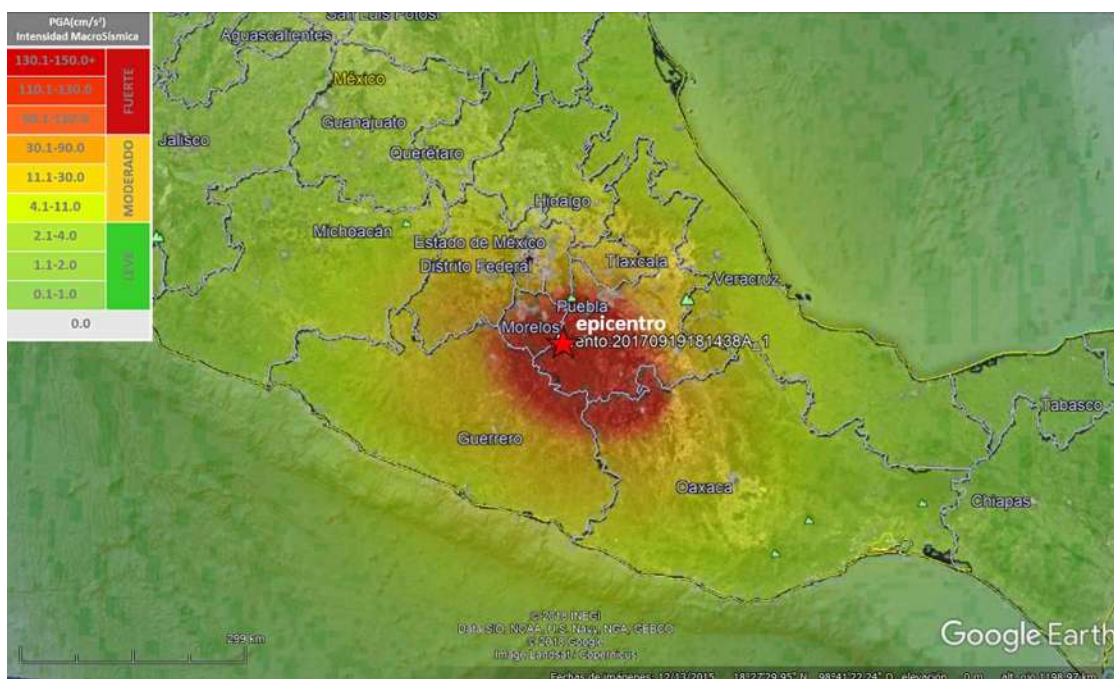


Figura 24. Localización del epicentro y estados con mayor afectación del sismo del 8 de septiembre del 2017.

Durante el siglo anterior, en la región a una distancia de 250 km del hipocentro del terremoto del 19 de septiembre de 2017 se han experimentado otros 19 terremotos de magnitud mayores a 6.5. La mayoría ocurrieron cerca de la interfaz de la zona de subducción en la costa del Pacífico, al sur del evento del 19 de septiembre. El más grande fue un terremoto de magnitud 7.6 en julio de 1957, en la región de Guerrero, que causó entre 50 y 160 muertes y muchas más afectaciones. En junio de 1999, un sismo de magnitud 7.0 a 70 km de profundidad,



justo al sureste del terremoto del 19 de septiembre de 2017, causó 14 muertes, alrededor de 200 heridos y daños considerables en la ciudad de Puebla.

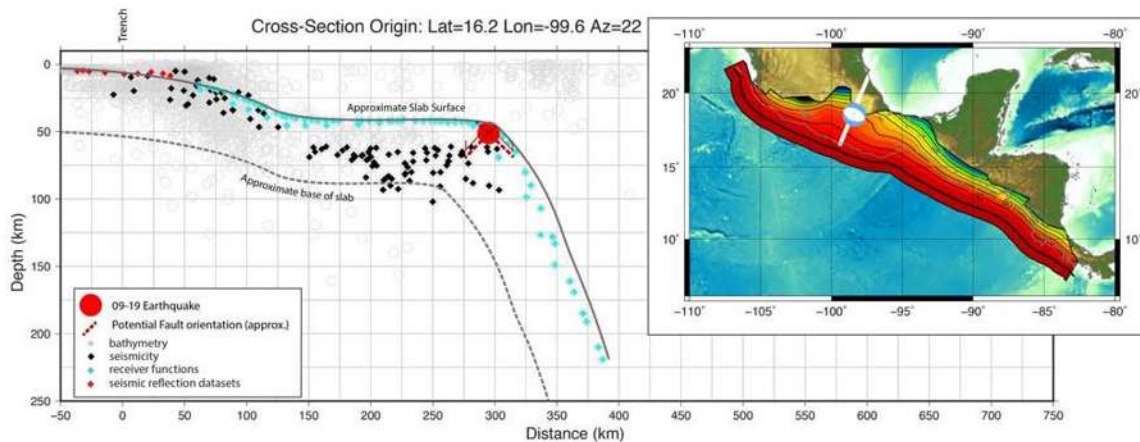


Figura 25. Sección transversal del epicentro del sismo del 19 de septiembre de 2017
(<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2000ar20/executive>).

El mecanismo focal de ambos terremotos (**figuras 26**) indica que se produjeron por deslizamiento en una falla que se sumergió muy poco hacia el suroeste, en la zona de la placa de Cocos donde converge con la de América del Norte a una velocidad de aproximadamente 76 mm / año, en dirección noreste. La ubicación, la profundidad y el mecanismo de falla normal de estos sismos indican que es probable que sean un evento intraplaca dentro del bloque de subducción de Cocos, es decir que ocurrió dentro de una placa tectónica, y no en los límites de las placas tectónicas (es decir no fue interplaca).

Aunque comúnmente el sismo del 7 y 19 de septiembre del 2017 se trazan como puntos en los mapas, los terremotos de este tamaño se describen más apropiadamente como deslizamiento sobre un área de falla más grande. Los eventos de fallas normales del tamaño de estos terremotos suelen ser de aproximadamente 50x20 km (largo x ancho).

Moment Tensor

Fault Plane Solution

Moment Tensor

Fault Plane Solution

Figura 26. Planos de falla, izquierda: sismo del 8 de septiembre del 2017, derecha sismo del 19 de septiembre de 2017 (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2000ar20/executive>).

Estos dos eventos ocasionaron grandes pérdidas humanas y materiales, derrumbando y dañando severamente edificaciones en la mayoría de los estados afectados por estos eventos, de los cuales se encuentran un gran número de edificios de tipo histórico como templos y conventos.

Se muestra un listado de templos y conventos que presentaron daños tras los sismos de septiembre de 2017, esta información se encontró a través de redes sociales, noticias y búsquedas en internet (**tabla 2**), los estados más afectados tras estos eventos y de los cuales se pudo recabar información fueron CDMX, Chiapas, Estado de México, Morelos, Oaxaca, Puebla y Tlaxcala. Cabe mencionar que esta lista no representa la magnitud del daño ocasionado por los eventos de septiembre de 2017, ya que aún se desconocen muchos de los edificios históricos que sufrieron daño y falta mucha información por recabar aun, que podría llevar algunos años de trabajo.



Tabla 2. Templos y conventos dañados tras los sismos de septiembre del 2017.

ESTADO	EDIFICACIÓN	LOCALIDAD O MUNICIPIO	COORDENADAS
CDMX	Parroquia de San Bernabé Apóstol	San Bernabé Ocotepec	19°18'49.9"N 99°15'22.3"W
	Parroquia de San Gregorio Magno	Xochimilco	19°15'12.6"N 99°03'23.7"W
	Parroquia San Juan Bautista	Coyoacán	19°20'56.0"N 99°09'43.8"W
	Parroquia de Nuestra Señora Reina de los Ángeles		19°26'57.1"N 99°08'30.9"W
CHIAPAS	Iglesia de San Lorenzo	Zinacantán	16°45'37.0"N 92°43'21.0"W
	Iglesia Señor del Calvario	Chiapa de Corzo	16°42'14.04"N 93° 0'41.71"W
	Parque de los Arcos	San Cristóbal de las Casas	16°44'13.1"N 92°38'17.4"W
	Templo de San Francisco		16°44'04.7"N 92°38'12.2"W
	Templo de Santa Lucía		16°43'55.6"N 92°38'12.2"W
ESTADO DE MÉXICO.	Capilla de Santa María	Ocuilan	18°58'29.3"N 99°25'11.4"W.
	Iglesia de Santa Mónica	Ocuilan	18°59'28.2"N 99°25'30.5"W
	Parroquia de Santiago Apóstol	Ocuilan	18°58'47.0"N 99°24'57.5"W
	Santuario del Señor del Calvario	Ocuilan	18°58'49.4"N 99°25'12.0"W
	Parroquia de San Pedro y San Pablo	Ecatzingo	18°57'29.6"N 98°45'09.6"W
MORELOS	Capilla de San Nicolás Tolentino	Tetelcingo, Cuautla	18°52'17.46"N 98°55'45.03"O
	Convento de Nuestra Señora de la Asunción	Cuernavaca	18°55'12.5"N 99°14'12.5"O
	Exconvento de San Pedro Apóstol	Jantetelco	18°42'54.8"N 98°46'34.8"W
	Exconvento y Parroquia Santiago Apóstol	Jiutepec	18°52'52.07"N 99°10'33.38"O
	Iglesia de Metepec	Metepec	18°52'46.9"N 98°44'43.0"W
	La Inmaculada Concepción	Zacualpan de Amilpas	18°47'1.4"N 98°45'56.9"O
	La Natividad	Tepoztlán	18°59'9.30"N 99°5'57.4"O



Palacio de Cortés	Cuernavaca	18°55'17.2"N 99°14'00.3"W
Parroquia de la Asunción de María	Yautepec	18°53'03.3"N 99°03'48.7"W
Parroquia de Nuestra Señora de Guadalupe (El Sagrario)	Cuernavaca	18°55'17.3"N 99°14'16.6"W
San Guillermo	Totolapan	18°59'14"N 98°55'10"O
San Juan Bautista	Tetela del Volcán	18°53'34"N 98°43'47.4"O
San Juan Bautista	Tlayacapan	18°57'22.3"N 98°58'53.4"O
San Juan Bautista	Yecapixtla	18°52'58"N 98°51'55"O
San Mateo	Atlatlahucan	18°56'7.4"N 98°53'52.7"O
Santiago Apóstol	Cuautla Morelos	18°48'45.3"N 98°57'14.9"W
Santiago Apóstol	Nepopualco	18°59'56.2"N 98°56'36.1"W
Santiago Apóstol	Ocuilco	18°52'40"N 98°46'27"O
Santo Domingo de Guzmán	Hueyapan	18°53'4.9"N 98°41'23"O
Santa Ana	Tenango	18°37'12.39"N 98°45'7.66"O
San Nicolas Tolentino (Ahuatepec)	Cuernavaca	18°58'0.64"N 99°12'32.92"O
San Andrés de la Cal	Tepoztlán	18°57'23.82"N 99° 6'53.36"O
San Francisco Zacualpan	Emiliano Zapata	18°50'30.07"N
Capilla la Exaltación	Tlacayapan	18°57'12.24"N 98°59'1.37"O
capilla Santa Ana	Tlacayapan	18°57'40.11"N 98°58'54.88"O
San Martin Caballero	Tlacayapan	18°57'22.06"N 98°59'9.96"O
Santa Catarina	Tepoztlán	18°58'14.01"N 99° 8'27.19"O
Iglesia del Padre Cristo	Axochiapan	18°30'16.22"N 98°45'12.16"O
Santiago Apóstol	Amayuca	18°43'26.72"N 98°47'54.25"O
San Pablo	Axochiapan	18°30'9.37"N 98°45'11.46"O
Templo de Tlayecat (San Marcos)	Tlayecat	18°45'24.14"N 98°52'51.58"O
Parroquia de San Andrés Apóstol	Jumiltepec, Ocuituco	18°54'43.84"N 98°46'28.84"O
Santo Domingo de Guzmán	Oaxtepec	18°54'22.8"N 98°58'11.3"O



ÍNDICES DE VULNERABILIDAD SÍSMICA PARA EDIFICIOS CONVENTUALES MEXICANOS



OAXACA.	Catedral de Huajuapán	Huajuapán	17°48'26.0"N 97°46'31.3"W
	Catedral de Santo Domingo de Guzmán	Tehuantepec	16°20'00.9"N 95°13'51.1"W
	Iglesia de la Virgen de la Natividad	Santa María Nativitas	17°39'44.0"N 97°20'05.1"W
	Iglesia de San Andrés	Miahuatlán	16°19'45.9"N 96°35'49.8"W
	Iglesia de San Vicente Ferrer	Juchitán de Zaragoza	16°25'55.87"N 95° 1'24.35"O
	San Pedro Mártir	San Pedro Comitancillo	16°29'24.9"N 95°09'34.5"W
	San Sebastián	Tehuantepec	16°20'08.6"N 95°13'54.0"W
	Santo Niño de Atocha	San José Ayuquila	17°56'31.0"N 97°58'08.8"W
	Templo del Sagrario y Vicario Episcopal de la Diócesis	Huajuapán de León	17°48'52.81"N 97°46'30.68"O
	Templo de San Cristóbal	San Cristóbal.	17°20'10.8"N 96°09'51.2"W
	Templo Expiatorio	Huajuapán	17°48'16.0"N 97°46'33.3"W
	Iglesia Asunción de María	Tehuantepec	16°19'33.32"N 95°14'8.04"O
	Iglesia de laborío (natividad excelsa)	Tehuantepec	16°19'48.30"N 95°13'53.66"O
	Iglesia del barrio Santa Cruz	Tehuantepec	16°19'24.03"N 95°14'0.61"O
	Iglesia de San Jerónimo	Tehuantepec	16°20'6.03"N 95°13'45.18"O
PUEBLA.	Convento de San Martín Caballero	Huaquechula	18°46'11.5"N 98°32'25.6"W
	Iglesia de Santiago Apóstol	Atzala	18°32'43.6"N 98°33'13.7"W
	Iglesia San Antonio Alpanoca	San Antonio Alpanoca	18°52'30.1"N 98°42'37.4"W
	Iglesia San Cristóbal Tepontla	Cholula	19°04'17.1"N 98°19'46.5"W.
	Templo de Huaquechula	Huaquechula	18°46'12.7"N 98°32'33.7"W
	Parroquia de San Juan Bautista	Pilcaya	18°14'00.5"N 98°42'18.1"W
	Parroquia de Santa María de la Natividad	Atlixco	18°54'34.6"N 98°26'01.1"W
	Santuario de la Virgen de los Remedios	Cholula	19°03'29.2"N 98°18'06.5"W



ÍNDICES DE VULNERABILIDAD SÍSMICA PARA EDIFICIOS CONVENTUALES MEXICANOS

	Templo del Señor Santiago	Xochiteopan	18°48'17.95"N 98°37'25.45"W
	Templo San Miguel del Milagro	San Miguel Tecuanipa, Tochimilco	18°52'51.1"N 98°37'04.7"W
TLAXCALA.	Iglesia De San Francisco de Asís	Tepeyanco	19°14'46.2"N 98°14'14.1"W.
	La Natividad De María	Nativitas	19°14'00.6"N 98°18'54.4"W.
	Parroquia de San José	Tlaxcala	19°19'05.7"N 98°14'20.0"W
MICHOACAN	Convento San Agustino (templo del señor Santiago)	Copándaro	19°53'36.74"N 101°12'50.80"W



Figura 27. Localización geográfica de los templos y conventos mostrados en la tabla 2.



5. VULNERABILIDAD SISMISCA CALCULADA.

Como se mencionó anteriormente la vulnerabilidad sísmica es la propensión de una estructura, grupo de estructuras, o zona urbana de ser susceptible a sufrir un cierto grado de daño, ante la ocurrencia de movimientos sísmicos de cierta intensidad; es una característica propia de las estructuras la cual está asociada directamente con sus características físicas y estructurales de diseño y a su vez es independiente de la peligrosidad sísmica del sitio donde estén ubicadas.

La vulnerabilidad calculada se obtiene en base a un análisis matemático mediante un modelo estructural analítico, o a partir de ensayos en laboratorio de modelos a escala y cuyos resultados han sido expresados en términos probabilísticos.

En el caso de edificios históricos el análisis de estos es complejo en comparación a otro tipo de estructuras, lo que hace difícil encontrar un software adecuado para el análisis de mampostería antigua, ya que existe una gran complejidad para el modelado tridimensional de este tipo de estructuras y problemas de convergencia en intervalos no lineales, por lo que se requiere el uso de procedimientos específicos y modelos lo suficientemente simples que permitan realizar análisis dinámicos paramétricos, pero teniendo en cuenta al mismo tiempo el comportamiento de la mampostería sujeta a cargas cíclicas.

5.1 Método de Elementos Rígidos.

Casolo y Peña (2004) desarrollaron un método de análisis que toma en cuenta las características de las estructuras de mampostería, el Método de los Elementos Rígidos (MER). El estudio paramétrico presentado en este trabajo utiliza este método de análisis.

Está formulado con la finalidad de emplear un número reducido de elementos, por lo que se puede considerar una aceptable simplificación para el análisis lineal y no lineal de estructuras de mampostería sin refuerzo al suponer que los elementos



tienen una dinámica de cuerpo rígido con dos desplazamientos traslacionales y uno rotacional, y las uniones entre los mismos son modelada por medio de resortes no lineales.

La filosofía del MER se basa en discretizar las estructuras mediante una serie de elementos que pueden ser triangulares, cuadriláteros o de orden mayor, los cuales tienen una cinemática de cuerpos rígidos, con dos desplazamientos lineales y una rotación (**figura 28**). Tres puntos de conexión (resortes) conectan dos elementos contiguos o los lados restringidos; estas conexiones son dos puntos axiales, separados una distancia $2b$ para tomar en cuenta un momento flexionante, y un punto de conexión a cortante, colocado a la mitad (**figura 29**).

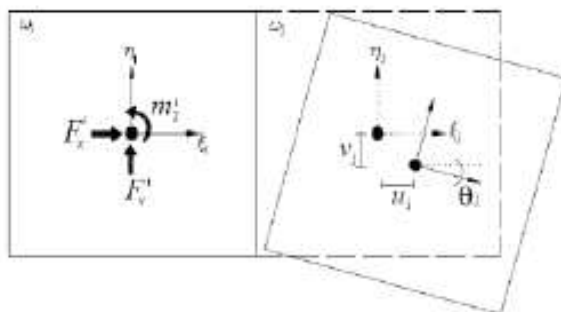


Figura 28. Fuerzas y desplazamientos.
(Casolo y Peña et al., 2004)

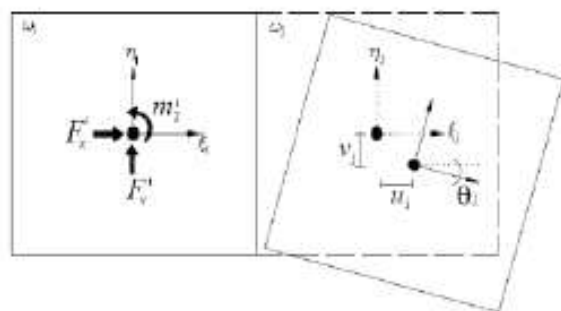


Figura 29. Conexión de dos elementos Rígidos.
(Casolo y Peña et al., 2004)



Este método considera a la mampostería como un material deformable, pero esta deformación se concentra en los puntos de conexión; mientras que, los elementos no son deformables. Cada uno de los puntos de conexión son cinemáticamente independientes entre ellos, pero se encuentran relacionados por la ley constitutiva del material, es decir, los puntos de conexión representan las características mecánicas de la mampostería, pero al mismo tiempo, representan la capacidad del modelo para tomar en cuenta la separación y el deslizamiento entre elementos.

El Método de los Elementos Rígidos es considerado como un modelo semicontinuo, ya que, en un modelo continuo existe una compatibilidad de deformaciones entre los elementos que comparten nodos en común; mientras que, en un modelo discontinuo puede existir un movimiento relativo entre dos elementos contiguos, en el MER puede haber un movimiento relativo entre elementos, pero las conectividades iniciales no cambian, existiendo una continuidad relativa entre elementos. De hecho, puede existir sobreposición, separación o deslizamiento entre elementos, los cuales significan compresión, tensión o cortante. El movimiento de cada uno de los elementos es considerado independiente, puesto que las estructuras de mampostería no pueden ser consideradas continuas, porque parte de su deformación se debe al movimiento relativo entre elementos. Sin embargo, las conexiones iniciales no cambian para disminuir el tiempo de cómputo.

5.2 Programa de análisis estructural RIGID V0.4.1.

Este programa realiza análisis dinámico no-lineal de estructuras de mampostería, el cual se basa en el Método de los Elementos Rígidos, ha sido desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, y nos permite crear archivos que puedan ser leídos por algún otro software de representación gráfica, con el fin de visualizar los estados de esfuerzos, deformaciones, modos de vibrar y daños dentro del modelo analizado.



Al crear el archivo de datos para el análisis se tienen que definir los nodos de cada elemento en sentido antihorario y se tiene que definir si se utiliza ley tipo Mohr-Coulomb para el cortante; en caso de utilizarla, se tendrá que definir si existe una degradación de la resistencia cortante por esfuerzos de compresión cercanos a la falla, tal como se indica en la **figura 30**.

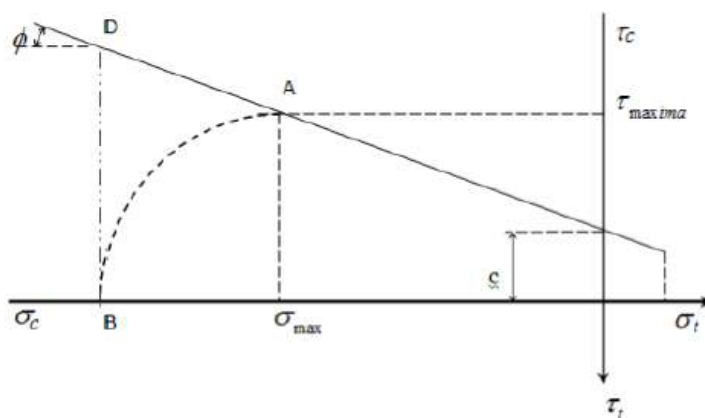


Figura 30. Ley Mohr-Coulomb

(Peña, F. et al.2010. Programa RIGID v.4.0.1, Manual del usuario, Instituto de Ingeniería, UNAM.)

El programa nos permite llevar diversos tipos de análisis estructurales o sísmicos como son, análisis lineales, no lineales estáticos o dinámicos, de los cuales te proporciona la energía disipada de cada elemento en cada incremento de tiempo, así como el cortante basal, desplazamientos y fuerzas en los resortes de interfaces.

Las limitaciones que presenta esta herramienta computacional es que es un programa de análisis bidimensional y su capacidad de análisis está limitada a mil elementos, tres mil nodos, cincuenta lados restringidos, quince materiales, cien mil puntos del acelerograma; aunque cabe mencionar que son suficientes para la mayoría de las estructuras de mampostería idealizada mediante macroelementos.

5.2.1 Modelos constitutivos.

El RIGID V0.4.1 cuenta con tres leyes constitutivas para definir el comportamiento axial de los materiales que son:



- Trilineal: Ley definida por tres segmentos de rectas a compresión según la **figura 31**. Para asignar esta ley, el comportamiento a compresión se debe definir para cada segmento de recta mediante sus pendientes, así como la resistencia de cada uno. Mientras que para el comportamiento a tensión se considera sólo un segmento de recta y su respectiva deformación (Peña, F. 2010).

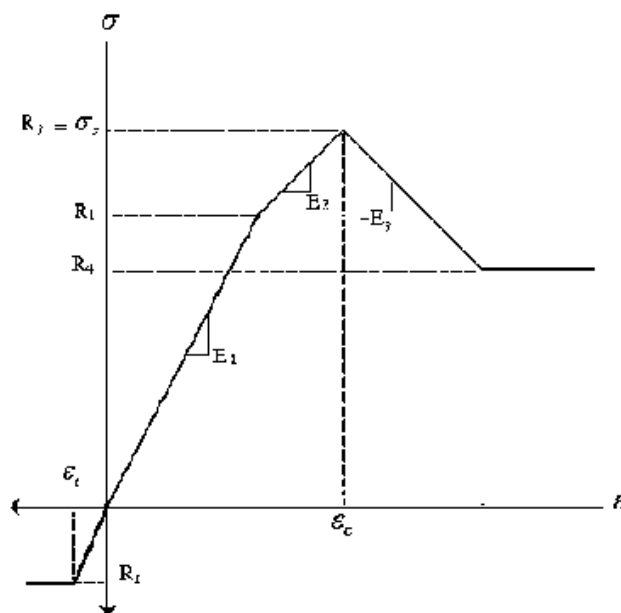


Figura 31. Ley constitutiva trilineal.

(Peña, F. et al. 2010. Programa RIGID v.4.0.1, Manual del usuario, Instituto de Ingeniería, UNAM.)

- Exponencial: el comportamiento a compresión se define mediante una ley exponencial (**figura 32**). Para definir este tipo de ley que representará la curva esfuerzo –deformación, únicamente se necesita la rigidez inicial del material y la resistencia a compresión máxima.

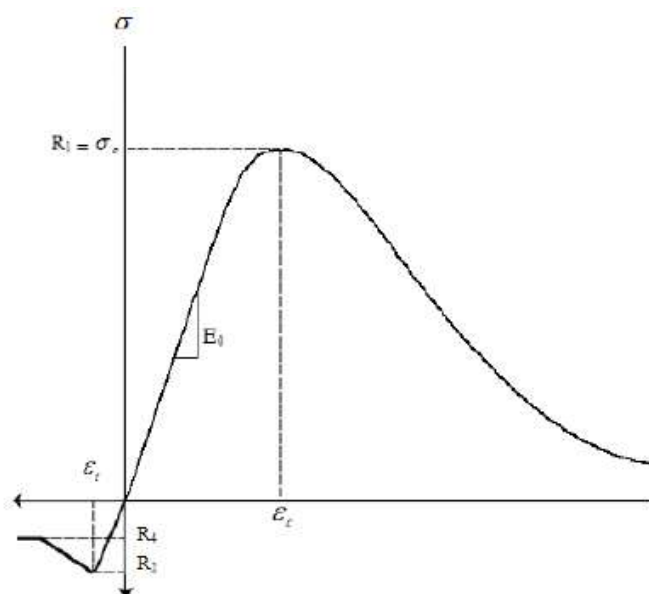


Figura 32. Ley constitutiva exponencial.

(Peña, F. et al. 2010. Programa RIGID v.4.0.1, Manual del usuario, Instituto de Ingeniería, UNAM.)

- Parabólico: el comportamiento a compresión se define mediante la ley parabólica (**figura 33**). En esta ley, es necesario definir una resistencia a compresión residual (ecuación 1), después de la cual el comportamiento es plástico.

$$\sigma = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_c^2} (\varepsilon - \varepsilon_c) + \sigma_c \quad (1)$$

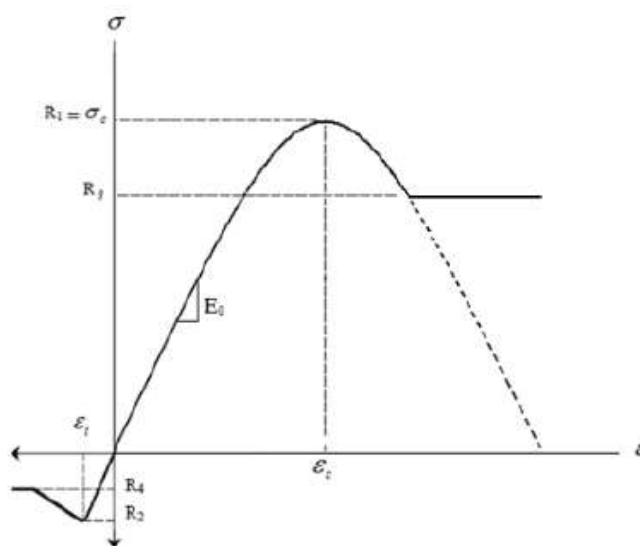


Figura 33. Ley constitutiva parabólica.

(Peña, F. et al. 2010. Programa RIGID v.4.0.1, Manual del usuario, Instituto de Ingeniería, UNAM.)

Donde:

E_0 = módulo de elasticidad inicial

σ = resistencia a compresión

$\sigma_c=R_1$ = esfuerzo máximo a compresión

R_2 = resistencia máxima en tensión

R_3 = resistencia última o residual a compresión

R_4 = resistencia última o residual a tensión

ϵ = deformación unitaria

ϵ_c = deformación máxima por compresión

ϵ_t = deformación máxima por tensión

De las leyes constitutivas anteriores se utilizó la ley parabólica, por ser la más simple ya que en las restantes tendríamos que manejar mayor cantidad de datos (con los que no se cuenta), lo cual nos hace tener un grado mayor de incertidumbre y por consiguiente menos certeza de los resultados obtenidos puedan reflejar el comportamiento de las estructuras.

5.3 Construcción de modelos.

Se utilizaron modelos bidimensionales para el análisis de los macroelementos seleccionados, los cuales corresponden a una sección transversal de los cuatro edificios patrimoniales de tipo conventual. Así pues, los macroelementos nos permiten analizar las partes más vulnerables del convento, las cuales están caracterizadas por la activación de mecanismos de colapso parciales, permitiéndonos con la suma de la contribución de cada macroelemento presente en la estructura obtener el comportamiento sísmico global de esta. El mallado propuesto para cada uno de los macroelementos se basó en la geometría de cada sección estudiada, y a su vez los valores de espesores proporcionados fueron los obtenidos en campo. A continuación, se muestra la sección transversal seleccionada de cada convento, así como el mallado propuesto.

- Templo y exconvento de San Agustín (**figuras 34, 35, 36**).

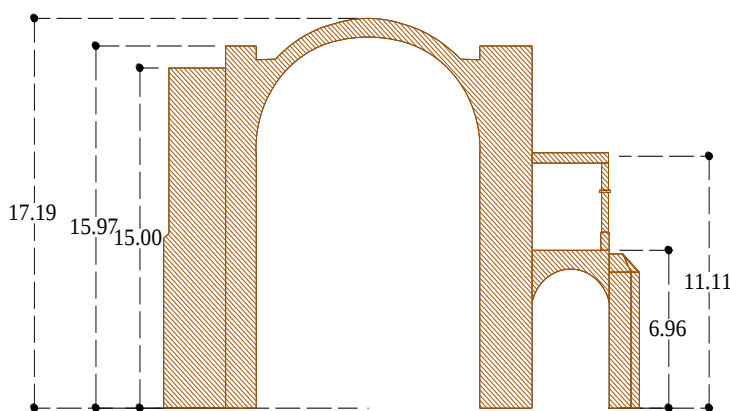


Figura 34.
Sección transversal

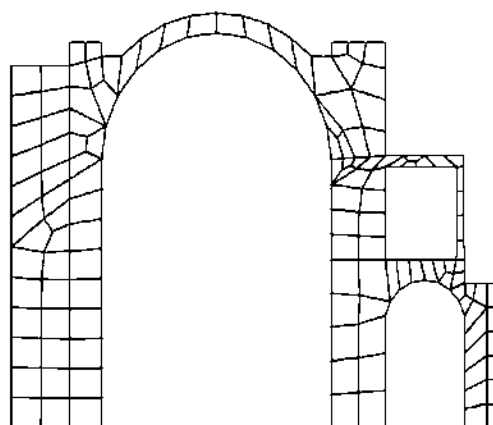


Figura 35.
Mallado propuesto
del macroelemento

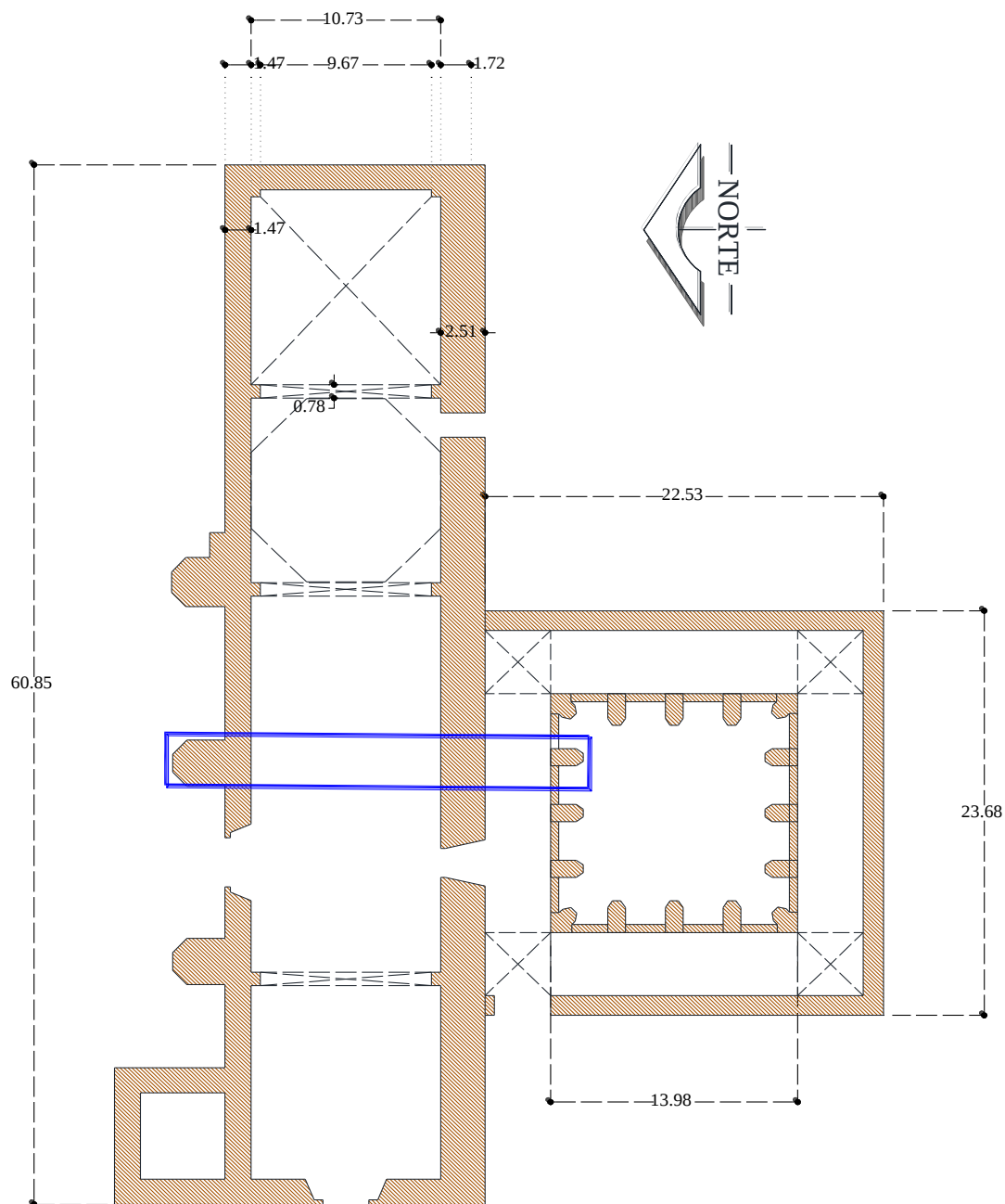


Figura 36. Planta arquitectonica del convento.



- Templo y exconvento franciscano de San Buenaventura (**figuras 37, 38, 39**).

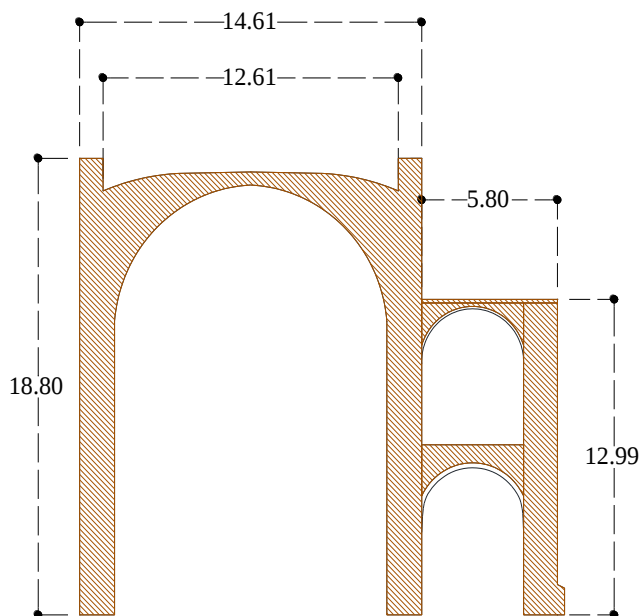


Figura 37.
Sección transversal

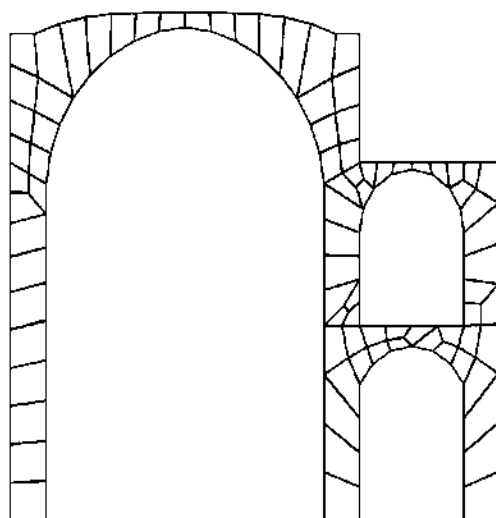


Figura 38.
Mallado propuesto
del macroelemento

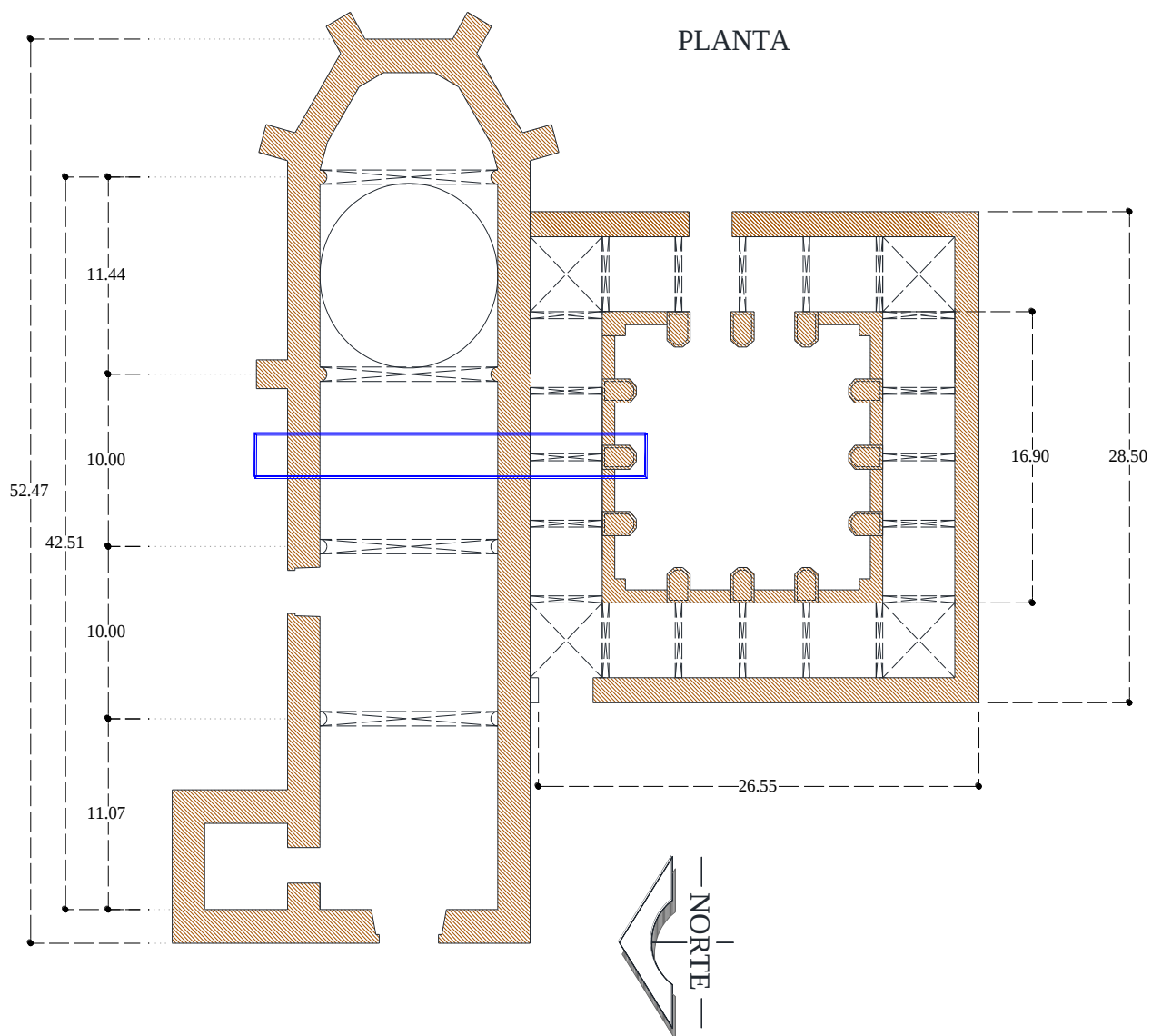


Figura 39. Planta arquitectonica del convento.

- Templo de Guadalupe y exconvento de San Diego (**figuras 40, 41, 42**).

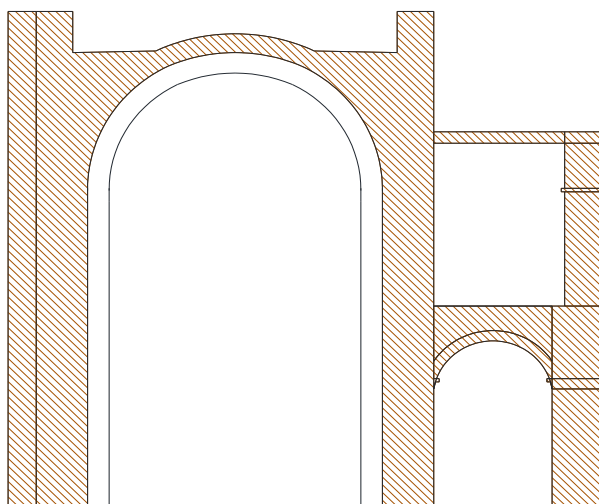


Figura 40.
Sección transversal

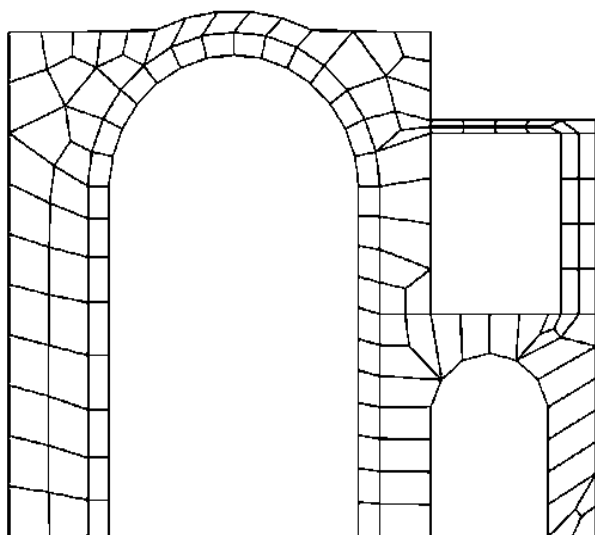
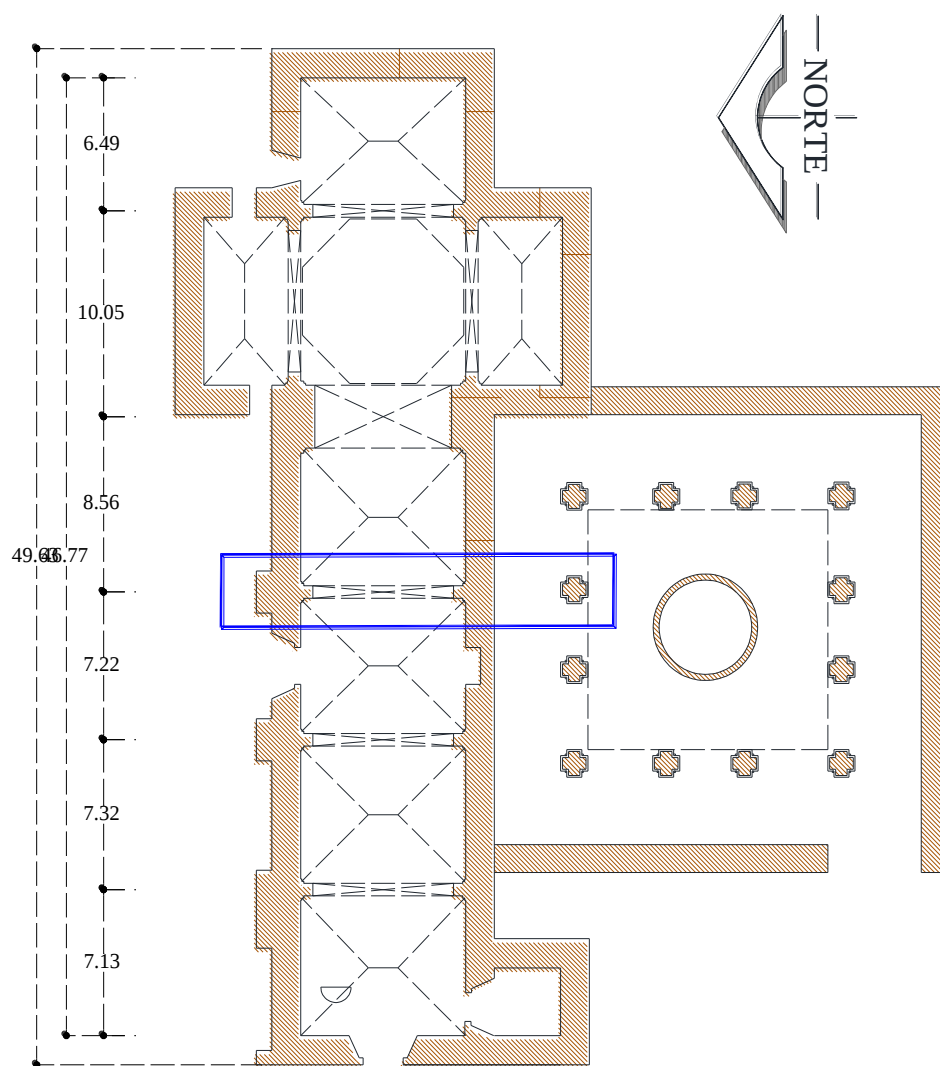


Figura 41.
Mallado propuesto
del macroelemento



PLANTA

Figura 42. Planta arquitectonica del convento.



- Templo y exconvento de la Merced (**figuras 43, 44, 45**).

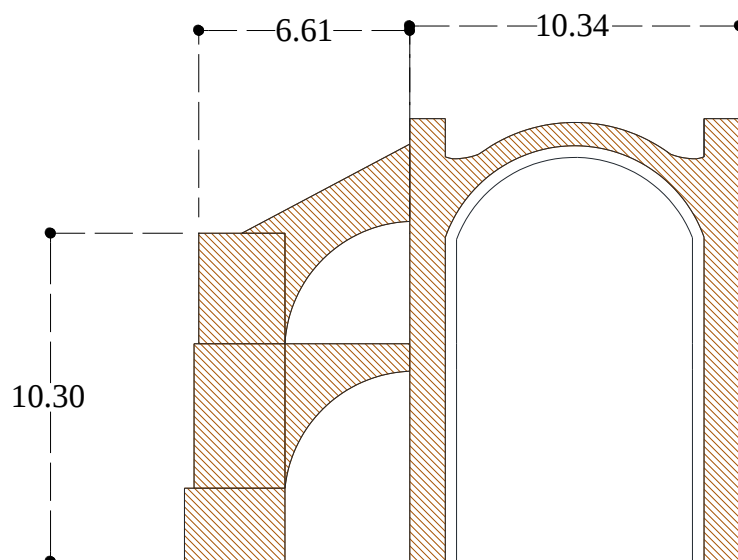


Figura 43.
Sección transversal

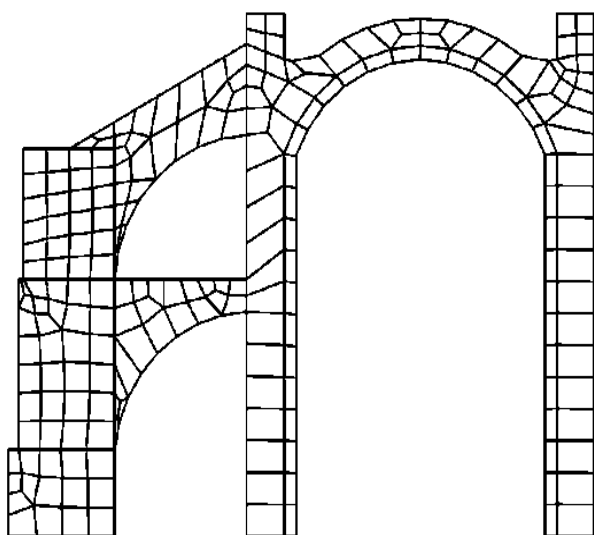
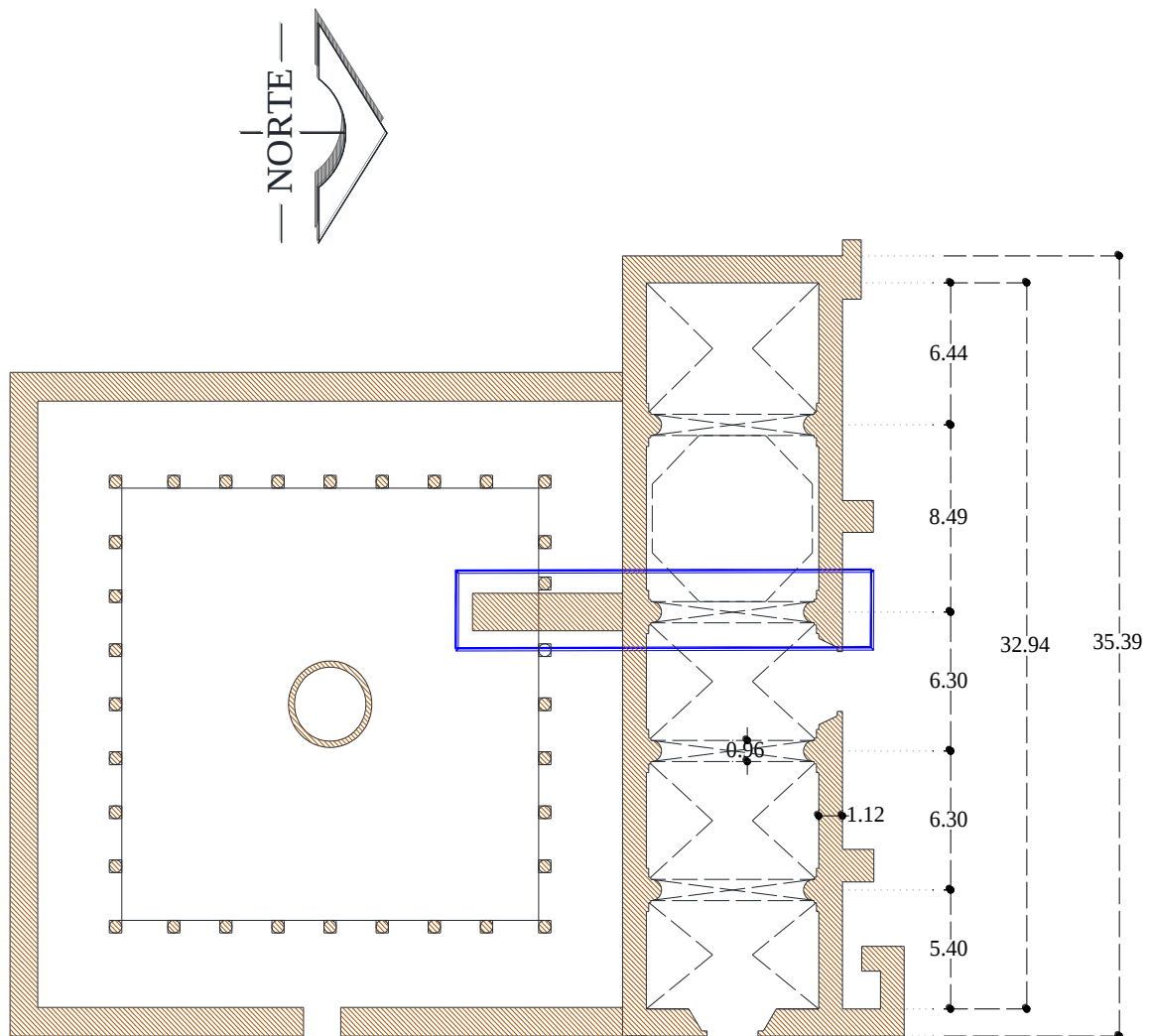


Figura 44.
Mallado propuesto
del macroelemento



PLANTA

Figura 44. Planta arquitectonica del convento.



5.4 Definición de parámetros

Para definir los parámetros empleados en los modelos estudiados de la presente investigación, se han basado en valores promedio obtenidos experimentalmente en territorio europeo, ya que la ciudad de Morelia no cuenta estudios sobre las propiedades mecánicas de sus canteras, sin embargo, cabe destacar que este trabajo puede ser el principio para que se realicen este tipo de investigaciones.

Como se mencionó anteriormente el método de elementos rígidos usa como base una ley constitutiva, la cual para nuestros análisis se ha optado por la ley parabólica, en la **tabla 2** se muestran cada uno de los parámetros empleados.

Tabla 2. Parámetros utilizados para los modelos.

PROPIEDADES MECANICAS							
Material	R1 (Mpa)	R2 (Mpa)	R3 (Mpa)	R4 (Mpa)	Módulo de elasticidad (Mpa)	Módulo de poisson	Densidad (Kg/m3)
Cantera de la zona	10.7877	-1.0788	6.963	-0.3236	1000	0.2	1800
Relleno	4.9035	-0.4904	0.3138	-0.1471	500	0.2	1600

Cabe destacar que se cuenta con dos tipos de materiales; cantera de la zona y material de relleno, este último se emplea en las zonas de los riñones con el fin de nivelar parcialmente la superficie de las bóvedas y proporcionar las pendientes necesarias para las caídas del agua.



5.5 Demanda sísmica

Se realizaron análisis no lineales en el tiempo, en un primer análisis se consideró solo la componente horizontal del movimiento y en un segundo análisis se tomó en cuenta la influencia de componente horizontal y vertical; esto se hizo para un periodo de retorno de 475, 975 y con las aceleraciones de las señales sísmicas sin escalar ya que la mayoría de las señales sísmicas tienen aceleraciones máximas del terreno mayores a la aceleración máxima probabilista esperada para la ciudad de Morelia. Los valores de las aceleraciones son: para un $T_r = 475$ el $PGA = 96.6 \text{ cm/s}^2$ y para un $T_r = 975$ el $PGA = 139.24 \text{ cm/s}^2$, obteniendo estos valores del PRODISIS.

Tabla 3. Demanda sísmica considerada.

	Acelerograma	aceleración Max (cm/s ²)		dt	Duración (s)
		H	V		
1	HMTT1709	170.474	83.0001	0.01	35
2	PBP21709	80.2083	93.3541	0.005	30
3	PHPU1709	117.0504	139.499	0.01	27
4	PZPU1709	119.9722	72.2495	0.005	35
5	RABO1709	154.6911	127.6887	0.005	22
6	RFPP1709	183.9518	115.4378	0.01	28
7	SAPP1709	205.9717	186.3154	0.01	25
8	SXPU1709	104.3176	139.1785	0.01	40
9	THEZ1709	149.2312	166.5006	0.01	30
10	SANNICOLAS	0.945	1.244	0.005	85

Cabe mencionar para fines prácticos en los análisis, la duración de los registros se redujo considerando únicamente la fase intensa de cada uno de ellos.

5.6 Resultados obtenidos.

Cabe mencionar que con algunas señales los modelos colapsaban, y en el caso de las señales sin escalar se redujeron las aceleraciones con la finalidad de poder conocer el periodo de retorno de esa estructura para la cual será el colapso. En



las tablas 4,5,6,7 se muestra en verde los modelos que si lograron su análisis al 100% y en rojo los que colapsaron, en naranja las señales sísmicas que se redujeron.

Tabla 4.

SEÑAL SISMICA	San Francisco					
	sin escalar		475		975	
	h	hv	h	hv	h	hv
HMTT1709	ok	ok	ok	ok	ok	no
PBP21709	ok	ok	ok	ok	ok	no
PHPU1709	ok	ok	ok	ok	ok	ok
PZPU1709	ok	ok	ok	ok	ok	no
RABO1709	ok	ok	ok	ok	ok	no
RFPP1709	ok	ok	ok	ok	ok	ok
SAPP1709	ok	ok	ok	ok	ok	ok
SXPU1709	ok	65%	ok	no	ok	no
THEZ1709	ok	90%	ok	ok	ok	ok
SANNICOLAS	ok	ok	ok	ok	ok	no

Tabla 5.

SEÑAL SISMICA	San Agustín					
	sin escalar		475		975	
	h	hv	h	hv	h	hv
HMTT1709	ok	ok	ok	ok	ok	ok
PBP21709	ok	ok	ok	ok	no	no
PHPU1709	ok	ok	ok	ok	ok	ok
PZPU1709	ok	ok	ok	ok	ok	ok
RABO1709	ok	ok	ok	ok	ok	ok
RFPP1709	ok	ok	ok	ok	ok	ok
SAPP1709	75%	75%	ok	ok	ok	no
SXPU1709	ok	ok	ok	ok	ok	ok
THEZ1709	ok	ok	ok	ok	ok	ok
SANNICOLAS	ok	ok	ok	ok	no	no



Tabla 7.

SEÑAL SISMICA	La Merced					
	sin escalar		475		950	
	h	hv	h	hv	h	hv
HMTT1709	ok	ok	ok	ok	ok	ok
PBP21709	ok	ok	ok	ok	no	no
PHPU1709	ok	ok	ok	ok	no	no
PZPU1709	ok	ok	ok	ok	ok	ok
RABO1709	ok	90%	ok	ok	ok	no
RFPP1709	ok	90%	ok	ok	ok	ok
SAPP1709	50%	50%	ok	ok	no	no
SXPU1709	ok	ok	ok	ok	ok	ok
THEZ1709	ok	80%	ok	ok	ok	no
SANNICOLAS	ok	ok	ok	ok	no	no

Tabla 8.

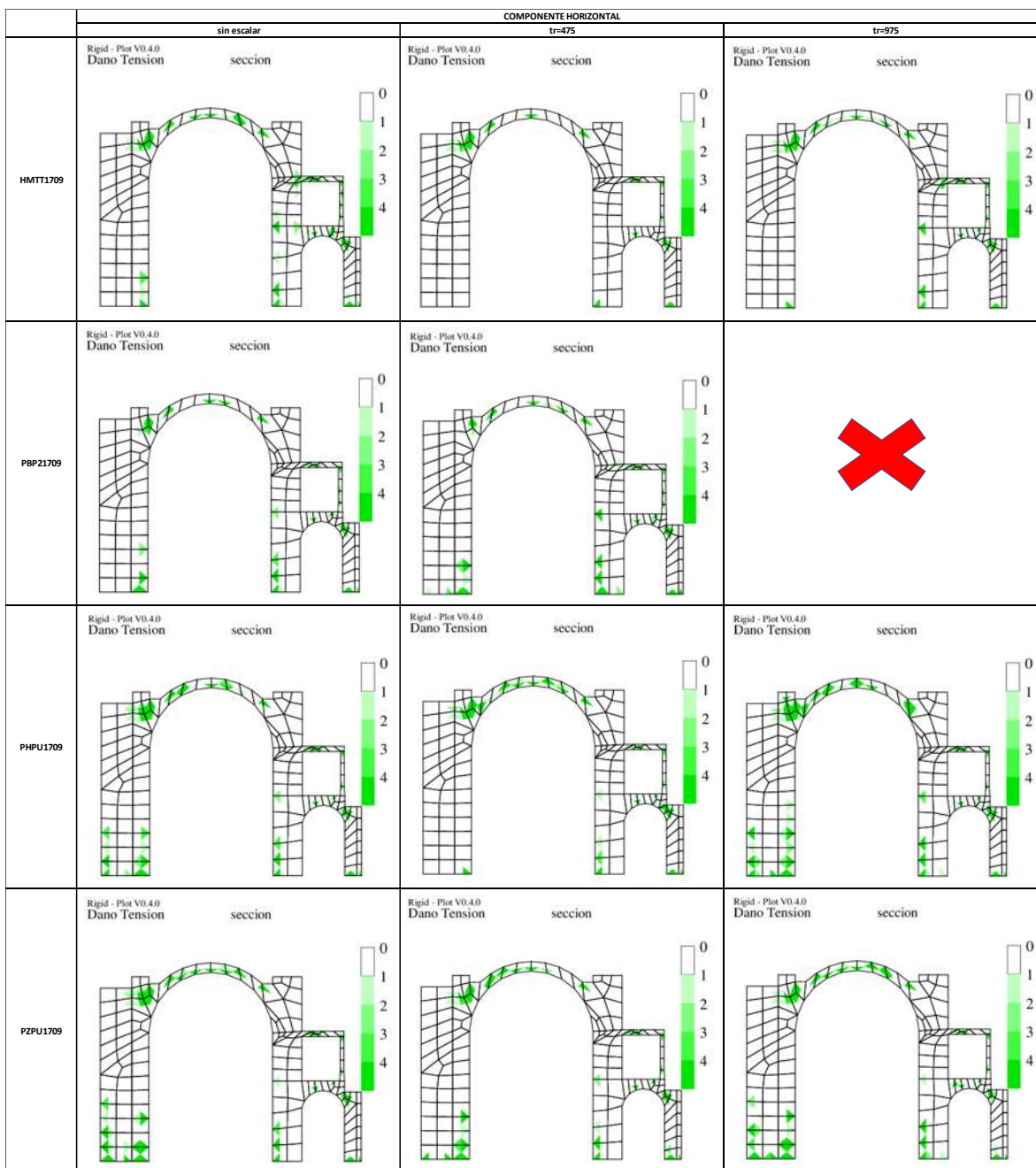
SEÑAL SISMICA	San Diego					
	sin escalar		475		950	
	h	hv	h	hv	h	hv
HMTT1709	ok	ok	ok	ok	ok	ok
PBP21709	ok	ok	ok	ok	no	no
PHPU1709	ok	ok	ok	ok	ok	ok
PZPU1709	ok	ok	ok	ok	ok	ok
RABO1709	ok	ok	ok	ok	ok	ok
RFPP1709	ok	ok	ok	ok	ok	ok
SAPP1709	90%	ok	ok	ok	ok	ok
SXPU1709	ok	ok	ok	ok	ok	ok
THEZ1709	ok	ok	ok	ok	ok	ok
SANNICOLAS	ok	ok	ok	ok	ok	ok

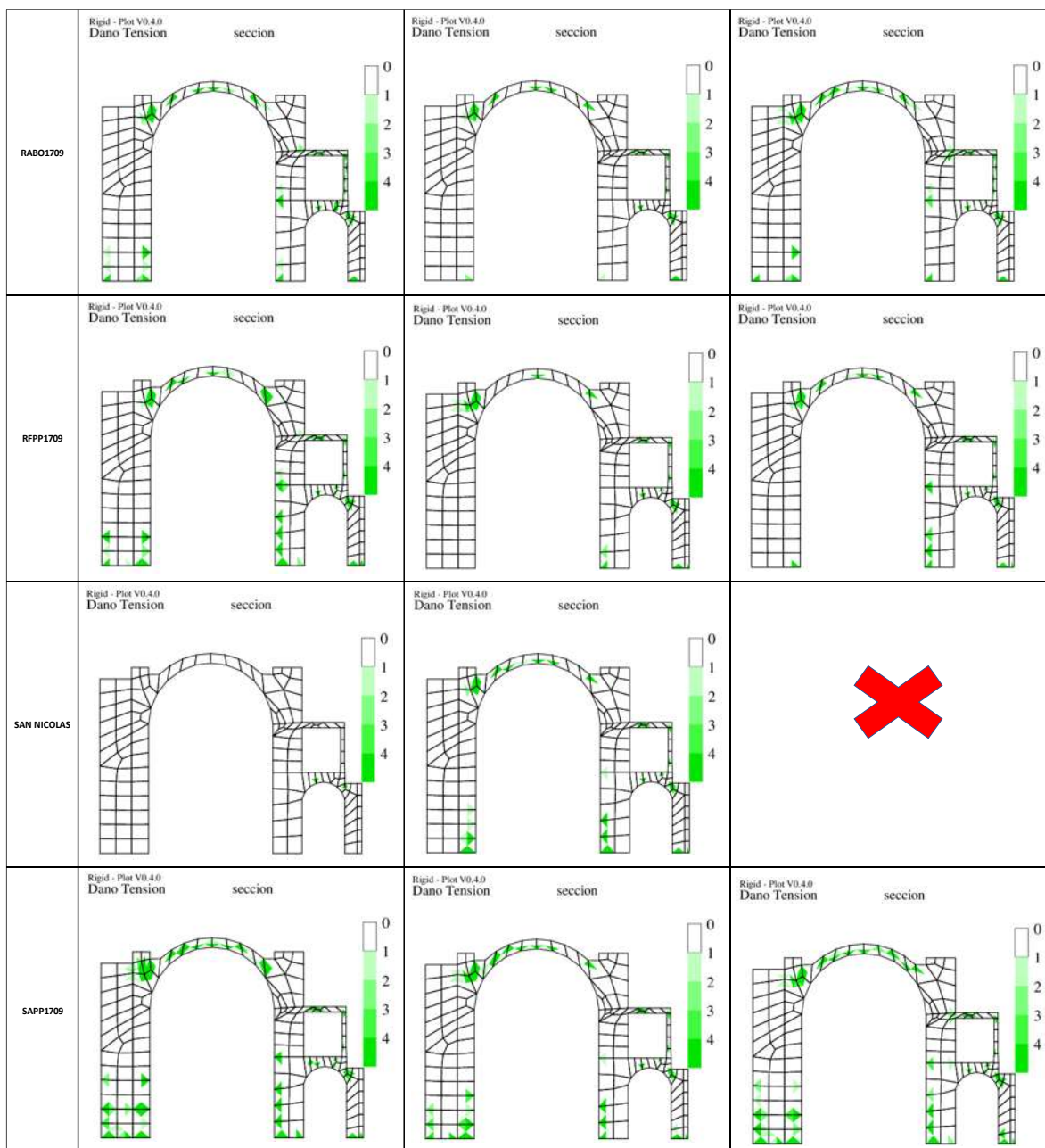
A continuación, se muestran los gráficos obtenidos del análisis dinámico, en el cual se pueden observar los daños a tensión que cada señal sísmica ocasiona, así como la deformada dinámica de esta.

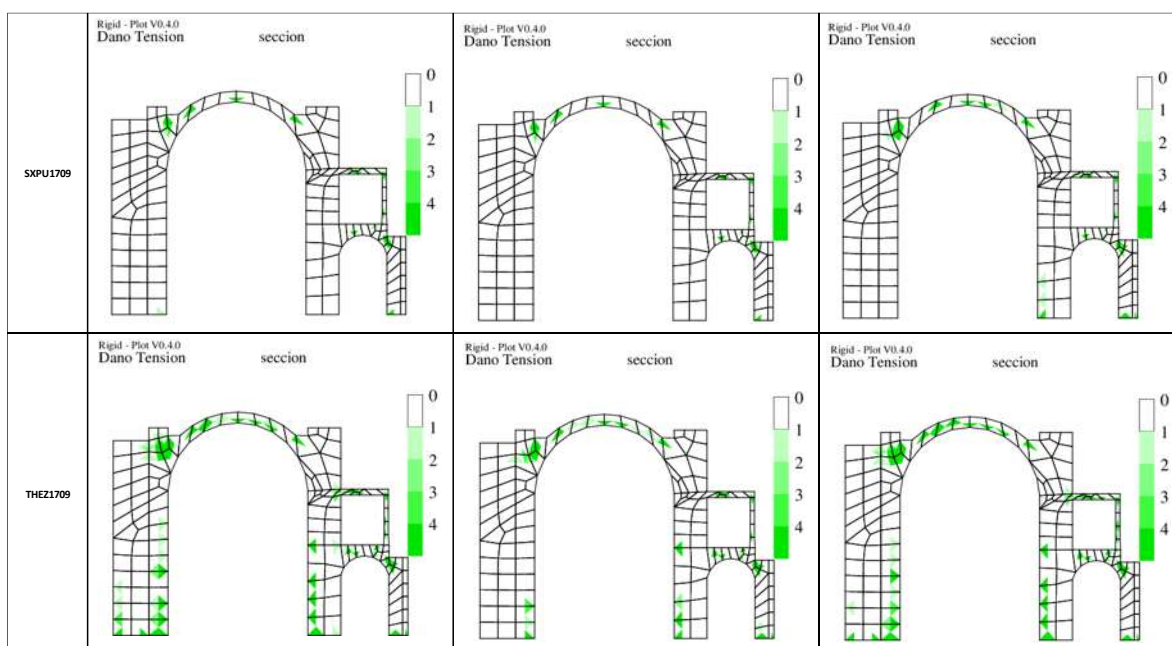


- SAN AGUSTIN

Daños a tensión.









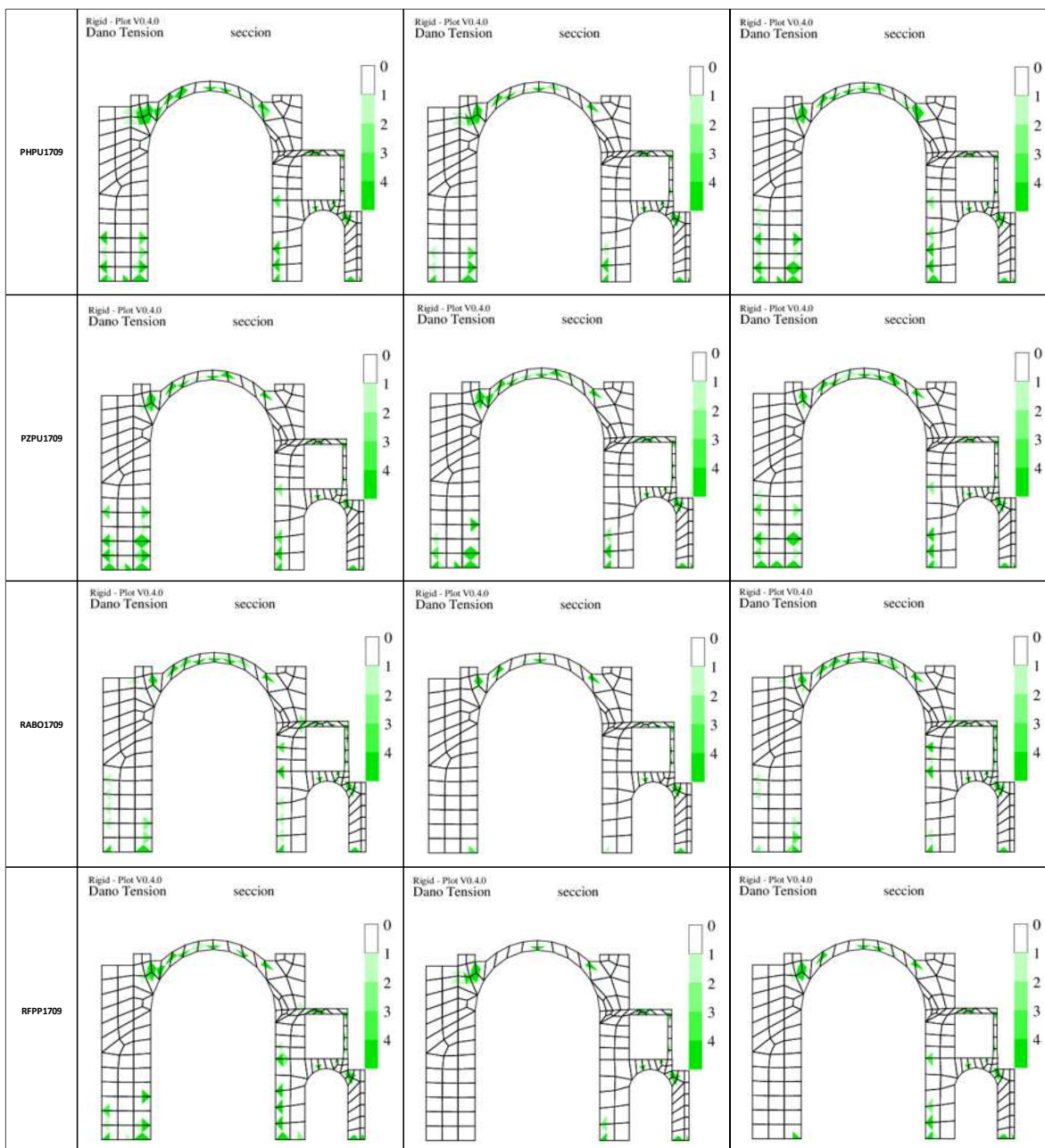
ÍNDICES DE VULNERABILIDAD SÍSMICA PARA EDIFICIOS CONVENTUALES MEXICANOS



	COMPONENTE HORIZONTAL + COMPONENTE VERTICAL		
	sin escalas	tr=475	tr=975
HMTT1709	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion 	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion 	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion
PBP21709	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion 	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion 	



ÍNDICES DE VULNERABILIDAD SÍSMICA PARA EDIFICIOS CONVENTUALES MEXICANOS





ÍNDICES DE VULNERABILIDAD SÍSMICA PARA EDIFICIOS CONVENTUALES MEXICANOS



SAN NICOLAS	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion 	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion 	
	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion 	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion 	
	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion 	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion 	
	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion 	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion 	

Deformada dinámica.

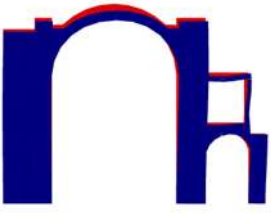
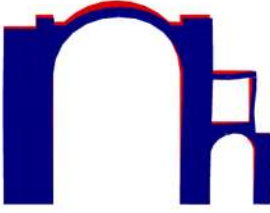
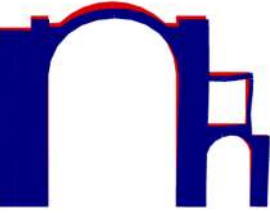
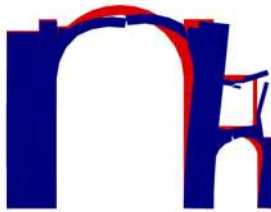
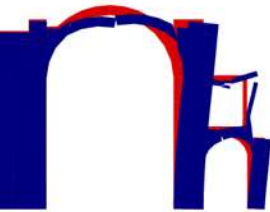
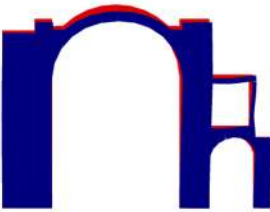
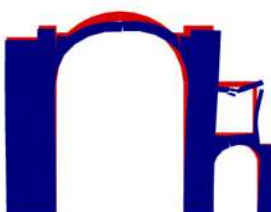
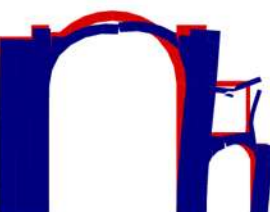
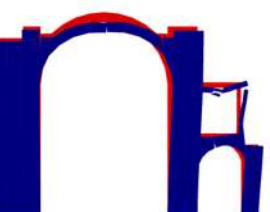


ÍNDICES DE VULNERABILIDAD SÍSMICA PARA EDIFICIOS CONVENTUALES MEXICANOS



	COMPONENTE HORIZONTAL		
	sín escalar	tr=475	tr=975
HMTT1709	Deformada Dinámica seccion Fac. escala: 100.000 Paso 3500 Rígid - Plot V0.4.0	Deformada Dinámica seccion Fac. escala: 100.000 Paso 3500 Rígid - Plot V0.4.0	Deformada Dinámica seccion Fac. escala: 100.000 Paso 3500 Rígid - Plot V0.4.0
PBP21709	Deformada Dinámica seccion Fac. escala: 100.000 Paso 3000 Rígid - Plot V0.4.0	Deformada Dinámica seccion Fac. escala: 100.000 Paso 3000 Rígid - Plot V0.4.0	Deformada Dinámica seccion
PHPU1709	Deformada Dinámica seccion Fac. escala: 100.000 Paso 2700 Rígid - Plot V0.4.0	Deformada Dinámica seccion Fac. escala: 100.000 Paso 2700 Rígid - Plot V0.4.0	Deformada Dinámica seccion Fac. escala: 100.000 Paso 2700 Rígid - Plot V0.4.0
PZPU1709	Deformada Dinámica seccion Fac. escala: 100.000 Paso 1700 Rígid - Plot V0.4.0	Deformada Dinámica seccion Fac. escala: 100.000 Paso 1700 Rígid - Plot V0.4.0	Deformada Dinámica seccion Fac. escala: 100.000 Paso 1700 Rígid - Plot V0.4.0



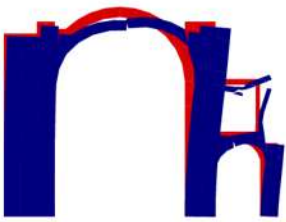
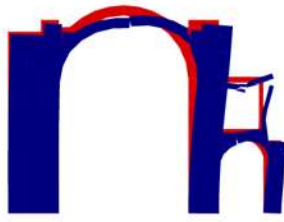
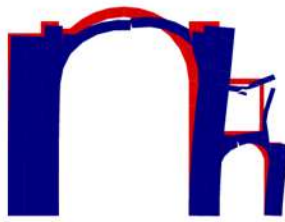
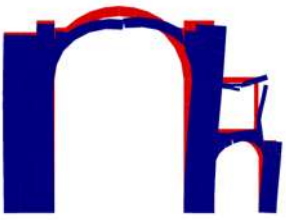
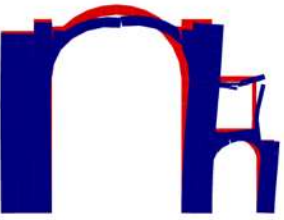
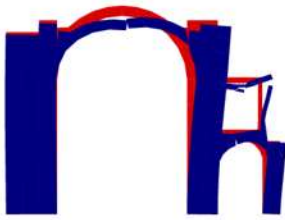
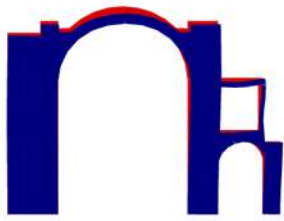
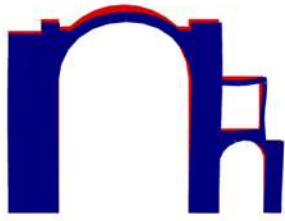
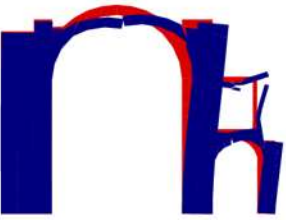
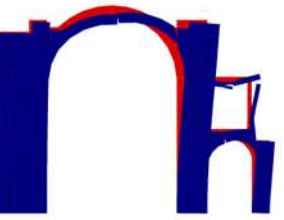
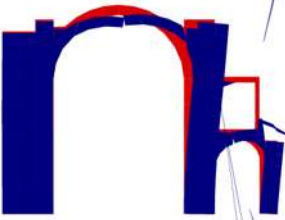
RABO1709	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 100.000 Paso 1100 Rígid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 100.000 Paso 1100 Rígid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 100.000 Paso 1100 Rígid - Plot V04.0
	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 50.000 Paso 2800 Rígid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 50.000 Paso 2800 Rígid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 50.000 Paso 2800 Rígid - Plot V04.0
	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 100.000 Paso 1100 Rígid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 100.000 Paso 1100 Rígid - Plot V04.0	
SAPP1709	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 100.000 Paso 2500 Rígid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 100.000 Paso 2500 Rígid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 100.000 Paso 2500 Rígid - Plot V04.0



SXPU1709	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 100.000 Paso 4000 Rigid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 100.000 Paso 4000 Rigid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 100.000 Paso 4000 Rigid - Plot V04.0
	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 50.0000 Paso 3000 Rigid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 100.000 Paso 3500 Rigid - Plot V04.0 Fac. escala: 50.0000 Paso 3000 Rigid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 50.0000 Paso 3000 Rigid - Plot V04.0

	COMPONENTE HORIZONTAL + COMPONENTE VERTICAL		
	sin escalera	tr=475	tr=975
HMTT1709	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 100.000 Paso 3500 Rigid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 100.000 Paso 3500 Rigid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 100.000 Paso 3500 Rigid - Plot V04.0
	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 100.000 Paso 3000 Rigid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 100.000 Paso 3000 Rigid - Plot V04.0	

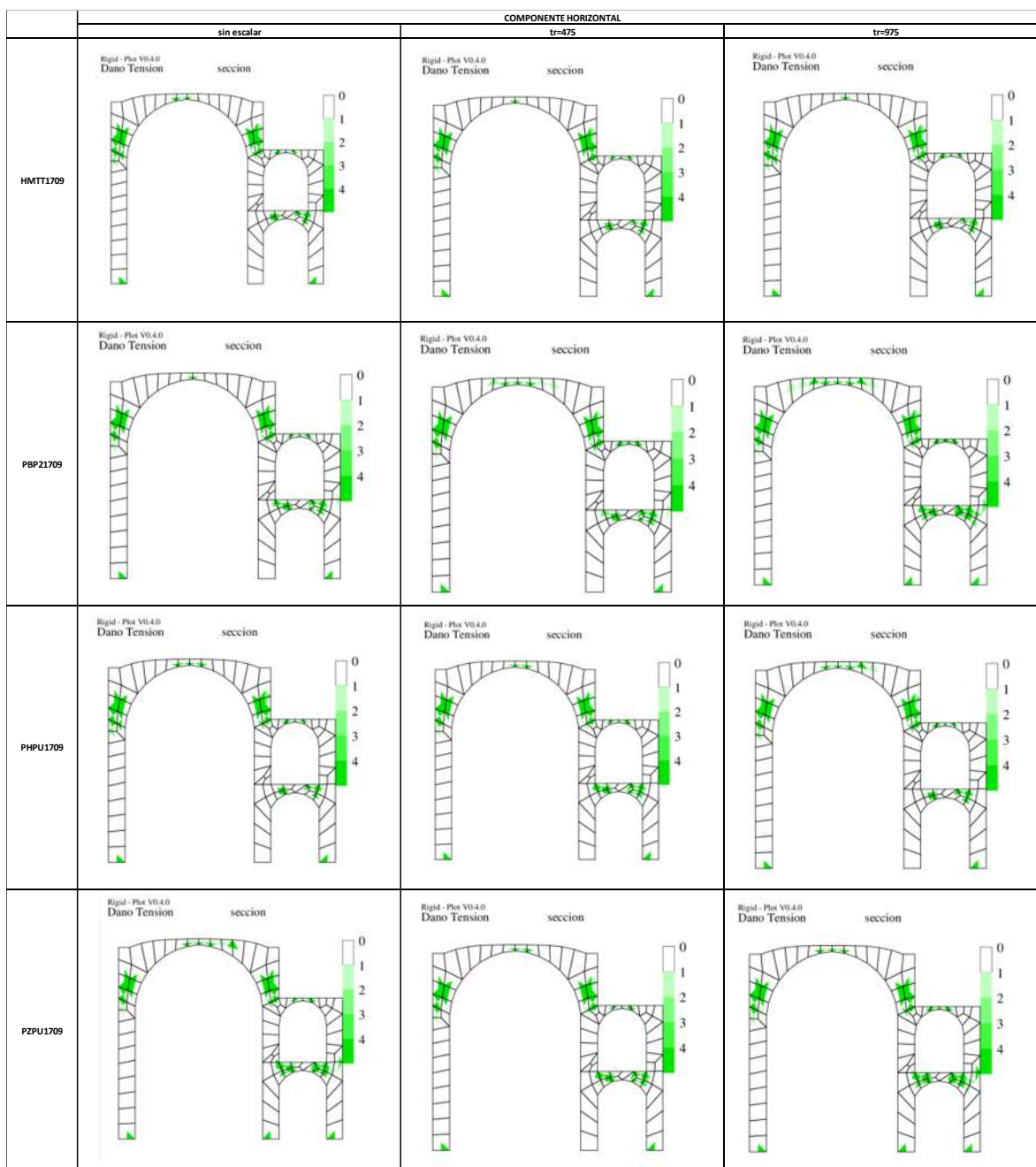


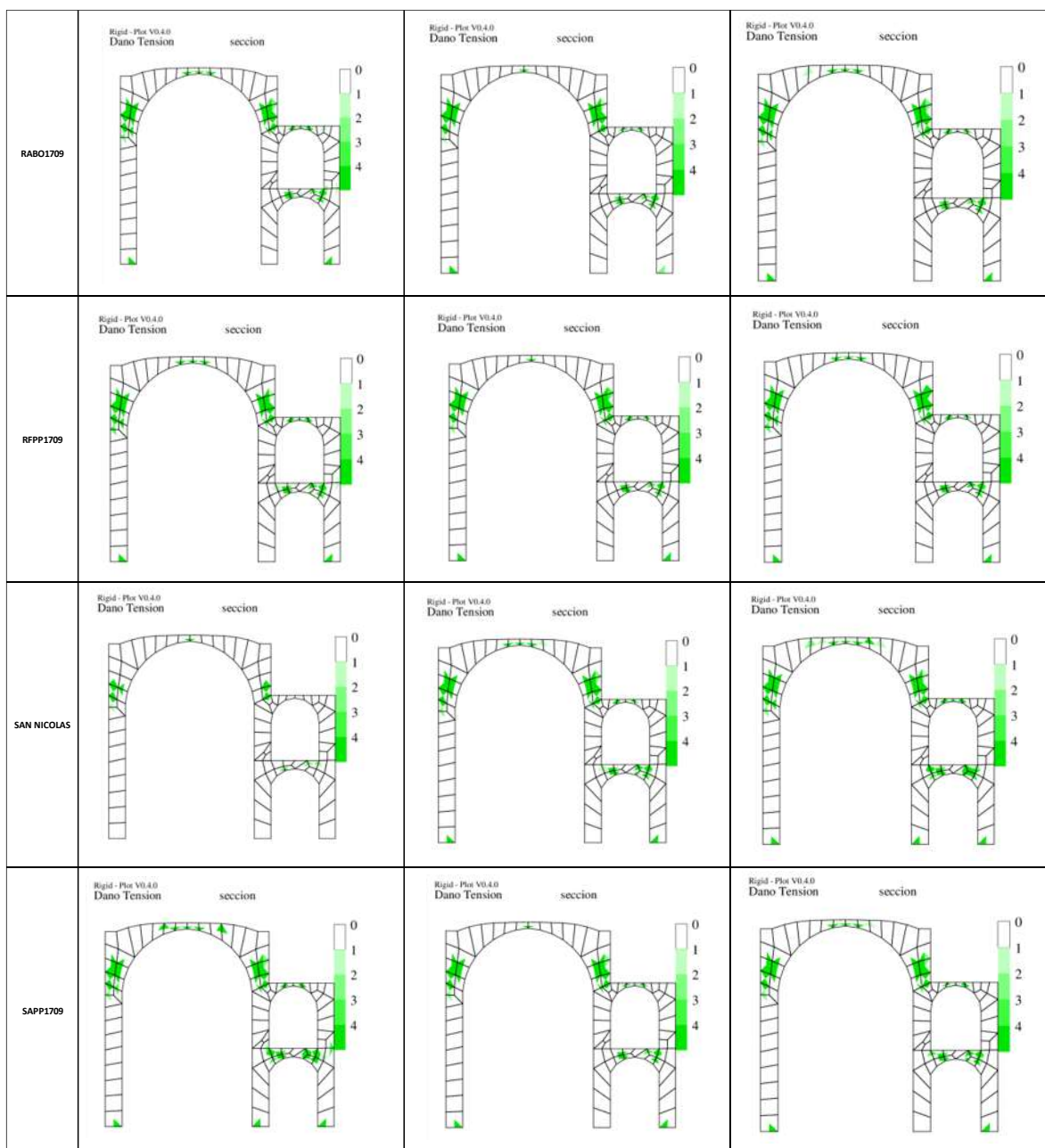
PHPU1709	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion
			
	Fac. escala: 100.000 Paso 2700 Rígid - Plot V0.4.0	Fac. escala: 100.000 Paso 2700 Rígid - Plot V0.4.0	Fac. escala: 100.000 Paso 2700 Rígid - Plot V0.4.0
PZPU1709	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion
			
	Fac. escala: 100.000 Paso 1700 Rígid - Plot V0.4.0	Fac. escala: 100.000 Paso 1700 Rígid - Plot V0.4.0	Fac. escala: 100.000 Paso 1700 Rígid - Plot V0.4.0
RABO1709	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion
			
	Fac. escala: 100.000 Paso 1100 Rígid - Plot V0.4.0	Fac. escala: 100.000 Paso 1100 Rígid - Plot V0.4.0	Fac. escala: 100.000 Paso 1100 Rígid - Plot V0.4.0
RFPP1709	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion
			
	Fac. escala: 50.0000 Paso 2800 Rígid - Plot V0.4.0	Fac. escala: 50.0000 Paso 2800 Rígid - Plot V0.4.0	Fac. escala: 50.0000 Paso 2800 Rígid - Plot V0.4.0

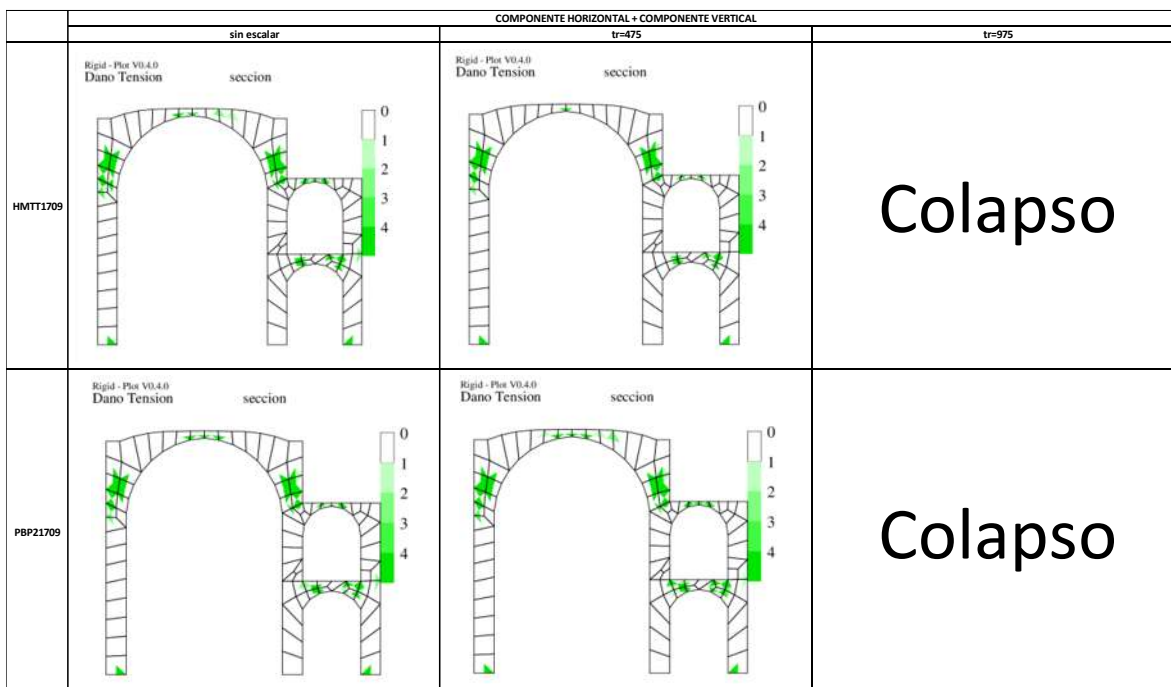
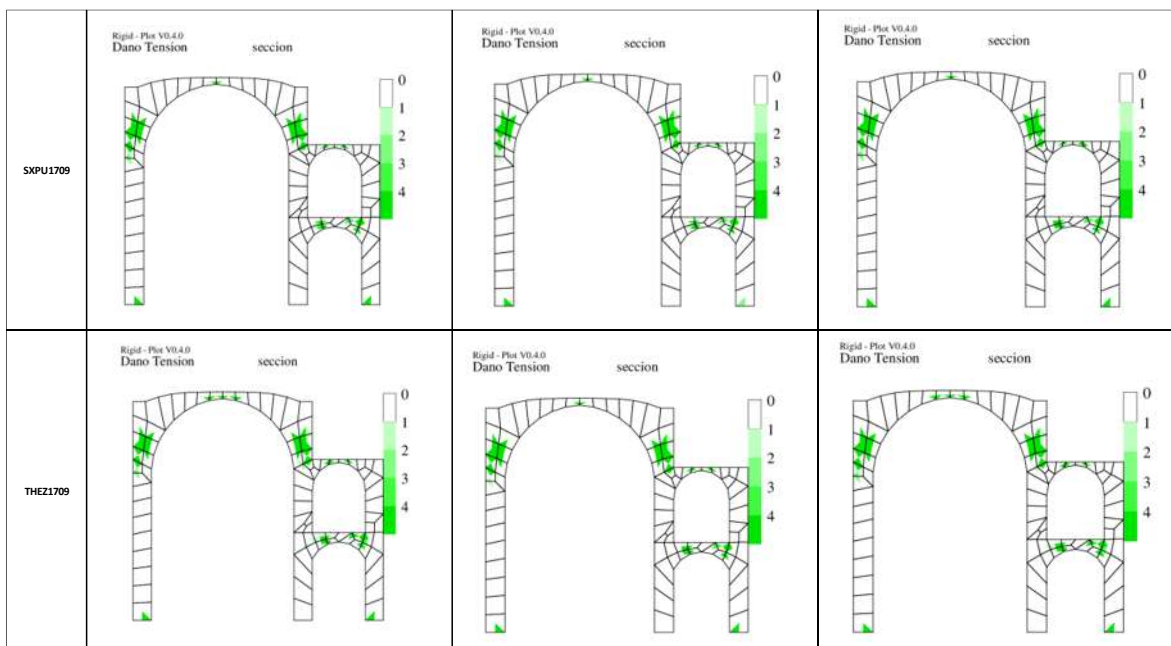
- SAN FRANCISCO



Daños a tensión.









PHPU1709			
			Colapso
			Colapso



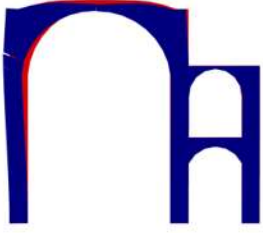
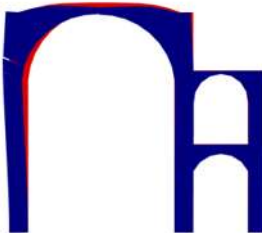
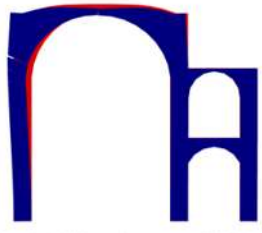
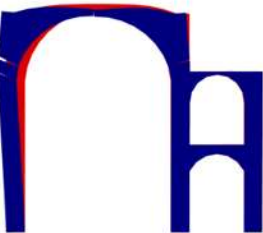
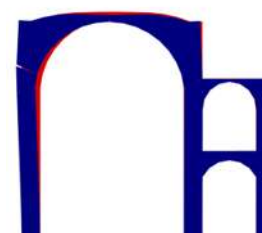
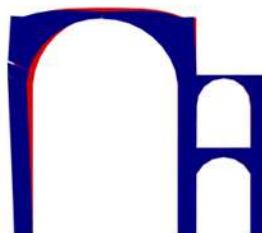
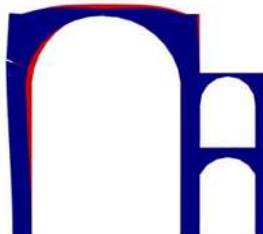
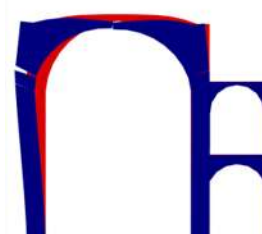
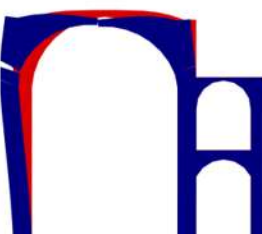
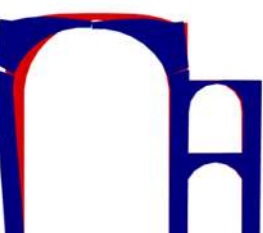
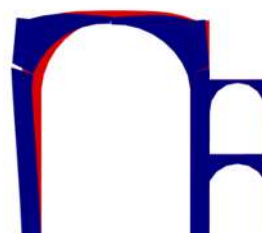
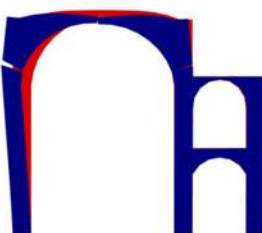
SAN NICOLAS	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion	Colapso	
	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion	
SAPP1709	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion	
SXPU1709	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion	Colapso		Colapso
THEZ1709	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion	



Deformada dinámica.

	COMPONENTE HORIZONTAL					
	sin escalas		tr=475		tr=975	
HMTT1709	Deformada Dinamica	seccion	Deformada Dinamica	seccion	Deformada Dinamica	seccion
PBP21709	Deformada Dinamica	seccion	Deformada Dinamica	seccion	Deformada Dinamica	seccion
PHPU1709	Deformada Dinamica	seccion	Deformada Dinamica	seccion	Deformada Dinamica	seccion
PZPU1709	Deformada Dinamica	seccion	Deformada Dinamica	seccion	Deformada Dinamica	seccion



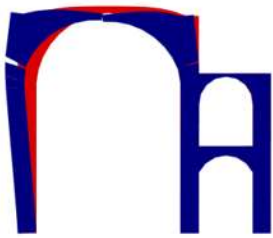
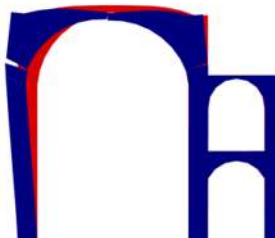
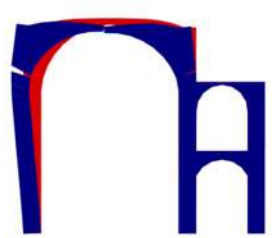
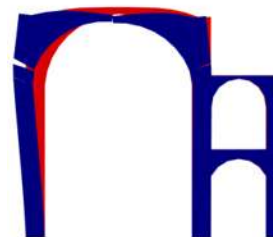
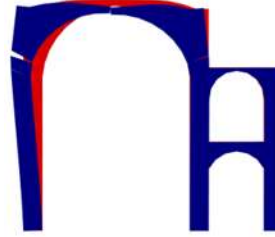
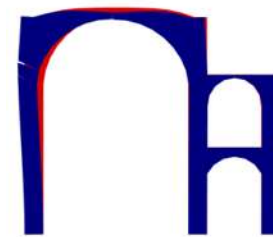
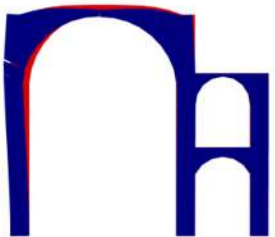
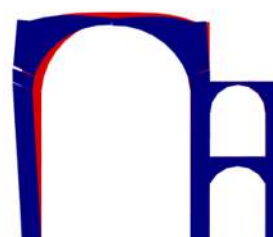
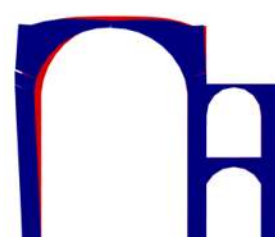
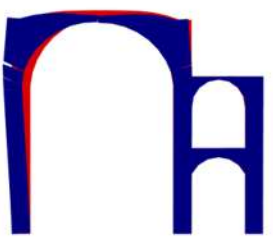
RABO1709	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 10.0000 Paso 1100 Rigid - Plot V0.4.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 10.0000 Paso 1100 Rigid - Plot V0.4.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 10.0000 Paso 1100 Rigid - Plot V0.4.0
	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 3.000000 Paso 2800 Rigid - Plot V0.4.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 3.000000 Paso 2800 Rigid - Plot V0.4.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 3.000000 Paso 2800 Rigid - Plot V0.4.0
	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 10.0000 Paso 8500 Rigid - Plot V0.4.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 10.0000 Paso 8500 Rigid - Plot V0.4.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 10.0000 Paso 8500 Rigid - Plot V0.4.0
SAPP1709	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 5.000000 Paso 2500 Rigid - Plot V0.4.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 5.000000 Paso 2500 Rigid - Plot V0.4.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 5.000000 Paso 2500 Rigid - Plot V0.4.0



SXPU1709	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion
	 Fac. escala: 5.00000 Paso 4000 Rigid - Plot V0.4.0	 Fac. escala: 5.00000 Paso 4000 Rigid - Plot V0.4.0	 Fac. escala: 5.00000 Paso 4000 Rigid - Plot V0.4.0
THEZ1709	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion
	 Fac. escala: 10.00000 Paso 3000 Rigid - Plot V0.4.0	 Fac. escala: 10.00000 Paso 3000 Rigid - Plot V0.4.0	 Fac. escala: 10.00000 Paso 3000 Rigid - Plot V0.4.0

	COMPONENTE HORIZONTAL + COMPONENTE VERTICAL		
	sin escalera	tr=475	tr=975
HMTT1709	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 10.00000 Paso 3500 Rigid - Plot V0.4.0	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 10.00000 Paso 3500 Rigid - Plot V0.4.0	Colapso
PBP21709	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 10.00000 Paso 1500 Rigid - Plot V0.4.0	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 10.00000 Paso 1500 Rigid - Plot V0.4.0	Colapso



PHPU1709	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 5.00000 Paso 2700 Rigid - Plot V0.4.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 5.00000 Paso 2700 Rigid - Plot V0.4.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 5.00000 Paso 2700 Rigid - Plot V0.4.0
	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 8.00000 Paso 3500 Rigid - Plot V0.4.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 8.00000 Paso 3500 Rigid - Plot V0.4.0	Colapso
RABO1709	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 10.00000 Paso 1100 Rigid - Plot V0.4.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 10.00000 Paso 1100 Rigid - Plot V0.4.0	Colapso
RFPP1709	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 3.00000 Paso 2800 Rigid - Plot V0.4.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 3.00000 Paso 2800 Rigid - Plot V0.4.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 3.00000 Paso 2800 Rigid - Plot V0.4.0

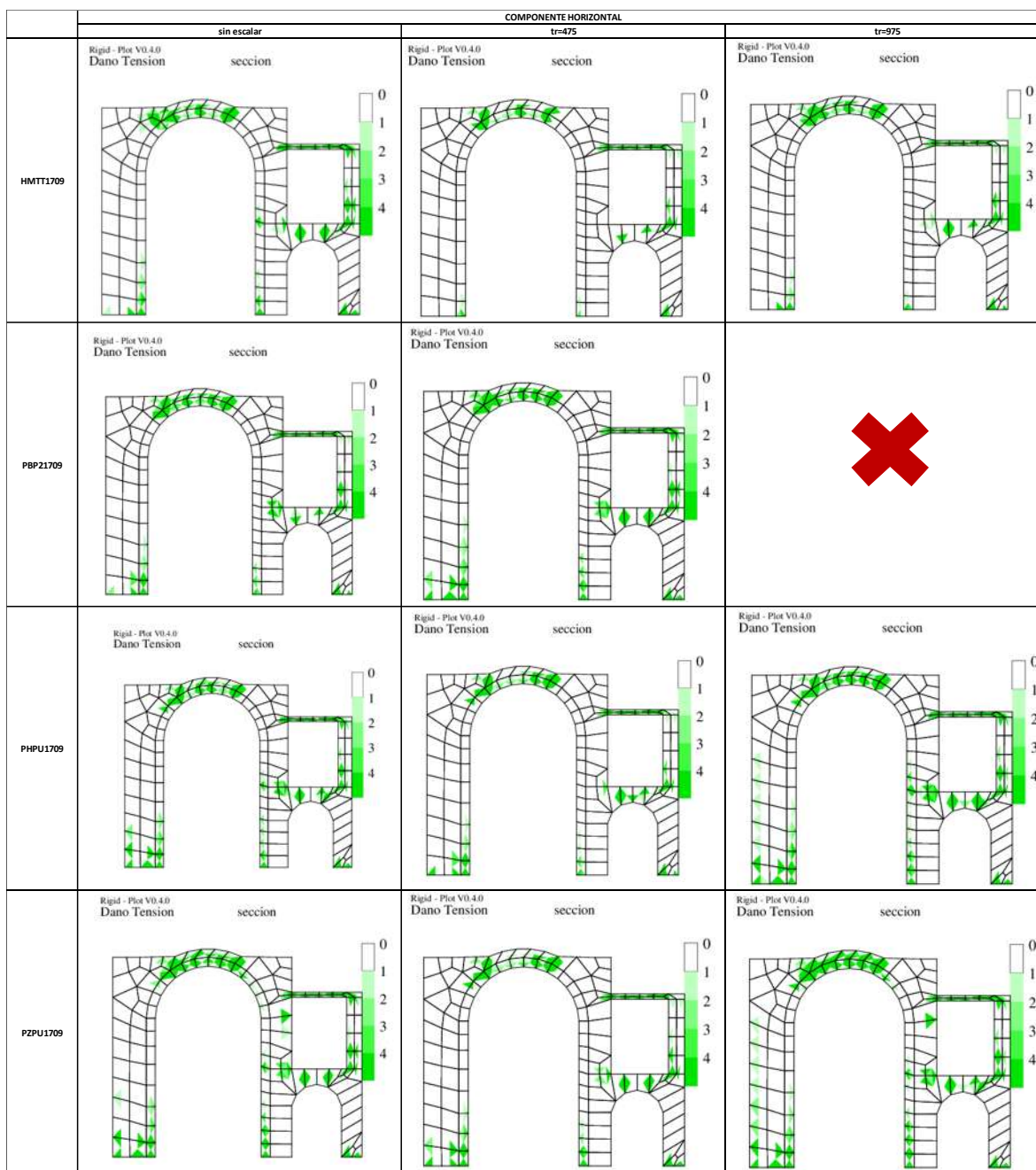


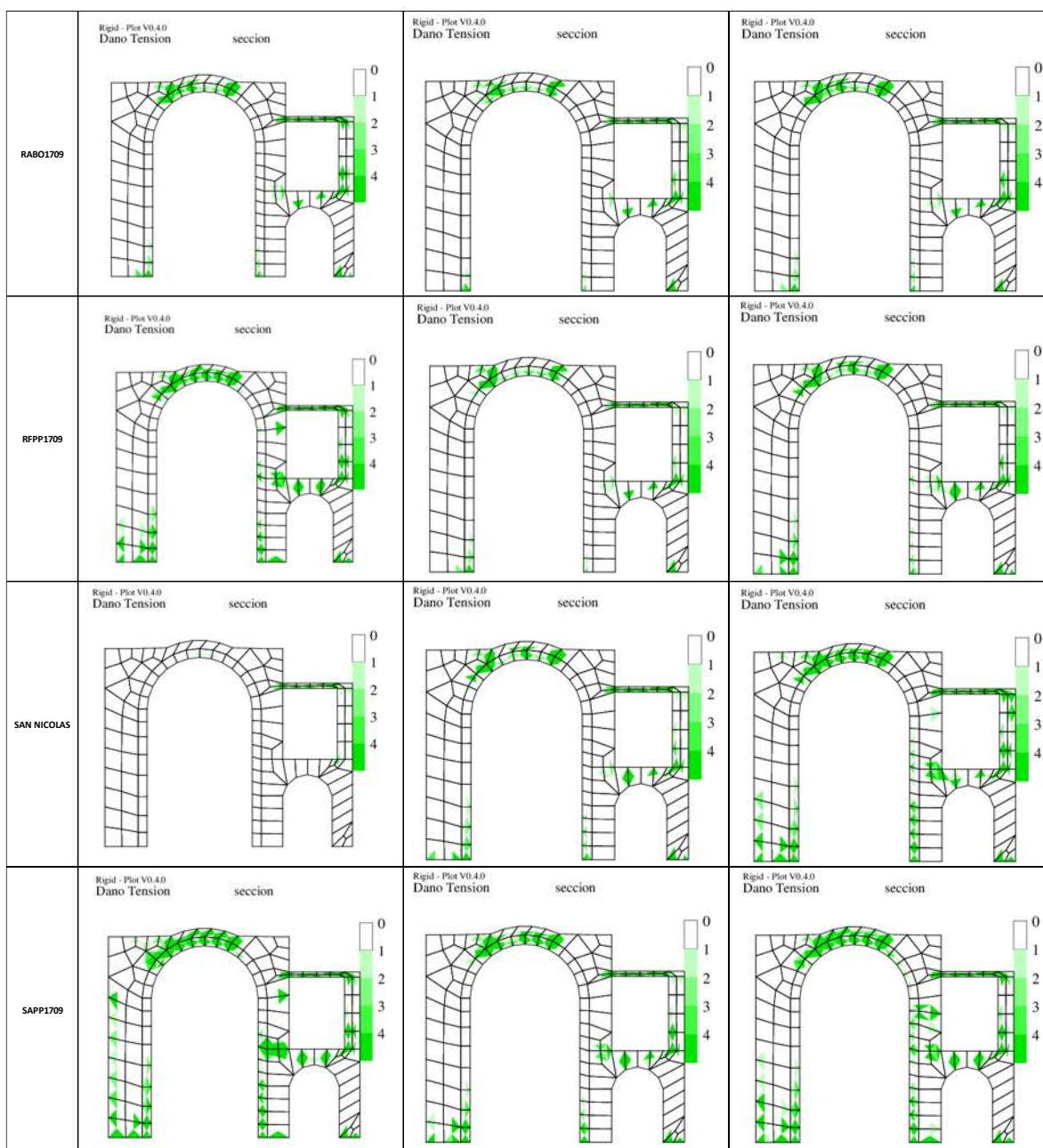
SAN NICOLAS	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 10.0000 Paso 8500 Rigid - Plot V0.4.0	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 10.0000 Paso 8500 Rigid - Plot V0.4.0	Colapso
	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 5.000000 Paso 2500 Rigid - Plot V0.4.0	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 5.000000 Paso 2500 Rigid - Plot V0.4.0	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 5.000000 Paso 2500 Rigid - Plot V0.4.0
	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 5.000000 Paso 4000 Rigid - Plot V0.4.0	Colapso	Colapso
	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 10.0000 Paso 3000 Rigid - Plot V0.4.0	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 10.0000 Paso 3000 Rigid - Plot V0.4.0	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 10.0000 Paso 3000 Rigid - Plot V0.4.0



- SAN DIEGO.

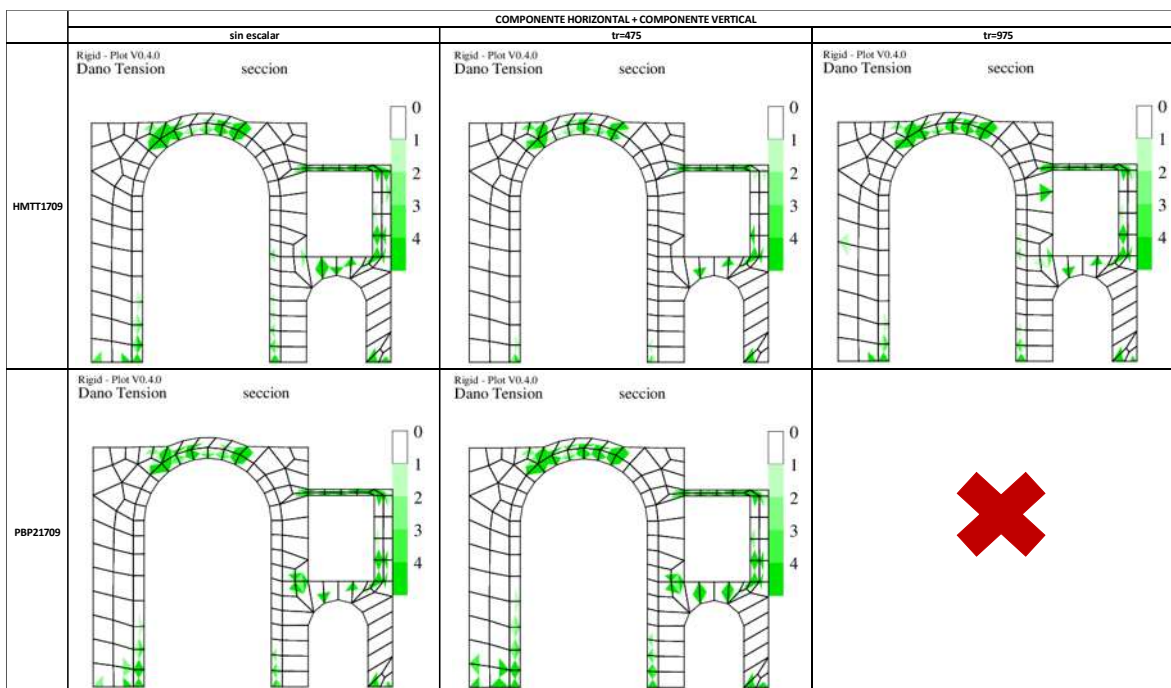
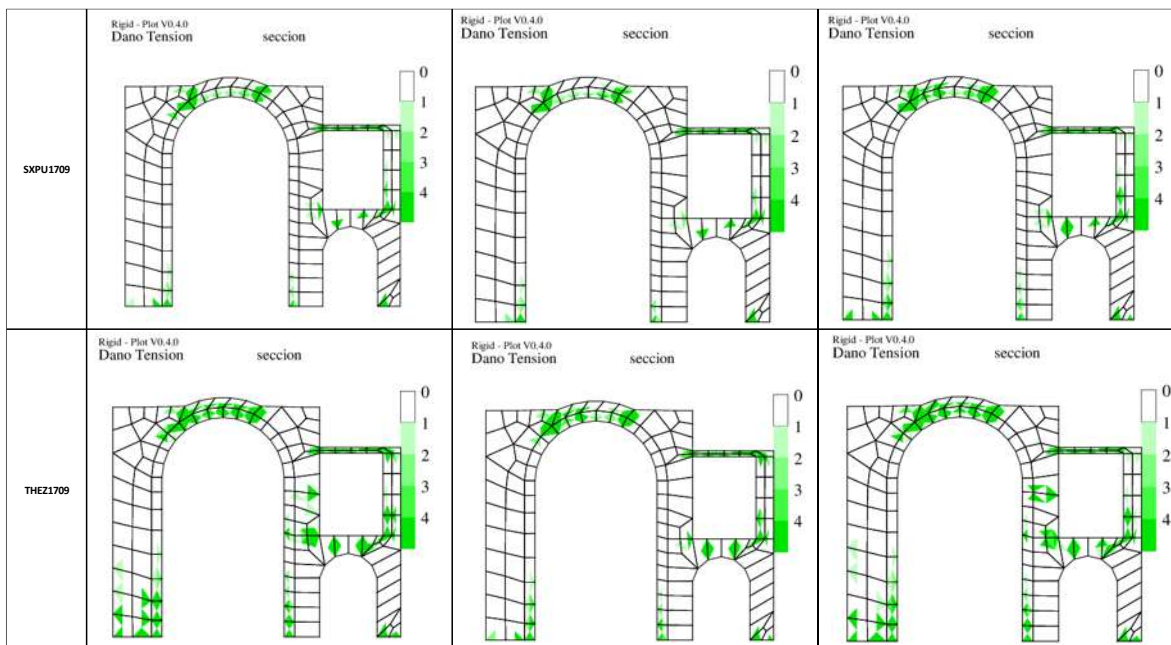
Daños a tensión.

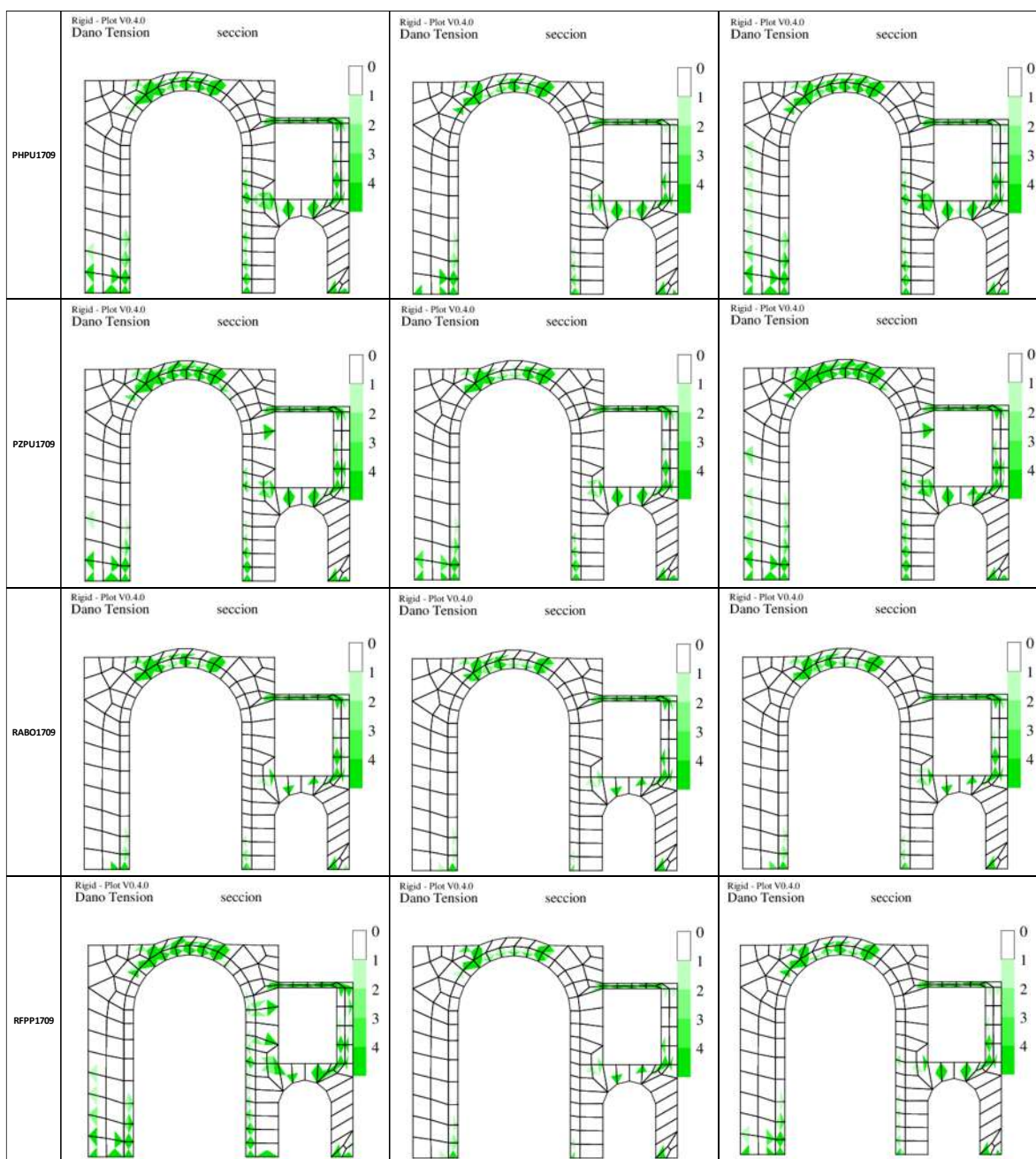


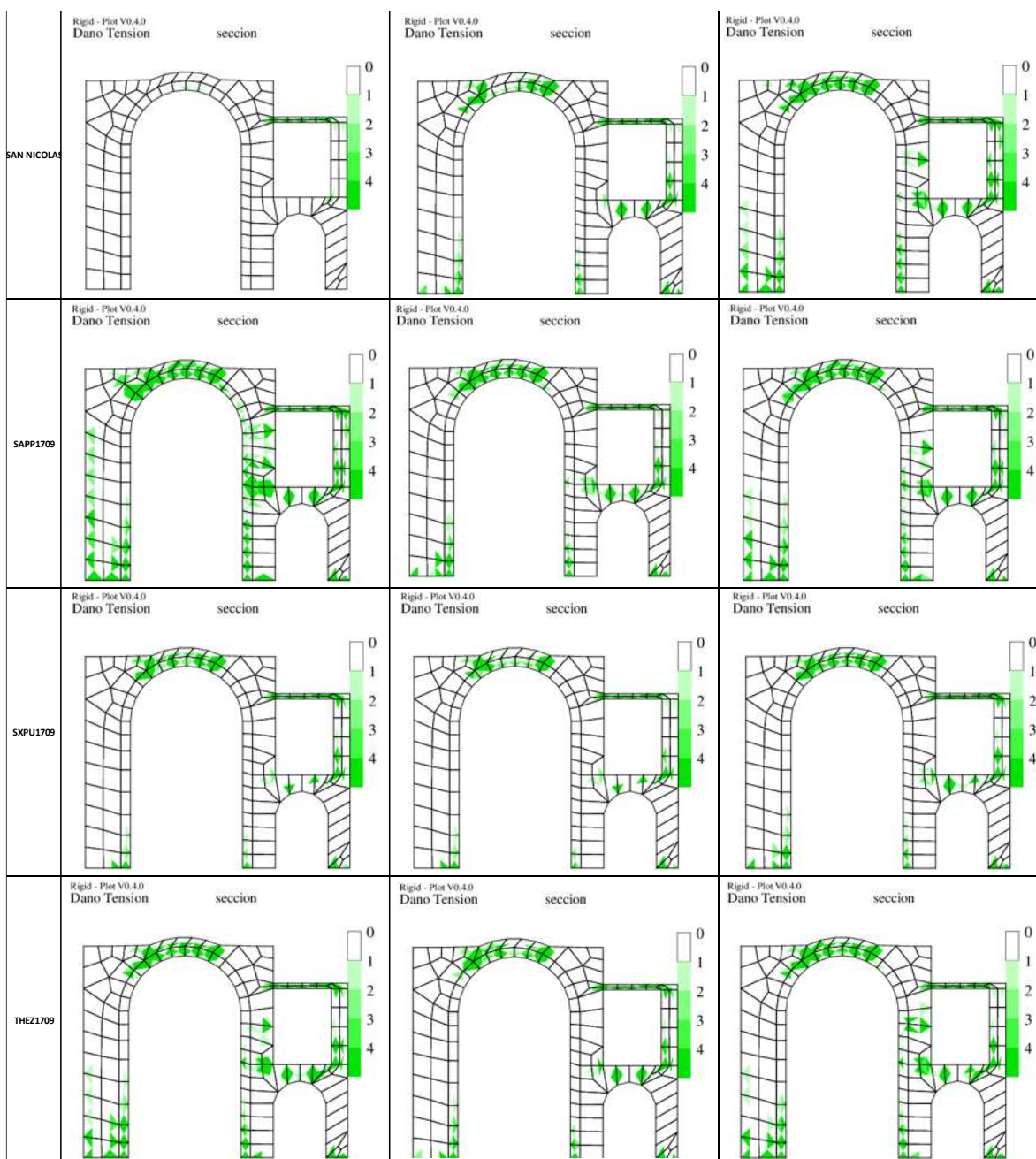




ÍNDICES DE VULNERABILIDAD SÍSMICA PARA EDIFICIOS CONVENTUALES MEXICANOS









Deformada dinámica.

	COMPONENTE HORIZONTAL					
	sin escalas		tr=475		tr=950	
HMTT1709	Deformada Dinamica	seccion	Deformada Dinamica	seccion	Deformada Dinamica	seccion
PBP21709	Deformada Dinamica	seccion	Deformada Dinamica	seccion		
PHPU1709	Deformada Dinamica	seccion	Deformada Dinamica	seccion	Deformada Dinamica	seccion
PZPU1709	Deformada Dinamica	seccion	Deformada Dinamica	seccion	Deformada Dinamica	seccion



RABO1709	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion
	Fac. escala: 10.0000 Paso 1100 Rigid - Plot V04.0	Fac. escala: 10.0000 Paso 1100 Rigid - Plot V04.0	Fac. escala: 10.0000 Paso 1100 Rigid - Plot V04.0
RFPP1709	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion
	Fac. escala: 3.000000 Paso 2800 Rigid - Plot V04.0	Fac. escala: 3.000000 Paso 2800 Rigid - Plot V04.0	Fac. escala: 3.000000 Paso 2800 Rigid - Plot V04.0
SAN NICOLAS	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion
	Fac. escala: 10.0000 Paso 8500 Rigid - Plot V04.0	Fac. escala: 10.0000 Paso 8500 Rigid - Plot V04.0	Fac. escala: 10.0000 Paso 8500 Rigid - Plot V04.0
SAPP1709	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion
	Fac. escala: 5.000000 Paso 2500 Rigid - Plot V04.0	Fac. escala: 5.000000 Paso 2500 Rigid - Plot V04.0	Fac. escala: 5.000000 Paso 2500 Rigid - Plot V04.0



SKPU1709	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion
	 Fac. escala: 5.00000 Paso 4000 Rigid - Plot V0.4.0	 Fac. escala: 5.00000 Paso 4000 Rigid - Plot V0.4.0	 Fac. escala: 5.00000 Paso 4000 Rigid - Plot V0.4.0
THEZ1709	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion
	 Fac. escala: 10.0000 Paso 3000 Rigid - Plot V0.4.0	 Fac. escala: 10.0000 Paso 3000 Rigid - Plot V0.4.0	 Fac. escala: 10.0000 Paso 3000 Rigid - Plot V0.4.0

COMPONENTE HORIZONTAL + COMPONENTE VERTICAL			
	sin escalera	tr=475	tr=950
HMTT1709	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion
	 Fac. escala: 10.0000 Paso 3500 Rigid - Plot V0.4.0	 Fac. escala: 10.0000 Paso 3500 Rigid - Plot V0.4.0	 Fac. escala: 10.0000 Paso 3500 Rigid - Plot V0.4.0
PBP21709	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion	
	 Fac. escala: 10.0000 Paso 1500 Rigid - Plot V0.4.0	 Fac. escala: 10.0000 Paso 1500 Rigid - Plot V0.4.0	 Fac. escala: 10.0000 Paso 1500 Rigid - Plot V0.4.0



PHPU1709	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion
	Fac. escala: 5.00000 Paso 2700 Rigid - Plot V0.4.0	Fac. escala: 5.00000 Paso 2700 Rigid - Plot V0.4.0	Fac. escala: 5.00000 Paso 2700 Rigid - Plot V0.4.0
PZPU1709	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion
	Fac. escala: 8.00000 Paso 3500 Rigid - Plot V0.4.0	Fac. escala: 8.00000 Paso 3500 Rigid - Plot V0.4.0	Fac. escala: 8.00000 Paso 3500 Rigid - Plot V0.4.0
RABO1709	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion
	Fac. escala: 10.0000 Paso 1100 Rigid - Plot V0.4.0	Fac. escala: 10.0000 Paso 1100 Rigid - Plot V0.4.0	Fac. escala: 10.0000 Paso 1100 Rigid - Plot V0.4.0
RFPP1709	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion
	Fac. escala: 3.00000 Paso 2800 Rigid - Plot V0.4.0	Fac. escala: 3.00000 Paso 2800 Rigid - Plot V0.4.0	Fac. escala: 3.00000 Paso 2800 Rigid - Plot V0.4.0

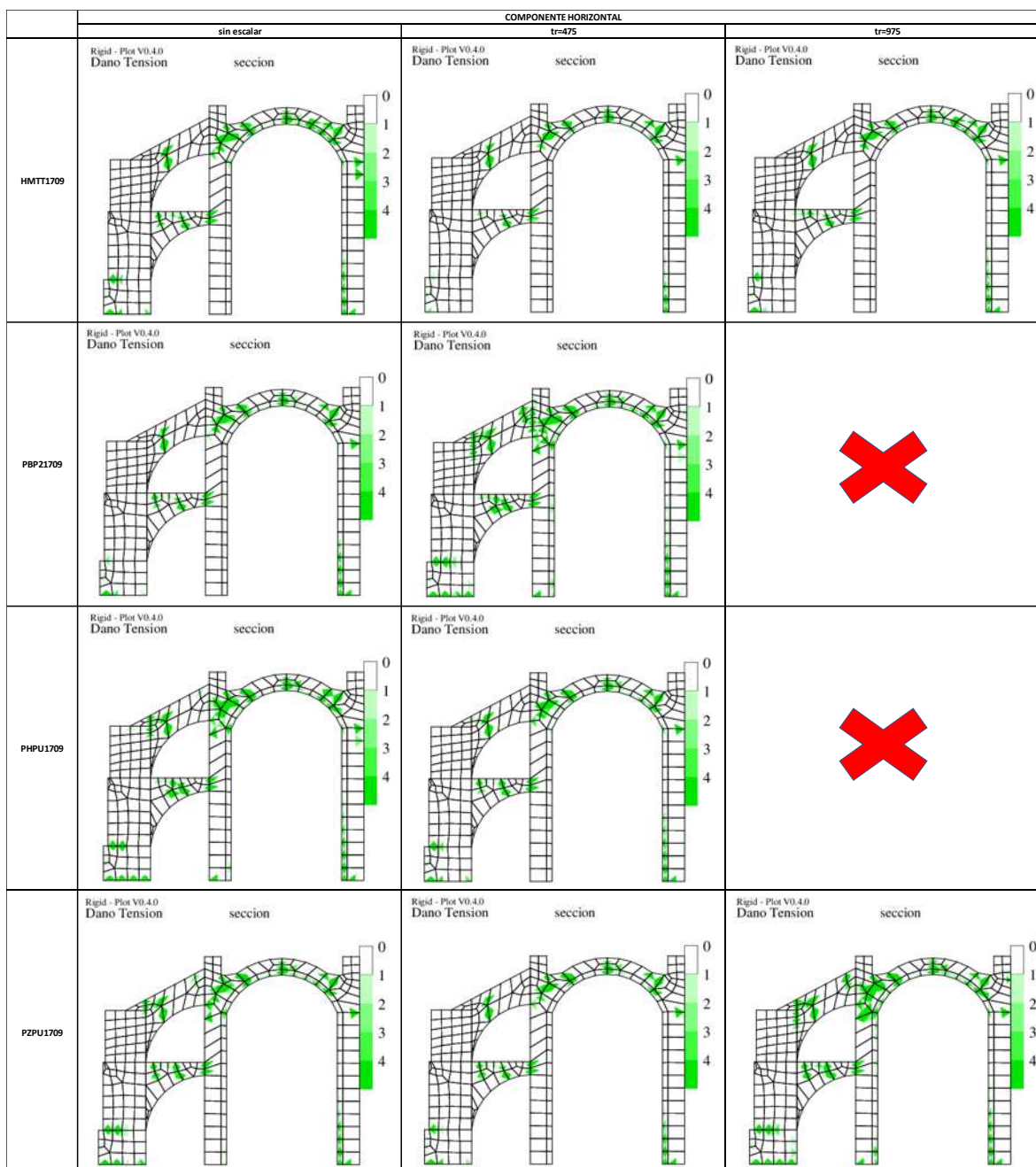


SAN NICOLAS	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion
	Fac. escala: 10.0000 Paso 8500 Rigid - Plot V04.0	Fac. escala: 10.0000 Paso 8500 Rigid - Plot V04.0	Fac. escala: 10.0000 Paso 8500 Rigid - Plot V04.0
SAPP1709	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion
	Fac. escala: 5.000000 Paso 2500 Rigid - Plot V04.0	Fac. escala: 5.000000 Paso 2500 Rigid - Plot V04.0	Fac. escala: 5.000000 Paso 2500 Rigid - Plot V04.0
SXPU1709	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion
	Fac. escala: 5.000000 Paso 4000 Rigid - Plot V04.0	Fac. escala: 5.000000 Paso 4000 Rigid - Plot V04.0	Fac. escala: 5.000000 Paso 4000 Rigid - Plot V04.0
THEZ1709	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion
	Fac. escala: 10.0000 Paso 3000 Rigid - Plot V04.0	Fac. escala: 10.0000 Paso 3000 Rigid - Plot V04.0	Fac. escala: 10.0000 Paso 3000 Rigid - Plot V04.0



- LA MERCED

Daños a tensión.

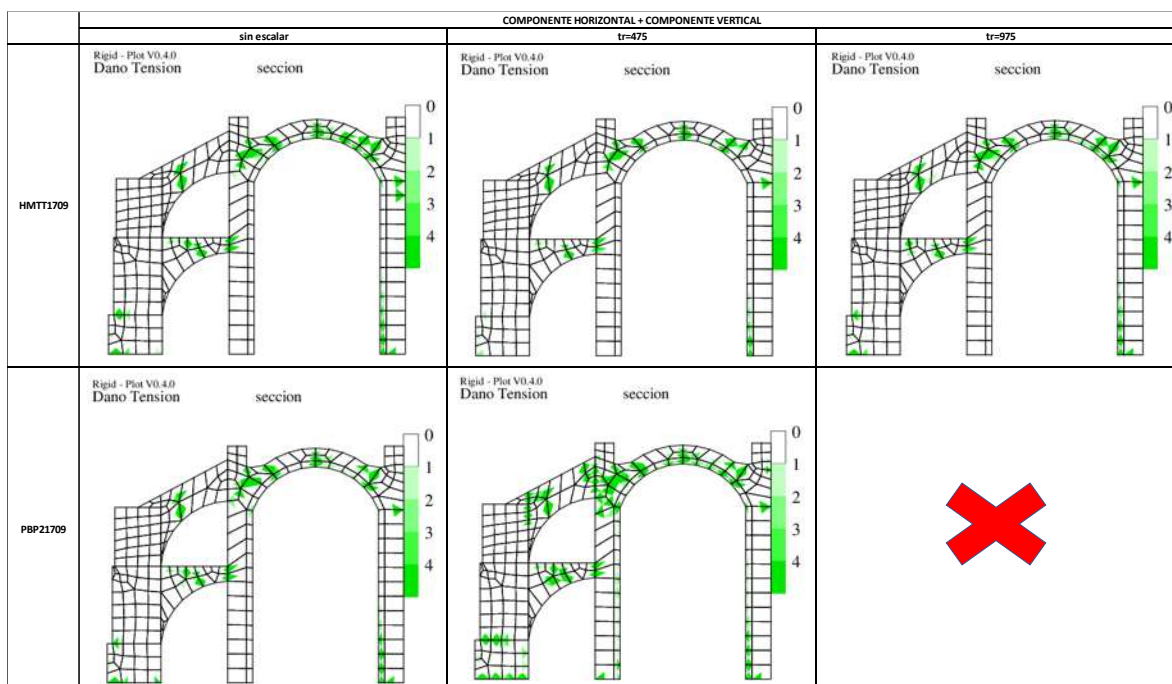
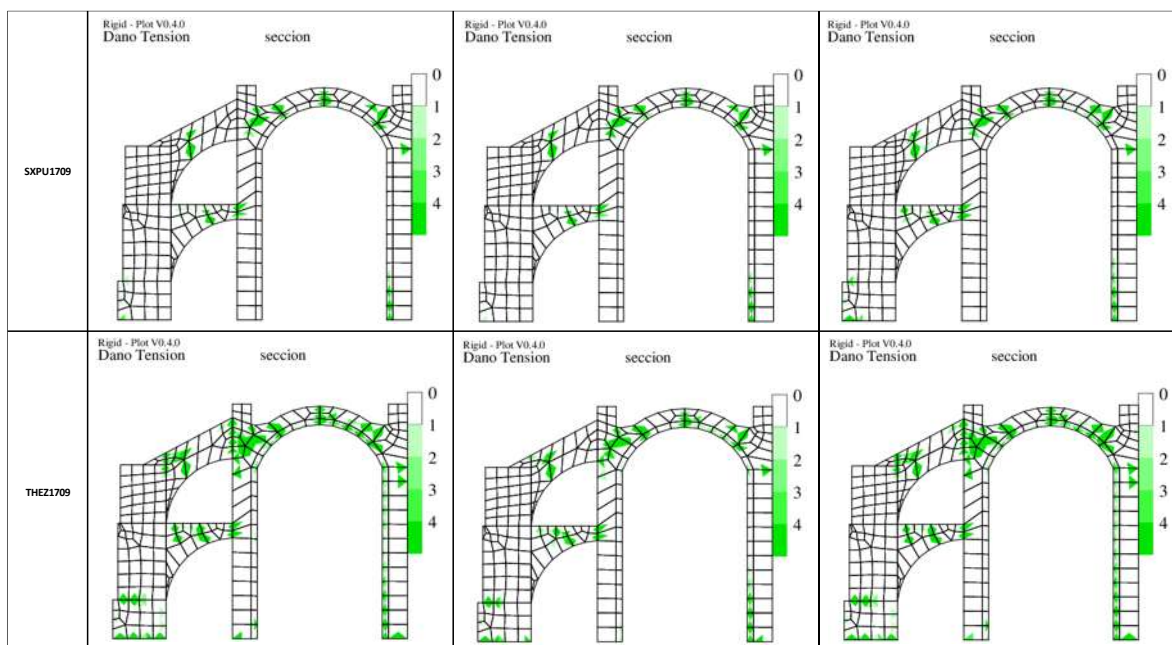




RABO1709	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion
RFPP1709	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion
SAN NICOLAS	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion	
SAPP1709	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion	



ÍNDICES DE VULNERABILIDAD SÍSMICA PARA EDIFICIOS CONVENTUALES MEXICANOS





PHPU1709	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion 	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion 	
	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion 	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion 	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion
	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion 	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion 	
	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion 	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion 	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion



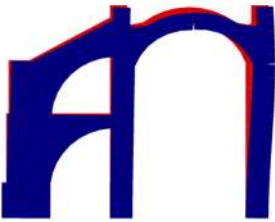
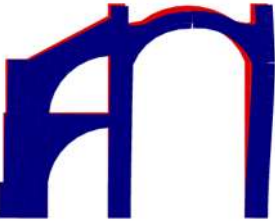
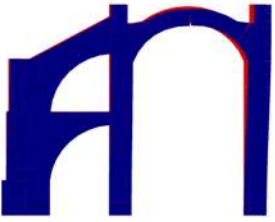
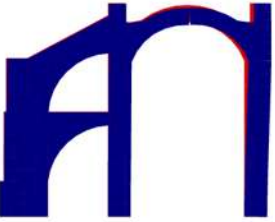
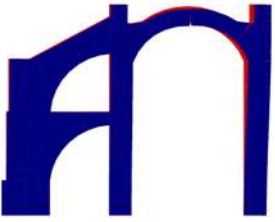
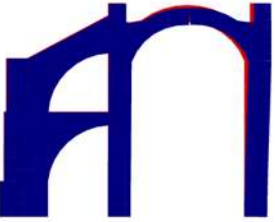
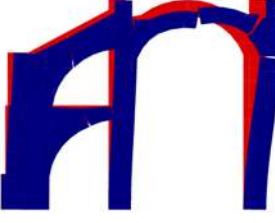
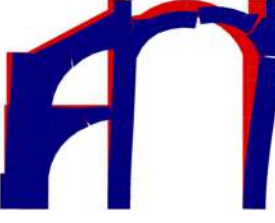
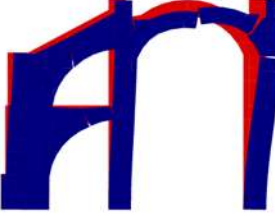
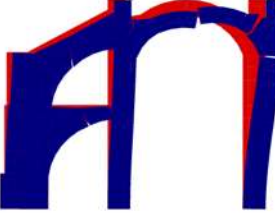
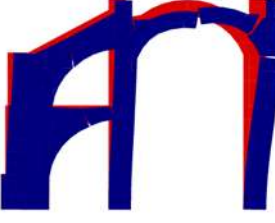
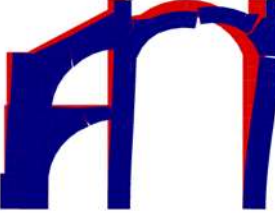
SAN NICOLAS	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion	
	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion	
SAPP1709	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion	
	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion	
SKPU1709	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion	
	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion	
THEZ1709	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion	
	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion	Rigid - Plot V0.4.0 Dano Tension seccion	



Deformada dinámica.

	COMPONENTE HORIZONTAL		
	sin escalas	tr=475	tr=975
HMTT1709	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 50.0000 Paso 3500 Rigid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 50.0000 Paso 3500 Rigid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 50.0000 Paso 3500 Rigid - Plot V04.0
PBP21709	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 50.0000 Paso 3000 Rigid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 50.0000 Paso 3000 Rigid - Plot V04.0	
PHPU1709	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 20.0000 Paso 2700 Rigid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 20.0000 Paso 2700 Rigid - Plot V04.0	
PZPU1709	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 50.0000 Paso 1700 Rigid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 50.0000 Paso 1700 Rigid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 50.0000 Paso 1700 Rigid - Plot V04.0



RABO1709	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 50.0000 Paso 1100 Rigid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 50.0000 Paso 1100 Rigid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 50.0000 Paso 1100 Rigid - Plot V04.0
	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 50.0000 Paso 1100 Rigid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 50.0000 Paso 1100 Rigid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 50.0000 Paso 1100 Rigid - Plot V04.0
	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 50.0000 Paso 1100 Rigid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 50.0000 Paso 1100 Rigid - Plot V04.0	
RFPP1709	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 10.0000 Paso 2800 Rigid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 10.0000 Paso 2800 Rigid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 10.0000 Paso 2800 Rigid - Plot V04.0
	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 10.0000 Paso 2800 Rigid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 10.0000 Paso 2800 Rigid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 10.0000 Paso 2800 Rigid - Plot V04.0
	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 10.0000 Paso 2800 Rigid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 10.0000 Paso 2800 Rigid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 10.0000 Paso 2800 Rigid - Plot V04.0
SAN NICOLAS	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 50.0000 Paso 4200 Rigid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 50.0000 Paso 4200 Rigid - Plot V04.0	
	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 50.0000 Paso 4200 Rigid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 50.0000 Paso 4200 Rigid - Plot V04.0	
	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 50.0000 Paso 4200 Rigid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 50.0000 Paso 4200 Rigid - Plot V04.0	
SAPP1709	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 50.0000 Paso 2500 Rigid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 50.0000 Paso 2500 Rigid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 50.0000 Paso 2500 Rigid - Plot V04.0
	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 50.0000 Paso 2500 Rigid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 50.0000 Paso 2500 Rigid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 50.0000 Paso 2500 Rigid - Plot V04.0
	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 50.0000 Paso 2500 Rigid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 50.0000 Paso 2500 Rigid - Plot V04.0	Deformada Dinamica seccion  Fac. escala: 50.0000 Paso 2500 Rigid - Plot V04.0



ÍNDICES DE VULNERABILIDAD SÍSMICA PARA EDIFICIOS CONVENTUALES MEXICANOS



SXPU1709	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion
THEZ1709	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion

	COMPONENTE HORIZONTAL + COMPONENTE VERTICAL		
	sin escalera	tr=475	tr=975
HMITT1709	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion
PBP21709	Deformada Dinamica seccion	Deformada Dinamica seccion	



PHPU1709	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 20.0000 Paso 2700 Rigid - Plot V0.4.0	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 20.0000 Paso 2700 Rigid - Plot V0.4.0	
	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 20.0000 Paso 2700 Rigid - Plot V0.4.0	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 20.0000 Paso 2700 Rigid - Plot V0.4.0	
PZPU1709	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 50.0000 Paso 1700 Rigid - Plot V0.4.0	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 50.0000 Paso 1700 Rigid - Plot V0.4.0	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 50.0000 Paso 1700 Rigid - Plot V0.4.0
RABO1709	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 50.0000 Paso 1100 Rigid - Plot V0.4.0	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 50.0000 Paso 1100 Rigid - Plot V0.4.0	
RFPP1709	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 10.0000 Paso 2800 Rigid - Plot V0.4.0	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 10.0000 Paso 2800 Rigid - Plot V0.4.0	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 10.0000 Paso 2800 Rigid - Plot V0.4.0



SAN NICOLAS	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 50.0000 Paso 4200 Rigid - Plot V0.4.0	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 50.0000 Paso 4200 Rigid - Plot V0.4.0	
	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 50.0000 Paso 2500 Rigid - Plot V0.4.0	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 50.0000 Paso 2500 Rigid - Plot V0.4.0	
	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 50.0000 Paso 4000 Rigid - Plot V0.4.0	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 50.0000 Paso 4000 Rigid - Plot V0.4.0	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 50.0000 Paso 4000 Rigid - Plot V0.4.0
	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 50.0000 Paso 3000 Rigid - Plot V0.4.0	Deformada Dinamica seccion Fac. escala: 50.0000 Paso 3000 Rigid - Plot V0.4.0	



En las **tablas 8, 9, 10 y 11** se muestran los desplazamientos máximos obtenidos de los análisis dinámicos para cada macroelemento.

Tabla 8. Desplazamientos máximos para el macroelemento transversal de San Agustín.

Desplazamientos máximos (cm)						
	sin escalara		475		975	
	h	hv	h	hv	h	hv
HMTT1709	1.01	0.99	0.49	0.66	0.86	0.89
PBP21709	1.24	1.23	1.49	1.49	-----	-----
PHPU1709	1.42	1.45	0.87	1.22	1.82	1.91
PZPU1709	2.28	2.26	1.65	1.84	2.36	2.21
RABO1709	1.11	1.05	0.72	0.70	1.10	0.95
RFPP1709	1.36	1.42	0.50	0.48	0.81	0.77
SANNICOLAS	0.05	0.05	1.22	1.17	-----	-----
SAPP1709	2.84	2.95	1.83	1.89	2.62	0.00
SXPU1709	0.63	0.64	0.59	0.61	0.56	0.85
THEZ1709	1.83	1.78	0.98	0.91	1.65	1.60

Tabla 9. Desplazamientos máximos para el macroelemento transversal San Francisco.

Desplazamientos máximos (cm)						
	sin escalara		475		975	
	h	hv	h	hv	h	hv
HMTT1709	0.6654	1.2615	0.7524	0.7506	1.0467	-----
PBP21709	1.7978	1.5877	1.8731	1.9577	3.4580	-----
PHPU1709	1.3046	1.3033	1.1373	1.0072	1.6261	1.5943
PZPU1709	2.7161	2.6714	2.0499	2.0368	3.3833	-----
RABO1709	1.0058	0.7666	0.7101	0.6165	0.8601	-----
RFPP1709	4.0336	4.3724	2.3668	2.3939	3.0297	3.5531
SANNICOLAS	0.2197	0.2242	1.5490	1.5276	2.4872	-----
SAPP1709	2.6941	2.7921	1.3666	1.4145	1.4025	1.5780
SXPU1709	0.7842	0.5913	0.7019	-----	1.1568	-----
THEZ1709	1.6164	1.5096	1.0981	1.1600	1.5271	1.5412



Tabla 10. Desplazamientos máximos para el macroelemento transversal La Merced.

Desplazamientos máximos (cm)						
	sin escalar		475		975	
	h	hv	h	hv	h	hv
HMTT1709	0.27	0.25	0.16	0.16	0.23	0.23
PBP21709	0.24	0.26	0.46	0.49	----	----
PHPU1709	0.51	0.50	0.32	0.32	----	----
PZPU1709	0.44	0.42	0.26	0.27	0.60	0.60
RABO1709	0.28	0.28	0.18	0.21	0.26	----
RFPP1709	0.43	0.38	0.21	0.21	0.27	0.28
SANNICOLAS	0.05	0.05	0.37	0.38	----	----
SAPP1709	0.66	0.66	0.57	0.56	----	----
SXPU1709	0.17	0.17	0.15	0.16	0.23	0.22
THEZ1709	0.48	0.49	0.38	0.39	0.47	----

Tabla 11. Desplazamientos máximos para el macroelemento transversal San Diego.

Desplazamientos máximos (cm)						
	sin escalar		475		975	
	h	hv	h	hv	h	hv
HMTT1709	2.29	2.32	1.15	1.17	1.71	1.95
PBP21709	2.76	2.70	3.70	3.70	----	----
PHPU1709	3.66	3.60	2.78	2.83	4.66	4.72
PZPU1709	3.59	3.62	2.70	2.55	3.87	3.96
RABO1709	1.58	1.73	1.15	1.21	1.48	1.51
RFPP1709	4.56	4.18	1.47	1.46	2.74	2.80
SANNICOLAS	0.10	0.10	1.47	2.18	4.46	4.28
SAPP1709	7.44	8.42	3.17	3.09	3.86	3.93
SXPU1709	1.79	1.82	1.53	1.59	2.38	2.46
THEZ1709	4.85	4.76	2.52	2.52	4.36	4.33



6. INDICES DE VULNERABILIDAD

De la evaluación y la interpretación del daño causado por los sismos surge la necesidad de cuantificar y explicar los efectos de este fenómeno sobre los diferentes tipos de estructuras existentes, permitiéndonos esto determinar en un dado caso la necesidad de reparación y/o refuerzo, o simplemente la demolición cuando existen riesgos evidentes a vidas humanas o construcciones cercanas.

Es frecuente encontrar diferentes tipos de representación del daño que dependen tanto del modelo utilizado, como de la clase de estudio que se desea realizar. Uno de los tipos de representación más utilizada son las representaciones mecánicas, que utilizan modelos teóricos que permiten describir el comportamiento del mecanismo estructural a través de los índices de daño.

Los índices de daño o vulnerabilidad, son un concepto introducido en los últimos años por algunos investigadores, estos cuantifican la degradación de los elementos estructurales que forman parte de los sistemas resistentes a cargas laterales y verticales. Se fundamentan en la apropiada definición de un modelo de daño representativo de las propiedades de los materiales, la topología estructural y las características de las acciones aplicadas y hoy en día son importante herramienta, tanto para la evaluación del daño y toma de decisiones respecto de la reparación, refuerzo o demolición de una estructura; así como en el desarrollo de las nuevas tendencias de diseño por desempeño.

Los índices de daño son funciones adimensionales, que pretenden evaluar el daño estructural y permiten cuantificarlo de forma más objetiva, mediante la ponderación cuantitativa de ciertos parámetros o variables de la respuesta estructural. Estos modelos generalmente se fundamentan en la relación demanda-capacidad de alguna variable estructural específica, la evolución de la degradación de alguna propiedad estructural e incluso, en la definición de parámetros energéticos.



Para modelar la acumulación del daño que ocurre cuando una estructura se ve afectada por una carga reversible, generalmente se utiliza una formulación de degradación cíclica, en la cual el daño se considera como una función de la deformación plástica acumulada o incorporando un término relacionado con la energía histerética disipada durante el sismo.

Para estructuras de mampostería uno de los índices de daño propuesto es el establecido por Ang y Wen (1987), que basados ensayos de laboratorio observaron que el comportamiento por fallo de la mampostería en la mayoría de los casos frágil, lo que significa que un indicador de daño puede ser la deformación máxima. Sin embargo, en los ensayos realizados bajo cargas cíclicas observaron que después de muchos ciclos los muros encontraban su fallo total, teniendo en cuenta así que otro indicador de daño puede ser la disipación de energía. Basados en estas observaciones Ang y Wen propusieron el siguiente índice de daño para mampostería (ecuación 2):

$$D = \frac{U_m}{U_f} + \frac{\varepsilon}{q_u * U_f} \int dE \quad (2)$$

Donde:

U_m = desplazamiento máximo

$\int dE$ = energía disipada

U_f = desplazamiento el fallo bajo carga monotónica

q_u = capacidad de carga última

ε =parámetro experimental, que toma valores del orden 0.075

El índice de daño es una cantidad normalizada, cuyo valor es, por definición, entre 0 y 1. El valor de $DI = 0$ denota la estructura no dañada, es decir, el comportamiento elástico lineal de la estructura durante el terremoto, mientras que $DI = 1$ denota la falla de la estructura, es decir, colapso local o general de la estructura. Park y Ang iniciaron la dependencia del grado de daño de la estructura



del índice de daño y definieron la relación entre el grado de daño y el índice de daño (Tabla 8).

Tabla 8. Interpretación del índice de daño

Grado de daño	Índice de daños	Estado de la estructura
Menor	0.0 - 0.2	reparable
Moderado	0.2-0.5	reparable
Grave	0.5-1.0	irreparable
Colapso	>1	perdida

6.1 Curvas de capacidad

Para poder obtener el índice de daño propuesto por Ang y Wen es necesario conocer el valor del desplazamiento al fallo bajo carga monotónica (U_f) y la capacidad de carga última (q_u), por lo que fue necesario realizar análisis “push-over” para cada estructura y así poder obtener la curva de capacidad, que es la relación entre un parámetro representando el nivel de carga lateral aplicada a la estructura y un desplazamiento característico representando la configuración de la deformada de la estructura. Típicamente, el corte basal (V_b) contra el desplazamiento de un punto seleccionado del macroelemento (**figuras 45, 46,47,48**).

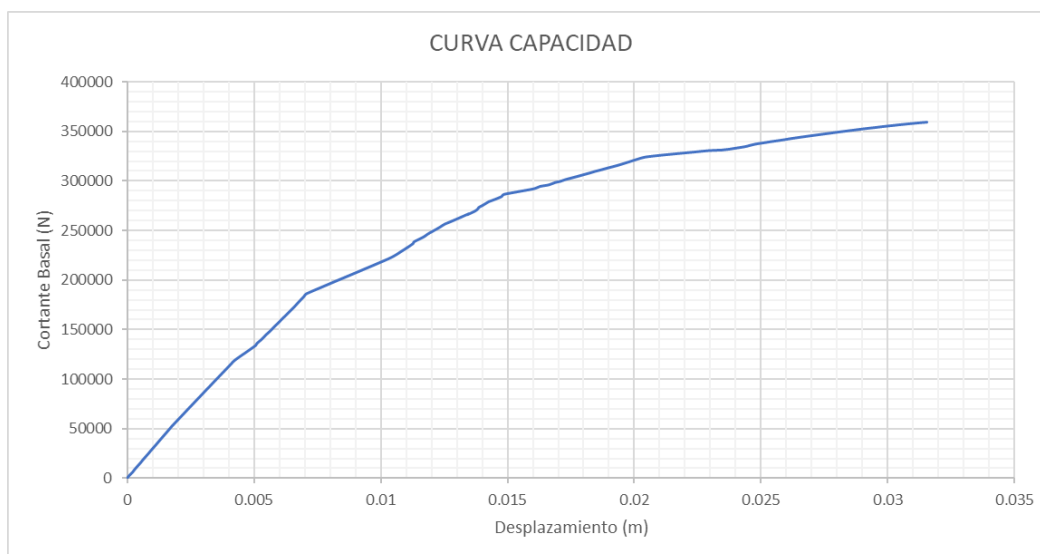




Figura 45. Curva capacidad para el macroelemento transversal del convento de San Agustín.

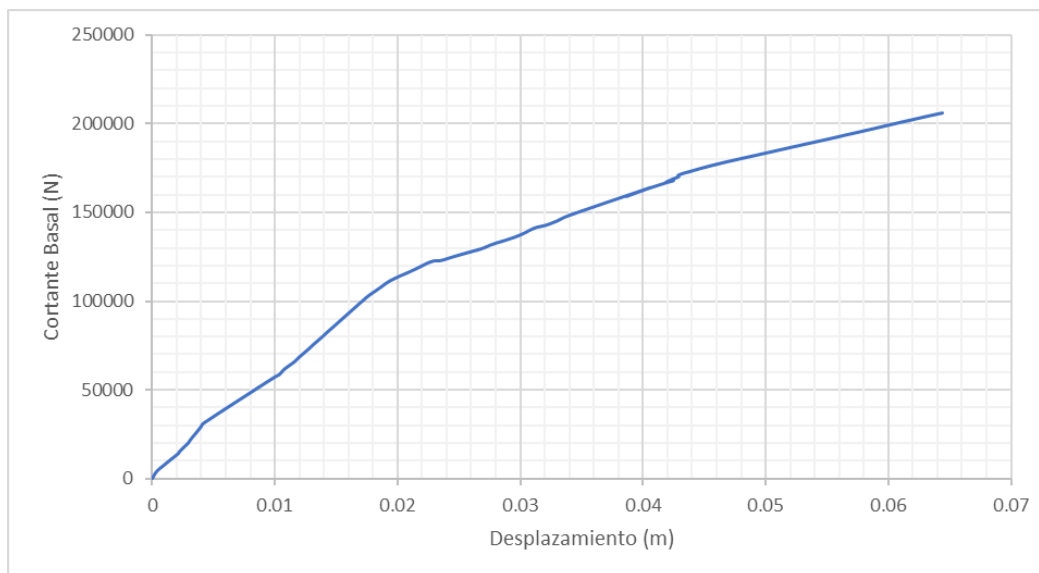


Figura 46. Curva capacidad para el macroelemento transversal del convento de San Francisco.

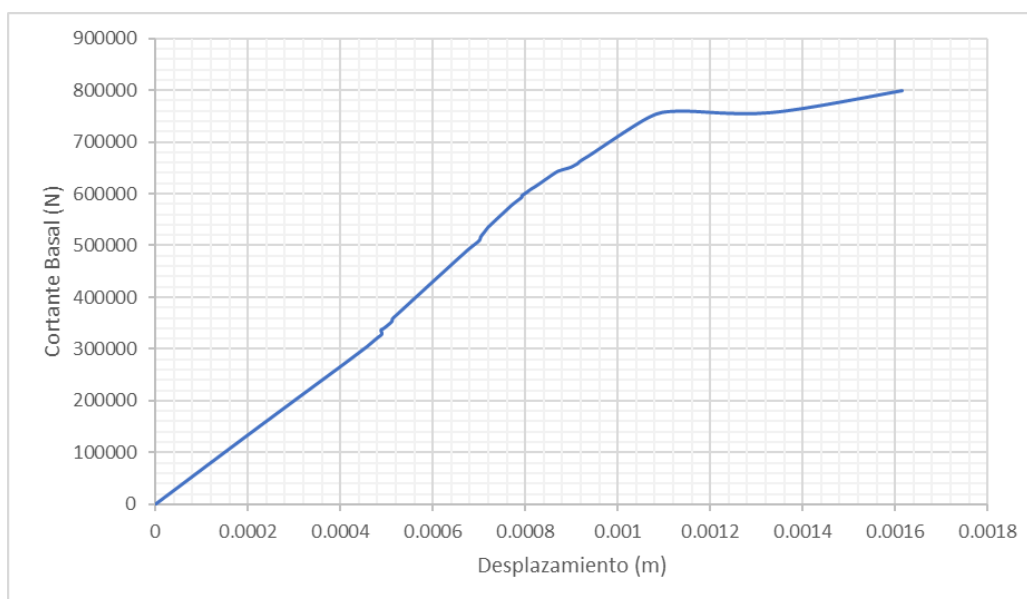


Figura 47. Curva capacidad para el macroelemento transversal del convento de la Merced.

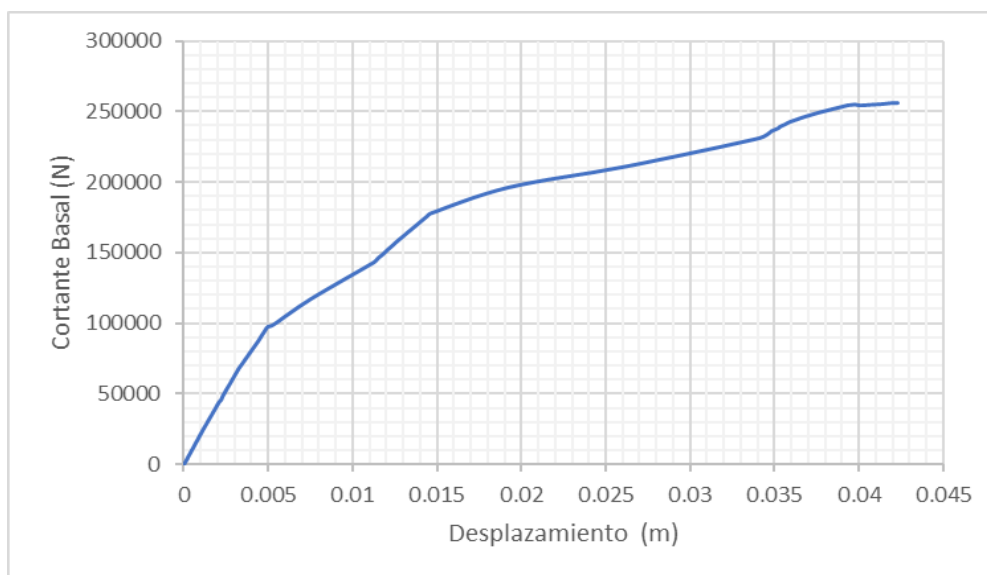


Figura 48. Curva capacidad para el macroelemento transversal del convento de San Diego.

En la **tabla 10** se muestra del desplazamiento el fallo bajo carga monotónica (U_f) y la capacidad de carga última (q_u) de cada macroelemento.

Tabla 10.

CONVENTO	U_f (cm)	Q_u (N)
San Agustín	3.15	360000
San Francisco	6.5	200000
La Merced	0.165	800000
San Diego	4.25	250000



6.2 Índices de daño calculados.

En las tablas 11,12,13 y 14 se muestran los valores de los índices de daños obtenidos para cada macroelemento.

Tabla 11. Índices de daños para San Agustín.

	Índices daño					
	sin escalar		475		950	
	h	hv	h	hv	h	hv
HMTT1709	0.658	0.666	0.166	0.554	0.292	1.547
PBP21709	1.044	1.043	1.146	1.299	1.000	1.000
PHPU1709	0.728	0.739	0.544	0.412	0.865	0.977
PZPU1709	1.326	1.659	1.087	1.387	1.615	1.580
RABO1709	0.810	1.890	0.579	1.686	0.767	1.864
RFPP1709	0.783	0.790	0.174	0.167	0.287	0.606
SANNICOLAS	0.015	0.015	0.515	2.813	1.000	1.000
SAPP1709	1.261	1.740	0.626	0.650	0.908	1.000
SXPU1709	0.211	0.597	0.197	0.551	0.672	0.748
THEZ1709	0.962	0.947	0.332	0.981	1.467	1.329

Tabla 12. Índices de daños para San Francisco.

	Índices daño					
	sin escalar		475		975	
	h	hv	h	hv	h	hv
HMTT1709	0.1200	0.2146	0.1236	0.1234	0.1741	1.0000
PBP21709	0.3359	0.3097	0.3728	0.3932	0.7198	1.0000
PHPU1709	0.2207	0.2224	0.1894	0.1700	0.2772	0.2740
PZPU1709	0.5146	0.5106	0.3754	0.3807	0.6570	1.0000
RABO1709	0.1798	0.1482	0.1215	0.1121	0.1535	1.0000
RFPP1709	0.6549	0.7100	0.3766	0.3812	0.4875	0.5697
SANNICOLAS	0.0338	0.0345	0.3494	0.3552	0.5846	1.0000
SAPP1709	0.4960	0.5140	0.2328	0.2406	0.2589	0.2867
SXPU1709	0.1341	0.1010	0.1199	1.0000	0.1986	1.0000
THEZ1709	0.2685	0.2521	0.1796	0.1902	0.2527	0.2568



Tabla 13. Índices de daños para La Merced.

	Índices daño					
	sin escalar		475		975	
	h	hv	h	hv	h	hv
HMTT1709	1.90	1.78	1.07	1.05	1.59	1.59
PBP21709	1.91	2.05	3.57	3.81	1.00	1.00
PHPU1709	3.38	3.35	2.11	2.10	1.00	1.00
PZPU1709	3.32	3.22	1.99	2.00	4.68	4.65
RABO1709	2.14	2.08	1.25	1.47	1.94	1.00
RFPP1709	3.02	2.66	1.44	1.43	1.95	1.96
SANNICOLAS	0.32	0.32	3.68	3.77	0.00	1.00
SAPP1709	4.51	4.47	3.84	3.39	1.00	1.00
SXPU1709	1.12	1.16	1.02	1.08	1.57	1.51
THEZ1709	3.27	3.26	2.51	2.57	3.24	1.00

Tabla 14. Índices de daños para San Diego.

	Índices daño					
	sin escalar		475		975	
	h	hv	h	hv	h	hv
HMTT1709	0.561	0.572	0.280	0.286	0.419	0.477
PBP21709	0.696	0.682	0.934	0.936	1.000	1.000
PHPU1709	0.897	0.883	0.678	0.690	1.141	1.154
PZPU1709	0.966	0.973	0.727	0.692	1.062	1.083
RABO1709	0.399	0.436	0.285	0.300	0.371	0.382
RFPP1709	1.135	1.050	0.359	0.357	0.676	0.690
SANNICOLAS	0.023	0.023	0.456	0.623	1.311	1.259
SAPP1709	1.841	2.095	0.780	0.761	0.970	0.986
SXPU1709	0.436	0.444	0.371	0.388	0.580	0.601
THEZ1709	1.192	1.170	0.607	0.608	1.070	1.062

Para observar de una mejor manera los resultados obtenidos, en las figuras 49 a la 60 se muestran las graficas de los índices de daño obtenidas para cada macroelemento.

En las Figuras 61 a la 64 se muestra una comparativa gráfica de los índices para cada periodo de retorno.

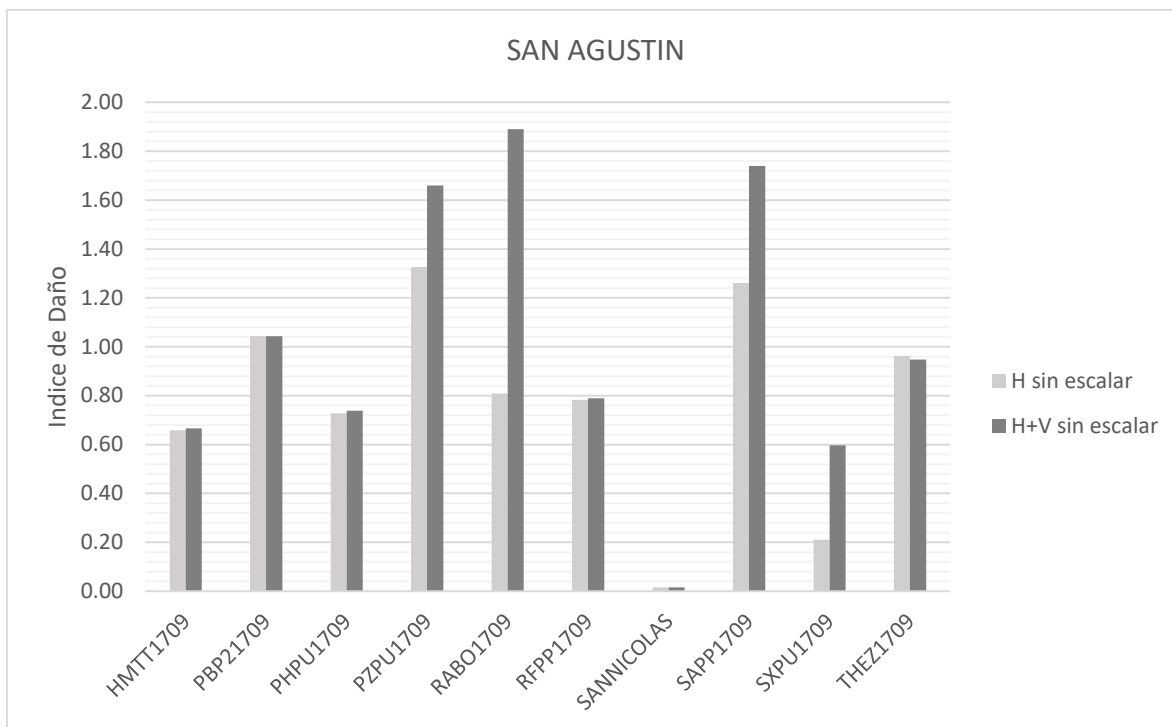


Figura 49. Grafica de los índices de daños para San Agustín sin escalar la señal del acelerograma.

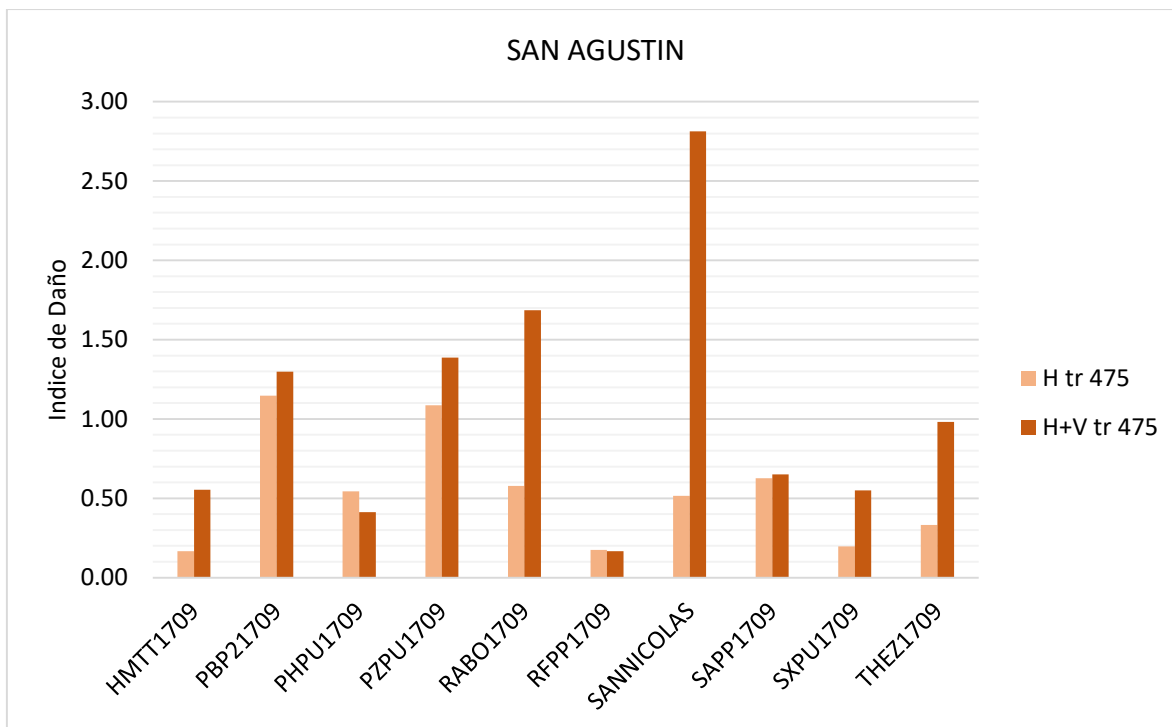


Figura 50. Grafica de los índices de daños para San Agustín para un Tr =475

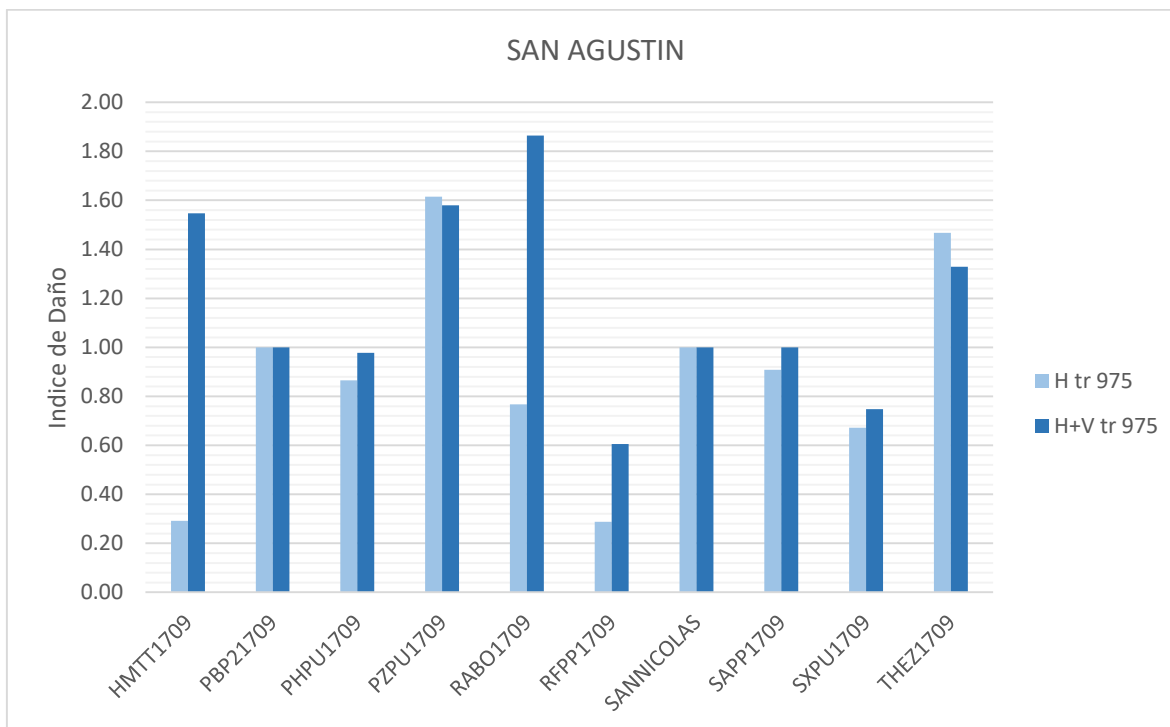


Figura 51 Grafica de los índices de daños para San Agustín para un $T_r = 975$

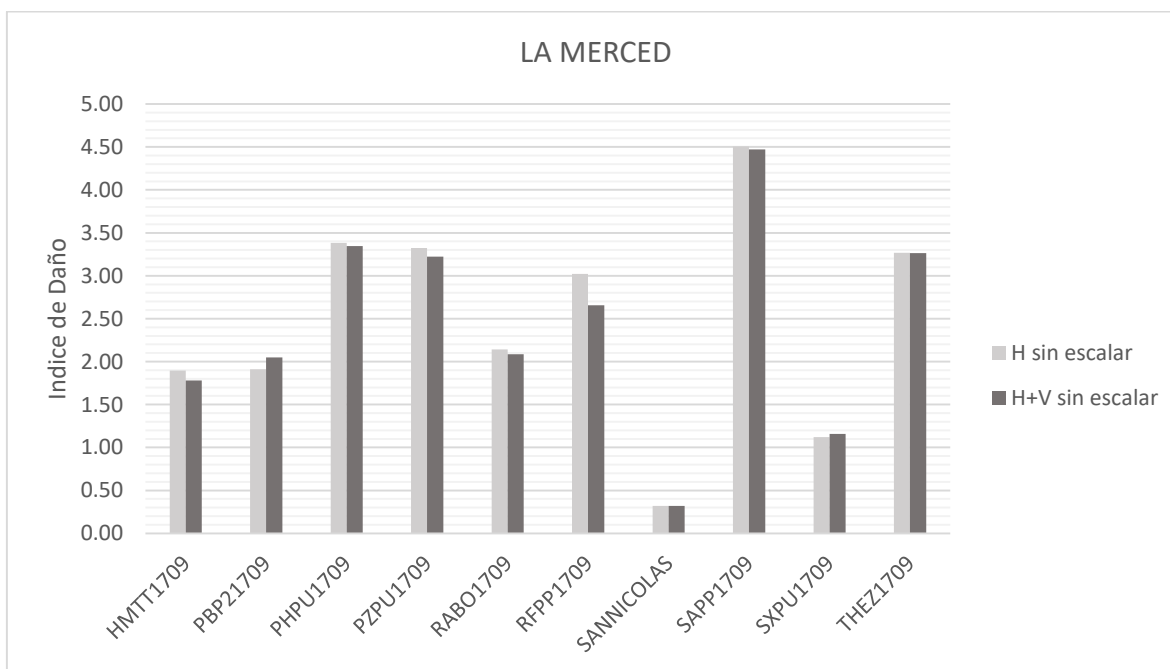


Figura 52. Grafica de los índices de daños para La Merced sin escalar la señal del acelerograma.

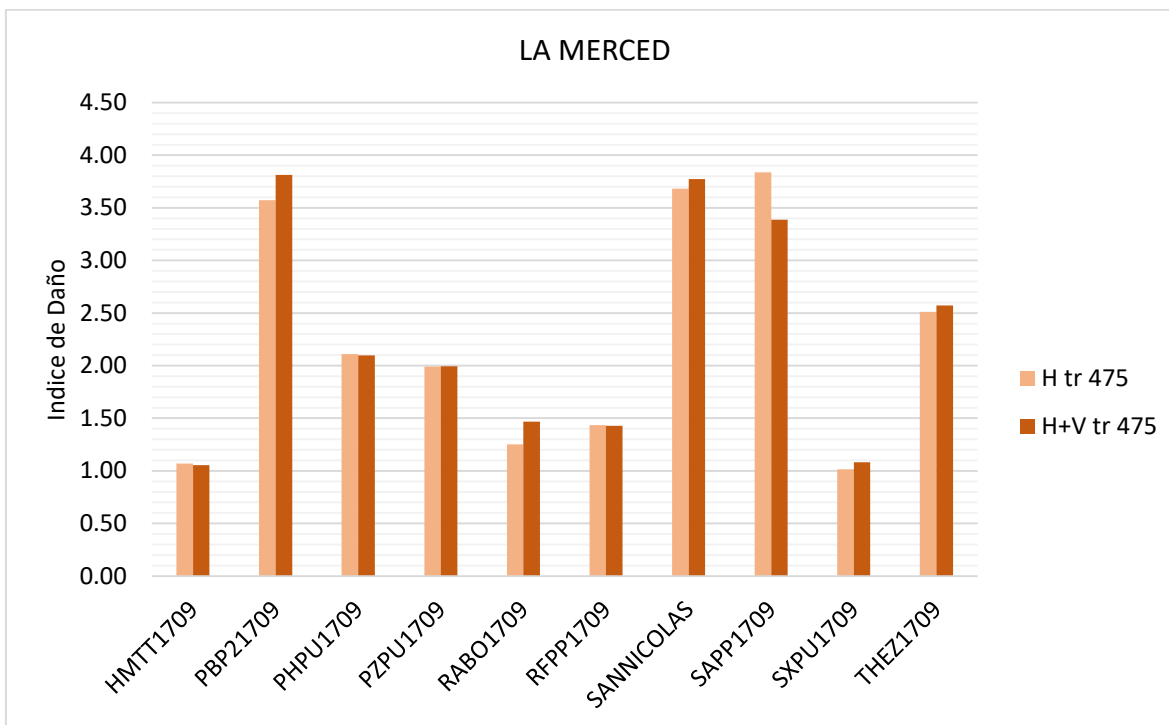


Figura 53. Grafica de los índices de daños para la Merced para un $Tr = 475$

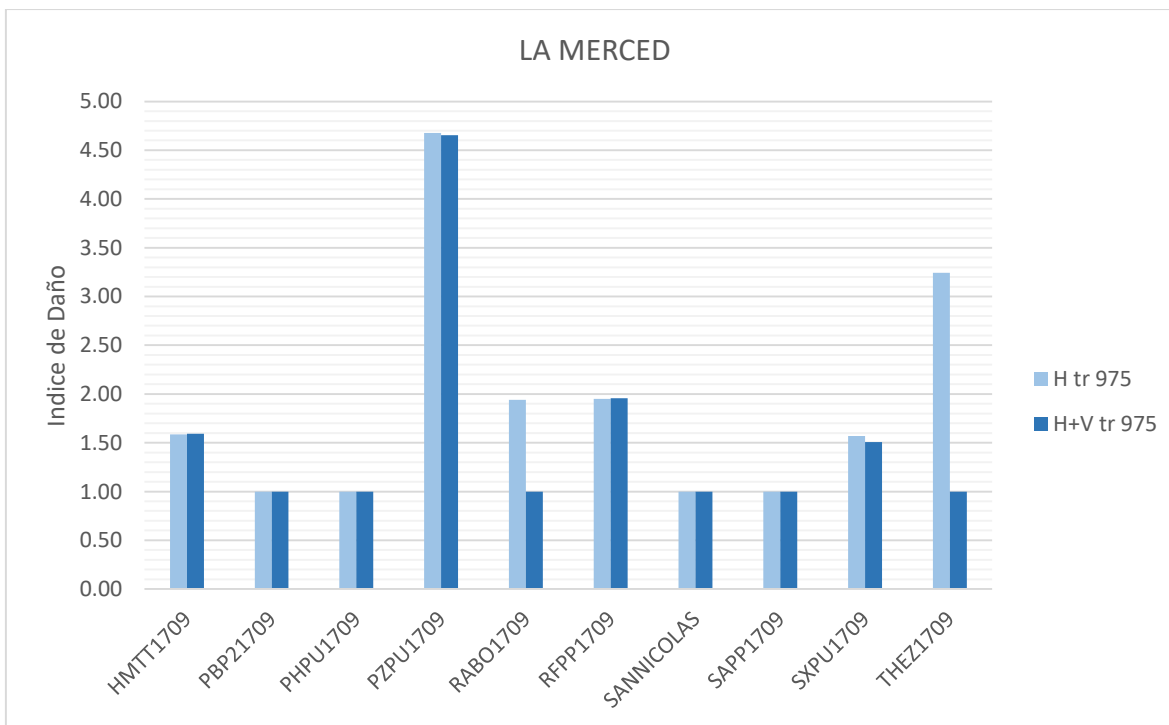


Figura 54. Grafica de los índices de daños para la Merced para un $Tr = 975$

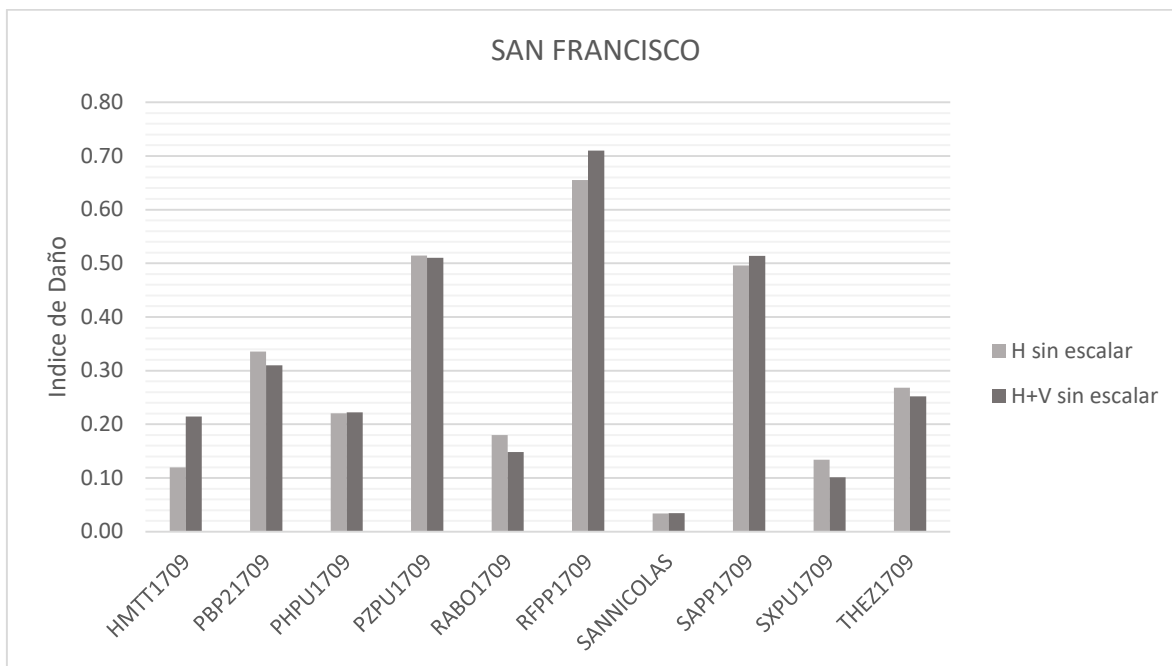


Figura 55. Grafica de los índices de daños para San Francisco sin escalar la señal del acelerograma.

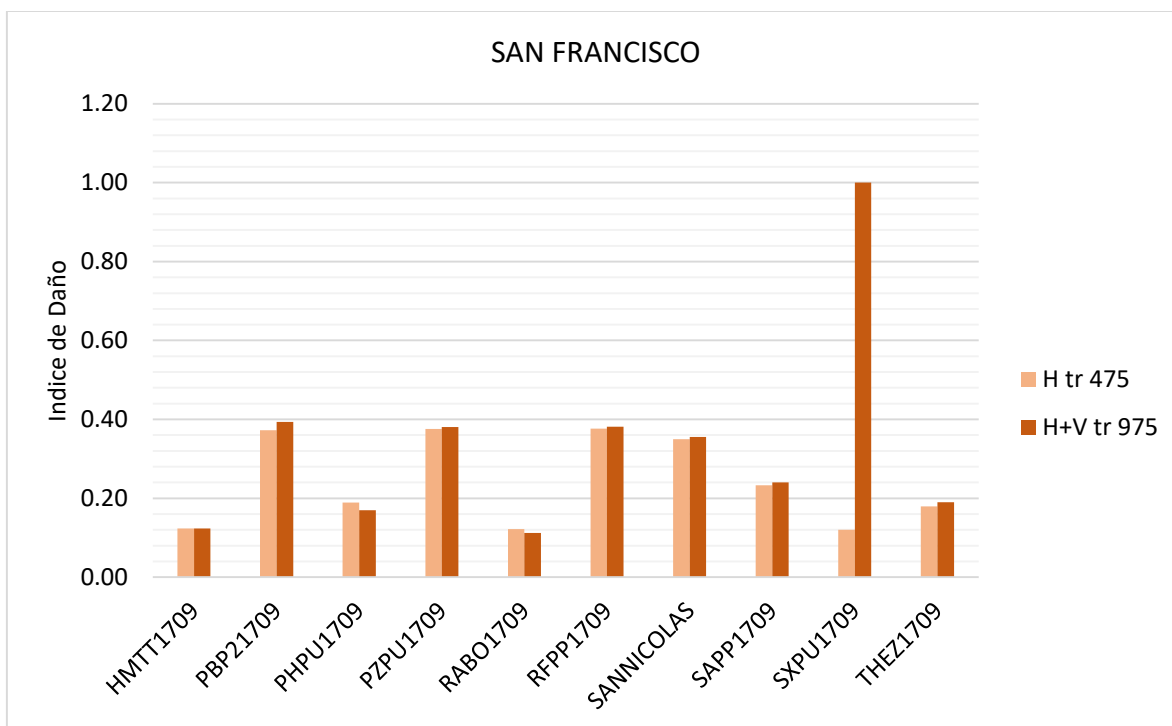


Figura 56. Grafica de los índices de daños para San Francisco para un $T_r = 475$

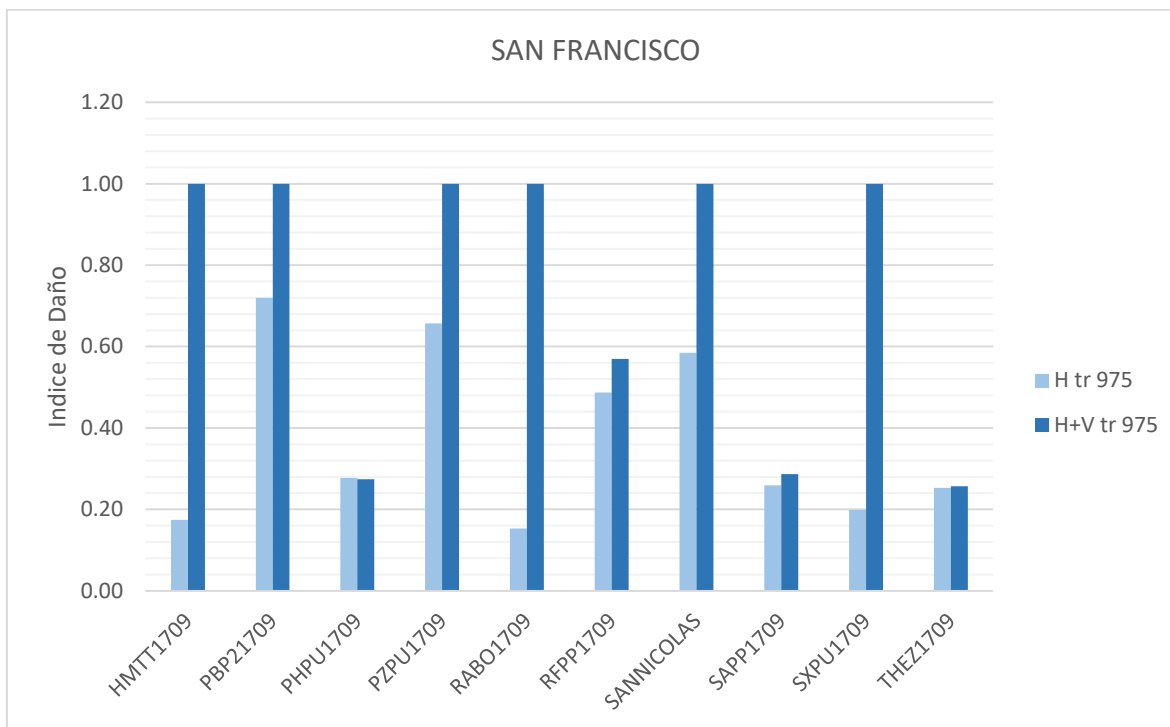


Figura 57. Grafica de los índices de daños para San Francisco para un $T_r = 975$

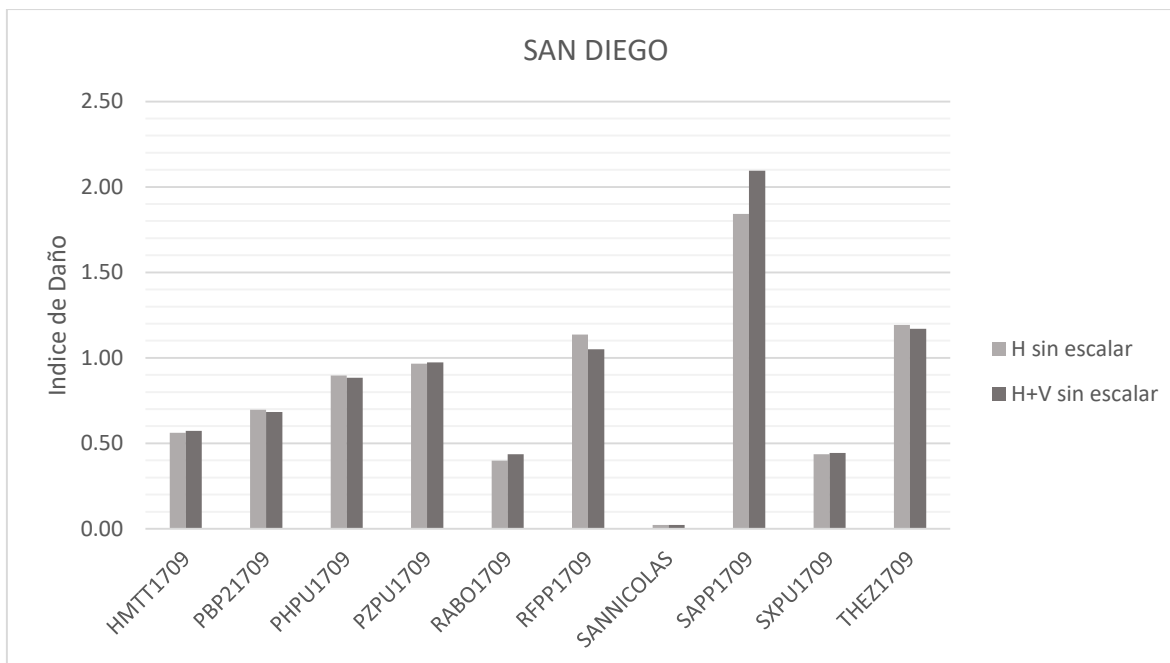


Figura 58. Grafica de los índices de daños para San Diego sin escalar la señal del acelerograma.

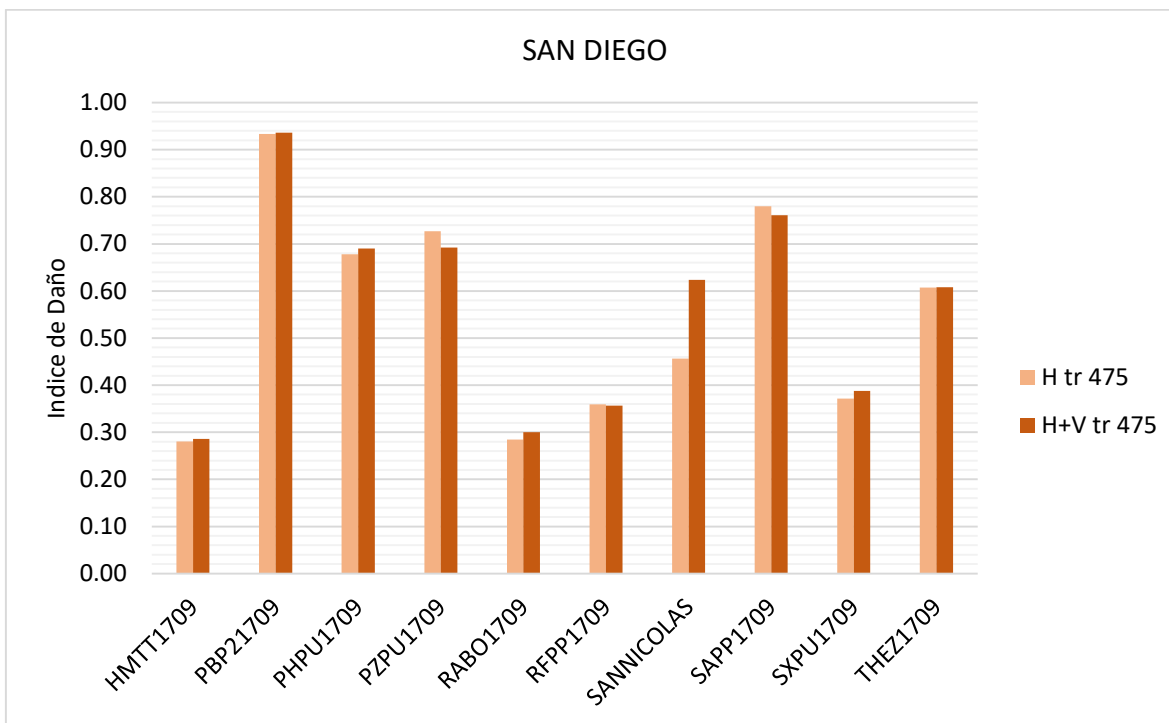


Figura 59. Grafica de los índices de daños para San Diego para un $Tr = 475$

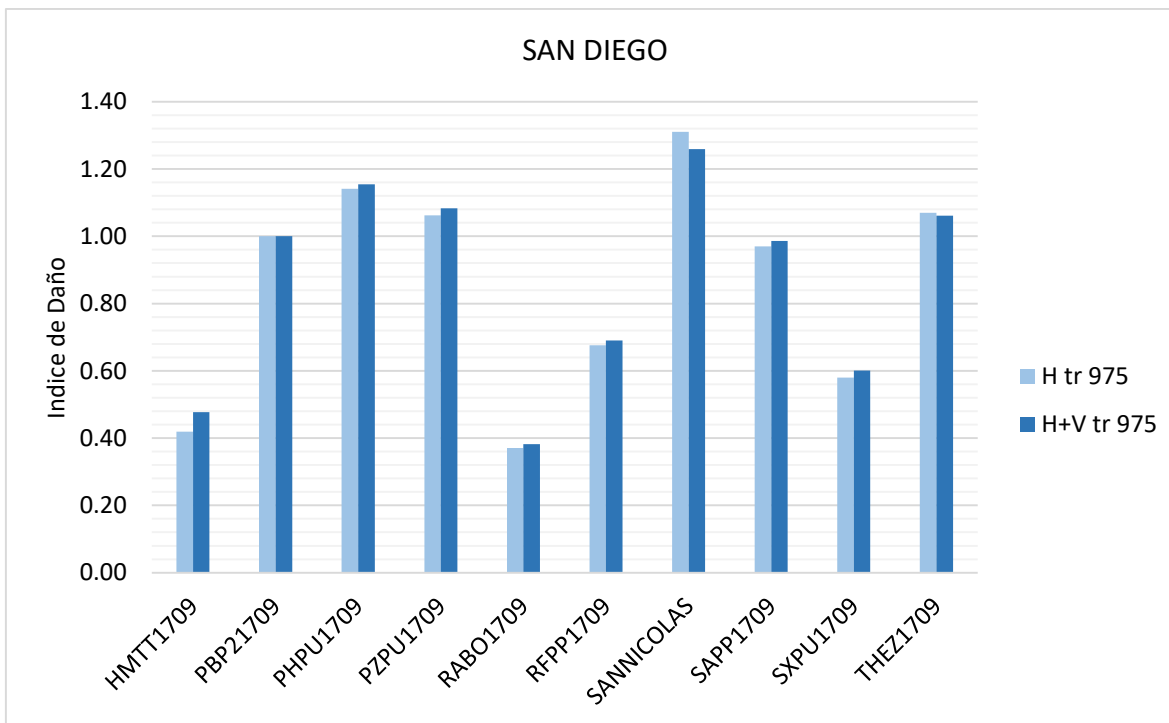


Figura 60. Grafica de los índices de daños para San Diego para un $Tr = 975$

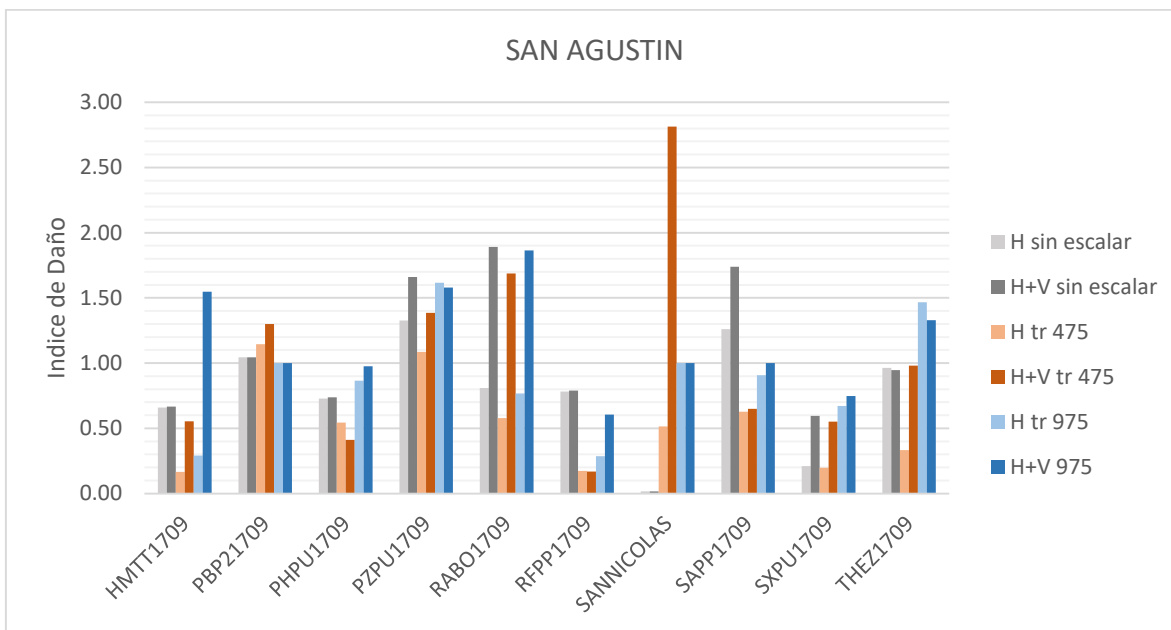


Figura 61. Grafica comparativa de los índices de daños para San Agustín.

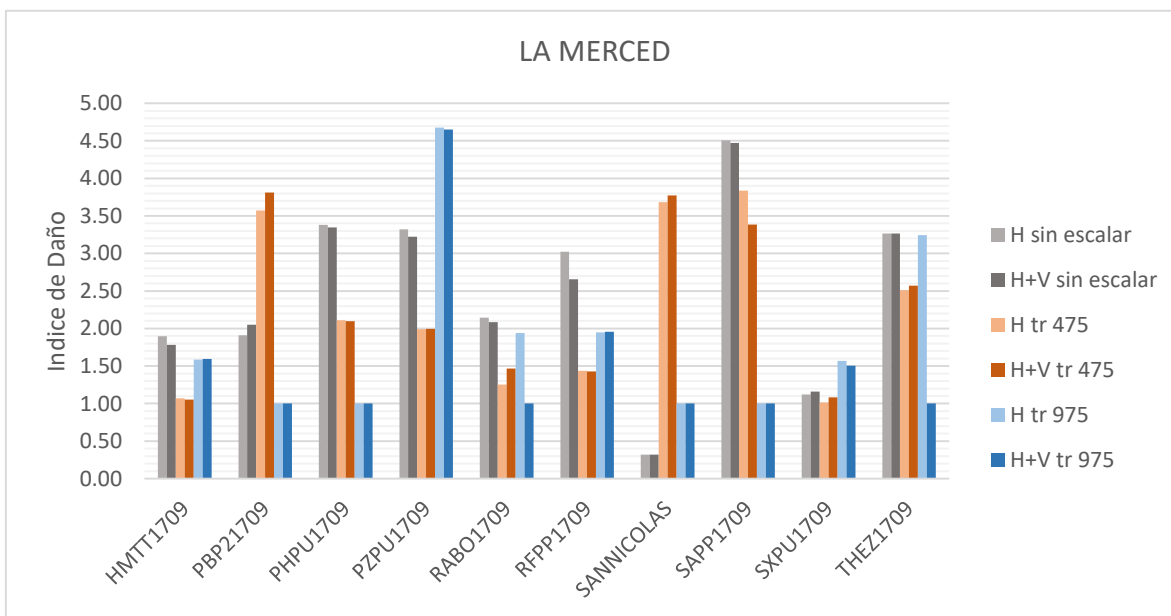


Figura 62. Grafica comparativa de los índices de daños para La Merced.

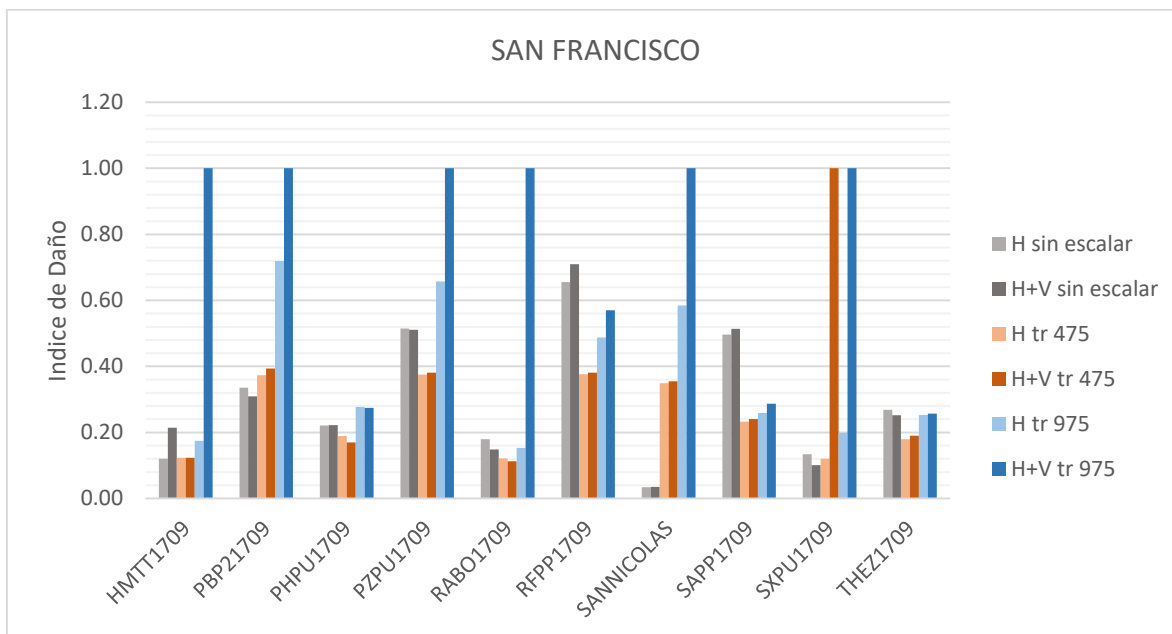


Figura 63. Gráfica comparativa de los índices de daños para San Francisco.

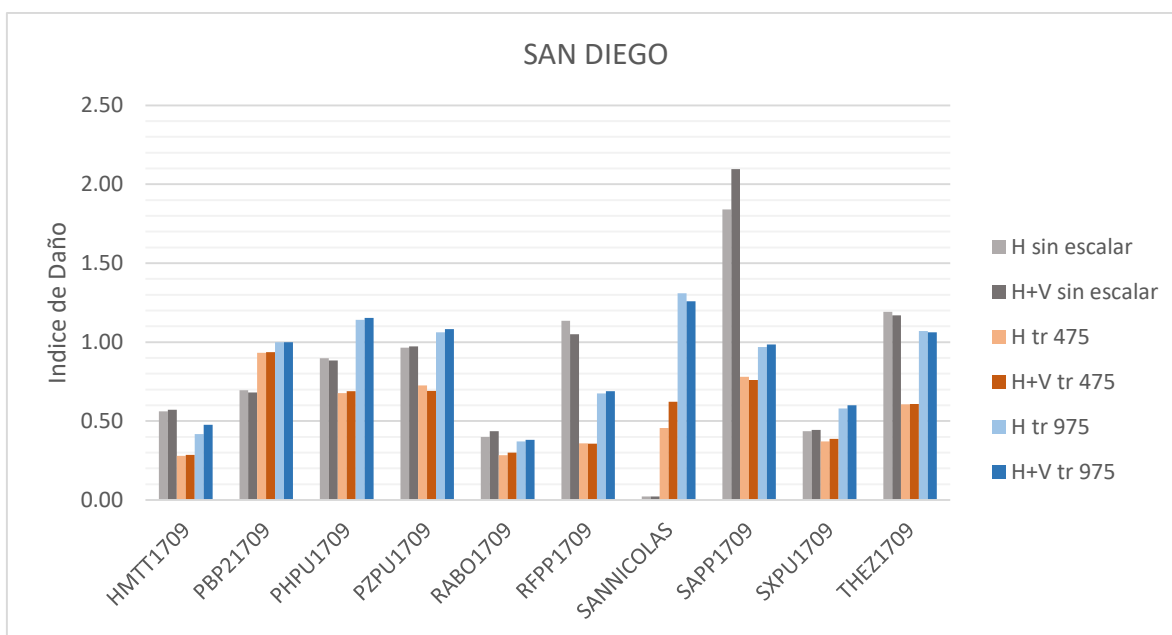


Figura 64. Gráfica comparativa de los índices de daños para San Diego.

7. ESCENARIO DE DAÑO PARA EL CENTRO HISTORICO DE MORELIA

7.1 Comportamiento estructural

En base a los resultados obtenidos de los análisis dinámicos, así como los índices calculados, se puede observar que estos conventos del centro histórico de Morelia tienen un escenario de daño desfavorable.

Para el templo y exconvento franciscano de San Buenaventura (figura 64 y 66) se puede observar que las zonas más afectadas son: la clave y la imposta, comprobando así que estos mecanismos de falla son recurrentes con los observados, también se puede observar como la parte del claustro del convento afecta la nave longitudinal, provocando que de la zona donde esta adjuntado el macroelemento sea más rígido.

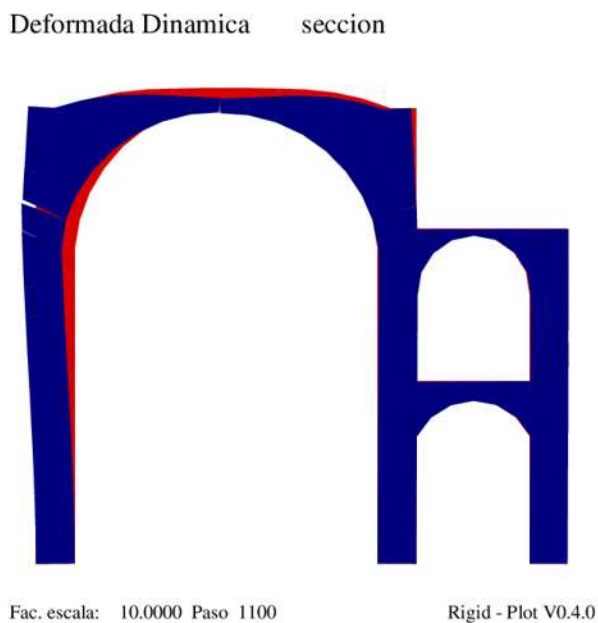


Figura 64.

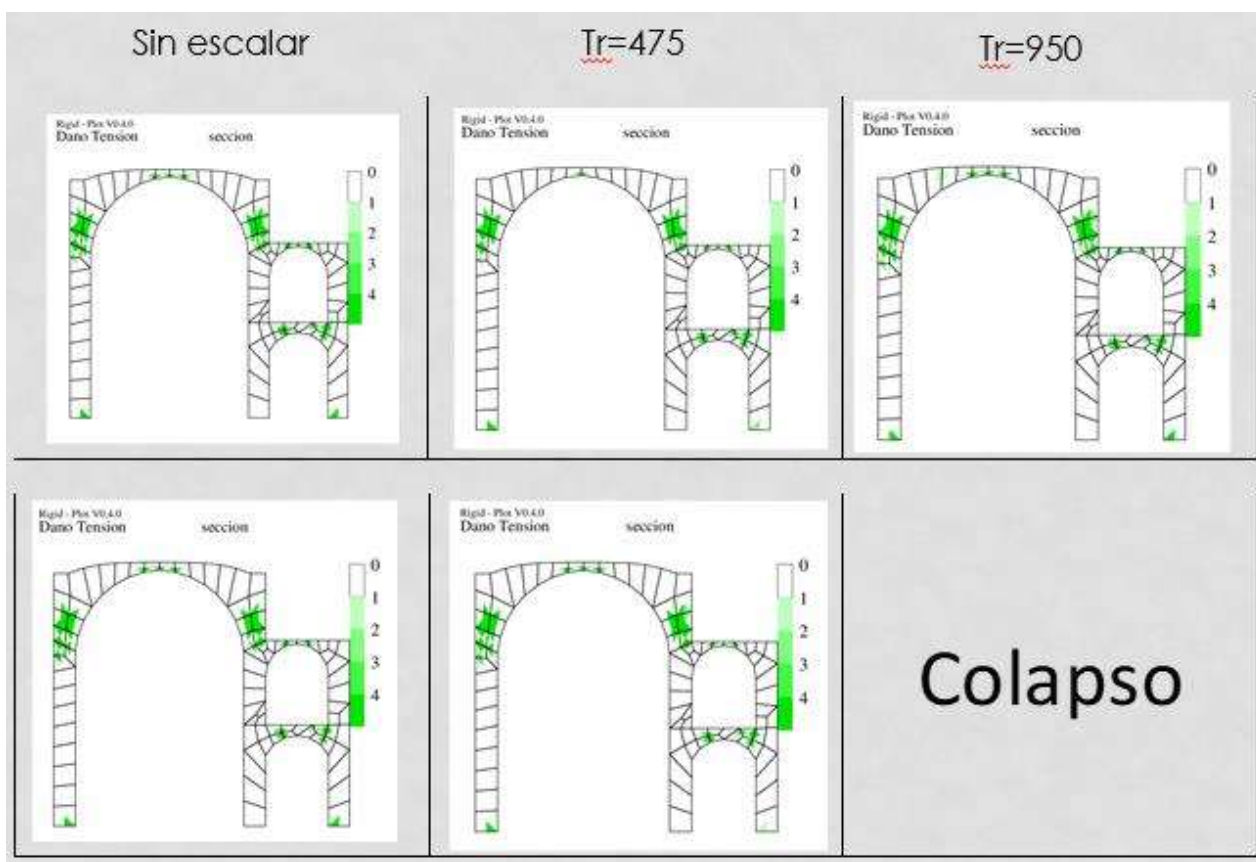
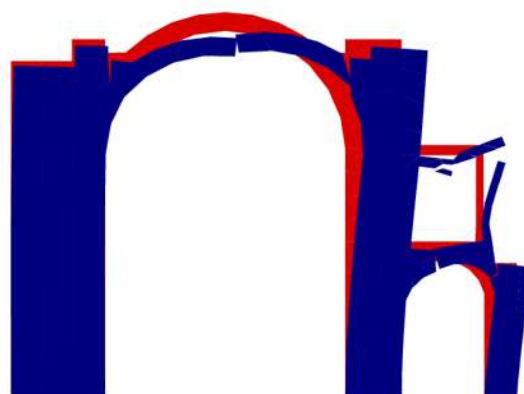


Figura 65.

En el convento de San Agustín (figura 66 y 67) se puede observar que las zonas más afectadas son: en la principal del templo la clave y la imposta, el contrafuerte presenta daños en la base y se nota claramente como rigidiza la nave principal pero que a su vez afecta la zona del claustro; en el claustro se observan daños en en el centro de las bóvedas.



Deformada Dinamica seccion



Fac. escala: 100.000 Paso 2500

Rigid - Plot V0.4.0

Figura 66.

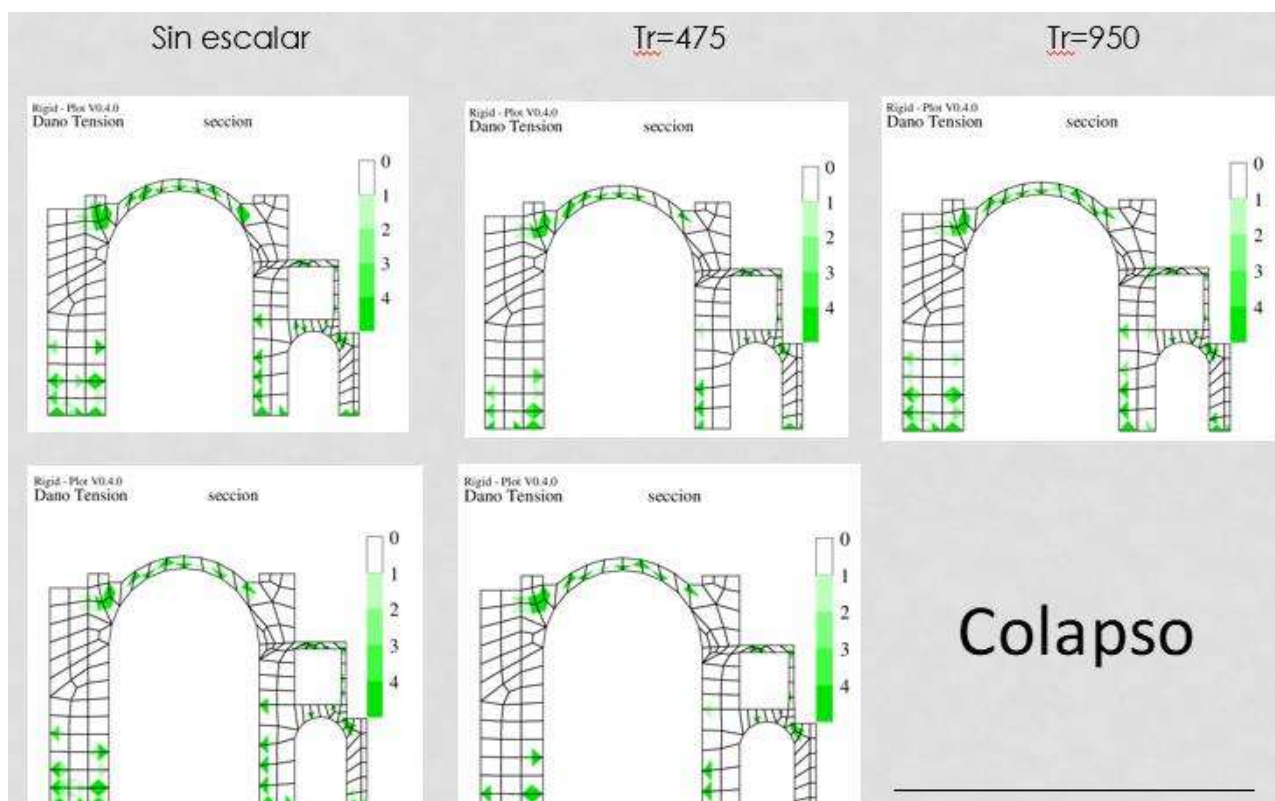


Figura 67.



En el convento de San Diego (figura 68 y 69) se puede observar que es muy rígido, debido al contrafuerte que tiene del lado de la nave y del lado del claustro, sin embargo, también se pueden observar zonas afectadas como es la parte de la clave, y la zona del extradós e intradós de la nave del templo. En la parte del claustro se observan daños en las bóvedas.

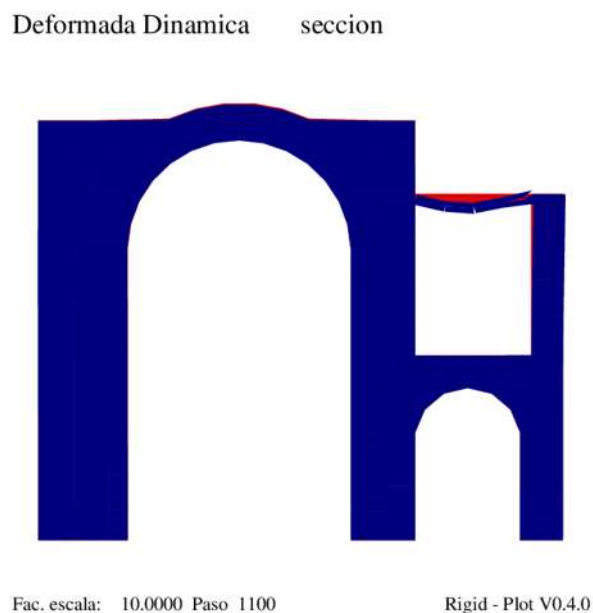


Figura 68.

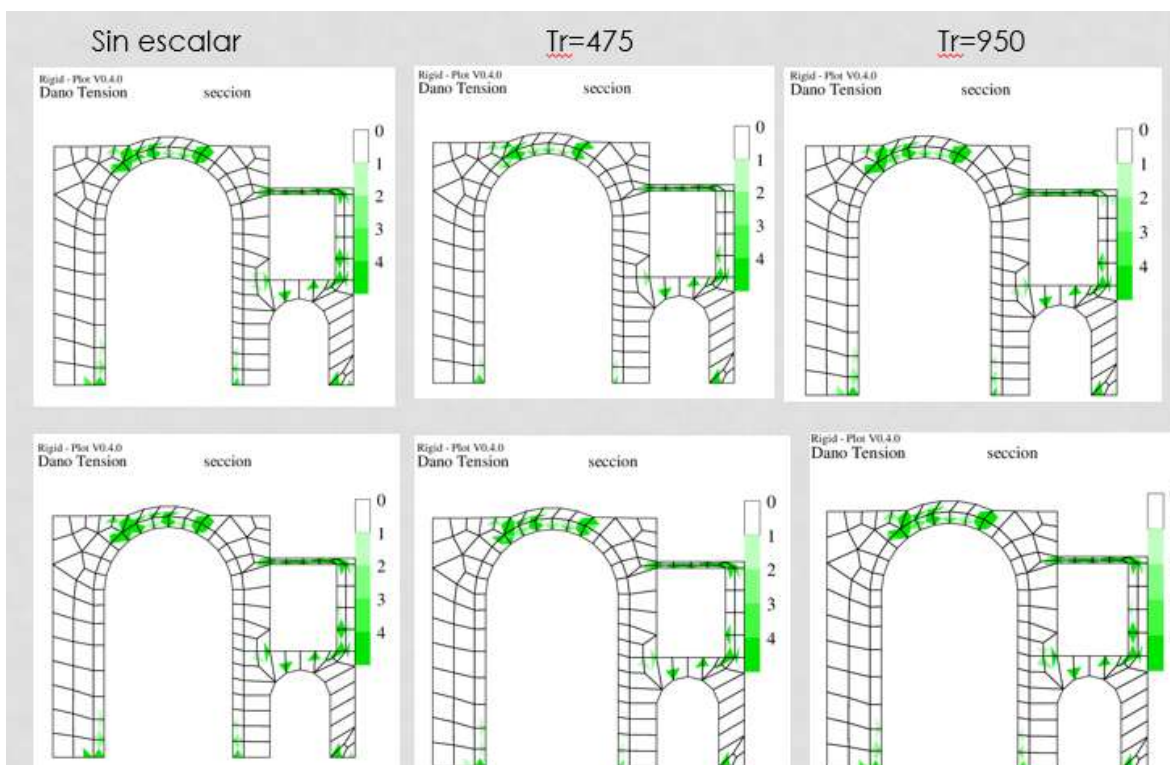
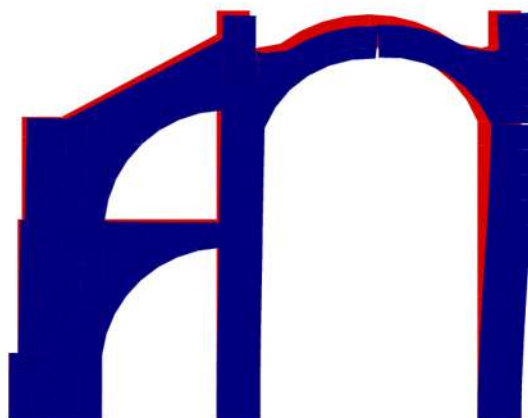


Figura 69.

En el convento de la merced (figura 70 y 71) se puede observar que es muy rígido el arbotante, sin embargo, por estar adosado a la nave del templo este le causa daños en la parte de la imposta del arco de la nave, de igual forma como una falla que se ha observado en la mayoría de los templos la zona de la clave presenta daños.



Deformada Dinamica seccion



Fac. escala: 50.0000 Paso 1100

Rigid - Plot V0.4.0

Figura 70.

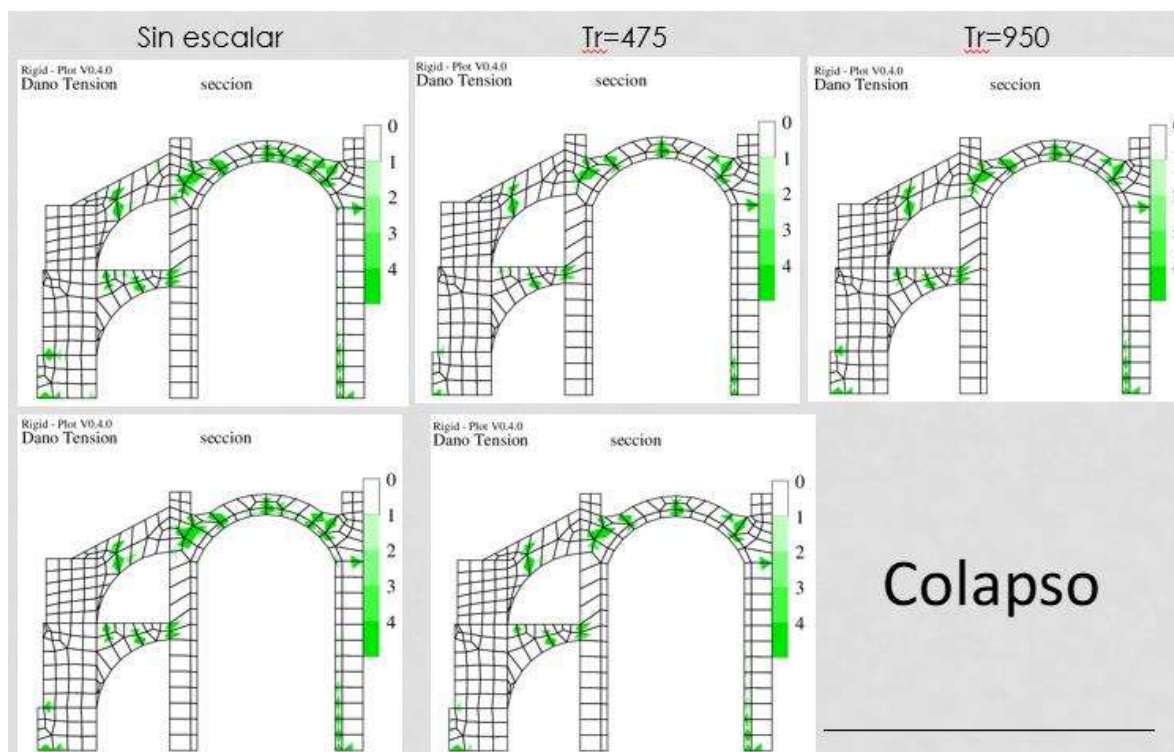


Figura 71.



8. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.

Se puede observar claramente que las zonas de daño en este tipo de estructuras si presentan un patrón recurrente, y se pueden corroborar con la información observada en campo, por lo que hacer este tipo de análisis si es viable para darnos de los mecanismos de falla y el grado de daño que esta puede tener.

También se puede observar que los daños se incrementa significativamente al considerar la componente vertical del sismo actuando simultáneamente con la componente horizontal, prevaleciendo una gran vulnerabilidad en estructuras históricas ante sismos de campo cercano, en los cuales las componentes verticales de aceleración suelen ser significativas, llegando a tener escenarios de daños desfavorables en el centro histórico de la ciudad de Morelia ya que se tiene la probabilidad de un sismo de falla normal de magnitud similar al del 19 de Septiembre del 2017 se presente en las cercanías de la ciudad

Este tipo de comportamientos en estructuras de tipo histórico se puede atribuir en primer lugar al alto nivel de asimetría existente tanto en planta como en elevación (típico de la arquitectura religiosa), ya que los diferentes macroelementos con los que cuenta (capillas, claustro, zona del coro, capilla abierta, etc) interactúan entre sí, y en segundo término, al evidente hecho de que este inmuebles tienen una gran variación de resistencias y rigideces producto de múltiples factores (edad, calidad de la cantería, nivel de deterioro, resistencia inicial, daños no visibles, etc.)

Como futuras líneas de investigación, ya que el análisis de edificaciones históricas es un campo estudiado vagamente por su complejidad, el campo de investigación es amplio. En primera instancia, se propone elaborar modelos más complejos, que tomen en cuenta la reagudización que se puede atribuir a elementos como bóvedas, el peso de cúpulas, muros perpendiculares a muros formeros, el efecto de atrios en ambos niveles y capillas o anexos laterales.



Los modelos analizados en el desarrollo de este trabajo, por el tipo de método empleado (modelos bidimensionales), no tomaron en cuenta los efectos de torsión en las estructuras, por lo que sería interesante conocer qué zonas sufren este tipo de esfuerzos y qué tanto afectan al edificio.

Ya que estamos hablando de edificios que fueron construidos entre los siglos XVI y XVIII, cabe destacar que algunas zonas de estas estructuras sufren de intemperismo, algo que no se tomó en cuenta a la hora de efectuar los análisis, por lo que se podría considerar para generar una mejor simulación del comportamiento de la estructura y poder predecir más acertadamente los posibles daños ante solicitaciones sísmicas futuras.

Así mismo se propone incrementar la muestra de los edificios en estudio esto con la finalidad de minimizar la incertidumbre asociada al comportamiento de este tipo de estructuras.



BIBLIOGRAFIA

Casolo, S. y Peña, F., *Modelo de elementos rígidos para el análisis de estructuras de mampostería*, Revista Internacional de Métodos Numéricos para el Cálculo y Diseño en Ingeniería, vol. 21, no. 2, 193-211, **2005**

Lagomarsino S., Giovanizzi S., *Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings*, Bull Earthquake Eng, **2006**

Casolo, S. y Peña, F., *Rigid element model for in-plane dynamics of masonry walls considering hysteretic behaviour and damage*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 36, 1029-1048, **2007**.

Gaytan, R., Martínez, G., Rojas, R., Roca, P., Viviescas, A., *Vulnerabilidad sísmica para el conjunto torres-fachada de la catedral de Morelia*, XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, León Guanajuato, **2010**.

Martínez, G., Rojas, R., Gaytan, R., Infante, H., *Fragilidad sísmica para las naves de la Catedral de Morelia*, XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Aguascalientes, Aguascalientes, **2011**.

Martínez, G., Rojas, R., Gaytan, R., *Caracterización Dinámica de las Torres de la Catedral de Morelia*, XVII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puebla, Puebla, **2009**

Martínez G., Rojas R., Gaytan R. *Efecto de la Componente Sísmica Vertical sobre las naves de la Catedral de Morelia*, XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Acapulco, Guerrero. **2012**.

Peña, F., Programa RIGID v.4.0.1, *Manual del usuario*, Instituto de Ingeniería, UNAM, **2010**.

Meli, R., *Los conventos mexicanos del siglo XVI: construcción, ingeniería estructural y conservación*, ed. Porrúa, **2011**

<https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Sismologia-de-Mexico.html>

<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2000ar20/executive>