



XXVIII  
CONSEJO DIRECTIVO



Arq. Irma García Torres  
M. I. Carlos Ramos Moreno

# El Elemento Finito aplicado en el Estudio de Vulnerabilidad Estructural de un Edificio Histórico

17 de mayo de 2024



XXVIII  
CONSEJO DIRECTIVO



## Contenido

- Introducción
- **I Aplicación del Método del Elemento Finito**
- 1.1 Tipos de Elemento Finito
- 1.2 Ejemplos de Elementos Finitos en 3D
- **II Factores de Deterioro Estructural**
- **III Vulnerabilidad Estructural ante la Amenaza Sísmica**
- III.1 Riesgo y exposición de amenazas sísmicas
- III.2 Respuesta sísmica de sus Macroelementos
- III.3 El efecto de Interacción Suelo-Estructura
- Conclusiones
- Bibliografía





XXVIII  
CONSEJO DIRECTIVO



## El Elemento Finito aplicado al Estudio de la Vulnerabilidad Estructural de un Edificio Histórico

### Introducción

El conocimiento de la vulnerabilidad estructural de un Edificio Histórico es fundamental para su conservación y la realización de acciones de intervención que conserven y mejoren sus propiedades dinámicas: Disminuyendo su respuesta sísmica y aumentando su resiliencia estructural alejando al Edificio del efecto de interacción Suelo-Estructura.

La aplicación del Método del Elemento Finito, es una técnica no destructiva, que permite construir un modelo representativo del edificio para estudiar su comportamiento estructural, el origen de sus patologías y monitorear su vulnerabilidad estructural como resultado de su estado de daño y de conservación en diferentes tiempos.

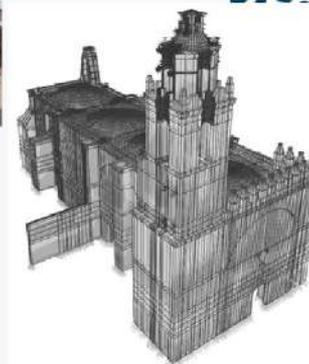
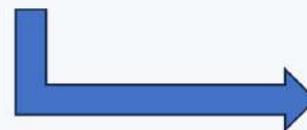


Fig. 1 Edificio del Exconvento Franciscano de Tecamachalco y el Modelo Representativo

## El Elemento Finito aplicado al Estudio de la Vulnerabilidad Estructural de un Edificio Histórico I Aplicación del Método del Elemento Finito “MEF”

El Método del Elemento Finito, es una aplicación matemática, basada en la aplicación de ecuaciones diferenciales, que permite construir, analizar y calcular resultados de acciones aplicadas a una estructura compleja como un Edificio Histórico.

El Modelo Representativo del Edificio Histórico considerado como “Continuo”, es dividido o discretizado en Elementos Finitos, con:

- La forma y tamaño requerido de acuerdo al objetivo de estudio.
- Las propiedades mecánicas de sus materiales.
- Condiciones de Frontera

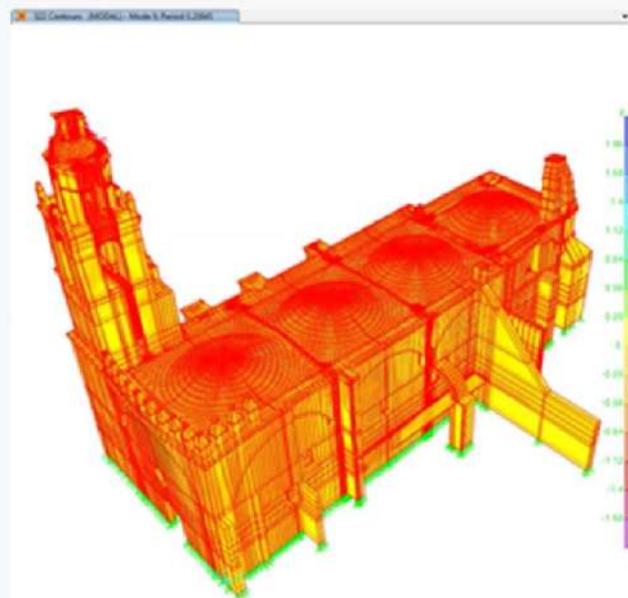
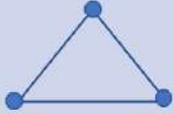
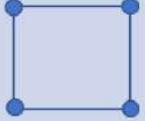
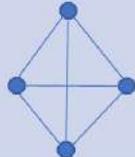
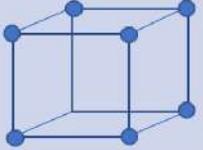
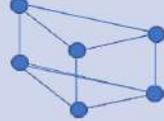
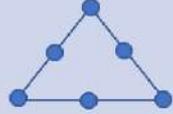
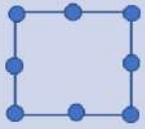
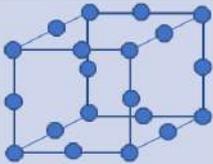
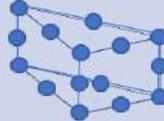


Fig. 2 Modelo de Elemento Finito

# El Elemento Finito aplicado al Estudio de la Vulnerabilidad Estructural de un Edificio Histórico

## I.1 Tipos de Elementos Finitos

Tabla 1. Tipos de Elementos Finitos

1D	2D		3D		
Barra de 2 Nodos	Triángulos 3 Nodos	Cuadriláteros 4 Nodos	Tetraedros 4 Nodos	Hexaedros 8 Nodos	Pentaedros 6 Nodos
					
Barra de 3 Nodos	6 Nodos	8 Nodos	10 Nodos	20 Nodos	15 Nodos
					





XXVIII  
CONSEJO DIRECTIVO



## El Elemento Finito aplicado al Estudio de la Vulnerabilidad Estructural de un Edificio Histórico

### I.1.1 Características de los Elementos Finitos

- Equilibrio: Todas las fuerzas deberán de cumplir con la condición de equilibrio.
- Compatibilidad o Adyacencia: Todos los elementos finitos serán compatibles, podrán deformarse pero no separarse, cada nodo se relaciona con un conjunto de variables incógnitas o grados de libertad, que entre el valor de una determinada variable es posible expresar en forma de un sistema de ecuaciones lineales.
- Comportamiento constitutivo del material: Cumplir con la relación de esfuerzo-deformación, de acuerdo con las propiedades mecánicas del material.
- Condiciones de Contorno. Las condiciones de frontera, representativas de la condición real del problema.



## El Elemento Finito aplicado al Estudio de la Vulnerabilidad Estructural de un Edificio Histórico

### I.2 Ejemplos de Elementos Finitos en 3D

#### 1.2.1 Representación virtual de una columna, con sólidos hexaedros de 8 nodos

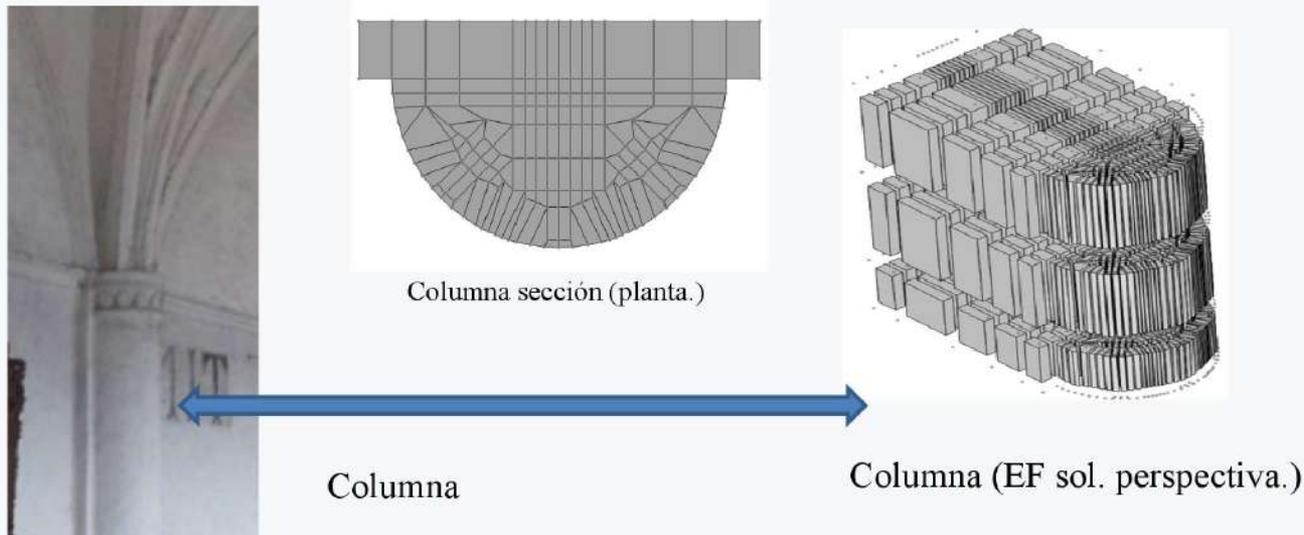


Fig. 3: Columna (vista interior y modelado con EF)

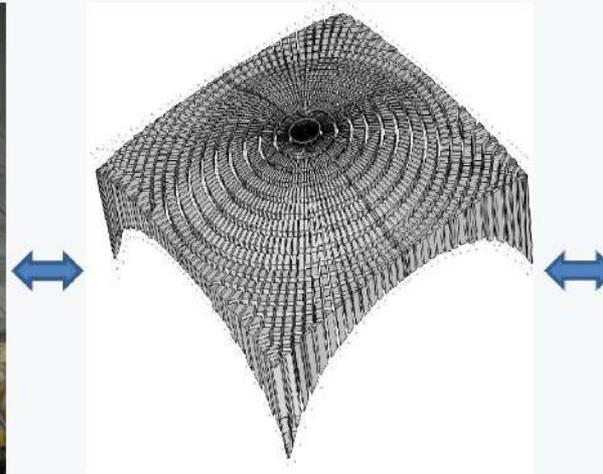
## El Elemento Finito aplicado al Estudio de la Vulnerabilidad Estructural de un Edificio Histórico

### 1.2 Ejemplos de Elementos Finitos en 3D

#### 1.2.2 Representación virtual de una sección de la bóveda, con "EF" sólidos, hexaedros de 8 nodos



Vista del intradós de la Bóveda



Sección de la bóveda con Elementos Finitos



Tipo de Elemento Finito utilizado

Fig. 4: Fotografía del intradós de la Bóveda y Muro Lateral Norte (vista interior y modelado con EF de la bóveda)



XXVIII  
CONSEJO DIRECTIVO



# El Elemento Finito aplicado al Estudio de la Vulnerabilidad Estructural de un Edificio Histórico

## II Factores de Deterioro Estructural en un Edificio Histórico

## Estado actual

- 1) Daño
- 2) Servicio
- 3) Conservación
- 4) Vulnerabilidad Estructural
- 5) Resiliencia Estructural



Fig. 2 Edificio



## El Elemento Finito aplicado al Estudio de la Vulnerabilidad Estructural de un Edificio Histórico

### II.1 Factores de Deterioro Estructural Antropogénicos

#### II.1.1 Guerras

Por sus características arquitectónicas y dimensiones considerando principalmente la altura, han sido utilizados como fortalezas y puntos de vigilancia en periodo de revoluciones, quedando las huellas por impactos de bala en algunos de sus elementos arquitectónicos como los cuerpos superiores de la Torre Campanario.



Figura 8. Cuerpos superiores de la torre campanario, con huellas de impactos de bala.

## El Elemento Finito aplicado al Estudio de la Vulnerabilidad Estructural de un Edificio Histórico

### II.1 Factores de Deterioro Estructural Antropogénicos

#### II.1.2 Vandalismo

El desconocimiento y la falta de valoración a nuestro patrimonio histórico, es un factor importante en el deterioro de los edificios históricos, como ejemplo: En el siglo pasado ocupaban el escudo ubicado en la base de la Torre Campanario para tiro al blanco, aún se observan las huellas de los impactos de bala.



Figura 9. Escudo de piedra en la base de la torre campanario, con huellas de impactos de bala.

## El Elemento Finito aplicado al Estudio de la Vulnerabilidad Estructural de un Edificio Histórico

### II.1 Factores de Deterioro Estructural Antropogénicos

#### II.1.3 Intervenciones estructurales y no estructurales

En el caso de daños estructurales, las reparaciones son insuficientes para solucionar el origen real de la patología en la bóveda.



Figura 10. Agrietamientos en el intradós de la bóveda, se observa que en acciones de rehabilitación anteriores, la reparación no ha sido suficiente para corregir el daño.

## El Elemento Finito aplicado al Estudio de la Vulnerabilidad Estructural de un Edificio Histórico

### II.1 Factores de Deterioro Estructural Antropogénicos

#### II.1.3 Intervenciones estructurales y no estructurales

En el caso de daños menores, causados por humedades en la parte inferior de los muros, los materiales no son compatibles químicamente con los materiales originales del edificio.



Figura 11. Los resanes en la sustitución de los aplanados en la parte baja de los muros, probablemente no se utilizan materiales compatibles a los originales.



XXVIII  
CONSEJO DIRECTIVO



## El Elemento Finito aplicado al Estudio de la Vulnerabilidad Estructural de un Edificio Histórico

### III Vulnerabilidad Estructural de un Edificio Histórico ante la amenaza sísmica

Factores de  
Vulnerabilidad  
Estructural por  
Sismo



III.1 El riesgo y exposición a amenazas que causen deterioro estructural (Sismos e intemperización).

III.2 La respuesta sísmica del Edificio y de cada uno de sus Macroelementos.

III.3 El efecto de interacción Suelo-Estructura (Relación de las propiedades dinámicas de la estructura y del Sitio)



## El Elemento Finito aplicado al Estudio de la Vulnerabilidad Estructural de un Edificio Histórico

### III Vulnerabilidad Estructural de un Edificio Histórico ante la amenaza sísmica

III.1 Del riesgo y exposición a amenazas sísmicas que causen deterioro estructural (Amenaza Sísmica al Municipio de Tecamachalco, Puebla)

#### III.1.1 Sismos de la Costa del Pacífico

Por su distancia del epicentro al Sitio de Estudio, distancia aprox. de 250 a 450 km. son importantes los efectos de la acción horizontal del sismo.

#### III.1.2 Sismos de Intraplaca y Volcánicos

Por su cercanía del epicentro al Sitio de Estudio, distancia menor a 120 km. son importantes los efectos de la acción horizontal y vertical del sismo.



Fig. 5 Mapa de la Amenaza Sísmica al Sitio de Estudio

## El Elemento Finito aplicado al Estudio de la Vulnerabilidad Estructural de un Edificio Histórico

### III Vulnerabilidad Estructural de un Edificio Histórico ante la amenaza sísmica

#### III.1.3 La respuesta sísmica del Edificio y de cada uno de sus Macroelementos.

En un Edificio Histórico, cada uno de sus Macroelementos tienen una respuesta sísmica diferente, de acuerdo con su ubicación dentro del conjunto, sus dimensiones, su orientación, su estado de conservación, la forma y conexión con los macroelementos colindantes y su función estructural.

Algunos Macroelementos responderán a frecuencias bajas y otros a frecuencias altas y/o a ambas.

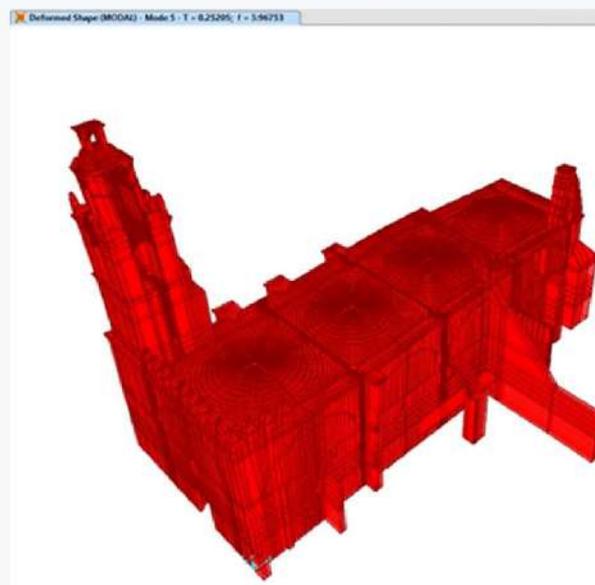


Fig. 6 Macroelementos del Edificio

## El Elemento Finito aplicado al Estudio de la Vulnerabilidad Estructural de un Edificio Histórico

### II Estudio de la Vulnerabilidad Estructural de un Edificio Histórico

#### III.3 El efecto de interacción Suelo-Estructura (Relación de las propiedades dinámicas de la estructura y del Sitio)

Es necesario, revisar además de la respuesta sísmica con periodos altos y frecuencias bajas, la respuesta a periodos cercanos al periodo de Sitio y frecuencias altas. Considerar la participación modal de masas, mínimo 90% en tres direcciones "X", "Y" y "Z".

MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y DE ISOPERIODOS PARA LAS TRES ZONAS URBANAS DEL MUNICIPIO DE TECAMACHALCO, PUEBLA



LA ZONA FIRME O SIN EFECTOS DE SITIO SE MUESTRA CON UN COLOR MORADO, LA ZONA INTERMEDIA O CON EFECTOS DE SITIO ENTRE 0.2 y 0.4 seg SE MUESTRA CON UN COLOR VERDE Y LA ZONA BAJA CON EFECTOS DE SITIO MAYORES A LOS 0.5 seg DE COLOR AMARILLO. TAMBIÉN SE HA TRAZADO LAS CURVAS DE IGUAL PERIODO CON LÍNEAS DELGADAS OSCURAS EN LOS SITIOS DONDE SE TENÍAN DATOS. ELABORÓ: GRUPO DE INGENIERÍA SÍSMICA UNAM, SOBRE UNA IMAGEN DE GOOGLE, 2011.

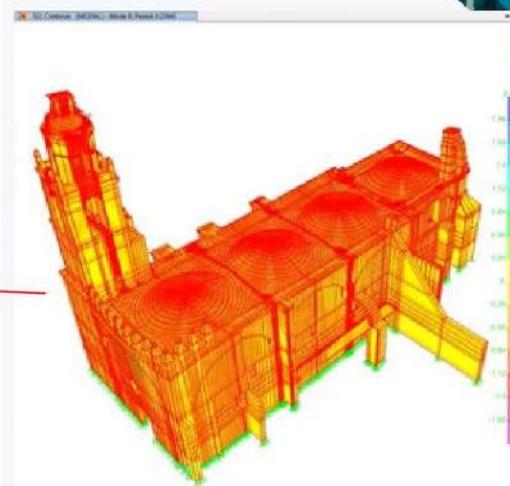


Fig. 7 Microzonificación sísmica del Municipio de Tecamachalco Puebla y el Modelo Analítico



XXVIII  
CONSEJO DIRECTIVO

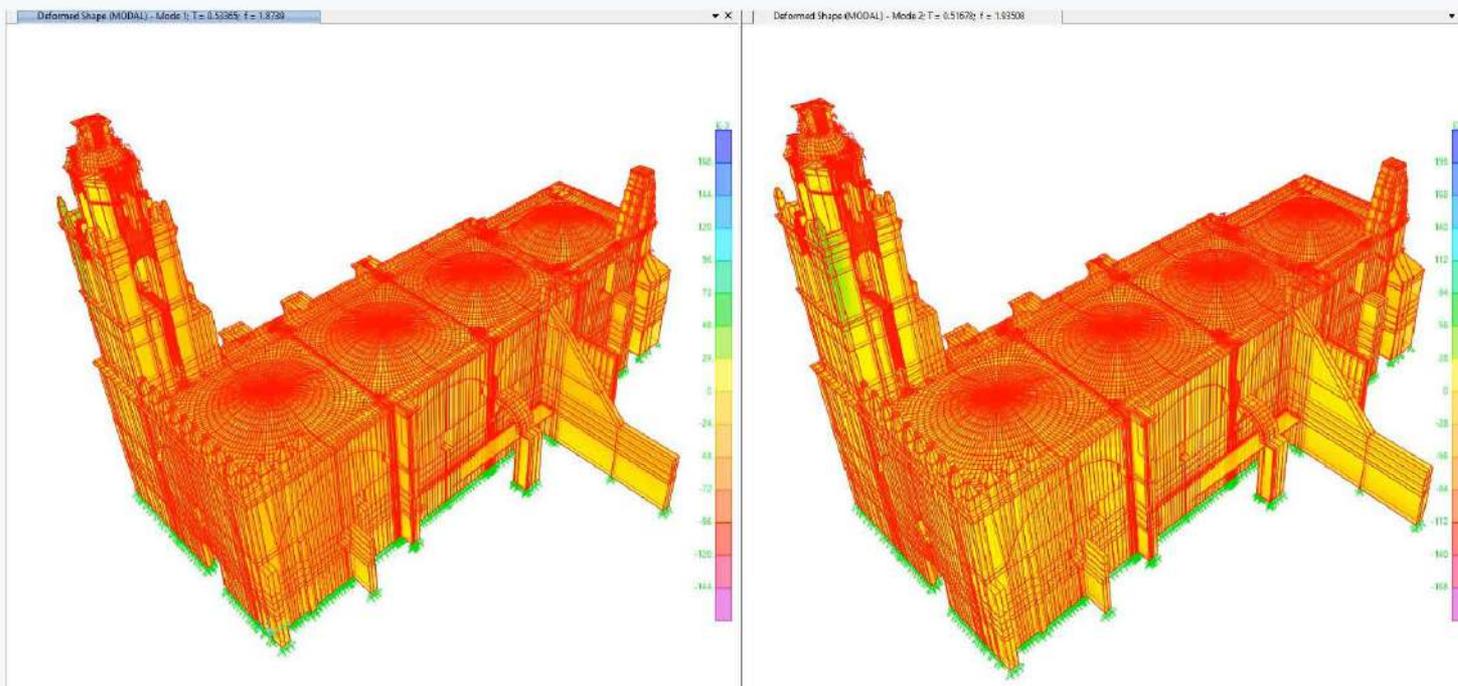
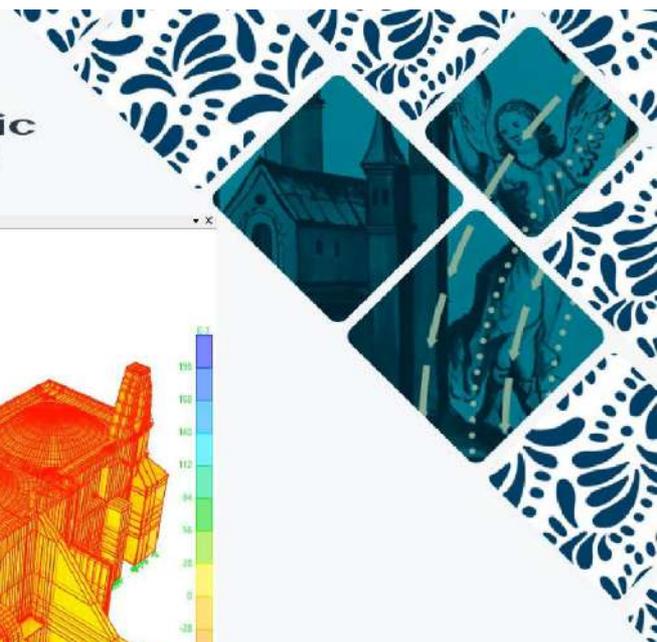


Fig. 8 Respuesta sísmica del Edificio y principales formas modales



XXVIII  
CONSEJO DIRECTIVO



## ➤ Conclusiones

### El Elemento Finito aplicado al Estudio de la Vulnerabilidad Estructural de un Edificio Histórico

1. El Método del Elemento Finito, es una herramienta con un fundamento matemático sólido, aplicable a la construcción virtual de un modelo representativo del edificio histórico, que permite estudiar, analizar y calcular las acciones sísmicas y la respuesta estructural del edificio.
2. El Modelo Representativo, debe llevar un proceso de validación y calibración, que cumpla con la representatividad: geométrica, las propiedades mecánicas de sus materiales, las propiedades dinámicas del Edificio Histórico y sus condiciones de frontera.
3. Estudiar la vulnerabilidad estructural del edificio, y su patrón de causa, es fundamental para realizar propuestas de intervención estructural razonables, enfocadas a mejorar el comportamiento estructural del Edificio, disminuyendo su respuesta sísmica y su vulnerabilidad estructural.
4. Con el Modelo Representativo una vez calibrado, es posible monitorear e identificar cambios en la vulnerabilidad estructural del edificio, durante los procesos de rehabilitación, Antes-Durante-Después, y la degradación o la recuperación de las propiedades mecánicas y dinámicas, en busca de reforzar su resiliencia estructural.
5. Los alcances de este estudio consideran solo el análisis lineal y será la base para análisis más detallados de análisis no lineal, los cuales nos acercarán más al comportamiento real del Edificio.





XXVIII  
CONSEJO DIRECTIVO



## Bibliografía

- Atlas de Riesgo de Tecamachalco Puebla (2011), H. Ayuntamiento de Tecamachalco, Puebla, 2011. Centro Universitario para la Prevención de Desastres Regionales (Cupreder), Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Secretaría de Desarrollo Social en México (SEDESOL), Puebla, México.
- Kubler, George. (2012). Arquitectura Mexicana del Siglo XVI; prólogo de Carlos Flores Marini; traducción de Roberto de la Torre, Graciela de Garay, Miguel Ángel de Quevedo – 2da. Edición – México: FCE, 2012.
- Centro Internacional de Estudios para la Conservación y la Restauración de los Bienes Culturales (ICCROM), Consejo Internacional de Monumentos y Sitios (ICOMOS), Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), Centro del Patrimonio Mundial de la UNESCO (2014), Manual de referencia para la gestión de riesgo de desastres. UNESCO / ICCROM / ICOMOS / UICN, 2014, ISBN 978-92-3-304165-3.
- México. Universidad Nacional Autónoma de México, I. d. G., Servicio Sismológico Nacional. (2021). Catálogo de sismos. Extraído de <http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/>.
- Ramos Moreno, Carlos (2015), Estudio del comportamiento estructural del Ex-convento Franciscano de Tecamachalco, tesis de maestría. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), Puebla, México.





XXVIII  
CONSEJO DIRECTIVO



# ¡Gracias!

M. I. Carlos Ramos Moreno

carlos\_ramss@yahoo.com.mx

Teléfono de Contacto 249 139 03 19



XXVIII  
CONSEJO DIRECTIVO



## El Elemento Finito aplicado al Estudio de la Vulnerabilidad Estructural de un Edificio Histórico

### Introducción

El conocimiento de la vulnerabilidad estructural de un Edificio Histórico es fundamental para su conservación y la realización de acciones de intervención que conserven y mejoren sus propiedades dinámicas: Disminuyendo su respuesta sísmica y aumentando su resiliencia estructural alejando al Edificio del efecto de interacción Suelo-Estructura.

La aplicación del Método del Elemento Finito, es una técnica no destructiva, que permite construir un modelo representativo del edificio para estudiar su comportamiento estructural, el origen de sus patologías y monitorear su vulnerabilidad estructural como resultado de su estado de daño y de conservación en diferentes tiempos.

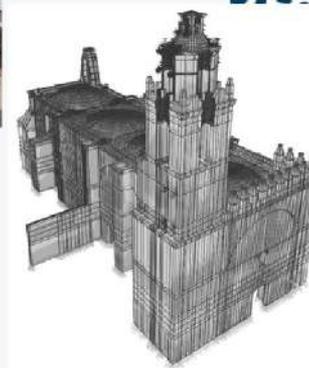


Fig. 1 Edificio del Exconvento Franciscano de Tecamachalco y el Modelo Representativo