



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES**

**CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA
CONSTRUCCIÓN**

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y ESTRUCTURAS

TESIS

**MODELACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL TEMPLO
DE SAN ANTONIO PARA DIFERENTES ESTADOS DE DEGRADACIÓN
DEL MATERIAL**

PRESENTA

DANIEL GAXIOLA APODACA

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL
EN EL ÁREA DE ESTRUCTURAS**

TUTOR

DR. JESÚS PACHECO MARTÍNEZ

INTEGRANTES DEL COMITÉ TUTORAL

**MRSM. JORGE GUADALUPE VILLANUEVA CLAVEL
DR. JOSÉ ÁNGEL ORTIZ LOZANO**

AGUASCALIENTES, AGS., 18 DE SEPTIEMBRE DE 2018

AUTORIZACIONES





FORMATO DE CARTA DE VOTO APROBATORIO


M. EN FIL. OMAR VÁZQUEZ GLORIA
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

PRESENTE

Por medio del presente como Tutor designado del estudiante **DANIEL GAXIOLA APODACA** con ID 224325 quien realizó la tesis titulado: **MODELACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL TEMPLO DE SAN ANTONIO PARA DIFERENTES ESTADOS DE DEGRADACIÓN DEL MATERIAL**, y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla, y así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

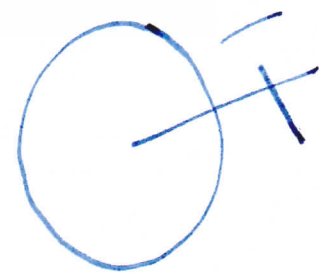
Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"
Aguascalientes, Ags., a 18 de Septiembre de 2018.


Dr. Jesús Pacheco Martínez
Tutor de tesis

MRSM. Jorge Guadalupe Villanueva Clavel
Cótutor de tesis


Dr. José Ángel Ortiz Lozano
Asesor de tesis



- ✓ c.c.p.- Interesado – Daniel Gaxiola Apodaca
- c.c.p.- Secretario de Investigación y Posgrado – Dr. Ricardo Arturo López León
- c.c.p.- Jefatura del Depto. de Construcción y Estructuras – Dr. Sergio Ignacio Martínez Martínez
- c.c.p.- Consejero Académico – Dr. José Ángel Ortiz Lozano
- c.c.p.- Minuta Secretario Técnico

Dra. María del Carmen Martínez Serna
Dirección General de Investigación y Posgrado
PRESENTE

Por medio de este conducto informo que el documento final de tesis titulado: "MODELACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL TEMPLO DE SAN ANTONIO PARA DIFERENTES ESTADOS DE DEGRADACIÓN DEL MATERIAL".
Presentado por el sustentante: Daniel Gaxiola Apodaca con ID: 224325, egresado de la Maestría en Ingeniería Civil cumple las normas y lineamientos establecidos institucionalmente. Cabe mencionar que el autor cuenta con el voto aprobatorio correspondiente.

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

ATENTAMENTE
Aguascalientes, Ags., 20 de septiembre de 2018.
"SE LUMEN PROFERRE"


M. en Fil. Omar Vázquez Gloria
Decano del Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción

c.c.p.- Dr. Ricardo Arturo López León – Secretario de Investigación y Posgrado del CCDC.
c.c.p.- Dr. Miguel Ángel Soto Zamora – Secretario Técnico de la Maestría en Ingeniería Civil.
c.c.p.- Dr. Jesús Pacheco Martínez – Tutor de tesis.
~~c.c.p.-~~ Ing. Daniel Gaxiola Apodaca – Egresado de la Maestría en Ingeniería Civil.
c.c.p.- Lic. Delia Guadalupe López Muñoz – Jefe Sección de Certificados y Títulos.
c.c.p. - Archivo

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia por todo el apoyo brindado durante la maestría y a lo largo de mi vida, por siempre alentarme a salir adelante y superarme, gracias por su trabajo y sacrificios, este logro no hubiera sido posible sin ustedes.

A mis compañeros y amigos que siempre estuvieron ahí para ayudar y a todos mis profesores por compartir su conocimiento y experiencia.

A mi tutor Dr. Jesús Pacheco Martínez por la paciencia y dedicación a este proyecto, gracias por la confianza otorgada desde el inicio, a mis asesores Dr. José Ángel Ortiz Lozano y MRSM. Jorge Villanueva Clavel, por su amabilidad y valiosos consejos

A la Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA) por las facilidades otorgadas para estudiar la maestría, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca recibida durante la maestría.

DEDICATORIAS



A mi familia, en especial a
mis padres y hermanas .

INDICE GENERAL

INDICE GENERAL.....	1
INDICE DE TABLAS.....	3
INDICE DE FIGURAS.....	4
RESUMEN.....	5
ABSTRACT	6
CAPITULO I INTRODUCCION.....	8
1.1 Antecedentes.....	8
1.2 Definición del Problema.....	11
1.3 Objetivo General.....	12
1.4 Objetivos Particulares.....	13
1.5 Alcances.....	14
1.6 Justificación.....	14
1.7 Hipótesis.....	16
1.8 Metodología.....	16
CAPITULO II ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO.....	19
CAPITULO III MARCO TEÓRICO.....	25
3.1 Importancia de los Monumentos Históricos.....	25
3.2 Mampostería.....	28
3.2.1 Generalidades.....	28
3.2.2 Degradación de la mampostería.....	30
3.3 Análisis modal.....	35
3.4 Templo de San Antonio.....	37
3.4.1 Estudios previos del Templo de San Antonio.....	38
CAPITULO IV DISEÑO EXPERIMENTAL.....	41
CAPITULO V RESULTADOS.....	47
CAPITULO VI DISCUSION DE RESULTADOS.....	63

CAPITULO VII CONCLUSIONES..... 67
REFERENCIAS 69
ANEXO A 76



INDICE DE TABLAS

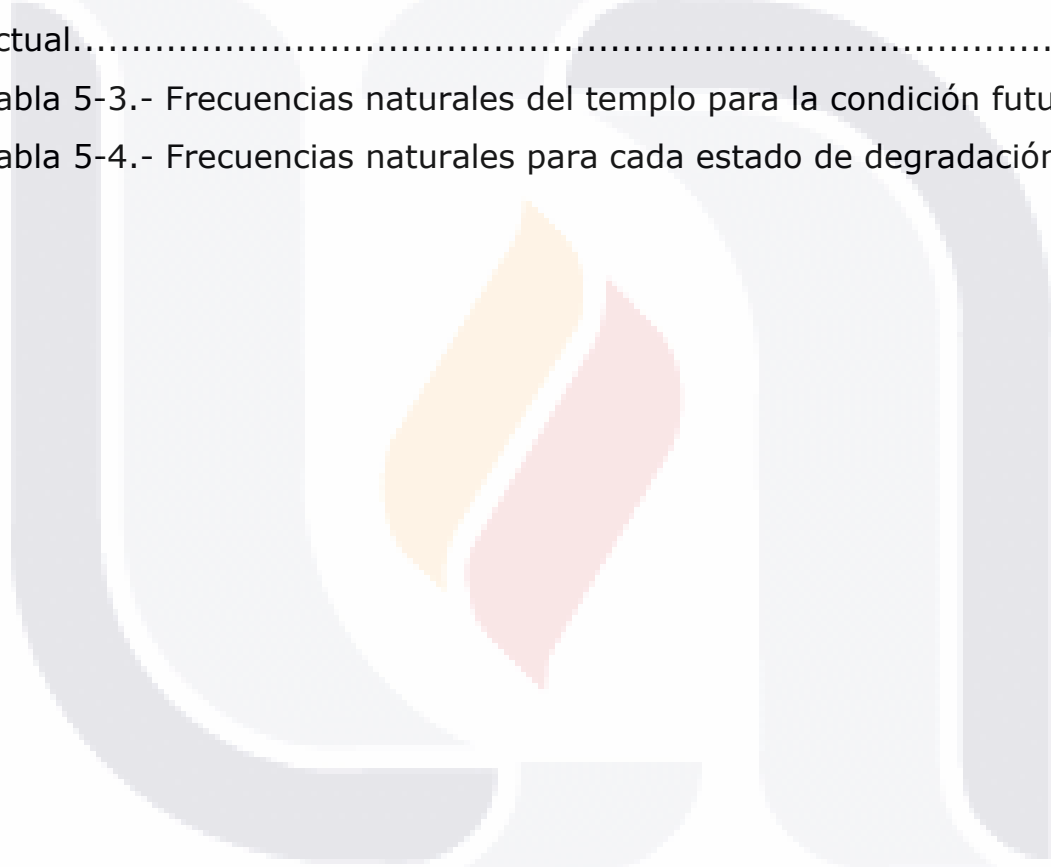
Tabla 4-1.- Tipo de mampostería y espesor de cada grupo del modelo.
..... 42

Tabla 5-1.- Frecuencias naturales de la estructura para la condición
inicial. 51

Tabla 5-2.- Frecuencias naturales de la estructura para la condición
actual..... 53

Tabla 5-3.- Frecuencias naturales del templo para la condición futura. 55

Tabla 5-4.- Frecuencias naturales para cada estado de degradación... 57



INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1.- Comportamiento estructural en diferentes estados de degradación del edificio. 11

Figura 3-1.- Localización del templo de San Antonio. 37

Figura 3-2.- Diferentes tipos de mampostería presentes en el templo. 38

Figura 5-1.- Modelo geométrico del Templo de San Antonio. 48

Figura 5-2.- Frecuencias naturales del templo para la condición inicial. 52

Figura 5-3.- Frecuencias naturales del templo para la condición actual. 54

Figura 5-4.- Frecuencias naturales del templo para la condición futura. 56

Figura 5-5.- Frecuencias naturales para cada estado de daño. 58

Figura 6-1.- Grafica resumen de las frecuencias encontradas por Hernández (2018) en la estructura del templo de San Antonio. 64

RESUMEN

En esta investigación se presentan los resultados del análisis numérico realizado a una estructura construida a base de sistemas de mampostería de piedra en el siglo XIX, el objeto de estudio se trata del Templo de San Antonio ubicado en la ciudad de Aguascalientes, México. Se trata de un análisis modal realizado en diferentes softwares de análisis de estructuras por elemento finito, para determinar los modos de vibrar del edificio al variar las propiedades mecánicas de la mampostería, simulando diferentes niveles de degradación por efecto de la cristalización de sales. Se tomaron tres estados de degradación, el inicial considerando la mampostería recién construida, el segundo considerando las condiciones actuales de la mampostería y finalmente considerando una condición avanzada de degradación. Con los resultados obtenidos se realizó una correlación de las frecuencias naturales del edificio con el grado de degradación de la mampostería para encontrar la función de decaimiento que describa el comportamiento de la frecuencia natural, con dicha función es posible determinar la frecuencia natural de la estructura para próximos niveles de degradación en la mampostería.

ABSTRACT

This research presents the results of the numerical analysis carried out on a structure built on the basis of stone masonry systems in the 19th century. The object of study is the San Antonio Temple located in the city of Aguascalientes, Mexico. It is a modal analysis carried out in different software for the analysis of structures by finite element, to determine the modes of vibrating the building by varying the mechanical properties of the masonry, simulating different levels of degradation due to the crystallization of salts. Three degradation stages were taken, the initial considering the newly constructed masonry, the second considering the current conditions of the masonry and finally considering an advanced condition of degradation. With the results obtained, a correlation of the natural frequencies of the building with the degree of degradation of the masonry was made to find the function of decay that describes the behavior of the natural frequency, with this function it is possible to determine the natural frequency of the structure for next levels of degradation in the masonry.



CAPITULO
I
INTRODUCCION

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

CAPITULO I INTRODUCCION

1.1 Antecedentes

Se considera edificio histórico a aquella construcción que forma parte de la historia de una población y es un testimonio vigente de sus tradiciones, además puede ser considerado como patrimonio de la humanidad (Herrera, 2011).

En México y en Aguascalientes la mayoría de los edificios históricos están contruidos con sistemas constructivos de mampostería, la cual es un material compuesto que resulta del arreglo de piezas pétreas, que pueden ser naturales o artificiales, unidas con algún cementante.

Debido a la importancia cultural y social de las construcciones históricas, su integridad es muy importante para el patrimonio histórico de la localidad a la que pertenecen, pero la conservación de estas estructuras requiere un estudio multidisciplinario complejo, debido a que: a) la modelación geométrica se complica por el hecho de que la arquitectura de este tipo de edificios, presentan formas complicadas en toda la edificación; b) La caracterización mecánica de los diferentes tipos de mampostería es una tarea difícil por los distintos materiales pétreos usados en la construcción de un mismo edificio, además las restricciones intrínsecas al carácter histórico del edificio limitan a usar pruebas no destructivas; c) La modelación numérica es una complicada tarea porque el estudio del comportamiento mecánico de la mampostería es un tema reciente (Peña Mondragón, Rivera Vargas, Robles Avilés, & Arce León, 2013).

Pese al solventar esta problemática, se ha considerado el comportamiento mecánico de la mampostería totalmente elástico con

perdida brusca de resistencia, sin considerar la existencia de ablandamiento o degradación de las propiedades mecánicas del material. Este comportamiento de la mampostería simplificado y se ha considerado inclusive en el análisis numérico de estructuras que presentan señales de deterioro (Roeder Carbo, 2004).

En un edificio la capacidad estructural está dada por su masa, rigidez y su capacidad de disipar energía, pero estas propiedades pueden verse afectadas por diversos agentes. Uno de los principales factores es la degradación de los materiales con que está construido, que es proporcional a la edad del edificio. Debido a que al paso del tiempo las construcciones están sometidas a diversas sollicitaciones tanto internas como externas a la construcción, se origina un proceso de deterioro de los materiales y un cambio en el comportamiento mecánico de la estructura. Es por esto que conforme avanza la edad de las construcciones se va perdiendo capacidad estructural, es decir, sufre una degradación gradual en sus propiedades mecánicas y dinámicas (Animas Rivera, 2015).

Para dimensionar el deterioro de las propiedades mecánicas de un edificio histórico, sería necesario hacer una comparación entre dos estados de la condición de deterioro. Bastaría con contrastar el comportamiento estructural del edificio recién construido, con su comportamiento actual para cuantificar lo que ha afectado la degradación al sistema (Animas Rivera, 2015).

En el caso de edificios históricos su antigüedad sugiere que su comportamiento estructural se ha reducido considerablemente si se pudiera comparar su estado actual con su estado inicial.

Recientemente se han desarrollado diversas técnicas para modelar estructuras de mampostería. Una de ellas es el método de elementos finitos, que gracias al avance de la computación y a los nuevos programas informáticos ha tenido un gran auge y es cada vez más utilizado para analizar estructuras. Un gran progreso en este método fue la incorporación de procedimientos para la solución de ecuaciones no lineales, lo que ha facilitado el estudiar el comportamiento del material fuera del rango elástico (Roeder Carbo, 2004).

Con el fin de establecer cuanto es que afecta la degradación en la capacidad estructural, un indicador que puede servir para este propósito es el cálculo de las propiedades dinámicas de la estructura, el cual se consigue mediante un análisis modal de elemento finito (Animas Rivera, 2015).

Estas propiedades son las frecuencias naturales de vibración, los modos naturales y el amortiguamiento; la frecuencia natural de vibración se define como la frecuencia a la que vibrará la estructura, después de ser perturbada de su posición inicial y se deja vibrar con libertad sin otro tipo de excitación externa y sus unidades son radianes por segundo o ciclos por segundo según sea circular o cíclica (Chopra, 2014).

Debido a que estas propiedades dependen únicamente de la masa y rigidez de la estructura es posible utilizar la frecuencia natural como parámetro para medir el nivel de daño (Clinton, et al., 2006).

Este parámetro permitiría hacer la comparación de los diferentes estados de degradación de la estructura, y usar estos datos para realizar una proyección a futuro y calcular el tiempo en que el comportamiento de la estructura puede ser inestable, poniendo en riesgo la estabilidad

del edificio, y se puedan tomar medidas que aseguren la conservación de este tipo de estructuras. (Figura 1-1)

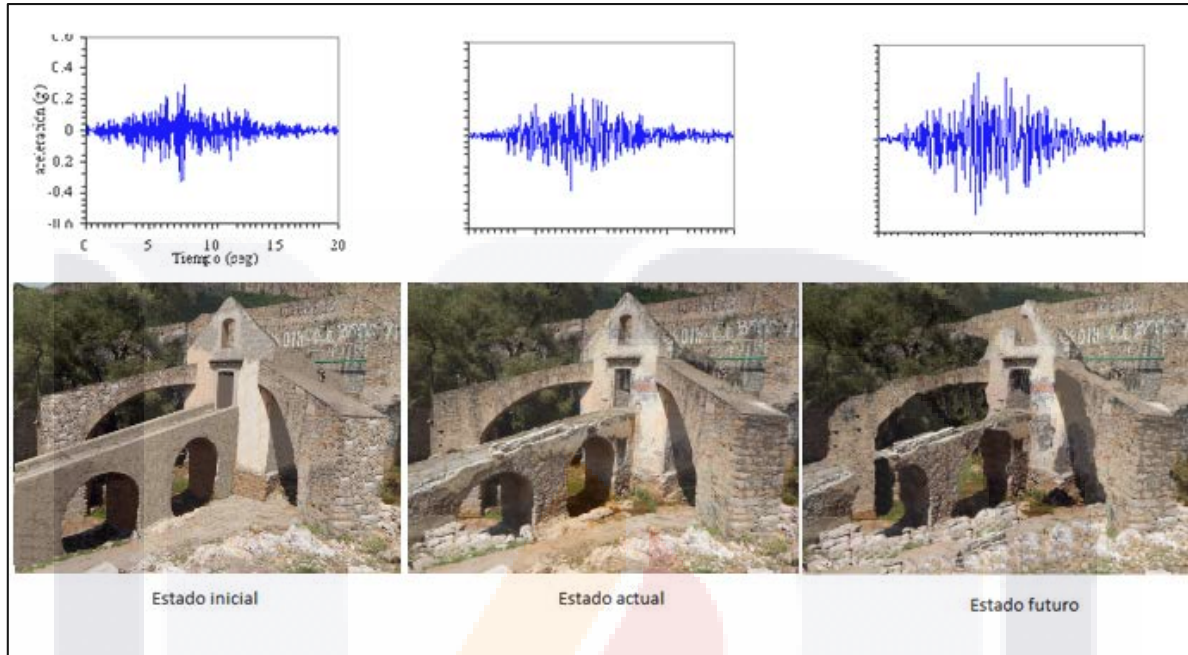


Figura 1-1.- Comportamiento estructural en diferentes estados de degradación del edificio. (Elaboración propia)

1.2 Definición del Problema

Actualmente no se conoce cómo evoluciona el comportamiento estructural de un edificio histórico desde su construcción hasta su estado actual, y no se conoce cómo podría ser su comportamiento en el futuro considerando los efectos de la degradación de los materiales por efecto del intemperismo.

Existen varios autores que se dedican al estudio del comportamiento estructural de edificios históricos. Dichos estudios se enfocan en determinar el estado de daño actual de una estructura, utilizando datos experimentales y modelos numéricos para conocer el comportamiento de la estructura (Carpinteri, Invernizzi, & Lacidogna, 2005) (Lee & Kim,

2015) (Gentile & Saisi, 2013) (Ramos et al., 2010) (Yuen & Kuok, 2010).

Aunque estas investigaciones aportan información sobre el comportamiento actual de la estructura, no proporcionan información sobre su comportamiento para un escenario futuro considerando el material con un grado de degradación mayor debida al intemperismo, ya que los edificios antiguos han pasado por un proceso de degradación importante y su capacidad estructural va disminuyendo a través del tiempo.

De lo anterior surge la necesidad de profundizar en cómo el efecto de la degradación del material afecta la capacidad estructural del edificio. Una cuestión de interés práctico que surge es la de ¿cómo será el comportamiento a futuro de un edificio patrimonial?, ¿Se podrá identificar el comportamiento del edificio justo antes de que sea estructuralmente inestable?

De ahí que este trabajo se enfoca en encontrar una metodología para evaluar el decaimiento del comportamiento estructural de un edificio a través del tiempo debido a la degradación de sus materiales. La metodología serviría en primer lugar para conocer la capacidad estructural del edificio a lo largo de su historia, y en segundo lugar para estimar el comportamiento del edificio en un futuro cuando esté próximo a ser estructuralmente inestable.

1.3 Objetivo General

Determinar el comportamiento estructural del templo de San Antonio en diferentes estados de degradación de los materiales para

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

determinar el tiempo para el cual el templo podría tener un comportamiento estructural inestable debido a la degradación de la mampostería.

1.4 Objetivos Particulares

- Revisar el estado del arte para conocer cuánto se ha investigado sobre el tema.
- Recopilar modelos numéricos de otras investigaciones aplicables al análisis del templo de San Antonio.
- Realizar un análisis del comportamiento actual de la estructura del templo con los datos de propiedades mecánicas determinadas en otros trabajos sobre el templo (condición actual).
- Apoyar en campaña experimental a la investigación sobre la caracterización de la degradación de los materiales del templo de San Antonio.
- Realizar un Análisis modal del comportamiento estructural del templo con diferentes estados de degradación de los materiales.
- Comparar los resultados realizados utilizando software privativo y open source.
- Definir el comportamiento (análisis modal) asociado y el tiempo probable a el estado estructural para el cual el edificio tendrá un comportamiento estructural inestable debido a la degradación de los materiales.

1.5 Alcances

- El presente proyecto tiene como objeto de estudio el templo de San Antonio ubicado en la ciudad de Aguascalientes, Ags.
- Para analizar el comportamiento estructural de esta edificación, se utilizará software de análisis basado en el método de elementos finitos. Se realizarán análisis modal para los diferentes estados de degradación de los materiales. La investigación está limitada a utilizar, para el análisis estructural, modelos geométricos del templo generados en trabajos previos.
- Para hacer las respectivas comparaciones del comportamiento estructural del edificio, el tipo de análisis utilizado fue el análisis modal que permite conocer los modos de vibrar del templo, y estos utilizarlos como indicador de la capacidad estructural.

1.6 Justificación

El concepto de Patrimonio Cultural comprende un valor heredado por parte de nuestros ancestros. Está compuesto por los bienes culturales que la historia ha otorgado a una nación, y a los que la sociedad ha atribuido importancia histórica, científica, simbólica y estética (Animas Rivera, 2015).

Una parte importante del patrimonio cultural se refiere al patrimonio Edificado o arquitectónico, que son todos aquellos edificios, estructuras y monumentos que tienen un valor cultural. La importancia de estas construcciones viene dada por: su estilo arquitectónico, arte en los elementos que le dan identidad, beneficios económicos directos o

indirectos, el valor cultural histórico y la concepción estructural en las antiguas técnicas y materiales de construcción.

Es por este valor que actualmente la Conservación del patrimonio arquitectónico es considerado esencial para la sociedad, ya que, por su valor como legado cultural y evidencia de los pueblos, influye positivamente contribuyendo económicamente mediante el turismo.

Por tal razón recientemente la ingeniería estructural se ha enfocado en el estudio de estructuras antiguas de mampostería con el objetivo de conocer el efecto de los daños por intemperismo y solicitaciones extremas en su comportamiento estructural. Sin embargo, aún es complicado reproducir el comportamiento real debido a la heterogeneidad de sus materiales.

Entonces, es de interés el determinar la condición estructural actual del edificio, pero también es de interés hacer inferencias sobre su condición estructural futura ante diferentes escenarios de solicitudes y de degradación del material. El conseguir lo anterior permitiría a los tomadores de decisiones en materia de conservación del patrimonio edificado, conseguir información cuantitativa para realizar una restauración preventiva enfocada a garantizar la seguridad estructural del edificio.

Los resultados de este estudio tienen interés científico-técnico para la comunidad internacional que trabaja en la conservación del patrimonio, ya que la metodología se pudiera aplicar para cualquier edificio en otras regiones del mundo. Los resultados, además, ampliaron el conocimiento de la condición estructural actual y futura del Templo de San Antonio, el cual está catalogado por el Instituto Nacional de Antropología e Historia

como Monumento Histórico y el Gobierno del Estado como Patrimonio Cultural de Aguascalientes.

1.7 Hipótesis

Es posible determinar el comportamiento estructural futuro de un edificio patrimonial a partir de la elaboración de una curva de decaimiento de su comportamiento estructural que incluya la historia de degradación de sus materiales.

1.8 Metodología

Este trabajo integró la información de otras investigaciones para desarrollar un análisis numérico que permitió predecir el comportamiento futuro de una estructura. Para ello la metodología documental y teórica incluyó las actividades que se describen a continuación:

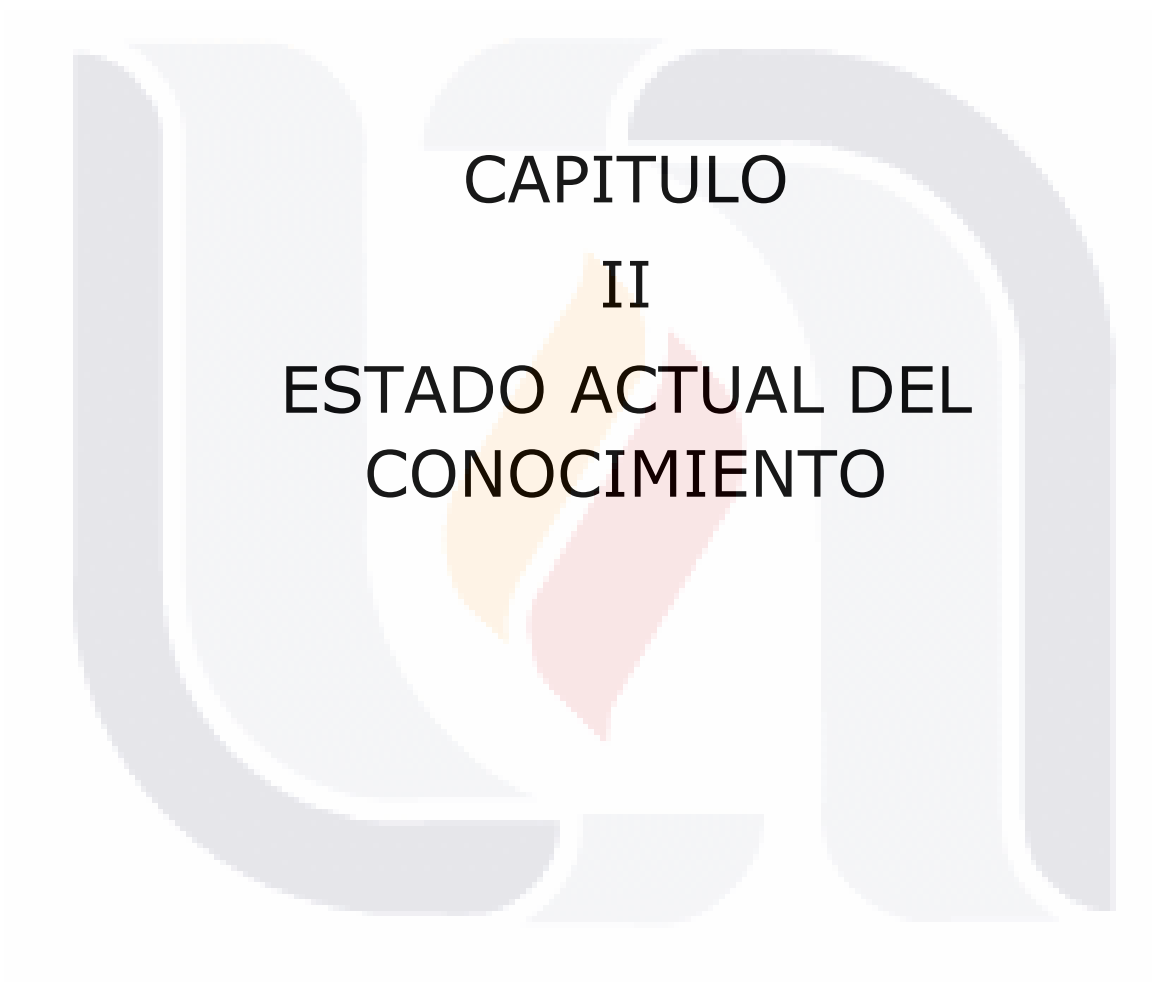
Un estudio del estado actual del conocimiento sobre el tema, para profundizar en los fundamentos teóricos y avances reportados en otros trabajos que aporten en la solución de la problemática planteada en el proyecto.

La Aplicación de herramientas numéricas de análisis estructural para realizar un análisis modal de la estructura del templo de San Antonio para diferentes etapas de degradación de los materiales. En esta etapa del trabajo se requirió un modelo geométrico de la estructura. Se usó el modelo previamente generado por Orenday (2016). Se utilizaron datos

de las propiedades del material para diferentes estados de degradación proporcionados por trabajo paralelo a este (Fonseca, 2018).

La propuesta contempló analizar la estructura con por lo menos tres estados de degradación del material: análisis uno, considerando un material sin degradación para determinar el comportamiento estructural del edificio para un estado inicial, es decir inmediatamente después de su construcción; análisis dos con las propiedades mecánicas del material actuales, para determinar el comportamiento del estado actual; y análisis tres con datos de las propiedades mecánicas del material correspondientes a un estado de degradación similar al próximo a la falla del material. Este último análisis permitió determinar el comportamiento futuro del templo para una etapa próxima a que sea inestable.

Con estos tres análisis se obtuvo una gráfica de decaimiento del comportamiento estructural del templo. Se determinó una ecuación que permitió establecer el comportamiento dinámico del templo en función del grado de degradación del material.



**CAPITULO
II
ESTADO ACTUAL DEL
CONOCIMIENTO**

CAPITULO II ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

Aunque el estudio del comportamiento de la mampostería es un tema relativamente reciente, se ha estudiado ampliamente desde el último cuarto del siglo XX. En la revisión del estado del arte de esta investigación se consideró prioritaria la búsqueda de metodologías para la obtención de los modos de vibrar de estructuras mediante métodos experimentales y por medio de análisis numérico. Se incluyó la revisión de dichas metodologías aplicadas tanto a estructuras de mampostería como de concreto y acero. Se incluye también la revisión de trabajos con metodologías para predecir el comportamiento de la mampostería ante los efectos del intemperismo, y de resultados de análisis comparativos del comportamiento de estructuras antes y después de algún daño o reparación.

(Gentile & Saisi, 2013) realizaron un estudio experimental para determinar los modos de vibrar de dos estructuras, una de ellas construida con mampostería. Los autores realizaron pruebas con dos niveles de excitación, el primer nivel correspondió a el efecto del viento y a micro-temblores y el segundo nivel correspondió al efecto del balanceo de las campanas, e hicieron un análisis modal por medio del programa ARTe-MIS. El análisis lo aplicaron a un campanario de la colegiata de san Víctor en Arcisate, Italia. Se encontraron los modos de vibrar de la estructura. Sus resultados indican que las frecuencias naturales disminuyen a medida que aumenta la excitación.

(Ramos et al., 2010) caracterizaron dos estructuras de mampostería de forma experimental por medio de sensores de aceleración. Obtuvieron la frecuencia natural de las estructuras y las compararon con los resultados de un análisis numérico de las mismas. Establecieron además

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

un sistema de monitoreo en ambas estructuras, el cual incluyó acelerómetros y sensores de humedad relativa y temperatura. El estudio se llevó a cabo en Portugal, en una torre de reloj en Mogadouro y en la iglesia del monasterio de Jerónimos. Sus resultados mostraron que la influencia de la humedad en el comportamiento dinámico de la mampostería no es despreciable.

(Clinton et al., 2006). Publicaron un estudio realizado sobre un edificio en el Instituto de Tecnología de California. En el edificio se instaló un sistema de monitoreo de acelerómetros con transmisión de datos en tiempo real. Los datos fueron procesados y se determinó la evolución de las frecuencias naturales a lo largo de la vida del edificio. El estudio concluyó que en 36 años de vida del edificio se redujeron permanentemente las frecuencias naturales en 22% en la dirección E-W y 12% en la N-S. Se concluyó que dicha reducción correspondió a una disminución de rigidez del sistema estructural del edificio.

(Carpinteri et al., 2005). Realizaron un estudio para determinar el estado actual de daño de un edificio histórico de mampostería y su evolución a través del tiempo. Utilizaron pruebas no destructivas para la evaluación, realizaron además un análisis numérico elástico no lineal para inferir la evolución del daño. Se tomó como caso de estudio la torre Sineo ubicada en la ciudad de Alba, Italia. Concluyeron que el daño de la estructura evoluciona casi linealmente, y con sus resultados infieren el nivel de daño para el cual la estructura es considerada inestable.

(Yuen & Kuok, 2010). Analizaron la influencia de las condiciones ambientales en la frecuencia modal de una estructura. Para ello, hicieron un monitoreo diario del comportamiento dinámico de una estructura, y de las condiciones de temperatura y humedad relativa en la ubicación del edificio durante un año. Utilizaron el enfoque bayesiano

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

para identificar las frecuencias modales. El edificio estudiado fue el "East Asia Hall" en Macao, China. Concluyeron que existe una alta correlación entre las frecuencias modales y las condiciones ambientales.

(Asmussen, Brincker, & Rytter, 1997) realizaron un estudio experimental para determinar los modos de vibrar de un puente de concreto. Usaron la técnica ASD (Averaged Spectral Densities) y la técnica RD (Random Decrement Technique) para procesar datos obtenidos de 26 acelerómetros colocados en diferentes puntos del puente. El caso de estudio fue el puente Vestvej ubicado en Dinamarca. Se concluyó que la técnica RD se puede utilizar para estimar la frecuencia natural del puente y algunas formas modales con buena confiabilidad.

Tras el colapso sin causa aparente de la torre de Pavia en Italia, (Anzani, Binda, & Roberti, 2000) analizaron como afectan las cargas permanentes a la mampostería. Se realizaron diferentes tipos de ensayos en bloques de mampostería recuperados de los escombros de la torre, los datos experimentales sirvieron como base para crear un modelo matemático para el comportamiento a largo plazo de la mampostería histórica, sin embargo, los autores recomiendan añadir al modelo una variable de daño para reproducir mejor el comportamiento de la mampostería.

(Vyas & Reddy, 2009) realizaron una simulación numérica para predecir el comportamiento de bloques de mampostería utilizando micromodelación. Integraron a la simulación, un modelo reológico de comportamiento del concreto para modelar la falla de los elementos constituyentes de mampostería (rocas y mortero) utilizando el programa ANSYS para la modelación numérica. Se logró predecir la carga para la aparición de la primera grieta y la resistencia a la compresión final con

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

una precisión de 81% con respecto a los valores observados experimentalmente.

(Václav Kocí et al., 2014) evaluaron tres diferentes tipos de arenisca usadas en la construcción de edificios en Republica Checa. Realizaron campañas de caracterización para determinar las propiedades de los materiales, y realizaron el análisis de datos históricos de temperaturas para conocer las características del clima. Con esta información alimentaron un modelo numérico para determinar el número de ciclos de congelación/descongelación que representa la vida útil de cada material. Propusieron además una forma de convertir los ciclos de congelación/descongelación a años de vida útil de las rocas.

(Ramírez & Caamaño, 2002) realizaron una comparación de las propiedades dinámicas de un edificio antes y después de reforzarlo. Para su estudio determinaron los primeros cinco modos de vibrar del edificio antes y después del refuerzo. El caso de estudio fue el edificio H que forma parte de la Unidad Azcapotzalco de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM-A), en la Ciudad de México. Encontraron que el periodo fundamental de vibración disminuyó un 22%, de 0.85s a 0.66s, lo que representa un aumento en la rigidez del 54%.

(Lee & Kim, 2015) estudiaron el efecto del daño y del contenido de agua en las propiedades dinámicas de cimentaciones de muelles de cajones de gravedad. Realizaron un modelo a escala en laboratorio y determinaron las frecuencias naturales, relación de amortiguamiento y las formas modales para los diferentes estados de daño. El estudio se llevó a cabo en el Instituto de Hidráulica Oceánica de la Universidad Nacional de Pukyong, Corea. Encontraron que las frecuencias naturales disminuyeron hasta un 10% y el amortiguamiento se incrementó en

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

aproximadamente un 70% en el primer modo de vibrar para el mayor nivel de daño.

De la revisión de la literatura se pueden enunciar los siguientes resultados de interés para el desarrollo de este trabajo:

- El cálculo de las frecuencias naturales por medios experimentales y numéricos es muy importante para el estudio de edificios históricos (Gentile & Saisi, 2013) (Ramos et al., 2010) (Yuen & Kuok, 2010) (Asmussen et al., 1997) debido a que se han usado como indicador de salud estructural (Clinton et al., 2006).
- Las frecuencias naturales de una estructura disminuyen con el nivel de daño (Clinton et al., 2006) (Lee & Kim, 2015), el refuerzo en una estructura provoca un aumento en la frecuencia natural (Ramírez & Caamaño, 2002).
- La simulación numérica es una herramienta importante en el estudio de edificios históricos donde las pruebas destructivas no son permitidas por normativas (Carpinteri et al., 2005).
- Se ha simulado el comportamiento de la mampostería a través de modelos matemáticos con buena aproximación (Anzani et al., 2000) (Vyas & Reddy, 2009)
- La vida útil de materiales pétreos se ha simulado numéricamente para conocer los años de vida útil en relación con la degradación (Václav Kocí et al., 2014)



CAPITULO
III
MARCO TEORICO

CAPITULO III MARCO TEÓRICO

3.1 Importancia de los Monumentos Históricos

La concepción de un monumento histórico no puede completarse sin antes hablar del origen de su valor como patrimonio de una localidad que ha permitido su continuidad en el tiempo.

La palabra patrimonio se vincula a aquello que proviene de la herencia de los padres, o que se han heredado y luego traspasados como parte de nuestra herencia. Este concepto hace referencia a bienes materiales, pero también puede aplicarse a bienes inmateriales que, viéndolo desde una perspectiva familiar, estos pueden ser los valores éticos (Díaz Cabeza, 2010).

A lo largo de la historia el concepto de patrimonio cultural se ha asociado a monumentos creados por el hombre resultado de su forma de expresarse. Pero este concepto ha ido adquiriendo nuevos sentidos, ahora los bienes patrimoniales van más allá de lo natural, arquitectónico o urbanístico. Actualmente la expresión de patrimonio cultural comprende dos aspectos, el primero se manifiesta en expresiones concretas (tangible) y el segundo de ellos se compone de mensajes inmateriales (intangible), estos últimos dan un sello de identidad que complementa a los primeros como evidencia de su existencia (Díaz Cabeza, 2010).

Por lo que se puede clasificar el patrimonio cultural como:

- **Bien Cultural Tangible:**

Está integrado por todos los bienes muebles e inmuebles que fueron construidos por el hombre en el pasado. Su valor procede desde puntos de vista que pueden ser, arquitectónico,

arqueológico, histórico, artístico o científico ("Patrimonio cultural", 2017).

- Bien Cultural Intangible:

Este tipo de patrimonio se refiere a "expresiones", que se transmiten de generación en generación, un claro ejemplo son las tradiciones, gastronomía, herbolaria, danza, música, artesanía y oficios. Estas expresiones dan identidad y continuidad a las ciudades, grupos o individuos ("Patrimonio cultural", 2017). Se puede decir que el patrimonio inmaterial se compone de obras generadas a partir de la creatividad de un pueblo de forma anónima, constituyendo las tradiciones de una comunidad, lo que hace que se distinga de otras comunidades, en otras palabras, representa un símbolo de su cultura (Díaz Cabeza, 2010).

Para la UNESCO el patrimonio cultural es a la vez un producto y un proceso, provisto a la sociedad actual como una herencia del pasado, producido en el presente de sus creadores, y que se debe transmitir a futuras generaciones ("Patrimonio", 2017).

Una parte importante del patrimonio tangible o material es el patrimonio arquitectónico, definido como un conjunto de bienes edificados a los que la sociedad otorga o reconoce algún valor cultural, estos pueden ser de cualquier naturaleza (Azkarate, Ruiz de Ael, & Santana, 2003). Este concepto también ha ido evolucionando debido a que el valor cultural cambia constantemente con la percepción que la sociedad tiene de éste, y además debido a la ampliación del concepto, que antes solo comprendía al monumento, hoy en día abarca a la entidad conformada por conjuntos edificados, considerados así por la coherencia de su estilo y por la historia de las generaciones que ahí han vivido ("Declaracion de Amsterdam", 1975).

Un concepto que comprende al patrimonio como entidad, y considera tanto bienes materiales como inmateriales dentro de un mismo sitio es el de patrimonio histórico, definido como: *“la herencia colectiva de hechos acontecidos, personajes, objetos materiales que han trascendido a través del tiempo, y el espacio social, que llegan a formar parte y esencia de la historia de un lugar”*, esta forma de expresarse por parte de la sociedad genera un vínculo entre las diferentes generaciones (Díaz Cabeza, 2010).

Desde esta perspectiva se puede percibir de una forma global la importancia de una estructura que por su antigüedad ha ido tomando valor con el tiempo, y surge la necesidad de etiquetarla dentro del concepto de monumento histórico.

La primera noción acerca de monumento dice que es aquello entregado a la posteridad para la historia (Díaz Cabeza, 2010). Se puede considerar como monumento histórico cualquier obra que con el tiempo ha adquirido valor cultural, y está compuesto por la obra arquitectónica y su entorno, y es testigo de algún acontecimiento histórico o progreso de una civilización. La estructura puede comprender aportaciones de diferentes épocas, y presentar en consecuencia varios estilos superpuestos. Debido a que la edificación es inherente a la historia y al lugar donde se ubica es importante conservar la obra como testimonio histórico (*“Carta Internacional Sobre la Conservación y la Restauración de Monumentos y Sitios”*, 1964).

...“Todo patrimonio se produce localmente en un tiempo y espacio determinado, el paso del tiempo y el consentimiento de la sociedad son los que permiten que el patrimonio local pueda ser considerado como regional, nacional o mundial” (*“Los Diversos Patrimonios”*, 2017).

El turismo que genera el patrimonio cultural ha dado cabida a un crecimiento en la importancia que se le ha dado en diversos países, gracias a la derrama económica que representa ("Patrimonio", 2017). Muchas de estos países dependen principalmente del turismo, debido a que si se gestiona de manera correcta puede tornarse en una componente importante de desarrollo económico. El turismo además de generar aspectos en la economía es considerado como uno de los medios de mayor importancia para el intercambio cultural, dando cabida al desafío de su conservación ("Patrimonio", 2017) ("Carta internacional sobre turismo cultural", 1999).

La conservación del patrimonio debe ser concebida desde un enfoque global, para de esta forma complementar la conservación de sitios puntuales o aislados, incluyendo desde los inmuebles con mayor renombre hasta los más modestos ("Declaracion de Amsterdam", 1975). La conservación y transmisión del patrimonio en primera instancia es responsabilidad de la comunidad donde tuvo origen y aquella que se involucró en su desarrollo, misma que tiene el derecho de usar los recursos generados por su patrimonio para mejorar su calidad de vida, esto sin poner en riesgo la integridad del patrimonio ("Los Diversos Patrimonios", 2017).

3.2 Mampostería

3.2.1 Generalidades

Se considera a la mampostería uno de los sistemas constructivos más antiguos, su historia se remonta a más de 10 mil años, es la representación del desarrollo constructivo de civilizaciones que han existido a lo largo de la historia (Roeder Carbo, 2004), y a pesar de su

antigüedad su comportamiento estructural no está del todo entendido. Entre las razones de esto se pueden mencionar: la complejidad del comportamiento mecánico y la cantidad de variables que se deben tomar en cuenta en su análisis. ("Análisis no lineal de muros de mampostería confinada sujetos a cargas laterales", s/f) (Roeder Carbo, 2004)

Autores como Bustamante, Carbo, Mondragón, Orduña y Ayala definen a la mampostería como un material compuesto por unidades o bloques que pueden ser de distintos materiales, como piedra o arcilla, y que pueden estar unidas con material aglomerante (Roeder Carbo, 2004). Este sistema se desarrolló gracias a que los conocimientos fueron transmitidos de generación en generación, muchas veces en secreto (Bustamante, Carbo, & Mondragón, 2007).

Antes del uso del concreto reforzado y el acero, la mampostería era el material más utilizado, por lo que no es cuestionable que la mayoría de las edificaciones que con el tiempo adquirieron valor patrimonial estén construidas con sistemas de mampostería (Bustamante et al., 2007). Es así como actualmente podemos apreciar un gran número de construcciones antiguas de este material, las cuales han resistido al paso del tiempo y a diversas solicitaciones de la naturaleza, lo que ha ocasionado daños en estas construcciones volviéndolas vulnerables, surgiendo así la necesidad de estudiar el comportamiento de este tipo de estructuras, gracias al análisis de edificaciones compuestas de mampostería se ha ido comprendiendo un poco su comportamiento, siendo este un primer paso para su total comprensión (Roeder Carbo, 2004).

La complejidad del análisis de la mampostería es atribuida principalmente a la heterogeneidad al ser un material compuesto, los

tipos de falla que presenta, propiedades de los materiales, adherencia entre el mortero y piezas entre otras (Orduña & Ayala, 2001). También es de consideración en la complejidad de la mampostería la asimetría de su comportamiento al presentar alta resistencia a la compresión en relación a su resistencia a la tensión, origen de su comportamiento no lineal (Bustamante et al., 2007).

3.2.2 Degradación de la mampostería

La mayoría de los edificios históricos están contruidos con sistemas de mampostería hechos con piedra principalmente, es por ello que la alteración en la roca que es parte del sistema constructivo influye en el comportamiento de la estructura. Los materiales pétreos se emplean tradicionalmente debido a sus propiedades de dureza resistencia y durabilidad, la piedra está formada por agregados minerales que se formaron por procesos naturales en largos periodos de tiempo, en una escala geológica (Rodríguez, Alemany, Gargallo, & Vázquez, 2006).

El deterioro o degradación de un material es un cambio del material que implica un decaimiento en sus propiedades fisicomecánicas (Ordaz & Esbert, 1998), debido a procesos mecánicos o químicos, que si bien puede retardarse usando un diagnóstico preciso de daño que pueda prever la información necesaria para una correcta caracterización o predicción de daño, pero este proceso de degradación es inevitable (Václav Kocí et al., 2014) (Rodríguez et al., 2006).

La alteración de un material es la modificación de sus características o propiedades debido al efecto de exposición a un ambiente, se dice que sufren cambios en sus propiedades manifestándose en su aspecto y/o comportamiento. Es un proceso natural presente en la roca desde su formación, pero se ve acelerado al cambiar las condiciones como presión

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

y temperatura al ser removida de su estado natural y puesta en obra en alguna edificación, se agregan variables atmosféricas, actividad de microorganismos, fluidos, estas nuevas condiciones hacen que la roca se vaya transformando en búsqueda de un equilibrio. (Václav Kocí et al., 2014) (Rodríguez et al., 2006).

Teóricamente la alteración de un material no necesariamente significa su degradación, pero al referirnos a materiales de construcción se utiliza alteración como sinónimo de degradación debido a que el cambio en las propiedades es perjudicial para el comportamiento de la estructura (Rodríguez et al., 2006).

3.2.2.1 Causas

Para tener una correcta evaluación de daños en los materiales pétreos en una construcción o monumento se deben tomar en cuenta todos los factores que influyen en su deterioro o alteración, desde el punto de extracción del material, su estado de degradación actual y llegar hasta su evolución como parte de una estructura. Se plantean tres factores principales que intervienen en el deterioro (Rodríguez et al., 2006):

- Factores propios del material o intrínsecos: los parámetros que influyen en el comportamiento ante la alteración son la composición, textura y porosidad. En cuanto a la composición y sus características como mineralogía y composición química son las que importan en la alterabilidad de la roca. La textura influye en la forma de alterarse el material, la presencia de anisotropías como estratificación o laminación condiciona la aparición de acanaladuras o exfoliación. La porosidad es un factor importante ya que al interior de los poros puede contenerse fluidos dando lugar a reacciones de alteración, características como el volumen, accesibilidad y tamaño de poro

influyen en el grado de alterabilidad de la roca (Rodríguez et al., 2006).

- Derivados del clima y contaminación ambiental o extrínsecos. – El clima introduce variables al proceso de alteración, factores como la temperatura, precipitación, viento afectan la durabilidad del material, cada variable a su vez presenta valores medios, extremos, cierta frecuencia y velocidad, que determinan el grado de afectación. La contaminación agrega otras variables como distintos tipos de gases y partículas que determinan las características de la atmosfera que afecta el lugar donde se encuentra el material como parte de una construcción (Rodríguez et al., 2006).

El agua es uno de los factores más importantes ya que influye en todos los procesos tanto físicos y químicos, ya que se encuentra contenida en los poros del material importando los cambios en el contenido y los cambios de fase.

- Constructivos. – el paso de una roca en su estado natural a un material de construcción implica el uso de un método para su extracción que puede afectar su comportamiento, el tipo de acabado puede hacer que sea más o menos susceptible, condiciones de almacenamiento como la presencia de humedad o contaminantes (Rodríguez et al., 2006).

En cuanto a los procesos o mecanismos que provocan alteraciones en los materiales pueden ser físicas, químicas o biológicas:

Los primeros son consecuencia de fuerzas externas que pueden ser naturales o debidos a una mala distribución de cargas en la estructura, en ambos casos se generan cambios de volumen que dan origen a la desintegración o rotura del material (Rodríguez et al., 2006).

Los principales procesos físicos de la degradación de rocas son la cristalización de sales, el efecto de este proceso aumenta en ambientes marinos donde la concentración de sales es mayor, y los ciclos de congelación y descongelación predominante en climas fríos o regiones con cambios bruscos de temperatura. Ambos procesos actúan de forma similar, caracterizándose por un aumento de volumen en los poros del material lo que aumenta la presión interna hasta el punto de la aparición de micro fisuras o hasta ampliar las que ya se encontraban presentes en el material (Václav Kocí et al., 2014).

Los procesos químicos se deben a reacciones del material con fluidos presentes en el ambiente, algunos de estos procesos son la hidratación, hidrólisis, disolución, oxidación, carbonatación, sulfatación, intercambio iónico. La presencia de uno u otro de estos procesos depende principalmente del tipo de material, y de la presencia de agua influyendo la composición y temperatura de ésta (Rodríguez et al., 2006).

Los procesos biológicos son muy variados ya que dependen del tipo de organismo que se presente, microorganismos y bacterias utilizan materiales inorgánicos como nutrientes, metabolizándolos y alterándolos, tienen una participación en la formación de yeso, oxidación de compuestos de hierro, liberación de ácidos o álcalis, algunas algas retienen humedad y polvo favoreciendo la aparición de procesos químicos, líquenes actúan física y químicamente, los musgos intervienen químicamente, ambos influyen liberando ácidos, las plantas superiores pueden actuar por medio de presiones debidas a la presión de sus raíces, por último los animales generan daños físicos directamente y químicos indirectamente por reacciones a partir de sus excrementos (Rodríguez et al., 2006).

3.2.2.1 Efectos

La mayoría de las patologías se producen en la superficie del material lo que contribuye a la infiltración de sustancias que pueden alterar aún más el material, entre los efectos de pérdida del material se pueden clasificar en los siguientes tipos:

- Alveolización: consiste en la aparición de cavidades alveolares originados por disolución o hidrólisis, común en calizas, areniscas con cemento carbonatado o en general rocas porosas.
- Excavaciones o cavernas: se refiere a la aparición de huecos asilados, puede tener el mismo origen que a alveolización pero ocurre generalmente en rocas no porosas.
- Erosiones superficiales: son pérdidas de material generalmente de la superficie expuesta, ocurre en rocas de carácter masivo y el origen es el mismo que los anteriores tipos.
- Arenización y disgregación: se debe a la pérdida diferencial de algún componente mineral, por lo general ocurren en la superficie de la roca, la arenización es propia de los granitos mientras que la disgregación es típica de las areniscas.
- Pérdidas del material: pueden ser generalizadas por la evolución de alguno de los efectos antes descritos pudiendo perderse piezas arquitectónicas completas.

A los efectos en el cambio de coloración se les llama patinas, que son delgadas capas superficiales que pueden tener diversas causas como el envejecimiento, suciedad, el lavado, decoloración, biogénicas.

Las eflorescencias son manchas blancas producidas por la precipitación de sales solubles que migran al evaporarse el agua en la superficie de la roca (Pancorbo, 2010)

3.3 Análisis modal

El análisis modal es utilizado para determinar las propiedades dinámicas de una estructura, estas propiedades son las frecuencias y los modos naturales (patrones de desplazamiento propio de cada frecuencia) y el amortiguamiento.

La frecuencia natural de vibración se define como la frecuencia a la que seguirá vibrando un sistema después de retirar la excitación que lo hizo vibrar (Cordero Hernandez, 2013).

El análisis se basa en que la respuesta de un sistema ante una excitación se expresa como una combinación de los modos naturales de vibración, descritos por movimientos armónicos simples, los cuales están en función de las propiedades de masa, rigidez y amortiguamiento del sistema (Sanchez Sosa, 2015).

Las propiedades dinámicas pueden verse afectadas por un cambio en la rigidez global de la estructura, que depende de las propiedades de sección transversal, módulo de elasticidad y longitud de cada elemento, y cualquier daño en la edificación, provocado por algún evento natural, solicitaciones accidentales o la degradación de sus materiales, representa una disminución de la rigidez global de la estructura.

Este cambio en las propiedades dinámicas por efecto de la disminución de rigidez se debe a que el análisis modal depende únicamente la masa y rigidez de la estructura, lo que lo hace sensible a los cambios en la rigidez; es por esto que es posible tomar las propiedades dinámicas como indicador de la salud estructural de una edificación, conociendo sus modos de vibrar y frecuencias y compararlas con alguna referencia inicial libre de daño(Sánchez Sosa, 2015) ("CATEC", 2017).

El análisis modal consiste en plantear la ecuación de movimiento de la estructura (3.1), después aplicar la superposición de la forma de respuesta y hacerla cumplir la ecuación de movimiento, se resume en un problema de valores y vectores propios, para ello es necesario conocer las matrices de masa, rigidez y si es aplicable la matriz de amortiguamiento.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F \quad (3.1)$$

Donde

M = matriz de masas, simétrica usualmente definida positiva.

C = matriz de amortiguamiento.

K = matriz de rigidez, simétrica en ocasiones semi definida positiva.

F = vector de fuerzas.

\ddot{x} = segunda derivada del desplazamiento en el tiempo.

\dot{x} = velocidad o primera derivada del desplazamiento.

x = desplazamiento

Para determinar los parámetros modales es necesario transformar la ecuación de movimiento (3.1) a un problema de valores propios, ecuación (3.2)

$$(K - \omega^2 M)\Psi = 0 \quad (3.2)$$

Donde

Ψ = vector propio

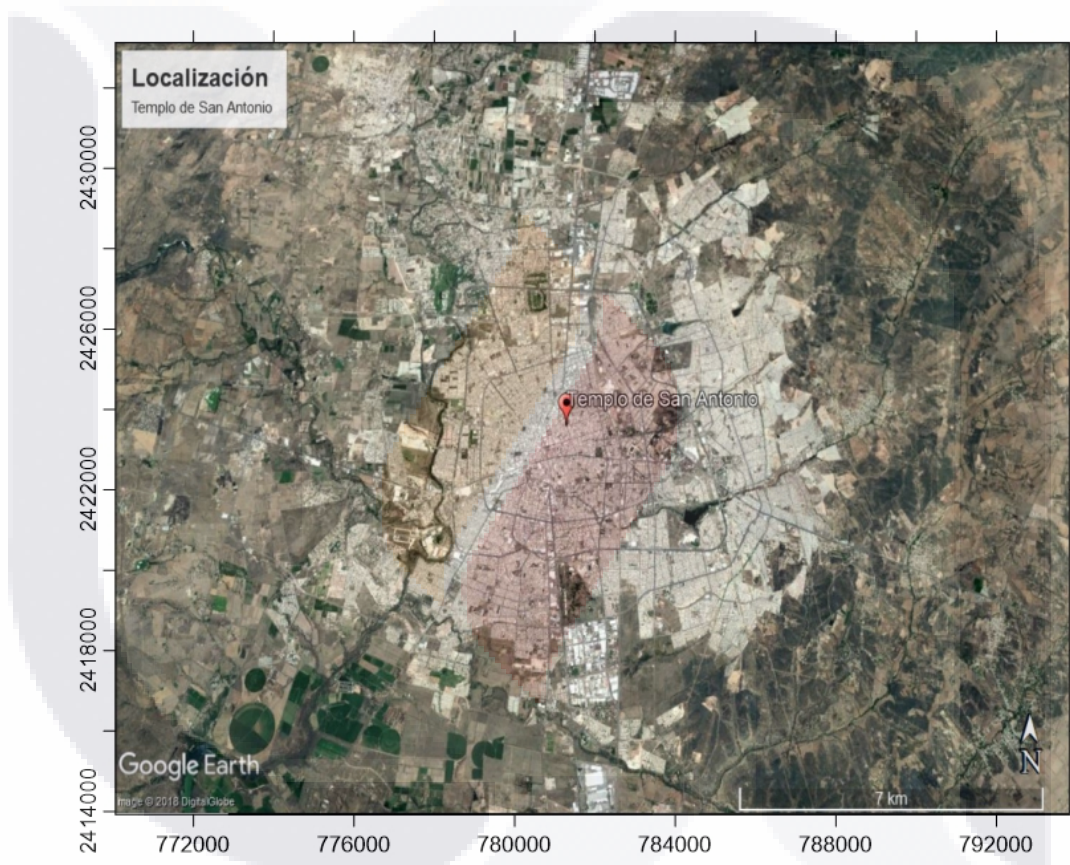
ω^2 = valor propio

0 = vector de ceros

la ecuación está planteada de modo que la raíz cuadrada de cada valor propio corresponde a una frecuencia natural de la estructura y los vectores propios corresponden a las formas modales.

3.4 Templo de San Antonio

El templo de san Antonio es una de las construcciones más importantes del estado de Aguascalientes, dada su importancia religiosa, arquitectónica, urbanística e histórica, se encuentra ubicado en el centro de la ciudad de Aguascalientes (figura 3-1), está catalogado por el INAH como monumento histórico (Navarro Hernandez, 2013).



*Figura 3-1.- Localización del templo de San Antonio.
(Elaborado a partir de Google Earth)*

La construcción del templo inicio en 1896 y no fue sino hasta 1906 que estuvo finalizado y abierto al público hasta 1908, cuenta con una amplia gama de estilos arquitectónicos, incluyendo gótico, neoclásico, barroco, árabe y ruso. El templo se encuentra construido con piedras de cantera de la región de colores verde, amarillo y rosa, la construcción estuvo a

cargo de J. Refugio Reyes Rivas (arquitecto post mortem) (“Templo de San Antonio de Padua | Viva Aguascalientes”, 2017)

El templo fue construido con muros de sillar de matacán unidos con mortero de arena y cal apagada, la cubierta es de vigueta y bóveda de ladrillo que se apoya sobre los muros de carga, arcos y columnas, cuenta con tres torres en su fachada, dos pequeñas a los costados y una principal al centro, la construcción tiene forma de cruz latina y al centro de cuenta con una cúpula sostenida por tres filas de columnas (Navarro Hernandez, 2013).

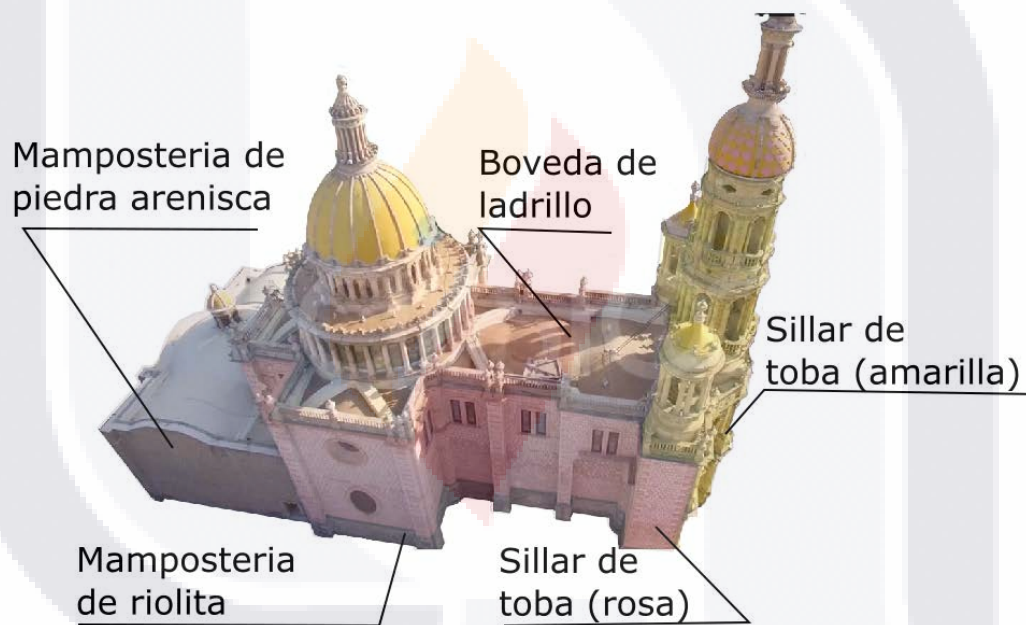


Figura 3-2.- Diferentes tipos de mampostería presentes en el templo. (Elaborado a partir de en línea, 2017)

3.4.1 Estudios previos del Templo de San Antonio

Se han realizado estudios aplicados al Templo de San Antonio debido a su importancia histórica y religiosa se ha tratado de identificar las patologías que tiene la estructura y estudiar su comportamiento.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Hernández Navarro (2013) realizó un estudio acerca del levantamiento geométrico del templo creando un modelo digital, se investigaron los materiales y sistemas constructivos utilizados en esta obra, adicionalmente se llevó a cabo un levantamiento de daños y una caracterización dinámica para obtener el periodo fundamental de vibración.

En su trabajo Hernández identificó cinco sistemas constructivos en base al tipo de material y acabados, e identificó los posibles bancos de materiales utilizados para la construcción del templo.

Animas Rivera (2015) realizó un estudio que consistió en calcular las propiedades dinámicas de la estructura experimentalmente para ser usadas como un sistema de monitoreo de la salud estructural, además realizó un modelo numérico para calcular las frecuencias naturales del templo y al calibrarlo con los datos experimentales sirviera para realizar otros tipos de análisis.

Orenday Tapia (2016) continuó con la investigación de Hernández y Animas, en el estudio se mejoró el modelo geométrico al incluir muros interiores que no se habían contemplado en el modelo anterior, se realizó una caracterización de las propiedades mecánicas de los materiales que conforman cada uno de los sistemas constructivos por medio de métodos geofísicos, y se evaluó la condición del templo por medio de un análisis de esfuerzos en la estructura.



CAPITULO
IV
DISEÑO EXPERIMENTAL

CAPITULO IV DISEÑO EXPERIMENTAL

Se utilizó software Open Source y privativo de elemento finito, para realizar el análisis modal de la estructura del templo de San Antonio con tres estados de degradación del material; el objetivo es obtener una relación ente las propiedades dinámicas del templo en función de la degradación de los materiales y asociarlo al tiempo de vida del edificio. Las actividades para conseguir este objetivo son las siguientes:

El análisis de elemento finito requiere de la modelización de la geometría de la estructura, por lo que se deben hacer las consideraciones necesarias para representar la estructura en su totalidad. De ahí que el modelo geométrico es necesario para realizar la discretización de la estructura en una malla de elementos conectados por nodos a los cuales es posible atribuirles las propiedades mecánicas del material.

El análisis estructural incluye la asignación a cada elemento de la malla las propiedades del material o materiales que conforman la estructura, también se deben establecer las condiciones de borde del sistema y las consideraciones necesarias para el tipo de análisis que se requiera.

Para el caso de estudio de esta investigación cada uno de los pasos descritos antes se desarrolló de la siguiente forma:

El modelo geométrico del templo se desarrolló a partir del levantamiento que realizó Hernández (2013) y del modelo previo realizado por Orenday (2016), con estos antecedentes se rehízo la estructura digital del templo con elementos planos tipo superficie para simular los elementos estructurales, dividiendo la geometría según los espesores de los elementos y los materiales de la mampostería.

El software que se utilizó para generar la malla fue Salomé de Code-Aster, en el programa se integran los módulos de pre y post-procesamiento, la malla se generó con el algoritmo NetGen 2D con parámetros de tamaño de elemento máximo y mínimo de 1 y 0.3 respectivamente. El resultado fue una malla que describe con buena aproximación la geometría del templo, con un total de 24176 nodos y 43233 elementos 2D. Los elementos 2D se agruparon en 26 grupos de acuerdo a los espesores y tipo de mampostería para que sea posible asignar las propiedades sin que haya interferencias entre los grupos, además se agruparon los nodos de la base del modelo para asignar las condiciones de borde del modelo.

La tabla 4-1 detalla el tipo de mampostería y el espesor que corresponde a cada grupo de elementos.

Tabla 4-1.- Tipo de mampostería y espesor de cada grupo del modelo.

grupo	material	espesor	grupo	material	espesor
1	sc2	1.000	14	sc5	0.500
2	sc2	1.600	15	sc5	0.600
3	sc2	0.671	16	sc5	0.180
4	sc2	0.507	17	sc5	0.213
5	sc3	1.300	18	sc5	0.300
6	sc2	1.320	19	sc5	0.750
7	sc3	1.320	20	sc5	0.400
8	sc4	0.915	21	sc5	0.317
9	sc4	1.160	22	sc5	0.100
10	sc4	0.830	23	sc5	0.250
11	sc5	0.260	24	sc5	0.200
12	sc5	0.640	25	sc5	0.115
13	sc5	1.000	26	sc5	0.203

Se realizaron tres análisis de tipo modal para observar el cambio en las propiedades dinámicas del edificio, los análisis se efectuaron en tres softwares de elemento finito, el software comercial Sap2000, y dos softwares Open Source, Calculix y Code-Aster. Cada uno de los análisis corresponde a una condición de degradación del material, la condición inicial consideró las propiedades del material que tuvo cuando el edificio fue construido; la condición actual corresponde al estado de degradación de la mampostería que tiene actualmente; y la condición futura considera un grado avanzado de degradación de los materiales de la mampostería.

El primer análisis que se realizó fue para la condición actual de la mampostería, para este análisis se partió de los datos obtenidos por Orenday (2018). Con el fin de calibrar el modelo se ajustaron los valores de las propiedades mecánicas de la mampostería para que coincidiera la frecuencia natural de la estructura calculada numéricamente con la frecuencia calculada experimentalmente por García (2018), las propiedades mecánicas de la mampostería obtenidas por Orenday se presentan en la tabla 4-2, además se describe el sistema de mampostería que corresponde a cada nomenclatura haciendo referencia a la figura 3-2.

Tabla 4-2.- Propiedades mecánicas de la mampostería del templo calculadas por Orenday (2018).

Nomenclatura	ρ (kg/m ³)	E (Mpa)	ν	Sistema de mampostería
SC1	1859	2100	0.32	Sillar de toba amarilla
SC2	1695	1060	0.27	Sillar de toba rosa
SC3	2073	2820	0.31	Mampostería de piedra natural
SC4	1557	530	0.23	Mampostería de piedra arenisca
SC5	2200	3050	0.45	Bóveda de ladrillo

Una vez calibrado el modelo con las propiedades mecánicas ajustadas, se aplicó la relación de decaimiento encontrada por Fonseca (2018) (anexo A) para obtener los valores de estas propiedades para cada estado de daño de la mampostería del templo, debido a que los resultados de Fonseca solo corresponde a un tipo de material, que concierne al SC1, la curva de decaimiento se ajustó a los demás sistemas de mampostería con base en su relación modular, en la tabla 4-3 se muestran las propiedades consideradas para los análisis en cada condición de daño.

Tabla 4-3.- Propiedades mecánicas de la mampostería para cada condición de daño.

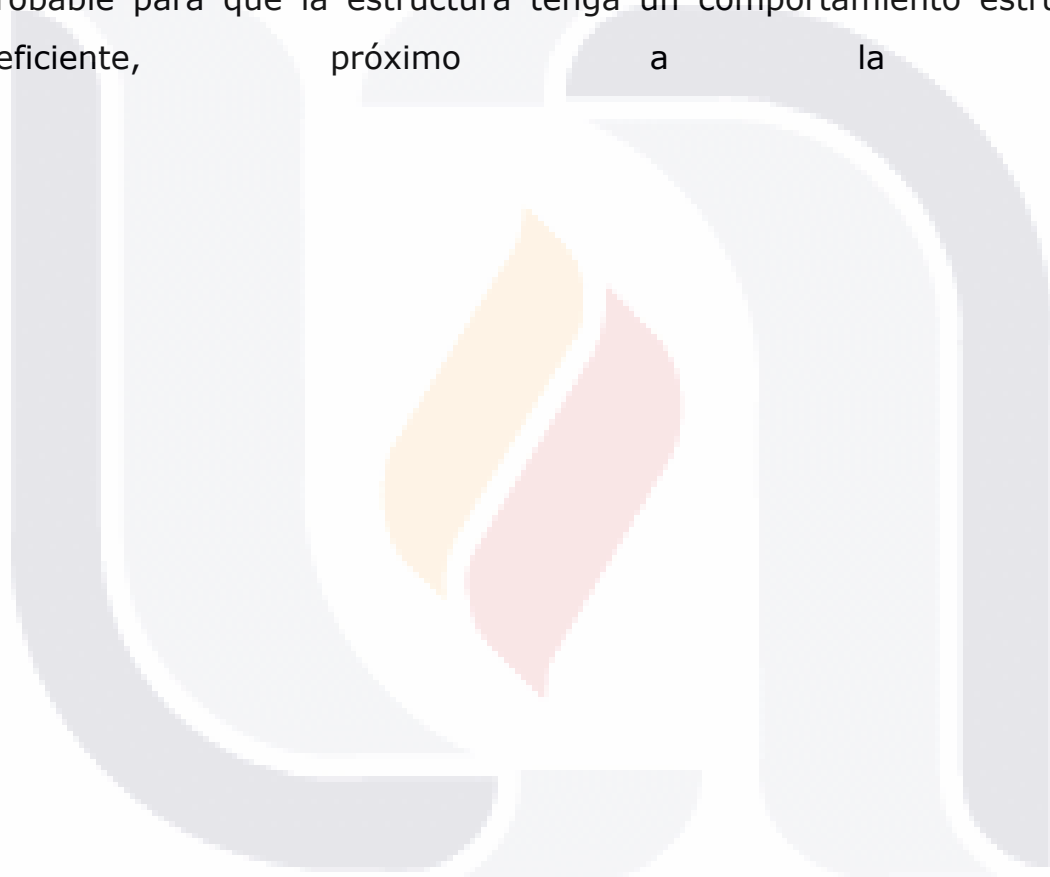
Material	Condición inicial			Condición actual			Condición futura		
	P*	E**	ν	P*	E**	ν	P*	E**	ν
sc1	1859	18242	0.38	1859	16980	0.32	1859	16817	0.29
sc2	1695	11072	0.39	1695	8571	0.27	1695	8250	0.21
sc3	2073	23741	0.35	2073	22801	0.31	2073	22680	0.29
sc4	1557	9287	0.47	1557	4285	0.23	1557	3643	0.11
sc5	2200	25530	0.49	2200	24661	0.45	2200	24549	0.43

*kg/m³

** MPa

Los resultados de estos análisis se graficaron con el fin de visualizar el decaimiento de las propiedades dinámicas en relación con las propiedades mecánicas de cada estado de degradación, con la información conseguida fue posible obtener una función que reprodujo este comportamiento.

Finalmente se usó la función obtenida para determinar el tiempo probable para que la estructura tenga un comportamiento estructural deficiente, próximo a la falla.





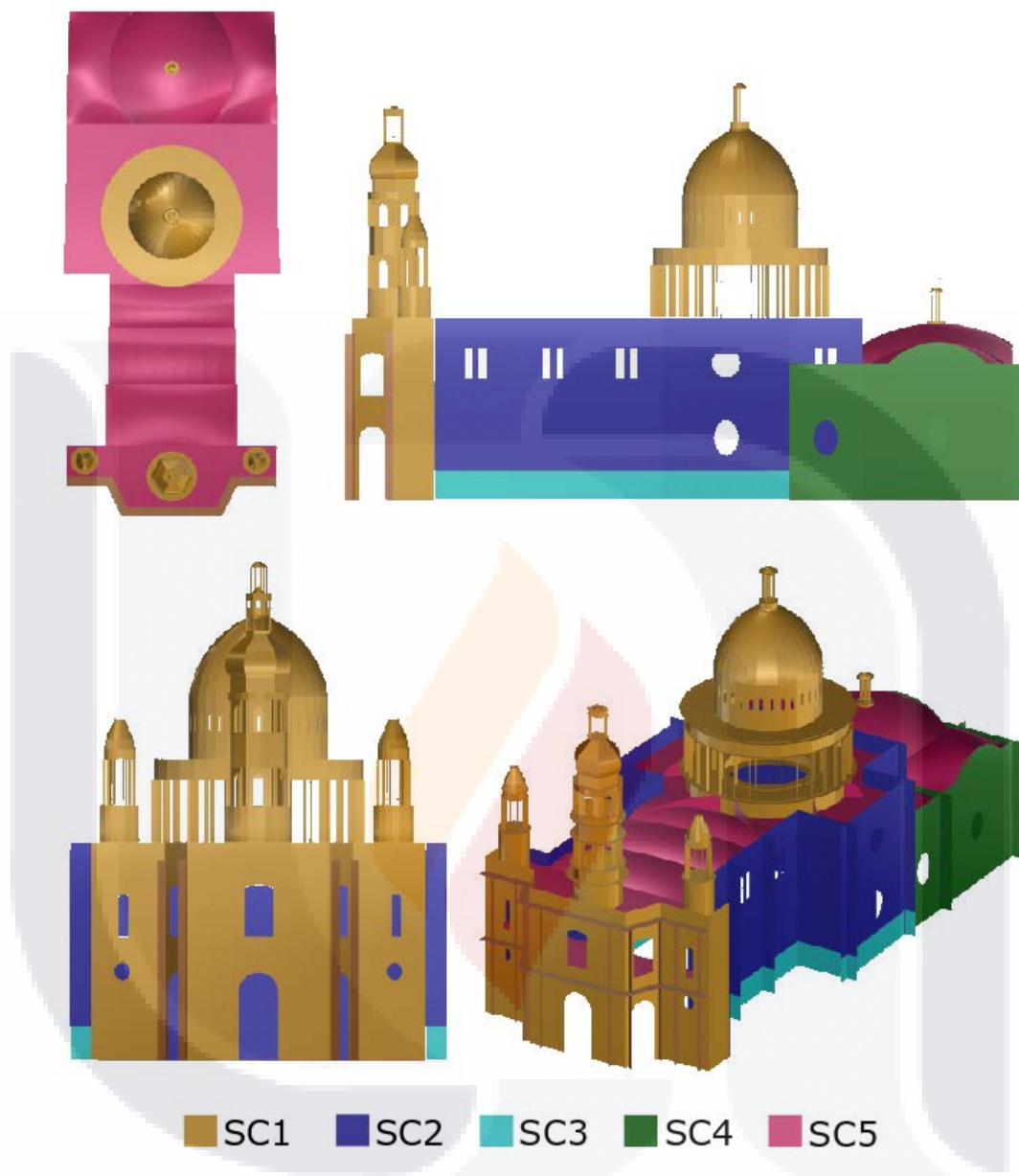
CAPITULO
V
RESULTADOS

CAPITULO V RESULTADOS

Se presenta como primer resultado de esta investigación el nuevo modelo geométrico del templo en tres dimensiones, construido a partir de 2842 elementos en dos dimensiones tipo superficie. En la figura 5-1 se muestran diferentes perspectivas del modelo del templo de San Antonio, donde se diferencian los diferentes sistemas constructivos por colores.

Otro resultado obtenido es el modelo de elemento finito. Para realizar la comparación entre los resultados de los softwares, se hicieron dos modelos de elemento finito, uno para los programas open source (Calculix y CodeAster) y otro para Sap2000, debido a que manejan diferentes formatos en sus archivos.

Ambos modelos describen de igual forma la geometría del templo, están compuestos por 43 233 elementos tipo área y 24 176 nodos, en ambos modelos se agruparon de manera similar los elementos según su espesor de sección transversal y al tipo de mampostería del que está formado, en las figuras 5-2 y 5-3 se muestran los modelos de elemento finito generados en Sap2000 y Salome respectivamente.



SC1: Sillar de toba amarilla, SC2: Sillar de toba rosa, SC3: Mampostería de piedra natural, SC4: Mampostería de piedra arenisca, SC5: Bóveda de ladrillo.

Figura 5-1.- Modelo geométrico del Templo de San Antonio.

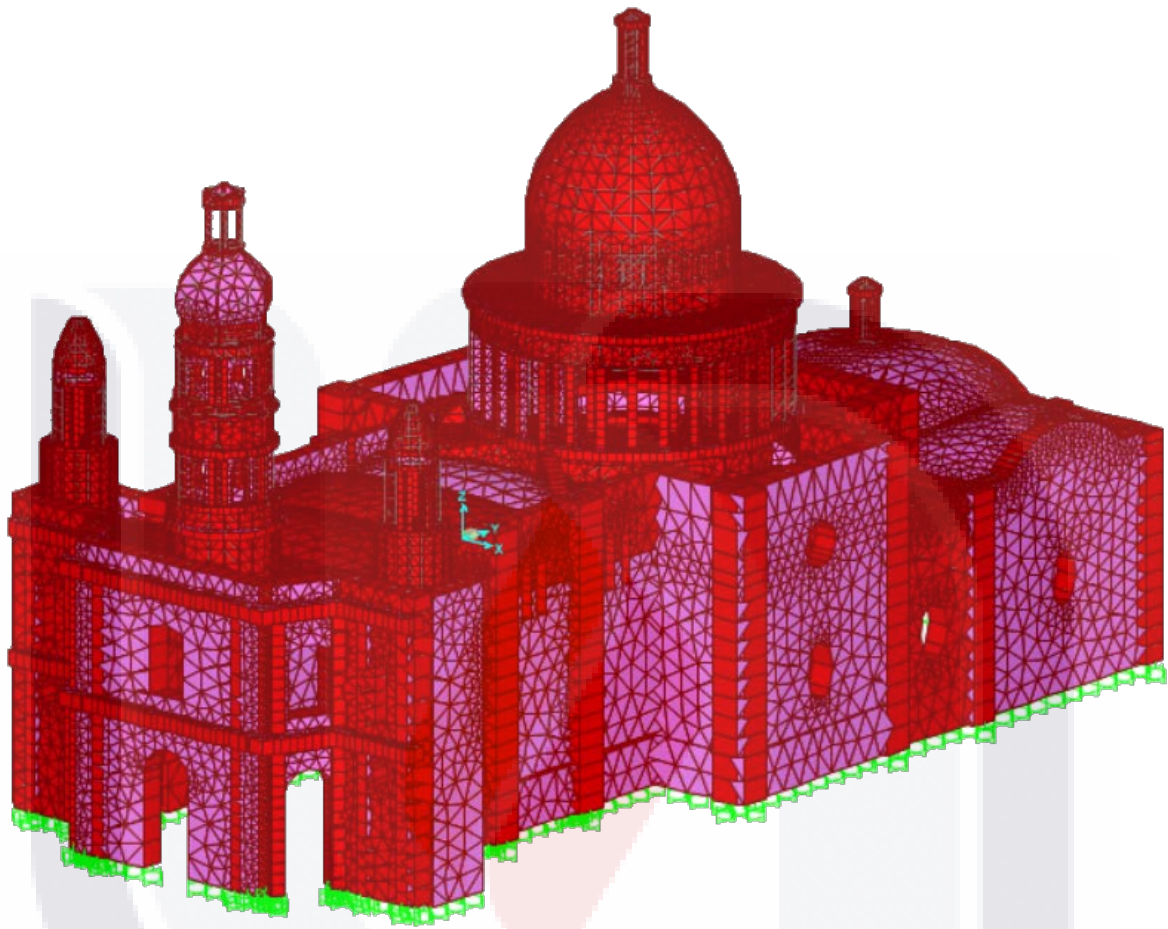


Figura 5-2.- Modelo en Sap2000 del templo de San Antonio.

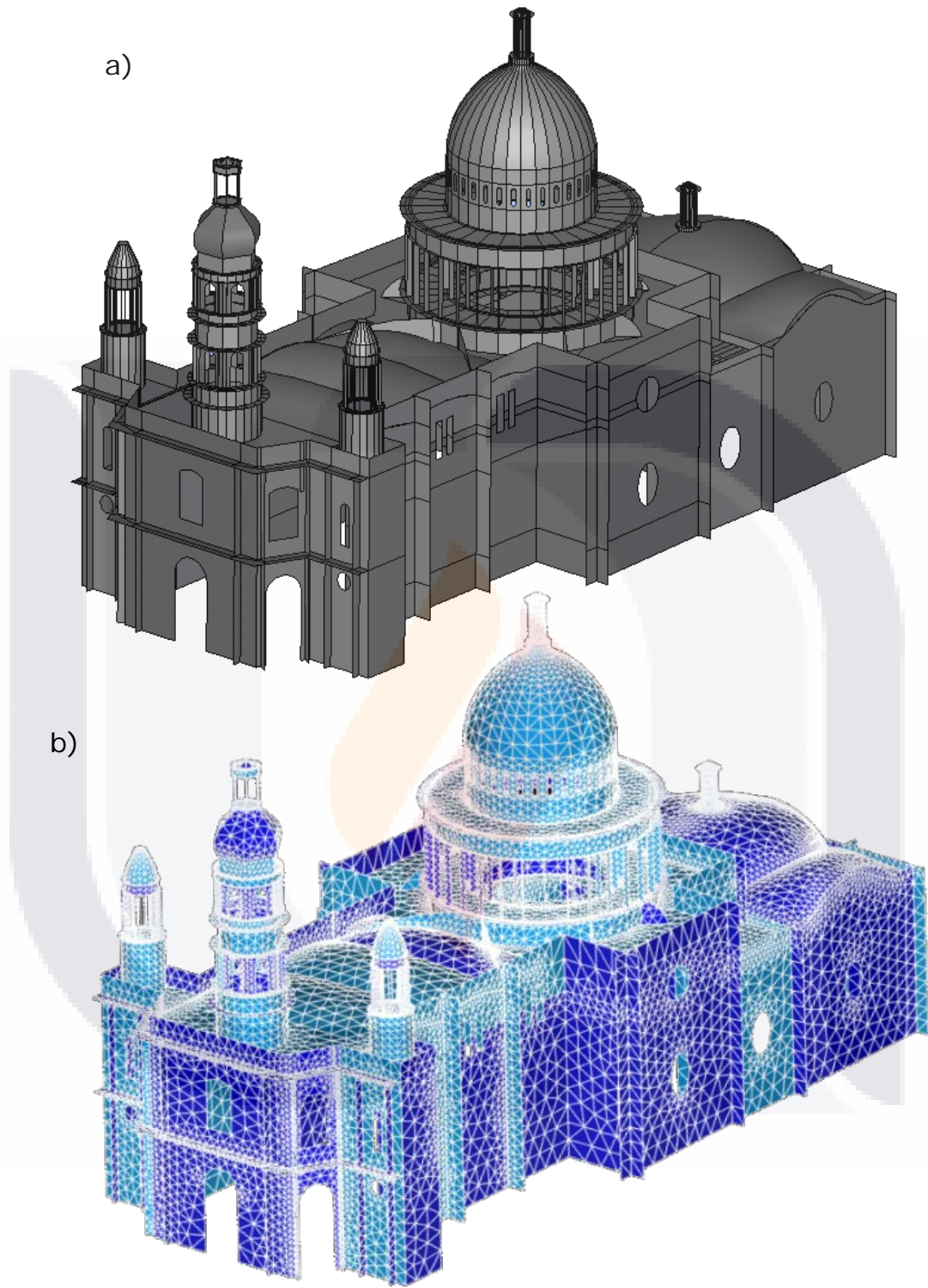


Figura 5-3.- Modelo de elemento finito del templo de San Antonio, a) geometría de la estructura, b) malla del modelo.

El análisis modal para la condición inicial del templo, considerando la mampostería sin daño para simular la estructura recién construida, se realizó en los tres softwares y los resultados se muestran en la tabla 5-1, estos resultados se graficaron para visualizar las diferencias entre los valores obtenidos, la gráfica se presenta en la figura 5-4.

Tabla 5-1.- Frecuencias naturales de la estructura para la condición inicial.

Modo	Frecuencia (Hz)		
	CodeAster	Calculix	Sap2000
1	2.618020	4.617708	2.815755
2	3.442470	4.666125	3.684165
3	3.988640	4.690607	4.078821
4	4.029820	5.436072	4.33809
5	4.157110	6.149222	4.424819
6	6.237960	8.980390	6.636043
7	7.682560	10.145620	8.829874
8	8.549680	10.672710	9.548408
9	9.856440	11.013540	10.613567
10	9.960700	11.318710	10.837256

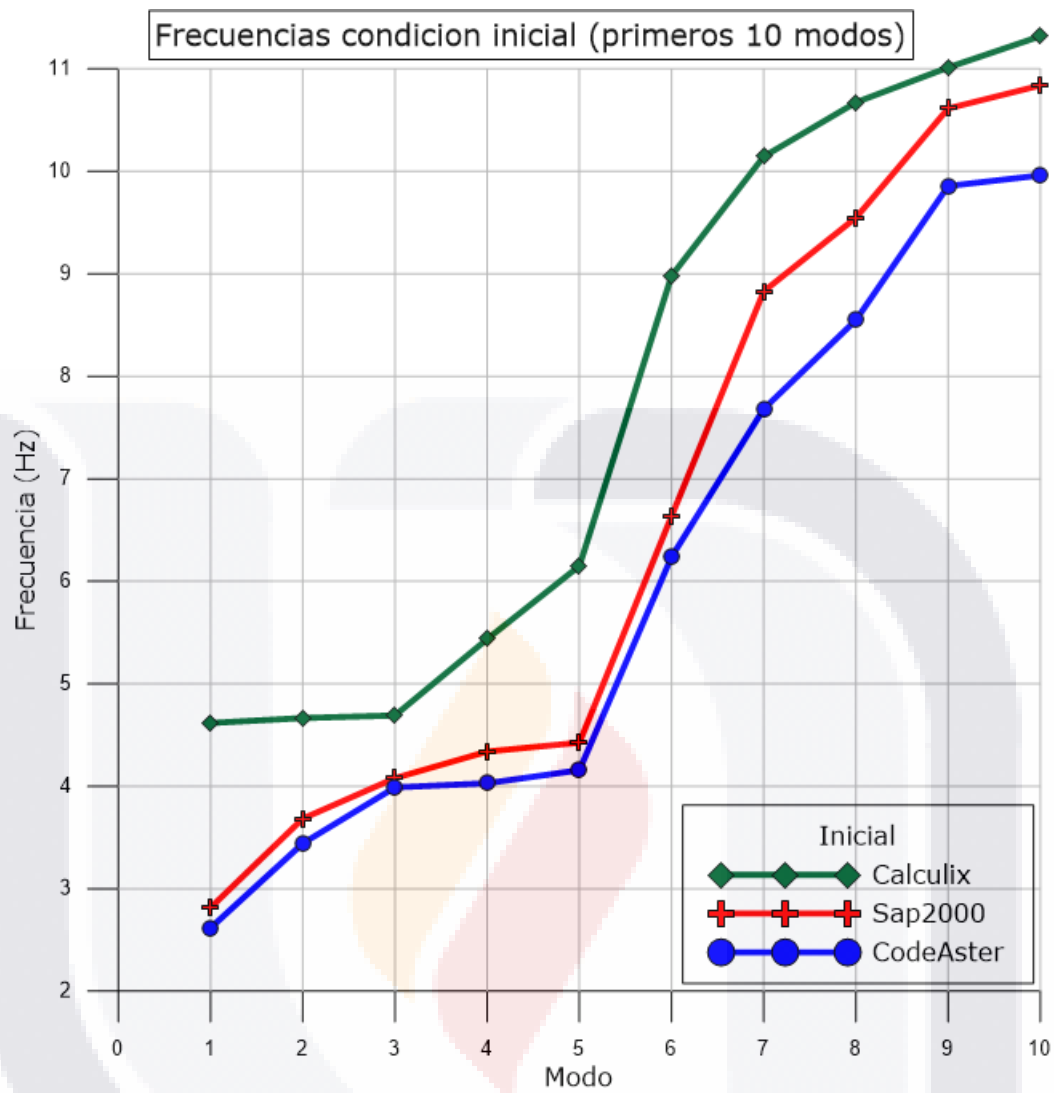


Figura 5-2.- Frecuencias naturales del templo para la condición inicial.

En la tabla 5-2 se resumen los resultados del análisis que corresponde con el estado actual de la estructura considerando la degradación presente en la mampostería, se realizó el cálculo de las frecuencias con los tres programas y los datos se graficaron como se muestra en la figura 5-5.

Tabla 5-2.- Frecuencias naturales de la estructura para la condición actual.

Modo	Frecuencia (Hz)		
	CodeAster	Calculix	Sap2000
1	2.520060	3.722710	2.706554
2	3.311180	4.199536	3.53706
3	3.834210	4.279079	3.91668
4	3.850920	4.420268	4.138204
5	3.964680	4.655077	4.214474
6	6.057990	8.048284	6.449357
7	7.314290	8.441497	8.370497
8	7.920390	9.413505	8.747565
9	9.002840	9.577318	9.683152
10	9.279960	9.618669	10.104621

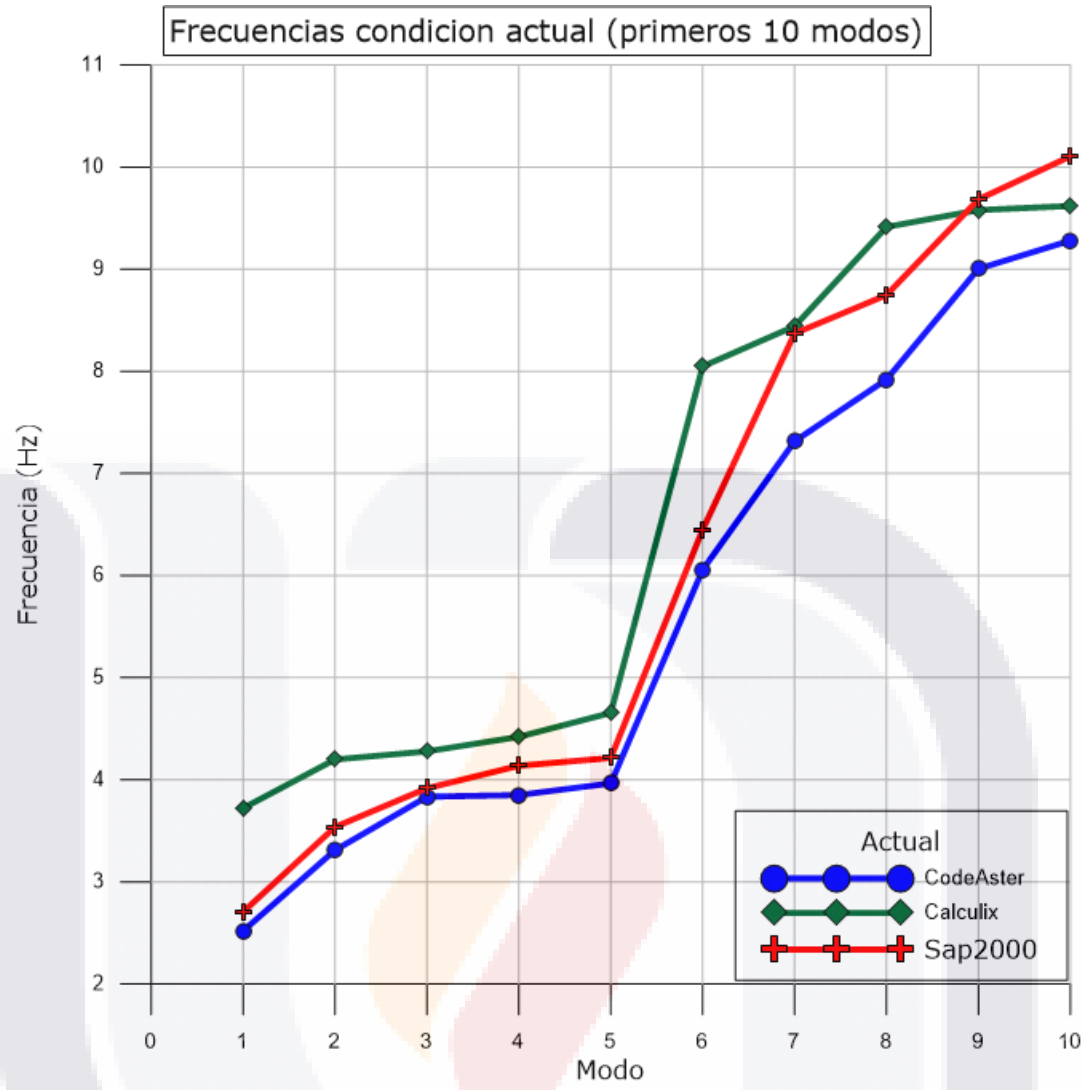


Figura 5-3.- Frecuencias naturales del templo para la condición actual.

Los resultados para el análisis correspondiente a la condición futura de degradación de los materiales de la mampostería, que equivale al estado de deterioro en donde la roca se disgrega debido a los ciclos de cristalización de sales según el estudio de Fonseca (2018), se presentan en la tabla 5-3 y gráficamente se pueden observar en la figura 5-6.

Tabla 5-3.- Frecuencias naturales del templo para la condición futura.

Modo	Frecuencia (Hz)		
	CodeAster	Calculix	Sap2000
1	2.494220	3.451737	2.676651
2	3.276890	4.116726	3.497100
3	3.810690	4.201697	3.891999
4	3.821360	4.360824	4.102567
5	3.932270	4.380381	4.17765
6	6.012340	7.915670	6.405147
7	7.245910	8.154133	8.281196
8	7.836030	8.911314	8.629276
9	8.605460	9.117009	9.242542
10	9.145910	9.345803	9.800411

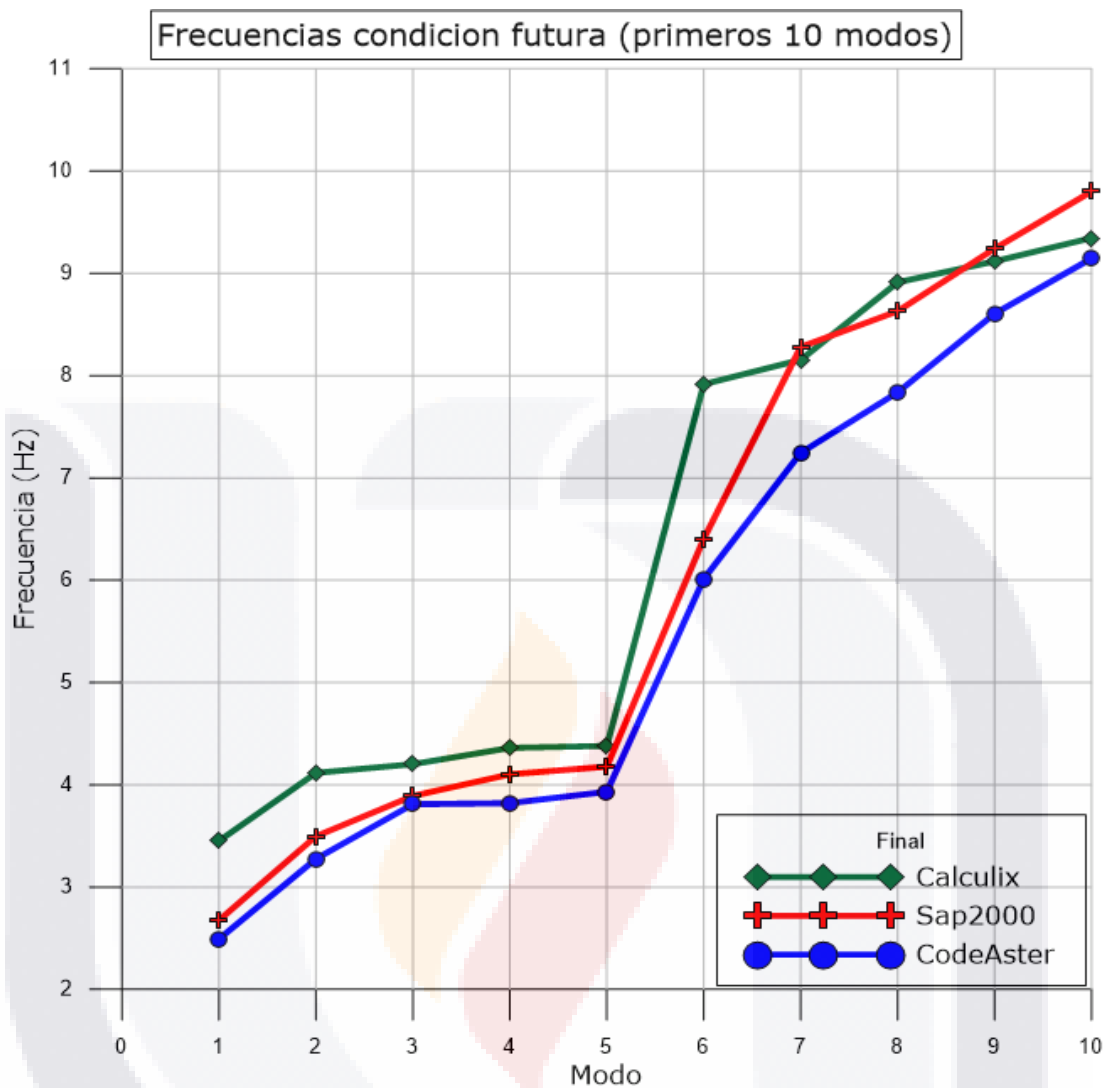


Figura 5-4.- Frecuencias naturales del templo para la condición futura.

Uno de los objetivos de la investigación es comparar las propiedades dinámicas del templo en los diferentes estados de degradación de la mampostería, es por ello que se las frecuencias naturales para cada estado de daño se resumen en la tabla 5-4 y corresponden a los primeros 10 modos.

Se eligieron los resultados del software CodeAster debido a que la calibración del modelo de elemento finito se realizó en el mismo software.

Tabla 5-4.- Frecuencias naturales para cada estado de degradación.

Modo	Frecuencia (Hz)		
	Estado inicial	Estado actual	Estado futuro
1	2.618020	2.520060	2.494220
2	3.442470	3.311180	3.276890
3	3.988640	3.834210	3.810690
4	4.029820	3.850920	3.821360
5	4.157110	3.964680	3.932270
6	6.237960	6.057990	6.012340
7	7.682560	7.314290	7.245910
8	8.549680	7.920390	7.836030
9	9.856440	9.002840	8.605460
10	9.960700	9.279960	9.145910

Para poder apreciar el cambio en las frecuencias para cada estado de degradación se graficaron estos resultados, la figura 5-7 muestra gráficamente los datos de la tabla 5-4, se indica la frecuencia en Hertz

para cada estado de daño en cada uno de los primeros 10 modos de vibrar.

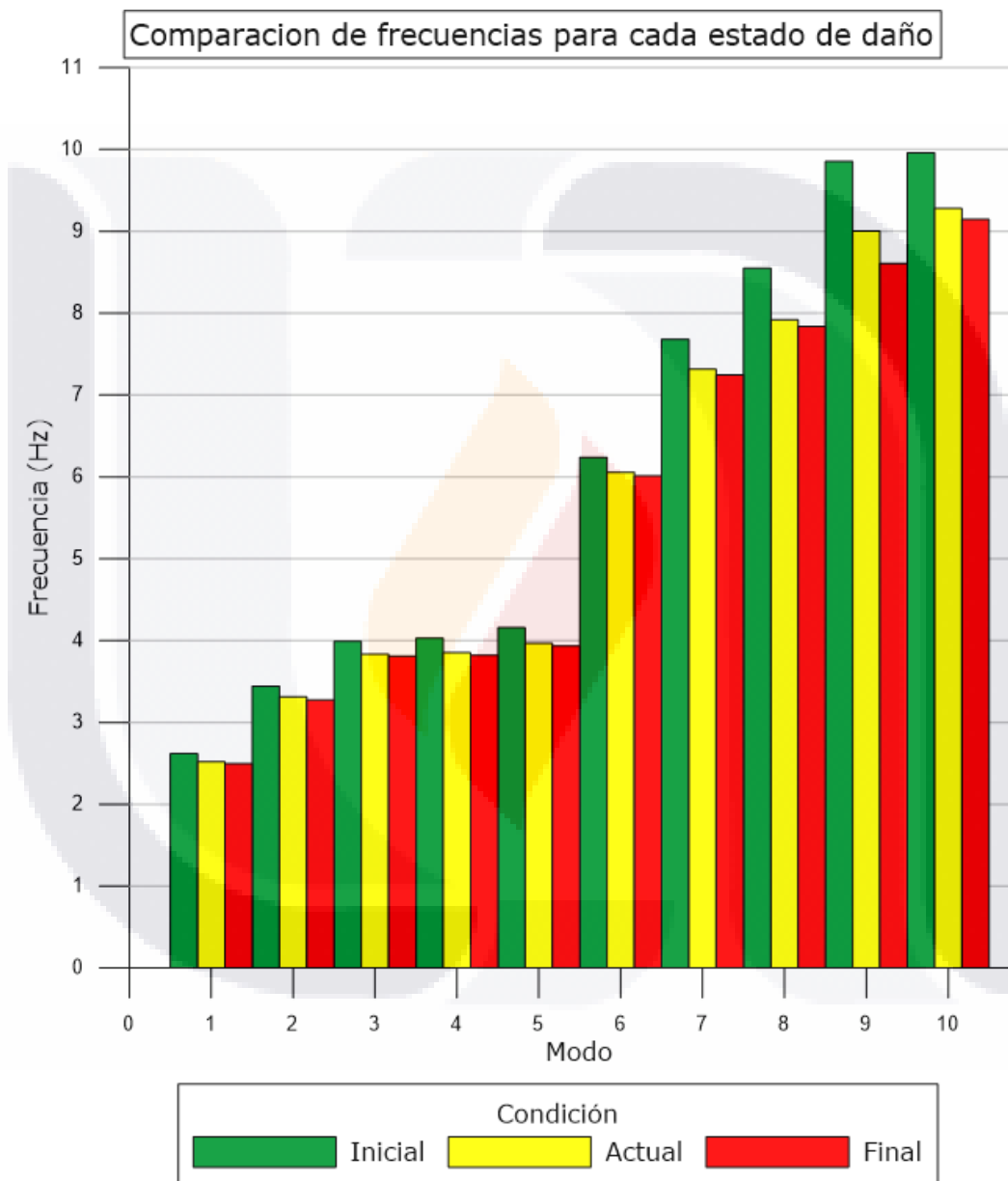


Figura 5-5.- Frecuencias naturales para cada estado de daño.

Los resultados de las frecuencias para cada modo de vibrar se desglosaron en graficas individuales, y se relacionaron con la edad del templo, para ello se tomaron los datos de Fonseca (2018) en su grafica donde relaciona el módulo de elasticidad de la piedra hermosa uno de los materiales presente en el templo, principalmente en la fachada, con la degradación producida por ciclos de cristalización de sales.

Se ubicaron en la gráfica de Fonseca los datos de las propiedades mecánicas actuales del material obtenido por mediciones "in situ" realizadas por Orenday (2016).

Los resultados de Orenday corresponden a los valores del ciclo 5 de la gráfica de Fonseca, por lo que se conjetura que han pasado 5 ciclos de cristalización de sales en los 110 años de vida del templo.

Siguiendo esta teoría el estado inicial que se considera en esta investigación corresponde al ciclo 0 en cuanto al daño por cristalización por sales y por lo tanto al inicio de la vida útil del templo, el estado actual significa la edad del templo, 110 años, que corresponde a 5 ciclos de cristalización de sales, por último el estado final se refiere al número máximo de ciclos que soportó la roca antes de disgregarse completamente, siendo 11 ciclos este valor, convirtiéndolo a años de vida son 242 años de daño en la mampostería.

La figura 5-8 describe el cambio en la frecuencia debido al daño en la mampostería para cada modo de vibrar, tomando como escala horizontal el número de ciclos de cristalización de sales y los años de vida del edificio.

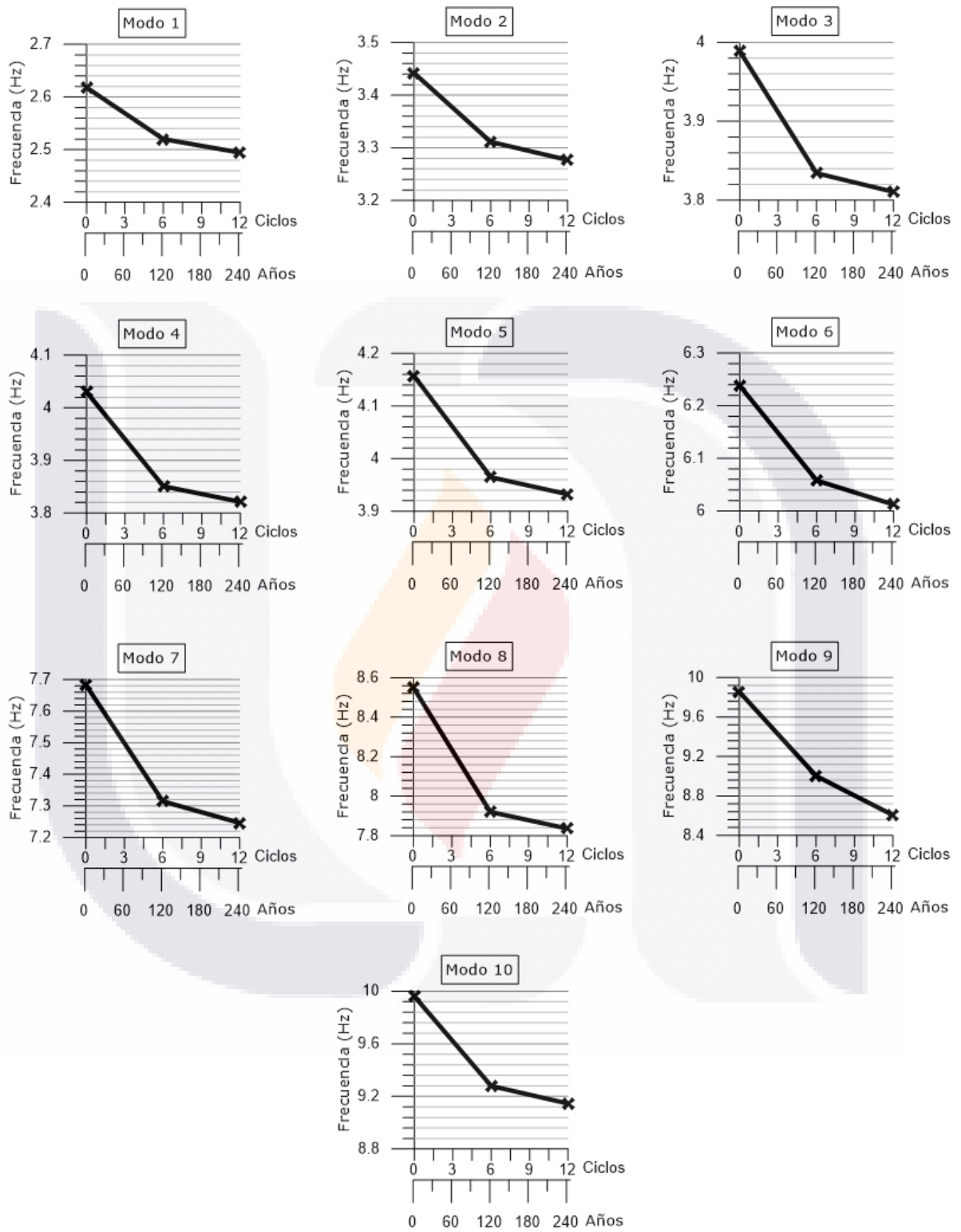


Figura 5-8.- Cambio en la frecuencia por estado de daño por modo.

Se graficó la frecuencia natural con relación a los años de vida del edificio únicamente para el primer modo, de manera que en la gráfica se muestra la ecuación que describe el comportamiento del decaimiento en la frecuencia en relación con la edad del templo. La figura 5-9 muestra la gráfica de los resultados de los análisis, la línea de tendencia que corresponde a una ecuación de segundo grado ya que es la que mejor describe el comportamiento de las frecuencias.

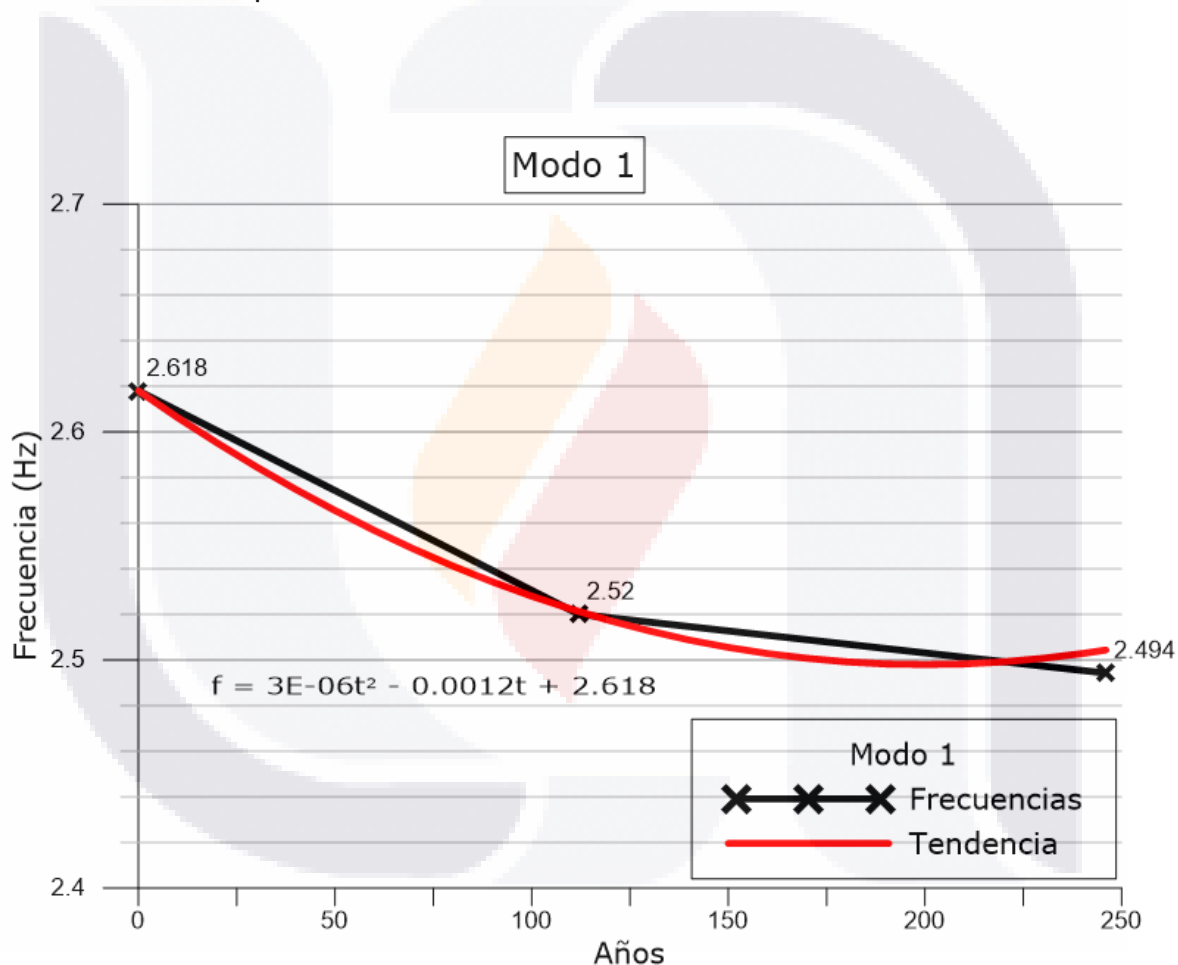


Figura 5-9.- Línea de tendencia para el primer modo.



CAPITULO

VI

DISCUSION DE RESULTADOS

CAPITULO VI DISCUSION DE RESULTADOS

El nuevo modelo geométrico logra reproducir de manera más aproximada la geometría general del templo, específicamente en las torres y en la cúpula, además se incluyeron los ventanales circulares presentes en la capilla y en los muros del templo, y también se agregaron las columnas y volados de la fachada, los cuales no se consideraban en modelos anteriores.

Los modelos de elemento finito creados en esta investigación se usaron para obtener las frecuencias naturales por medio de análisis modal, pero estos mismos modelos pueden utilizarse para realizar otros tipos de análisis ya sean estáticos o dinámicos, para ello solo habría que asignar las consideraciones que requiera el tipo de análisis que se desee realizar.

La calibración del modelo requirió modificar las propiedades mecánicas de los sistemas de mampostería hasta que la frecuencia natural encontrada en el modelo numérico para el primer modo corresponda con la mayor aproximación posible a la frecuencia fundamental encontrada por (Hernandez, 2018) cuyo valor es de 2.52 Hz, en la figura 6-1 se muestra una gráfica resumen de los resultados de Hernández donde se resalta la frecuencia fundamental de la estructura.

La comparación de los resultados de cada software para el primer análisis correspondiente a la condición inicial del templo, tomando como referencia los resultados del software Code-Aster que es en el que se realizó la calibración, se observa que los resultados de Sap2000 aproximados entre sí, varía un 7%, mientras que para Calculix los resultados difieren en 48%, para el primer modo.

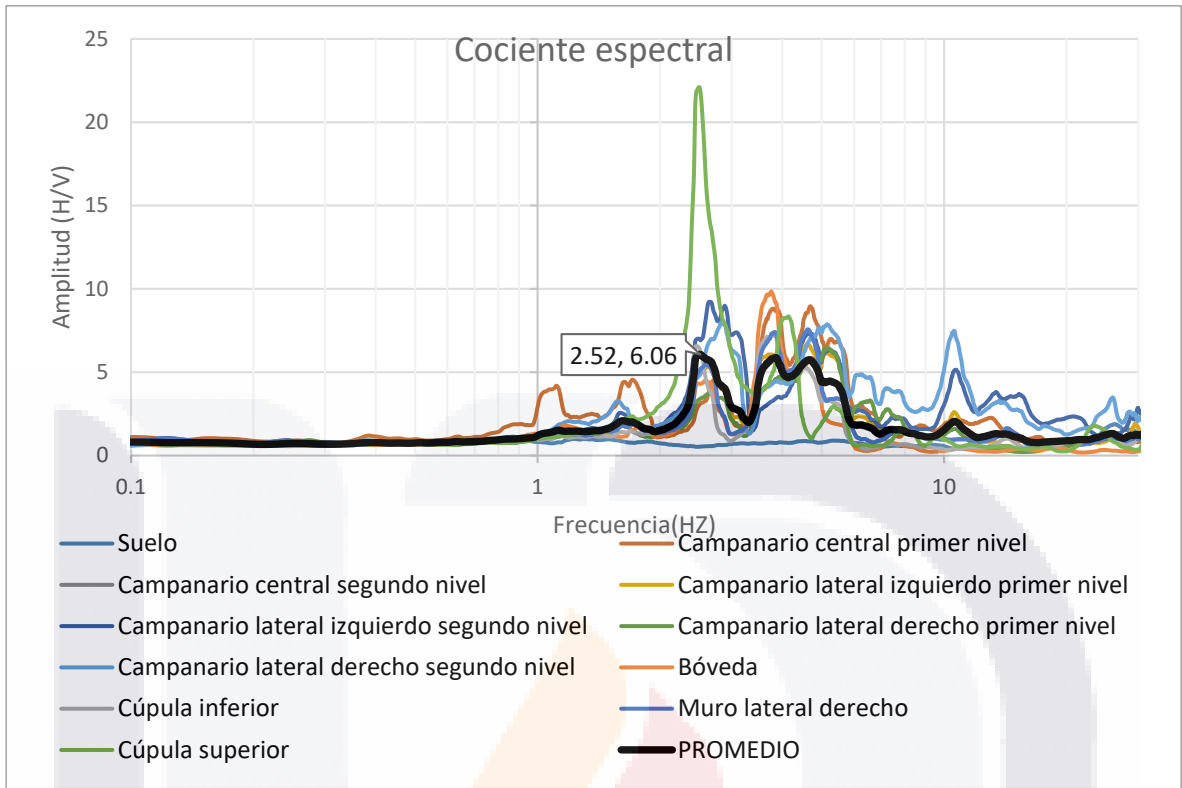


Figura 6-1.- Grafica resumen de las frecuencias encontradas por Hernández (2018) en la estructura del templo de San Antonio.

Este comportamiento de los resultados de los softwares es similar en los tres estados considerados en los análisis.

En el comportamiento de la frecuencia se observa que hay un decaimiento a medida que aumenta el daño por degradación de los materiales que componen la mampostería.

Esta disminución de la frecuencia natural se presenta para cada uno de los modos de vibrar, en este caso se analizaron los primeros 10, se observa que el comportamiento no es lineal, sino que disminuye más rápido del estado inicial al actual, no es así para el cambio entre el estado actual al estado final.

Este comportamiento se hace más notable para los modos superiores, por lo que el decaimiento en la frecuencia es más notorio.

En el análisis del primer modo (figura 5-9) se agregó a la gráfica la línea de tendencia que describe el comportamiento de la disminución en la frecuencia a medida que aumenta la edad del edificio, en este caso es una ecuación de segundo grado:

$$f = 3E-06t^2 - 0.0012t + 2.618$$

Dónde:

f = frecuencia, Hz

t = edad del edificio, años

Con esta ecuación es posible encontrar la frecuencia natural de la estructura para cualquier edad del edificio de 0 a 246 años que en teoría es la vida útil de la mampostería estudiada por Fonseca (2018).

La diferencia entre la frecuencia del estado inicial y el estado final es de 0.124 Hz, el cambio es mínimo para el primer modo, esta diferencia aumenta en los modos superiores siendo de 0.815 Hz para el modo 10.

Esto hace posible un diagnóstico de la estructura del edificio obteniendo la frecuencia natural "in situ", y ubicándola en la gráfica sería posible conocer cuánto es que está próxima a la frecuencia que corresponde al estado final de la mampostería, siendo posible también conocer el estado de la mampostería transformando a número de ciclos de cristalización de sales y así conocer sus propiedades mecánicas.

Este último procedimiento podría ser viable siempre y cuando el cálculo de la frecuencia natural de la estructura por medios experimentales sea preciso, o bien, se identifiquen los modos superiores de vibrar donde el rango de frecuencias es mayor.



CAPITULO
VII
CONCLUSIONES

CAPITULO VII CONCLUSIONES

El uso de software open source de elemento finito para el análisis de estructuras históricas es viable ya que los resultados son semejantes a los resultados obtenidos con software comercial, en este caso Code-Aster y Sap2000 respectivamente.

Para el caso de la calibración del modelo se obtuvieron resultados con mayor aproximación a la frecuencia natural de la estructura calculada por medios experimentales con el programa Salome de Code-Aster.

Los resultados del programa open source Calculix no fueron confiables debido a que se alejaban a los resultados obtenidos con los otros dos programas utilizando las mismas consideraciones para cada análisis, de igual forma fue el que menos se aproximó a la frecuencia experimental.

Existe un decaimiento en las frecuencias modales a través del tiempo de vida en una estructura debido a la degradación de los materiales con que está construido, encontrando esta razón de decaimiento es posible establecer un parámetro que indique cuando la estructura tendrá un comportamiento deficiente y a su vez es posible dar seguimiento a la evolución de las propiedades dinámicas reales de la estructura por métodos experimentales para identificar en que momento la frecuencia de la estructura se acerca a los niveles de riesgo.

La disminución de la frecuencia natural de la estructura por efecto de la degradación de la mampostería a través del tiempo indica que existe una disminución en las propiedades mecánicas del material, las cuales se pueden encontrar con la ecuación de Fonseca, relacionando la frecuencia con un estado de daño medido en ciclos de cristalización de sales con las gráficas 5-8 o 5-9. Esta disminución de la frecuencia

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

natural se asocia con mayores deformaciones y menor capacidad de carga en la estructura, debido a la pérdida de rigidez.

Para poder detectar el cambio en la frecuencia es necesario un análisis modal experimental preciso y/o detectar los modos superiores de vibración donde el rango de variación es mayor.

Con la ecuación encontrada es posible determinar la frecuencia que tendría la estructura del Templo de San Antonio en los próximos años, además es posible pasar de años a la equivalencia en ciclos de cristalización de sales y a las propiedades mecánicas de la mampostería.

El siguiente paso en el estudio de la estructura analizada en esta investigación es utilizar el modelo de elemento finito desarrollado para realizar un análisis dinámico ya sea para conocer la respuesta de la estructura ante algún tipo de excitación, de esta forma conocer los esfuerzos y deformaciones reales de la estructura. Valdría la pena también analizar el edificio ante una carga dinámica que actúe en un rango de frecuencias para conocer el comportamiento de la estructura cuando entra en resonancia.

A su vez, considerar el efecto de la degradación de los materiales a través del tiempo para conocer en qué momento los esfuerzos y/o desplazamientos serán excesivos comprometiendo la seguridad de la estructura.

Debido a que lo anterior no se contempla en los objetivos de esta investigación, se plantea como recomendación para futuras investigaciones.

REFERENCIAS

- Análisis no lineal de muros de mampostería confinada sujetos a cargas laterales. (s/f). Recuperado el 5 de mayo de 2017, de https://www.researchgate.net/publication/237403957_Analisis_no_lineal_de_muros_de_mamposteria_confinada_sujetos_a_cargas_laterales
- Animas Rivera, H. (2015). *Evaluación del empleo de modo de vibrar como indicador de la condición estructural de edificios históricos* (tesis doctoral). Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes.
- Anzani, A., Binda, L., & Roberti, G. M. (2000). The effect of heavy persistent actions into the behaviour of ancient masonry. *Materials and Structures*, 33(4), 251–261. <https://doi.org/10.1007/BF02479335>
- Asmussen, J. C., Brincker, R., & Rytter, A. (1997). Ambient Modal Testing of the Vestvej Bridge using Random Decrement. *Aalborg: Institute of Building Technology and Structural Engineering*.
- Azkarate, A., Ruiz de Ael, M. J., & Santana, A. (2003). El Patrimonio Arquitectónico.
- Bustamante, A. O., Carbo, G. R., & Mondragón, F. P. (2007). EVALUACIÓN SÍSMICA DE CONSTRUCCIONES HISTÓRICAS DE MAMPOSTERÍA: COMPARACIÓN DE TRES MODELOS DE ANÁLISIS. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 0(77), 71–88. <https://doi.org/10.18867/2007-RIS-77-4>

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Carpinteri, A., Invernizzi, S., & Lacidogna, G. (2005). In situ damage assessment and nonlinear modelling of a historical masonry tower. *Engineering Structures*, 27(3), 387–395. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.11.001>

Carta Internacional Sobre la Conservación y la Restauración de Monumentos y Sitios. (1964).

Carta internacional sobre turismo cultural. (1999).

CATEC. (2017). Recuperado el 22 de junio de 2017, de <http://www.catec.aero/materiales-y-procesos/lisis-modal.htm>

Chopra, A. K. (2014). *Dinámica de estructuras* (Cuarta edición). México: PEARSON EDUCACION.

Clinton, J. F., Case Bradford, S., Heaton, T. H., & Favela, J. (2006). The Observed Wander of the Natural Frequencies in a Structure. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(1), 237–257.

Cordero Hernández, T. (2013). *Estudio del cambio en las propiedades dinámicas de las estructuras de mampostería por efecto del deterioro de los materiales* (Tesis Maestría). Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes.

Declaración de Ámsterdam. (1975, octubre).

Díaz Cabeza, M. del C. (2010, mayo). Criterios y conceptos sobre el patrimonio cultural en el siglo XXI. *Serie Materiales de Enseñanza*, Universidad Blas Pascal, 1(1).

En línea, (2017). Recuperado el 28 de enero de 2018, a partir de <http://www.airstoc.com/media/by/la-casa-productora/in/aguascalientes-aguascalientes/all-media/files/church-and-museum-in-aguascalientes>.

Fonseca, M. (2018). *Caracterización de la degradación de las propiedades mecánicas de la mampostería por efecto del intemperismo* (Tesis Maestría). Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes.

Gentile, C., & Saisi, A. (2013). Operational modal testing of historic structures at different levels of excitation. *Construction and Building Materials*, 48, 1273–1285. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.013>

Hernández, G. (2018). *Medición de vibraciones en tiempo real de estructuras para el estudio de su comportamiento*. (Tesis Maestría). Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes.

Herrera, J. D. (2011). El deterioro de los edificios históricos por inadecuada atención de conservación. *Cuadernos de los Amigos de los Museos de Osuna*, (13), 122–123.

Lee, S.-Y., & Kim, J.-T. (2015). Effects of foundation damage and water-level change on vibration modal parameters of gravity-type caisson structure. *Science China Technological Sciences*, 58(2), 316–329. <https://doi.org/10.1007/s11431-014-5748-1>

Los Diversos Patrimonios. (2017, abril 27). Recuperado el 27 de abril de 2017, de <http://www.ilam.org/index.php/es/programas/ilam-patrimonio/los-diversos-patrimonios>

Navarro Hernández, M. (2013). *Levantamiento geométrico y de daños del templo de San Antonio y análisis estructural de la situación actual* (Tesis Maestría). Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes.

Ordaz, J., & Esbert, R. (1998). Glosario de términos relacionados con el deterioro de las piedras de construcción. *Materiales de Construcción*, 38(209), 39-45.

Orduña, A., & Ayala, G. (2001). Análisis no lineal de muros de mampostería confinada sujetos a cargas laterales. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Agustin_Orduna2/publication/237403957_Analisis_no_lineal_de_muros_de_mampostera_confinada_sujetos_a_cargas_laterales/links/00b495286a23c01d68000000.pdf

Orenday, E. (2016). *Estudio de caracterización de las propiedades mecánicas del templo de San Antonio para su análisis dinámico* (Tesis Maestría). Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes.

Pancorbo, F. J. (2010). *Corrosión, degradación y envejecimiento de los materiales empleados en la edificación*. Marcombo.

Patrimonio. (2017, abril 27). Recuperado de <https://es.unesco.org/creativity/sites/creativity/files/digital-library/cdis/Patrimonio.pdf>

Patrimonio cultural. (2017, abril 27). Recuperado el 27 de abril de 2017, de <http://www.conarte.org.mx/patrimonio-cultural>

- Peña Mondragón, Rivera Vargas, Robles Avilés, & Arce León. (2013). Caracterización dinámica del templo de San Bartolomé apóstol, Naucalpan. *Multidisciplina*, (14), 148–178.
- Ramírez, M., & Caamaño, J. (2002). Análisis de vibración sísmica y ambiental de un edificio antes y después de su refuerzo mediante dos cuerpos anexos (pp. 911–922). Presentado en XIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Puebla, Pue..
- Ramos, L. F., Marques, L., Lourenço, P. B., De Roeck, G., Campos-Costa, A., & Roque, J. (2010). Monitoring historical masonry structures with operational modal analysis: Two case studies. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24(5), 1291–1305. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2010.01.011>
- Rodríguez, F. J. A., Alemany, R. M. E., Gargallo, J. O., & Vázquez, P. (2006). Análisis del deterioro en los materiales pétreos de edificación. *Revista electrónica ReCoPaR*, (3), 23–32.
- Roeder Carbo, G. M. (2004). *simulación numérica del comportamiento mecánico de la mampostería* (doctorado). Universidad Nacional Autónoma de México, México DF.
- Sánchez Sosa, K. (2015). *Monitoreo de salud estructural empleando análisis de componentes principales con árboles de decisión y máquinas de soporte virtual* (Tesis Maestría). Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México DF.
- Templo de San Antonio de Padua | Viva Aguascalientes. (2017, junio 22). Recuperado el 22 de junio de 2017, de

<http://vivaaguascalientes.com/en/templo-de-san-antonio-de-padua/>

- Václav Kocí, Jirí Madera, Jan Fort, Jaromír Zumár, Milena Pavlíková, Zbysek Pavlík, & Robert Cerný. (2014). Service Life Assessment of Historical Building Envelopes Constructed Using Different Types of Sandstone: A Computational Analysis Based on Experimental Input Data. *The Scientific World Journal*, 2014, e802509. <https://doi.org/10.1155/2014/802509>
- Vyas, C. V. U., & Reddy, B. V. V. (2009). Prediction of solid block masonry prism compressive strength using FE model. *Materials and Structures*, 43(5), 719–735. <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9524-9>
- Yuen, K.-V., & Kuok, S.-C. (2010). Ambient interference in long-term monitoring of buildings. *Engineering Structures*, 32(8), 2379–2386. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.04.012>

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS



TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

ANEXO A

Resultados de la investigación de Fonseca (2018)

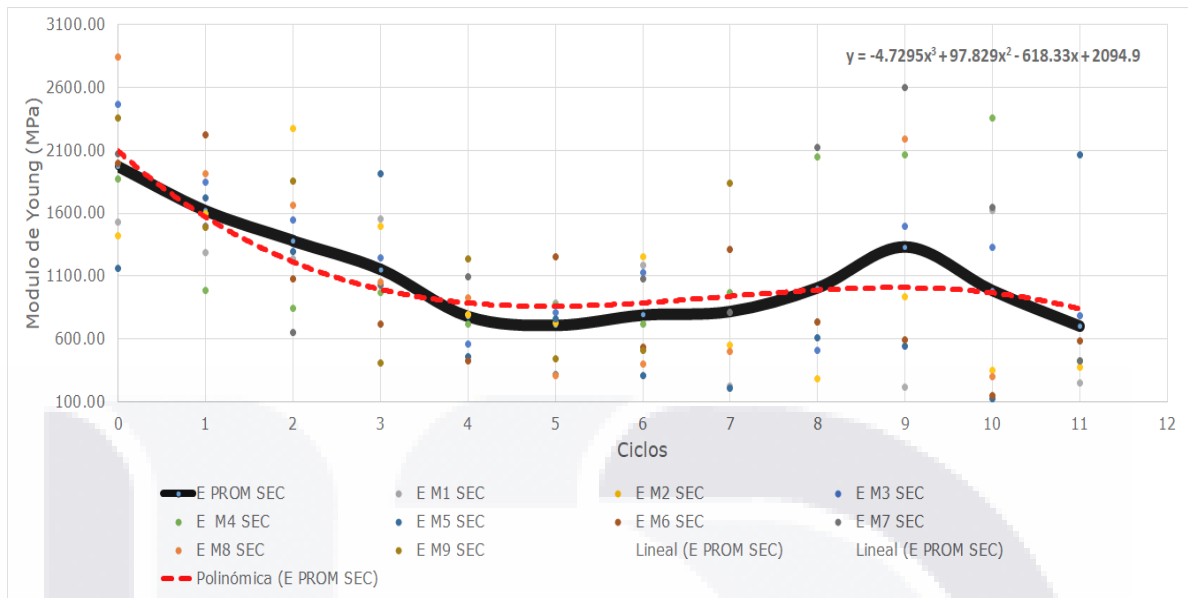
“Caracterización de la degradación de las propiedades mecánicas de la mampostería por efecto del intemperismo”

Valores obtenidos del módulo de Young estático por medio del método secante de la cantera hermosa.

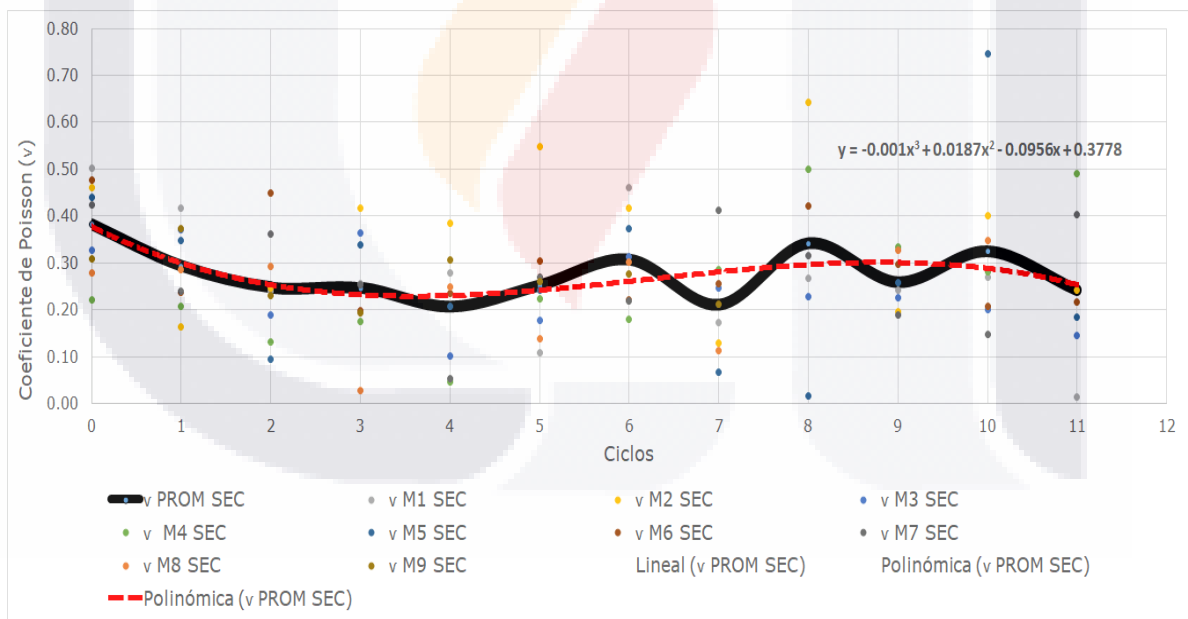
Muestra	E (Mpa) Ciclo 0	E (Mpa) Ciclo 1	E (Mpa) Ciclo 2	E (Mpa) Ciclo 3	E (Mpa) Ciclo 4	E (Mpa) Ciclo 5	E (Mpa) Ciclo 6	E (Mpa) Ciclo 7	E (Mpa) Ciclo 8	E (Mpa) Ciclo 9	E (Mpa) Ciclo 10	E (Mpa) Ciclo 11
1	1529.05	1289.29	1233.00	1549.97	790.31	886.58	1187.84	221.33	733.58	212.22	1620.89	245.47
2	1421.38	1597.89	2272.18	1494.93	793.76	726.16	1251.47	546.73	279.45	933.91	351.88	376.80
3	2468.45	1844.34	1545.94	1244.35	560.13	812.45	1124.68	949.72	503.69	1493.46	1330.19	785.26
4	1870.37	980.57	839.02	970.04	720.18	866.00	719.49	965.41	2051.64	2068.67	2353.94	421.43
5	1161.88	1720.88	1298.15	1916.86	455.53	755.17	302.71	203.65	609.60	541.02	124.29	2063.45
6	1999.86	2222.71	1077.61	713.54	426.87	1254.99	535.01	1312.93	734.56	593.59	145.16	583.79
7	2069.49	1499.47	650.69	1028.27	1095.55	315.04	1072.58	812.08	2124.81	2603.78	1642.74	423.40
8	2841.02	1917.73	1660.80	1053.73	926.71	304.06	396.03	499.11		2193.52	294.80	
9	2358.66	1485.08	1851.95	405.90	1232.66	437.80	504.97	1841.75				
Promedio	1968.91	1617.55	1381.04	1153.07	777.97	706.47	788.31	816.97	1005.33	1330.02	982.99	699.94

Valores obtenidos del coeficiente de Poisson estático por medio del método secante de la cantera hermosa.

Muestra	v Ciclo 0	v Ciclo 1	v Ciclo 2	v Ciclo 3	v Ciclo 4	v Ciclo 5	v Ciclo 6	v Ciclo 7	v Ciclo 8	v Ciclo 9	v Ciclo 10	v Ciclo 11
1	0.50	0.42	0.24	0.26	0.28	0.11	0.46	0.17	0.27	0.24	0.27	0.01
2	0.46	0.16	0.25	0.42	0.38	0.55	0.42	0.13	0.64	0.20	0.40	0.24
3	0.33	0.37	0.19	0.36	0.10	0.18	0.31	0.25	0.23	0.23	0.20	0.14
4	0.22	0.21	0.13	0.17	0.05	0.22	0.18	0.29	0.50	0.33	0.28	0.49
5	0.44	0.35	0.09	0.34	0.21	0.24	0.37	0.07	0.02	0.26	0.75	0.18
6	0.48	0.24	0.45	0.20	0.23	0.30	0.22	0.25	0.42	0.30	0.21	0.22
7	0.42	0.24	0.36	0.25	0.05	0.27	0.22	0.41	0.32	0.19	0.15	0.40
8	0.28	0.29	0.29	0.03	0.25	0.14	0.30	0.11		0.33	0.35	
9	0.31	0.37	0.23	0.19	0.31	0.26	0.28	0.21				
Promedio	0.38	0.29	0.25	0.25	0.21	0.25	0.31	0.21	0.34	0.26	0.32	0.24



Gráfica del comportamiento del módulo de Young con respecto al ciclo de cristalización de sales.



Gráfica del comportamiento del coeficiente de Poisson con respecto al ciclo de cristalización de sales.