

# Análisis del comportamiento estructural ante la acción de un sismo. El caso del Templo de San Agustín, Puebla, México

Benítez Barranco Alejandro E.<sup>1a</sup>, Fernández de Lara A. Ma. Del C.<sup>2b</sup>, Morales Arizmendi Moisés.<sup>3c</sup>, Lobato Macías Ma. Dolores<sup>4d</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Facultad de Arquitectura, BUAP, México

<sup>a</sup>enrique2000@yahoo.com.mx, <sup>b</sup>carmina\_fdezdelara@yahoo.com.mx,

<sup>c</sup>arizmendimoises@hotmail.com, <sup>d</sup>lolitawx@yahoo.com

**Palabras clave:** técnicas, comportamiento, estructural, sismo

## RESUMEN

El trabajo que se presenta se centra en el uso del Método del elemento Finito, técnica moderna que permitió valorar el comportamiento estructural del Templo de San Agustín en la ciudad de Puebla, México, a partir de las afectaciones que el movimiento sísmico de magnitud 6.5 en la escala de Richter (Mw 7.0), le provocó a esta estructura histórica que data del siglo XVII, y que por determinación de ley es considerada monumento histórico. Hecho que obliga a garantizar su permanencia no solo por ser fuente objetiva de conocimiento histórico, o por su significado cultural adquirido con el tiempo, o por ser ejemplo de tecnología constructiva, sino por ser una edificación religiosa en uso para la sociedad que lo ha heredado.

La modelación estructural permitió ver los puntos propensos a daño de manera virtual, situación que contribuyó al diagnóstico estructural, y permitió sustentar la definición de la intervención a realizar en el inmueble, garantizando la permanencia de este patrimonio arquitectónico del centro histórico de la ciudad de Puebla.

## INTRODUCCIÓN

El estado de Puebla al igual que otras entidades de la República Mexicana colindantes a él como Oaxaca, Tlaxcala, Veracruz, y el Distrito Federal entre otros, resultan propensos a movimientos sísmicos de manera permanente, por estar en la zona de subducción de la placa continental y la placa de Cocos, causando severos daños a estructuras históricas y contemporáneas en diferentes momentos, debido a que *“Las placas tectónicas, al deslizarse una sobre o debajo de otras, provoca un desplazamiento en algunas de las fallas del terreno, que son las áreas sobre las que se deslizan los bloques terráqueos que se ha roto, impulsados, según se cree por el magma del interior del planeta, que tiene a compensar, en la litósfera, el espacio ocupado por las nuevas cadenas montañosas marinas, ya que la superficie de la tierra es constante”* [Tonda, 1985, pp.7-9). Esto se traduce en movimientos telúricos de mayor o menor intensidad que se conoce como sismos.

La ciudad de Puebla, México fundada en el siglo XVI, cuenta en su núcleo central con edificios civiles y religiosos singulares de valor histórico, arquitectónico y constructivo, cualidad que le permite contar desde 1977 con una zona de monumentos históricos declarada como tal por el ejecutivo federal. “*Está formada por 391 manzanas que comprenden 2,619 edificios con valor histórico construidos entre los siglos XVI al XIX, y de los cuales 61 fueron destinados en alguna época al culto religioso. Entre ellos puede señalarse los conjuntos conventuales de San Francisco, Santo Domingo, San Agustín, El Carmen, Santa Bárbara, San Antonio y de la Compañía de Jesús, los conventos de Monjas de Santa Teresa, Santa Clara, La Santísima Trinidad, Santa Rosa, Santa Inés y Santa Mónica, los Templo de Guadalupe, de San Pablo, San José, de San Marcos, del Santo Ángel de Analco, de La Luz y de la Santa Cruz*” [SEP, 1977, p.5]. Además, del universo de edificaciones referidas 71 se destinaron a fines educativos y servicios asistenciales; el resto de las construcciones, es decir 2,487 son inmuebles civiles de uso particular. Incluye además 27 plazas y jardines de suma importancia para la ciudad. Esta misma área, fue inscrita en el año de 1987 en la lista de *Patrimonio Mundial* por la UNESCO, lo que impone un compromiso social por mantenerla.

El actual centro histórico de la ciudad, se encuentra referida en las efemérides sísmicas de México. Y sin duda, el sismo ocurrido el 15 de junio de 1999, se presenta como uno, cuyo efecto destructor afectó la arquitectura histórica de la ciudad. Presentando la misma un panorama desalentador. El sismo de magnitud 6.7 en la escala de Richter (Mw 7.0), ocasionó daños a edificios históricos y contemporáneos, y solo a lo largo de los días fue posible valorar los daños que dicho fenómeno natural ocasiono.

El sismo ha sido considerado por los expertos como atípico, debido a la diferencia de magnitudes de las máximas aceleraciones del terreno en dirección ortogonales, lo que se traduce en cambio de dirección de la estructuras cuando éstas estaban presentando un movimiento constante. Lo que se tradujo en desfazamiento de elementos con una altura considerable.

Las redes de estaciones acelerográficas de instituciones como el Instituto de Ingeniería y Geofísica de la UNAM., la Red de Observancia Sísmica del CENAPRED y la Red de Acelerógrafos de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, destacan que se registraron aceleraciones hasta 279 cm/s en dirección norte-sur y de hasta 104.5 cm/s en la dirección este-oeste; estos registros se presentaron en aquellas zonas donde existen depósitos blandos. Cabe señalar, que a pesar de que en la ciudad de Puebla predominan suelos conocidos como tepetates es decir tobáceos, también se llegan a encontrar depósitos aluviales que son depósitos blandos, y aunque en ellos fue donde existió mayor aceleración del movimiento telúrico, al estar poblado de construcciones de máximo dos niveles, no se presentaron daños. No así, en el área central de la ciudad, donde se localizan suelos aluvio-palustres-lacustres. Este tipo de suelo es producto de la ubicación de la ciudad en el Eje Neovolcánico y a los ríos que la cruzan.

No es la intención de este trabajo hacer una descripción detallada de los daños en todos los inmuebles, lo que se pretende es dar un panorama general que permita tener una idea de la gravedad de los daños que sufrió la zona de monumentos de la ciudad de Puebla en su patrimonio. Las cifras refieren 505 inmuebles que presentaron algún daño de los cuales, 149 solo tenían desprendimiento de aplanados al interior o exterior de las construcciones, 201 inmuebles además de los desprendimientos de aplanados presentaban fisuras en muros, mientras que 107 tenían estos dos tipos de deterioros pero además presentaban grietas en su estructura. Por último 48 inmuebles además de los deterioros antes descritos, presentaban pérdida de alguna parte de su estructura, sin llegar al colapso total del inmueble. En este rubro destaca el Templo de San Agustín, cuyo último cuerpo de la torre quedo casi en ruina (Fig.1); fue dictaminado para su demolición por personal de la Coordinación General de Protección Civil e investigadores del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED); sin embargo al ser un monumento histórico, se debería hacer un esfuerzo por evitar la pérdida de este patrimonio edificado de la ciudad.



Figura 1: Vista del último cuerpo de la torre. Templo de San Agustín

## Los Daños

El Templo de Nuestra Señora de Gracia, mejor conocido como de San Agustín, formó parte del conjunto religioso de uno de los conventos más grandes que tuvo la ciudad. Su importancia no solo se debió al número de religiosos que existían en él, sino al tipo de ministerio que ejercían con la población española e indígena entre los que destacan: decir misa y administrar los sacramentos de la eucaristía y la confesión. Pero además el convento albergaba el *noviciato* (o noviciado), el cual funcionaba al parecer desde 1569 en la ciudad de Puebla por órdenes de Fray Diego de Bertabillo (o Vertavillo), al igual que en el Convento de la Ciudad de México.

El templo está situado al norte del conjunto religioso tal como lo establece el programa arquitectónico de los conjuntos conventuales novohispanos, formaba la esquina de *“la antigua Calle del Costado de San Agustín”* [Leicht, 1986, pp. 100-101] y *“la antigua Calle de Ibarra desde 1875”* [Leicht, 1986, p. 196]. El frente del templo estuvo resguardado con un muro de más de tres varas de alto, el cual fue sustituido en 1955 por la reja que actualmente se observa. *“Delante de la Iglesia tiene un patio que lo rodea por el nordeste y sudeste, solado todo de laja”* [Fernández, 1992, p.400]; la descripción que se realiza corresponde al atrio del edificio religioso que presenta esta disposición.

Las primeras noticias documentadas de la construcción del nuevo templo corresponde al año de 1569 que es cuando se inician los trabajos, dos años más tarde se detienen la actividad constructiva por falta de recursos, y para 1591 se trabaja activamente en la obra, realizándose doce arcos torales para el templo que son los que le dan forma a la nave principal. Al mismo tiempo se empiezan a trabajar las portadas de cantera. La torre del templo no es un elemento más dentro del conjunto religioso, ya que su diseño y ubicación, está enfocado no solo a la parte funcional, sino a ser un elemento de remate en el conjunto. Su altura es más de dos veces la altura de la fachada.

Como tantas otras torres es de planta cuadrada, sin embargo existe una variante en ella en cuanto a su desplante, el cual no se hace desde el piso como es costumbre en muchas iglesias de la época, sino se desplanta sobre la bóveda de arista de la primera capilla del lado derecho del conjunto religiosos como a continuación se describe: *“Sobre la misma Capilla del ángulo del levante, se eleva la torre de tres cuerpos bien proporcionados y su cúpula sobre el último, con su linternilla que sirve del pie a la veleta, adornados de almenas los ángulos del segundo y tercer cuerpo, que la agracian mucho y poblada de*

*campanas y esquilas muy sonoras*”[Echeverría, 1992, p. 397]. Es hasta el año de 1780 que se concluyen los trabajos de la torre, por lo que tuvieron que pasar 211 años.

Cabe señalar que esta condición del desplante de la torre, hace que estructuralmente no sea tan rígida, hecho que se evidenció durante el movimiento telúrico. Los daños que se presentaron fue desprendimiento de aplanados, grietas y fisuras a todo lo largo de las cuatro caras de la torre, y el colapso parcial del último cuerpo de la torre, así como una pequeña parte del arranque de la cúpula que tenía de remate.

El peso estimado de la parte que colapso fue de setenta y cinco toneladas, de las cuales, la mayor parte cayó sobre la bóveda de la primera capilla del templo que es sobre la que se desplanta la torre, lo que le produjo grietas, fisuras y desprendimiento de aplanados a la bóveda de arista. Al interior de la torre, el viaje de caída del material degolló una ménsula de piedra que soportaba la gualdra de madera sobre la que cuelga la campana principal; además afectó una parte del desarrollo de la escalera de caracol que sirve para acceder al primer cuerpo de la torre, sin embargo no la inhabilitó totalmente. Los rieles que daban forma a la losa del segundo cuerpo se doblaron por el impacto recibido, esto produjo un empuje en uno de los arcos que aún permanecía de pie, pero había perdido su verticalidad. El resto de la parte colapsada afectó con grietas y fisuras la nave del templo, produciendo una horadación y deformación en el sitio donde se produjo el impacto, sin llegar a perforarla.

Cabe señalar que la obra arquitectónica se convirtió en un documento, pues no debemos perder de vista que es producto de una actividad intelectual que alcanza a ser materializada a través de una actividad constructiva, y que los materiales son hábilmente transformados para lograr formas y volúmenes predeterminados que permiten crear espacios habitables cuya ubicación y temporalidad plasmaran en ella las condicionantes del momento en que se erige. Por lo que toda obra arquitectónica, permite apropiarnos del cúmulo de información que ofrece. A través de diferentes levantamientos como el arquitectónico, fotográfico, de materiales y sistemas constructivos, así como el levantamiento de deterioros se pudo entender al monumento como un todo y no como la suma de partes.

Finalmente, después de los análisis realizados, se pudo constatar que en la fábrica del Templo y torre de San Agustín se utilizó piedra de travertino y de basalto gris, así como ladrillos. El conglomerante o mortero con el que se asentaron las piezas fue de cal-arena en proporción 1:3 en la mayor parte del edificio, análisis de laboratorio permitieron comprobar el uso de mortero en proporción 1:5 en el último cuerpo de la torre.

El esfuerzo normal de compresión en elementos estructurales como muros, se resuelve por el gran espesor de los mismos. Y la dimensión de la cimentación estuvo determinada por el tipo de subsuelo y la transmisión de cargas a recibir. Los grandes claros a cubrir fue posible a través de arcos y bóvedas, ambos elementos constructivos que trabajan a compresión.

Analizando lo que quedó de la torre, se evidencian problemas constructivos tales como: mortero en proporción 1:5 que resulta de muy baja calidad para los trabajos que se realizaron en la torre; pérdida de la geometría de la cúpula, por falta de sección en su arranque, capaz de soportar los esfuerzos adicionales del sismo, sin olvidar que el último cuerpo de la torre disminuyó su masa al reducir el espesor de los muros e incorporarle cuatro vanos más a los ocho que conformaban su diseño. El procedimiento constructivo que se observa en la cúpula presenta hiladas que no corresponden a su centro de trazo, es decir fueron colocados a nivel o en forma horizontal, lo que evita que los esfuerzos sean transmitidos a los muros por la propia geometría del elemento arquitectónico.

Se encontró residuos de tierra de un cuarto de la cúpula hacia su parte más alta, lo que hace suponer un relleno a manera de cimbra para poder concluir la construcción de la misma. Este error constructivo corresponde al siglo XIX, sin embargo la parte de la torre aún en pie demostró que el error era de origen y que en la reconstrucción se utilizó el mismo procedimiento. Todos estos daños en la torre aparentemente fueron producidos por el sismo, pero no debemos olvidar que los movimientos telúricos generalmente evidencian errores constructivos y malas intervenciones.

## Análisis del comportamiento estructural

Aunque a simple vista el daño más severo que presentaba la torre era el colapso de su último cuerpo, casi toda su estructura portante presentaba grietas y fisuras a todo lo largo de sus cuatro muros. El riesgo aumentó cuando al iniciar trabajos de consolidación en los muros del primero y segundo cuerpo de la torre, se comprobó la existencia de grandes hoquedades en su interior; lo que hacía suponer una estructura poco sólida. Incluso no debemos olvidar que cualquier hueco en un muro portante supone una concentración de carga en los bordes del material.

Considerando que se trata de un monumento histórico, la propuesta de intervención debía ser autorizada por el Instituto nacional de Antropología e Historia. Una vez que fue aceptada la propuesta de consolidación de la torre y reconstrucción de la parte faltante con materiales y sistemas constructivos contemporáneos, tal como lo establece la Carta de Venecia en su artículo 10 que refiere: *“Cuando las técnicas tradicionales se revelen inadecuadas, la restauración puede asegurarse apelando a las más modernas técnicas, cuya eficacia haya sido demostrada por estudios científicos y garantizada por la experiencia”* [Mangino, 1991, p.73]

Es así, que se hizo el estudio de la ruina en cuanto a sus aspectos formales, funcionales, de escala y de estilo; lo que permitió respetar la parte y sustancia antigua y el aspecto formal del monumento. La propuesta correspondió a una estructura tridimensional para el último cuerpo de la torre, que permitiera la unidad (-abrazara-) con la ruina, y el remate se trabajó con una cúpula geodésica que daría forma a la cúpula de la torre. Ambas estructuras pueden definirse como *“un sistema estructural formado por un gran número de barras que unidas por sus extremos dan como resultado una red que puede considerarse bidimensional o tridimensional, cuando es de una o dos caras respectivamente”* [Heinen & Gutiérrez, 1977, p. 12]. Dentro de las principales ventajas de este tipo de estructuras se encuentra: facilidad constructiva, son ligeras, pueden ser desmontables, facilidad de transporte, y cuando se usan como cubiertas, permiten cubrir grandes claros.

Definida la estructura a calcular, se toma como base las dimensiones y proporciones del elemento original aún en pie. Una vez calculada se sometió a un modelo finito para conocer los esfuerzos que esta estructura pudiera ejercer sobre la torre y la parte original del último cuerpo de la misma aún en pie. *“Este método se basa en una idealización de la estructura que consiste en suponer la verdadera estructura (continuum) compuesta por una cantidad de elementos arbitrarios, pero definidos e interrelacionados entre sí a través de sus nudos de modo que la continuidad tensional y de esfuerzos se aproxima a los desplazamientos experimentados por los nudos”*[Bares, 1981, p. 586](Fig. 2 y Fig. 3)

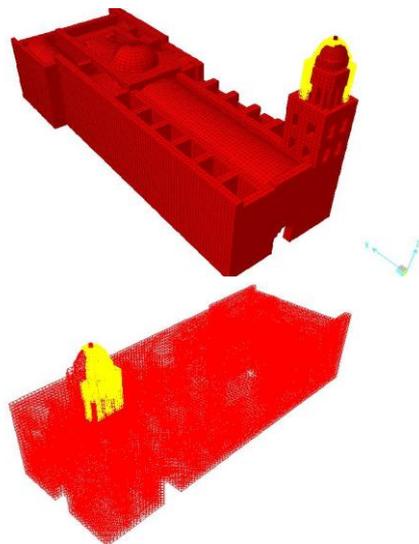


Figura 2. Idealización del conjunto de la estructura del templo

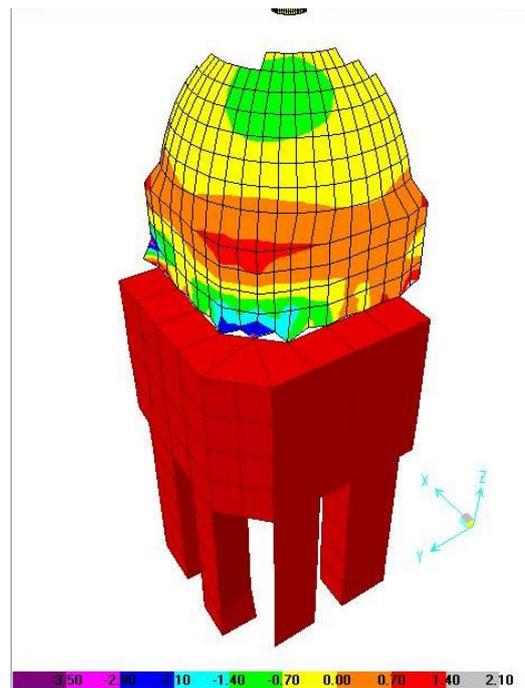


Figura 3: Idealización de la estructura de la torre. Templo de San Agustín

De este estudio se llega a la conclusión que la estructura tridimensional en su desplante deberá tener unas juntas de neopreno para amortiguar los esfuerzos de tensión y de torsión; así como unos tirantes interiores cuya sujeción sería al interior de los muros del primero y segundo cuerpo de la torre para lograr una homogeneidad en el conjunto.

A grandes rasgos, se ha mencionado aspectos relacionados con la técnica de ejecución de la estructura tridimensional y el uso del sistema finito. La ejecución precisa del proceso de puesta en obra, se encuentra dentro del proyecto ejecutivo de intervención en propiedad del Instituto Nacional de Antropología e Historia. El cual muestra la vinculación entre los materiales contemporáneos, la técnica constructiva y el proyecto, anteponiendo en todo momento el respeto al testimonio histórico y la no unidad de estilo; ya que este no es objetivo de la restauración.

Se buscó en todo momento diferenciar la parte original de la que no lo era, lo que fue posible a través de los materiales utilizados, también se colocó una exposición fotográfica tanto de la propuesta como del proceso de ejecución de la obra de restauración, y se dio la difusión de la importancia de estos trabajos que se venían realizando en el Templo de San Agustín a través de los medios de comunicación, y de la participación activa del fraile responsable del templo. Pues la preservación del monumento que se estaba recuperando a través de la restauración, debe ser responsabilidad de todos.

## CONCLUSIONES

La problemática que se presentó en el conjunto religioso de San Agustín y más concretamente en su torre, permitió comprobar que toda obra de restauración requiere de un amplio conocimiento de materiales y sistemas constructivos tradicionales, así como su comportamiento dentro de la obra a restaurar. Que el monumento en caso de eventualidades como siniestros puede ser un importante documento que proporciona información para iniciar trabajos de aseguramiento. Que esta información debe ser

complementada con la investigación histórica, que permita conocer todo acerca de la obra arquitectónica en el momento de su construcción, y de las etapas subsecuentes que formen parte de la segunda historia del edificio. Que para elaborar el proyecto de intervención, los levantamientos de materiales y sistemas constructivos, así como el levantamiento de deterioros son determinantes.

Que el proyecto de restauración debe considerar el uso de técnicas y tecnologías no tradicionales cuando se haya demostrado la ineficacia de las tradicionales en caso de daños severos en el monumento, siempre que estos sean respetuosos de los valores de la obra arquitectónica. Que todo trabajo de restauración debe ser realizado involucrando a tantas disciplinas como sean necesarias para el mejor desarrollo del mismo, ya que tanto la historia, como la arqueología, la antropología, la ingeniería, la geología, la física y la química entre otras, tienen mucho que aportar en la conservación del patrimonio cultural que nos legaron nuestros antepasados.

Incluso la interdisciplinariedad permite conceptualizar mejor la problemática que se va a resolver, y da pie a la elaboración de una estructura metodológica que haga de la restauración la práctica científica que debe ser. Práctica que requiere de personal especializado para los trabajos a realizar, cuyos conocimientos prácticos permiten el respeto a la parte material del bien cultural. Y promueven la recuperación de técnicas y oficios que en ocasiones han caído en desuso. Y que ante la necesidad, se vuelven a valorar y a ponerse en práctica.

Pero toda restauración integral con rigor científico y técnico, debe tener un sustento teórico como se señaló en el trabajo, solo así entenderemos que los monumentos históricos son testimonios de la cultura y fuente valiosa de la historia que deben ser conservados por su capacidad de delación y evidencias que refuerza la conciencia de identidad de un pueblo. Sencillamente ese sustento teórico permea la integridad profesional del restaurador y hace más fácil la toma de decisiones en bien del monumento como en el caso de la reconstrucción, la cual es una de las intervenciones más delicadas dentro de la restauración, misma que es posible si tenemos presente que la restauración termina donde comienza la hipótesis.

Como toda actividad humana, la restauración es perfectible, lo mismo que los materiales y técnicas empleadas; y aunque el campo de la restauración ha habido avances significativos en las últimas décadas, como el uso del sistema finito, termina siendo opcional, cuando ellos garantiza una respuesta asertiva a favor del monumento.

## REFERENCIAS

- [1] Tonda, J. (1985) "Las características de un temblor. Una ruptura de 200 km. de longitud, pp. 7-9
- [2] SEP/ INAH. (1977). *Decreto por el que se declara una Zona de Monumentos Históricos en la Ciudad de Puebla de Zaragoza, Estado de Puebla*, p.5
- [3] Leicht, H. (1986). *Las Calles de Puebla*" Puebla, 1986, pp. 100-101
- [4] Leicht, H. (1986). *Las Calles de Puebla*" Puebla, 1986, p.196
- [5] Fernández Echeverría y V. M. (1992). *Historia de la Fundación de la Ciudad de la Puebla de los Ángeles*, p. 400
- [6] Mangino T. A. (1991)..*La Restauración Arquitectónica. Retrospectiva Histórica*, p. 73
- [7] Heinen J. y J. Gutiérrez V. (1977). *Estructuras*. Parte 6, p. 12
- [8] Bares, R. (1981). *Tablas para el cálculo de placas y vigas pared*, p. 586