



Diagnóstico del estado físico de una edificación religiosa del siglo XVI dañada por sismo

Patricia Máximo-Romero, Rogelio Ramos-Aguilar, Máximo Ávila-Cruz, Víctor Galindo-López, José G.O. Muñoz-Flores, Lorena Cárdenas-López, Argenis Eduardo Morales-González & Alan Agustin Salas-Xochipa

Facultad de Ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. patricia.maximo@correo.buap.mx

Recibido: 6 mayo 2024. Recibido en formato revisado: 5 septiembre 2024. Aceptado: 9 septiembre 2024.

Resumen

Este trabajo es el resultado de una serie de estudios que se realizaron en el templo de Nuestra Señora de la Merced, localizado en el Centro Histórico de la ciudad de Puebla, México. El templo es una edificación colonial con valor patrimonial que ha tenido modificaciones estructurales y daños por sobrecargas generadas por sismo y por bombardeos. Sobresale el sismo del 2 de octubre de 1864 que dañó severamente el segundo cuerpo de la torre. El sismo del 19 de septiembre de 2017 agrietó y fisuró algunos elementos de la estructura, por ejemplo, la clave del arco del coro donde se formó una articulación plástica. Se realizó la modelación del arco en SAP 2000 v20 para aplicar un análisis Pushover; se registraron vibración ambiental, temperatura y humedad, variables que degradan a los materiales; se hizo el levantamiento topográfico de la portada y el estudio fotogramétrico del exterior de toda la estructura.

Palabras clave: sismo; templo; Pushover; vibración ambiental; fotogramétrico.

Physical diagnostic of a 16th century religious building damaged by an earthquake

Abstract

This work presents the findings of a series of studies conducted on of the temple Nuestra Señora de la Merced, located in The Historic Center of the city of Puebla, Mexico. The temple is a colonial building with heritage value that has undergone structural modifications and suffered damage from overloading generated by earthquakes and bombings. A noteworthy earthquake is the one of October 2, 1864, which severely damaged the second level of the tower. The earthquake of September 19, 2017, caused cracking and fissures in some elements of the structure, such as the keystone of the choir arch, where a plastic joint was formed. The arch was modeled in Sap 2000 v20 to perform a Pushover analysis; ambient vibration, temperature, and humidity were recovered, variables that cause degradation of materials. A topographic survey of the façade and a photogrammetric study of the entire structure's exterior were conducted.

Keywords: earthquake; temple; Pushover; ambient vibration; photogrammetric.

1 Introducción

Los estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca, Puebla, Estado de México, Veracruz y Baja California, forman parte del territorio mexicano localizados en la costa del Océano Pacífico. Estos estados están localizados en las zonas de riesgo alto y riesgo medio. La alta sismicidad generada por la interacción de las placas de Norteamérica, de Cocos, del Pacífico, de Rivera y del Caribe, se registra en la red acelerográfica que se extiende a lo largo

de la costa del Pacífico, hacia los estados de Jalisco, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas, y en las ciudades de México, Puebla, Oaxaca y Acapulco [1].

El estado de Puebla se divide en tres regiones sísmicas, al norte la zona asísmica, en el centro la zona penisísmica y al sur la zona sísmica. La última zona está relativamente cerca de la zona de subducción del sureste de la República Mexicana. También, se tienen identificadas siete fallas geológicas, de las cuales, tres (Popocatepetl-Chignahuapan, Malintzi y Tehuacán, Cd. Sedán) pasan por la zona sísmica,

How to cite: Máximo-Romero, P., Ramos-Aguilar, R., Galindo-López, V., Muñoz-Flores, J.G., Cárdenas-López, L., Morales-González, A.E. y Salas-Xochipa, A.A., (2024). Diagnóstico del estado físico de una edificación religiosa del siglo XVI dañada por sismo. BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA. 56, pp. 33 - 46. DOI:<https://doi.org/10.15446/rbct.n56.114291>

donde han ocurrido sismos que han causado escenarios de desastre en algunos municipios del estado de Puebla.

Uno de los sismos que ocasionó graves daños en el Patrimonio Cultural Edificado, principalmente en templos construidos entre los siglos XVI y XIX, fue el que ocurrió el 15 de junio de 1999, cuyas características y reporte de daños se dieron a conocer en el Informe Técnico “El sismo de Tehuacán del 15 de junio de 1999”, elaborado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). Según el Servicio Sismológico Nacional (SSN), el sismo ocurrió a las 15:41:06 hrs. (Hora local), con magnitud M 6.7 (Mw 7.0), coordenadas focales latitud 18.20°N, longitud 97.47°O y profundidad de 60 a 80 km. El epicentro se ubicó aproximadamente a 20 km al sur-suroeste de la ciudad de Tehuacán, Puebla y también a unos 55 km al noreste de la ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca, donde se registró un temblor de magnitud Mw 7.1 el 24 de octubre de 1980. El temblor produjo intensidades de moderadas a altas en el epicentro, causando daños de consideración en algunas ciudades y poblados del sur de Puebla y norte de Oaxaca; y en mucha menor medida, en el sur de Morelos y en los estados de Tlaxcala, México, Veracruz y Guerrero. En otros lugares los daños fueron muy ligeros.

En el estado de Puebla, causó daños en viviendas, escuelas, hospitales, edificios históricos e iglesias, edificios públicos, caminos, puentes y en el suministro de energía. El Consejo Nacional para la Cultura y las Artes (CONACULTA) y el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), censaron minuciosamente los daños y reportaron 1,124 edificios históricos e iglesias dañados, de los cuales un 10 por ciento tuvieron daños severos, 40 por ciento moderados y 5 por ciento leves. (CENAPRED, 1999) [2].

El 7 de septiembre de 2017, ocurrió un sismo de magnitud 8.2, el Servicio Sismológico Nacional reportó los datos siguientes: epicentro localizado a 133 km al suroeste del poblado de Pijijiapan, en el estado de Chiapas, ocurrido a las 23:49:17 (hora del centro), profundidad de 45.9 km y coordenadas epicentrales 14.761° latitud N y -94.103° longitud W [3]. Este sismo se sintió en los Estados de Chiapas, Morelos, Puebla, Tlaxcala, Guerrero, Estado de México, Ciudad de México y Oaxaca, causó la pérdida de vidas humanas y daños severos en viviendas construidas con adobe y templos, localizados en Oaxaca, principalmente.

Otro sismo de magnitud importante fue el ocurrido el 19 de septiembre de 2017, a las 13:14:40 horas, reportado por el Servicio Sismológico Nacional, con magnitud de 7.1, localizado en el límite estatal de Puebla y Morelos, a 12 km al sureste de Axochiapan, Morelos, a 120 km de la Ciudad de México y a 8 kilómetros al noroeste de Chiautla de Tapia, Puebla. Las coordenadas del epicentro fueron 18.40 latitud N y -98.72 longitud W y la profundidad de 57 km [4]. El sismo se sintió en Puebla, Morelos, Oaxaca, Veracruz, Tlaxcala, Estado de México y Guerrero, causando la pérdida de vidas humanas. El INAH reportó 241 templos dañados en Puebla [5].

Cabe señalar que los sismos del 15 de junio de 1999 y del 19 de septiembre de 2017 se originaron por fallas locales, lo que se puede corroborar con las coordenadas de los epicentros.

2 Caso de estudio. Templo de Nuestra Señora de la Merced

El templo de Nuestra Señora de la Merced se localiza en la calle 5 Nte. 1001, Centro histórico de Puebla, México. Es una construcción de grandes dimensiones que ha tenido modificaciones estructurales a lo largo de su historia. También ha sido dañado por sismo y por bombardeos provocados por el sitio de Puebla en el siglo XIX. A continuación, se presenta información histórica del este templo.

1864, 3 de octubre. México D.F. En la noche del 2 al 3 de octubre ocurrió un sismo que causó 20 muertos en Puebla y muchos heridos; en Acultzingo y Acatzingo muchas desgracias personales, lo mismo que en San Andrés Chalchicomula. Una parte de la torre se vino abajo junto con dos pilares. El ingeniero del ejército francés suscribe del deterioro... templos y edificios públicos, que halló en la Merced muy lacrado el segundo cuerpo de la torre, el que será conveniente destruir, y en la portería apuntalar las bóvedas por estar muy cuarteadas, y quitar los techos que hay encima de ellas que amenazan ruina, así como otros del interior del convento que se hallan en el mismo estado [6].

Leicht, 2016 comenta respecto a una fotografía del templo incluida en su libro: El acceso al atrio, por la esquina suroriente, se mantiene inalterado, mas la fotografía revela que no existía el actual acceso izquierdo sobre la barda, el cual replicó las formas del arco lateral que fue tapiado sobre la avenida 10 poniente [7].

A causa de los sitios que sufrió la ciudad en el siglo XIX, la torre se dañó tanto que hubo que demoler la mitad; lo que queda es un ancho cuerpo de planta cuadrada. En 1817 por indicaciones del superior fray José Santos Coy, se demolieron los muros laterales de las capillas con la finalidad de que el templo tuviera corredores a ambos lados de la nave central, es decir, como un templo de planta basilical. Hacia 1835 se hicieron otras reformas quedando el edificio más o menos como hoy lo vemos [8]. En la Fig. 1 se observa el templo de la Merced antes del año 1872.



Figura 1 Torre original del templo de la Merced antes del año 1872. Fuente: Mercedarios Puebla.



Figura 2 Templo de Nuestra Señora de la Merced en siglo XX.
Fuente: Mercedarios Puebla.

Hasta el momento, no se tiene información de daños en el templo de Nuestra Señora de la Merced causados por el sismo del 15 de junio de 1999. Pero, por ejemplo, el templo de Nuestra Señora del Refugio, localizado en el Centro Histórico de la ciudad de Puebla, tuvo daños moderados por este sismo y no fueron documentados en el informe del CENAPRED, lo mismo pudo haber pasado con el templo en estudio. En la Fig. 2 se muestra como lucía el templo en el siglo XX, sin el segundo cuerpo de la torre y el cupulín.

El sismo ocurrido el 19 de septiembre de 2017, ocasionó agrietamientos y fisuras en diferentes elementos de la estructura del templo. Sobresalen los daños que provocó en la clave del arco del coro donde se formó una articulación plástica de 0.5 cm, aproximadamente, debido a que el movimiento telúrico abrió las columnas que sostienen al arco mostrado en la Fig. 3 y el detalle del daño se observa en la Fig. 4, otros arcos resultaron con daños menores, en la bóveda se formó una grieta de 7.6 cm de ancho, grietas y fisuras en muro de la sacristía, entre otros.

Después del sismo el arco fue apuntalado para evitar una mayor deformación, mientras las autoridades competentes decidían qué tipo de materiales utilizarían para la restauración, de tal manera, que fueran compatibles con los originales sin alterar sus valores intrínsecos.

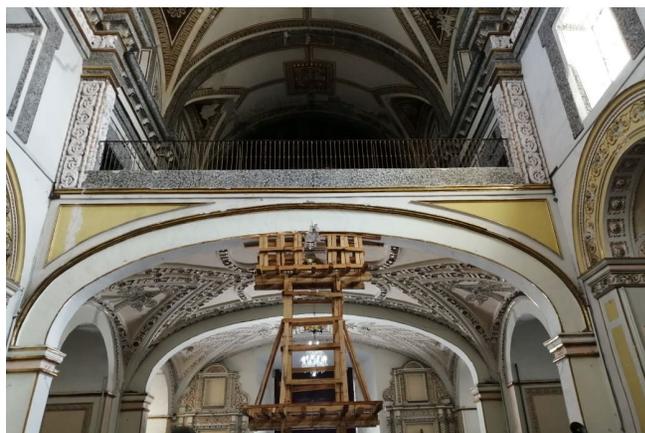


Figura 3. Arco del coro con falla estructural y por abertura de los apoyos.
Fuente: Fotografía tomada por Muñoz-Flores, 2019.



Figura 4. Detalle del daño del arco.
Fuente: Fotografía tomada por Muñoz-Flores, 2019.

2.1 Modelación del arco del coro y el análisis Pushover

Para lograr que el modelo fuera lo más aproximado posible, se realizó el levantamiento del arco y de la bóveda con una estación total, tomando lecturas de distancia, mediante una onda electromagnética portadora (microondas o infrarrojos) con distintas frecuencias que rebota en un prisma ubicado en el punto a medir y regresa, tomando el instrumento el desfase entre las ondas. Posteriormente, se vaciaron los datos registrados en Microsoft Excel y se trazó una aproximación del arco, enseguida se exportaron esos datos a AutoCAD versión 2018 para generar el modelo y poderlo exportar a SAP 2000 v20.

Las coordenadas de los puntos se obtuvieron respecto a un sistema de referencia global, registrando las lecturas respecto a los ejes X Y (horizontales) y Z (vertical).

La Tabla 1 contiene los datos de las coordenadas de los puntos del eje inferior del arco y la Tabla 2 los mismos datos, pero del eje superior. Donde X e Y corresponden a los ejes de referencia globales, análogamente, x e y son las coordenadas de los ejes locales.

Tabla 1.
Coordenadas de los puntos del eje inferior del arco.

No. Puntos	Coordenadas de los Puntos Eje Inferior			
	X	Y	x	Y
1	1003.2530	1004.275	3.253	4.275
2	1003.2370	1004.486	3.237	4.486
3	1003.1610	1004.799	3.161	4.799
4	1003.0340	1005.092	3.034	5.092
5	1002.7350	1005.439	2.735	5.439
6	1002.0470	1005.882	2.047	5.882
7	1001.0030	1006.289	1.003	6.289
8	1000.0440	1006.483	0.044	6.483
9	998.8440	1006.63	-1.156	6.63
10	997.8950	1006.642	-2.105	6.642
11	996.8130	1006.576	-3.187	6.576
12	995.6440	1006.395	-4.356	6.395
13	994.6950	1006.126	-5.305	6.126
14	993.8600	1005.732	-6.14	5.732
15	993.3070	1005.291	-6.693	5.291
16	993.0270	1004.934	-6.973	4.934
17	992.9420	1004.698	-7.058	4.698
18	992.9050	1004.428	-7.095	4.428
19	992.9200	1004.229	-7.08	4.229

Fuente: Elaborada por Muñoz-Flores, 2019.

Tabla 2.
Coordenadas de los puntos del eje superior del arco.

No. Puntos	Coordenadas de los Puntos Eje Superior			
	X	Y	x	y
1	1003.7920	1004.2515	3.7920	4.2515
2	1003.7767	1004.5712	3.7767	4.5712
3	1003.6714	1004.9792	3.6714	4.9792
4	1003.4927	1005.3779	3.4927	5.3779
5	1003.1018	1005.8498	3.1018	5.8498
6	1002.2957	1006.3638	2.2957	6.3638
7	1001.1518	1006.8104	1.1518	6.8104
8	1000.1261	1007.0134	0.1261	7.0134
9	998.8806	1007.1696	-1.1194	7.1696
10	997.8829	1007.1802	-2.1171	7.1802
11	996.7568	1007.1177	-3.2432	7.1177
12	995.5286	1006.9286	-4.4714	6.9286
13	994.5031	1006.6368	-5.4969	6.6368
14	993.5716	1006.1906	-6.4284	6.1906
15	992.9203	1005.6724	-7.0797	5.6724
16	992.5494	1005.1956	-7.4506	5.1956
17	992.415	1004.8318	-7.5850	4.8318
18	992.3622	1004.4466	-7.6378	4.4466
19	992.3794	1004.2173	-7.6206	4.2173

Fuente: Elaborada por Muñoz-Flores, 2019.

La Fig. 5 muestra los puntos del arco modelado en AutoCAD versión 2018.

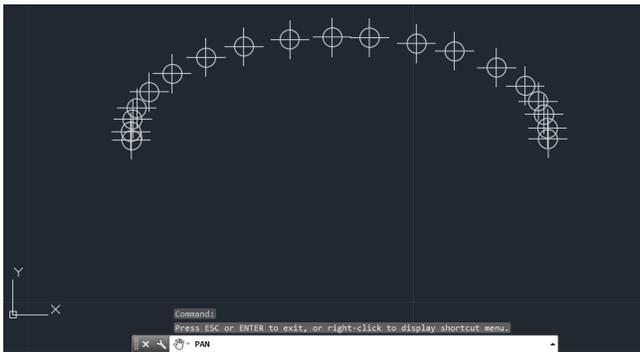


Figura 5. Puntos de los datos registrados en Microsoft Excel.
Fuente: Los autores, AutoCAD versión 2018.

La Fig. 6 muestra la configuración del arco mediante la unión de los puntos para obtener su perfil en AutoCAD versión 2018.

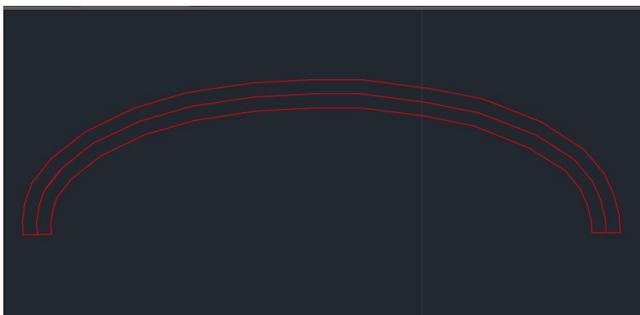


Figura 6. Perfil del modelo del arco.
Fuente: Los autores, AutoCAD versión 2018.

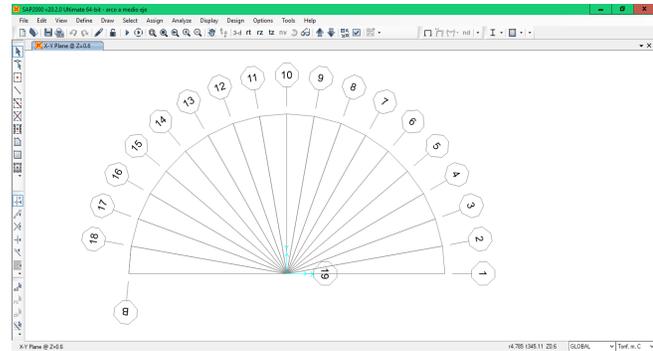


Figura 7. Configuración del arco con coordenadas importadas de Microsoft Excel.

Fuente: Los autores, SAP 2000 v20.

A continuación, se presenta un resumen de la modelación del arco en SAP 2000 v20 y parte del procedimiento de la aplicación del método del empujón (Pushover o análisis de colapso) con el objetivo de crear la curva de capacidad del arco, donde se aplica un patrón de cargas laterales, que se incrementa en cada iteración, llevando al arco más allá del rango elástico y su posterior colapso o hasta su deformación máxima. Se obtiene una gráfica de fuerza-desplazamiento conocida como curva de capacidad estructural o curva Pushover. El modelo se exportó a SAP 2000 v20, configurando el software con una malla en coordenadas cilíndricas, tal como se muestra en la Fig. 7. Posteriormente, se trazó el arco sobre la malla con el comando Draw Frame y sobre cada punto de las barras se asignaron las coordenadas correspondientes para obtener el arco con la configuración real.

El informe FEMA 273 (1997) [9], introduce el Análisis Estático No Lineal para el modelado y análisis sísmico, conocido como análisis “Pushover”. Consiste en empujar el modelo matemático de una estructura con una distribución prescrita de fuerzas monótonamente crecientes para predecir la secuencia de daño en el intervalo de comportamiento inelástico, provee una relación entre el desplazamiento del nudo de control, donde se registra el desplazamiento y el cortante basal. La relación resultante muestra los cambios de rigidez, así como la capacidad de carga lateral de la estructura.

En SAP 2000 v20 se siguieron los siguientes pasos: modificación de las propiedades del material, introducción de los valores en el apartado Non linear Material Data...e introducción de los puntos de la curva Stress-Strain... (Ver más en informe FEMA 273). En la Fig. 8 se muestra el modelo del arco con las rótulas plásticas propuestas de

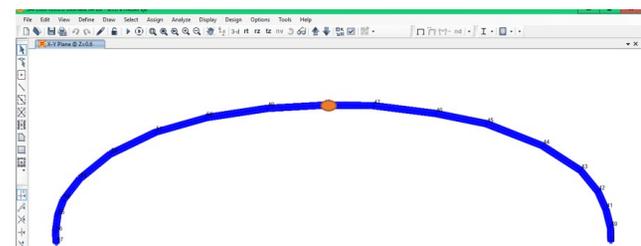


Figura 8. Arco modelado que muestra las rótulas plásticas y el punto de control.

Fuente: Los autores, SAP 2000 v20.

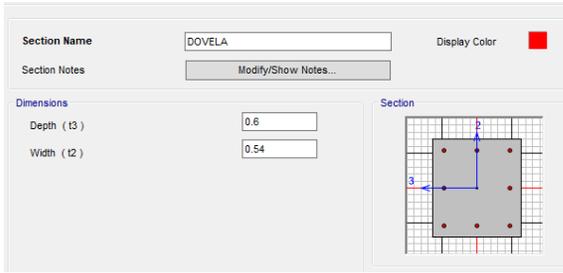


Figura 9. Sección característica geométrica de la dovela.
Fuente: Los autores, SAP 2000 v20.

acuerdo a los lineamientos del FEMA 356 o ASCE 41-13 y el punto de control, que en este caso fue el punto 10, localizado en la mitad de la clave del arco, con dicho punto se monitoreó el desplazamiento.

Los templos mexicanos construidos en el siglo XVI, son de mampostería combinada, por lo que en SAP 2000 v20 se seleccionó el concreto por ser el material más parecido a la mampostería, introduciendo sus características para el análisis. El arco del templo es del tipo carpanel o apainelado, conformado por dovelas, caracterizadas por su disposición radial. El punto de control se ubicó en la dovela central del arco, llamada clave. En la Fig. 9 se muestran las dimensiones de la sección plana que se utilizaron para cada dovela.

El material se definió introduciendo los datos siguientes:
 $E=1,500 \text{ kips/in}^2=105,675 \text{ kg/cm}^2$, $\gamma=160 \text{ lb/ft}^3$, $f'c=200 \text{ psi}=140.61 \text{ kg/cm}^2$, $ft=100 \text{ psi}=7.03 \text{ kg/cm}^2$.

Donde

E =módulo de elasticidad

γ =peso unitario.

$f'c$ =capacidad de resistencia a la compresión

ft =capacidad de resistencia a la tensión.

El arco se modeló con carga muerta que considera su peso propio y la correspondiente al peso del coro. El análisis Pushover se hizo mediante un análisis estático no lineal. En la Fig. 10 se muestra la gráfica Desplazamiento vs Reacción en la base, el desplazamiento es el del punto de control (punto 10) con un valor de -0.015 m (negativo porque se desplaza hacia abajo en la dirección del eje Z) y la reacción en la base, tiene un valor de 158.8 ton . Estos valores representan la carga y el desplazamiento que puede soportar el arco antes de fallar.

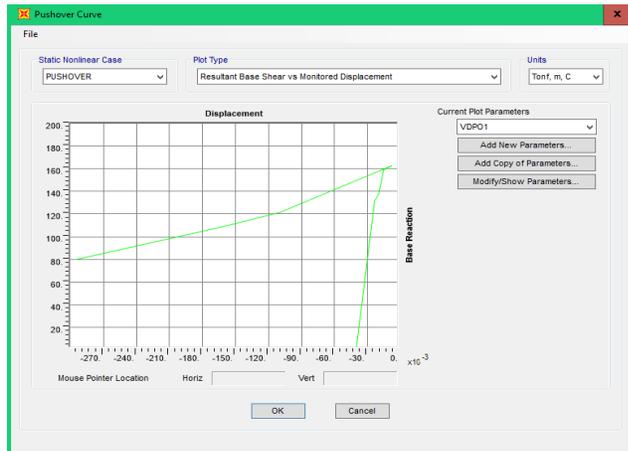


Figura 10. Gráfica Desplazamiento vs Reacción en la base.
Fuente: Los autores, SAP 2000 v20.

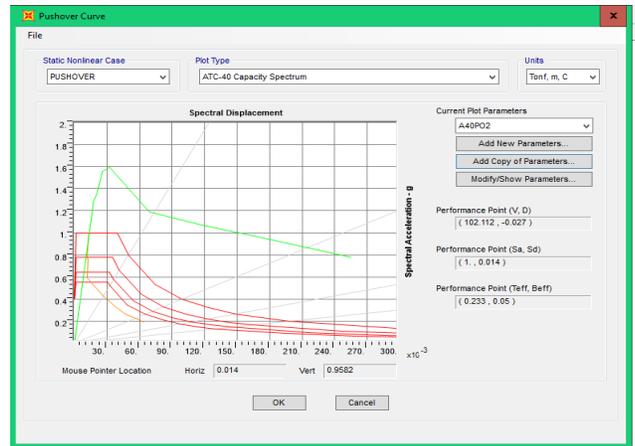


Figura 11. Punto de intersección de los espectros de demanda y la curva de capacidad.

Fuente: Los autores, SAP 2000 v20.

En la Fig. 11 el punto de intersección de los espectros de demanda y la curva de capacidad se conoce como punto de desempeño. El espectro de demanda se muestra en color verde y la curva de capacidad en color naranja, el desempeño de la estructura está dado por 0.014 m de desplazamiento y 0.9582 g . Este punto representa el límite donde el arco puede trabajar sin formar rótulas plásticas.

Finalmente, la Fig. 12 muestra las posibles rótulas plásticas que se generaron en nueve pasos del Pushover, llevando al arco a su colapso total.

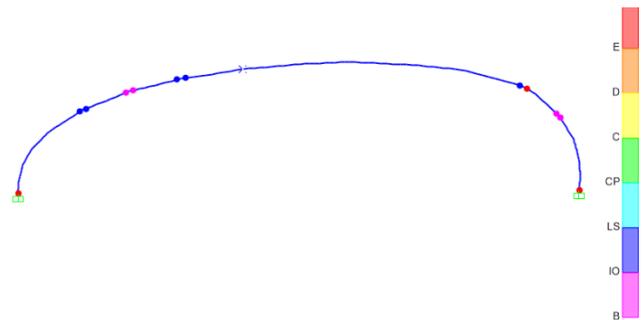


Figura 12. Gráfica que muestra las rótulas plásticas formadas en nueve pasos.
Fuente: Los autores, SAP 2000 v20.

2.2 Estudios para identificar patologías en el templo

Continuando con los estudios realizados en este templo, se instalaron sensores para registrar vibración ambiental, humedad y temperatura, debido a que son variables que afectan a las estructuras antiguas y que generan patologías que degradan a los materiales, haciéndolos más vulnerables ante la acción sísmica. También, se realizó el levantamiento topográfico de la fachada principal, porque se tenía la duda si el sismo del 19 de septiembre de 2017, había provocado un desplazamiento horizontal de la fachada. Por último, se realizó un estudio fotogramétrico para identificar posibles daños en el exterior del templo, difíciles de identificar a simple vista.

2.2.1 Registro de temperatura del ambiente, humedad relativa y vibración ambiental.

Se solicitaron los permisos correspondientes al Rector del templo de Nuestra Señora de la Merced, para ingresar al interior de las instalaciones y seleccionar los espacios donde se instalarían los sensores mencionados en el apartado anterior. En la Fig. 13 se observa humedad en la zona del coro.



Figura 13. Patologías en la zona del coro.
Fuente: Fotografía tomada por Cárdenas-López, 2023.



Figura 14. Patologías en la zona de la sacristía.
Fuente: Fotografía tomada por Cárdenas-López, 2023.

En la sacristía existen agrietamientos, tal como se observa en la Fig. 14.

Después de realizar la inspección visual se definieron los espacios donde se instalarían tres dispositivos con los sensores integrados. Estos sensores fueron construidos por estudiantes de electrónica. La Fig. 15 muestra uno de esos dispositivos.

Se propuso instrumentar con un dispositivo (Sensor 1) la cúpula Fig. 16, ya que es un elemento estructural (macroelemento) que vibra de forma independiente respecto a toda la estructura y que forma parte de la configuración estructural del templo. Se ha documentado que, durante sismos extraordinarios, las cúpulas han presentado deficiente comportamiento estructural, formándose fisuras, grietas e incluso, han colapsado.



Figura 15. Dispositivo con los sensores integrados (temperatura, humedad y vibración).
Fuente: Fotografía tomada por Cárdenas-López, 2023.



Figura 16. Sensor 1 instalado en el interior de la cúpula.
Fuente: Fotografía tomada por Cárdenas-López, 2023.



Figura 17. Sensor 2 instalado en la zona del coro.
Fuente: Fotografía tomada por Cárdenas-López, 2023.



Figura 18. Sensor 3 instalado en la sacristía.
Fuente: Fotografía tomada por Cárdenas-López, 2023.

El segundo dispositivo (Sensor 2) se instaló en la zona del coro Fig. 17, debido a las patologías que presenta originadas por variables ambientales y de origen mecánico (fisuras, agrietamientos, desplazamientos, etc.).

El tercer dispositivo (Sensor 3) se instaló en la sacristía Fig. 18, pues es un lugar cerrado, sin ventilación y que presenta patologías por humedad y variación de temperatura.

En las Figs. 19 - 27, se muestran parte de los resultados de los registros de los sensores 1, 2 y 3 durante el día 21 de noviembre de 2023 y sus correspondientes coeficientes de correlación para determinar qué influencia tienen estas variables meteorológicas en esas zonas del templo y su relación con la degradación de los materiales. Los sensores fueron construidos por estudiantes de electrónica y las figuras incluidas en este documento, corresponden a la etapa de su calibración. Como se puede observar existen correlaciones congruentes según la localización de los sensores.

En la ciudad de Puebla, el año 2023 se caracterizó por el incremento de la temperatura ambiental comparada con años anteriores y la posibilidad de lluvia durante el mes de noviembre, aumentando el porcentaje de la humedad ambiental. En la cúpula el coeficiente de correlación entre la temperatura ambiental y la humedad del ambiente es -0.74636496 , valor que indica que las variables se relacionan negativamente, es decir, mientras la temperatura aumenta, la humedad disminuye y viceversa. En la zona del coro el coeficiente de correlación es -0.92219541 , este valor indica una correlación negativa casi perfecta, ese lugar está bien ventilado, mientras la temperatura aumenta, la humedad disminuye. La sacristía es un lugar cerrado y poco ventilado, esta condición favorece a la correlación negativa de las variables estudiadas, el coeficiente de correlación es -0.83747653 . Los coeficientes de correlación que se obtuvieron son congruentes con las climáticas en cada lugar.

En [10] se muestran los resultados de una investigación titulada “influencia de variables medioambientales en la humedad por capilaridad en muros de la iglesia Santa Lucía”. En este documento citan: En esta investigación se centró la atención en las variables hidro climáticas temperatura, humedad relativa, incidencia de los vientos y radiación solar. La temperatura contribuye a la evaporación del elemento afectado. Si las oscilaciones térmicas son significativas favorecen al aumento del deterioro de la edificación. Cuando la humedad relativa se encuentra por encima del 70%, se considera un peligro para el estado de las edificaciones, ya que mantiene elevados los niveles

de humedad, impidiendo la evaporación del elemento afectado, lo cual favorece el crecimiento de microorganismos.

En la ciudad de Puebla, el año 2023 se caracterizó por el incremento de la temperatura ambiental, comparada con años anteriores y la posibilidad de lluvia durante el mes de noviembre.

Los resultados que se obtuvieron son congruentes con las condiciones climáticas que se presentaron en esos días, sin olvidar que los sensores se encontraban en la etapa de pruebas y calibración. En las gráficas se observan valores menores de 70% de la Humedad Relativa, por lo cual, las zonas monitoreadas no se encuentran en peligro.



Figura 19. Temperatura del ambiente. (°C), registro en el sensor 1.
Fuente: Los autores, Microsoft Excel.

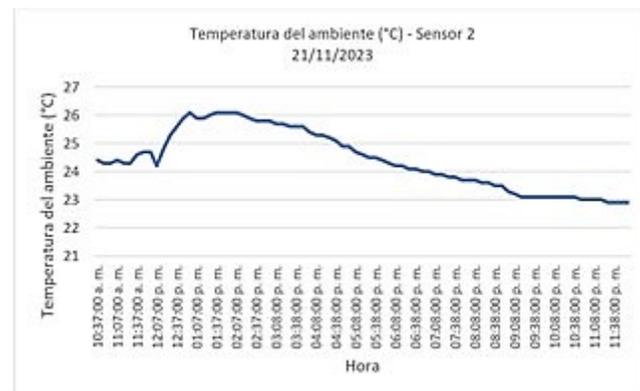


Figura 20. Temperatura del ambiente. (°C), registro en el sensor 2.
Fuente: Los autores, Microsoft Excel.



Figura 21. Temperatura del ambiente. (°C), registro en el sensor 3.
Fuente: Los autores, Microsoft Excel.



Figura 22. Humedad relativa (%), registro en el sensor 1.
Fuente: Los autores, Microsoft Excel.

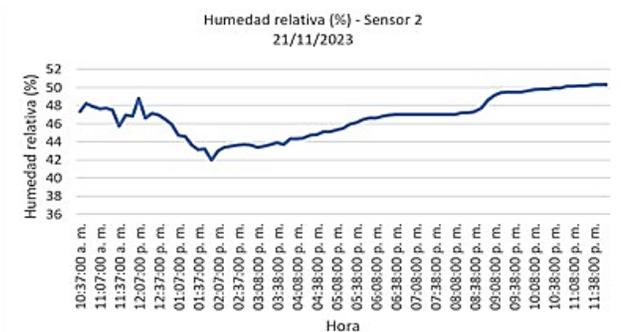


Figura 23. Humedad relativa (%), registro en el sensor 2.
Fuente: Los autores, Microsoft Excel.

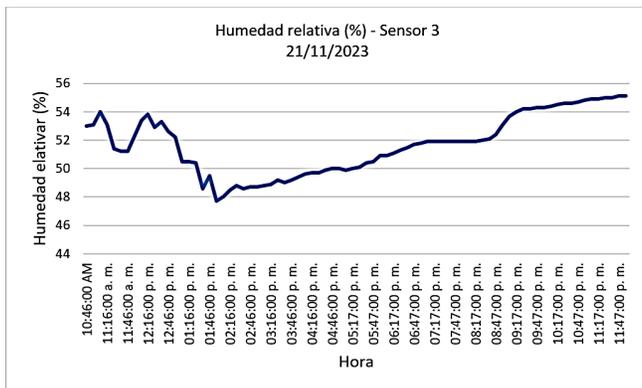


Figura 24. Humedad relativa (%), registro en el sensor 3.
Fuente: Los autores, Microsoft Excel.

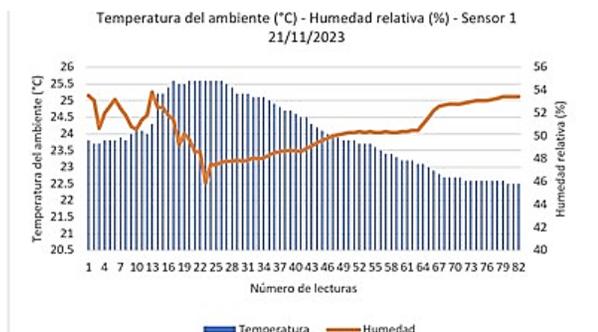


Figura 25. Temperatura ambiente (°C)-Humedad relativa (%), registro en el sensor 1. Coeficiente de correlación -0.74636496.
Fuente: Los autores, Microsoft Excel.

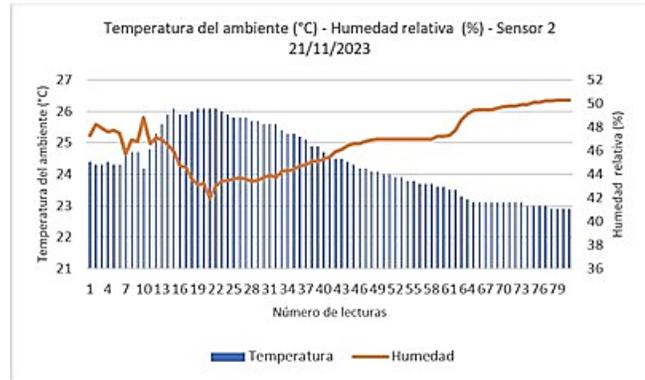


Figura 26. Temperatura ambiente (°C)-Humedad relativa (%), registro en el sensor 2. Coeficiente de correlación -0.92219541.
Fuente: Los autores, Microsoft Excel.

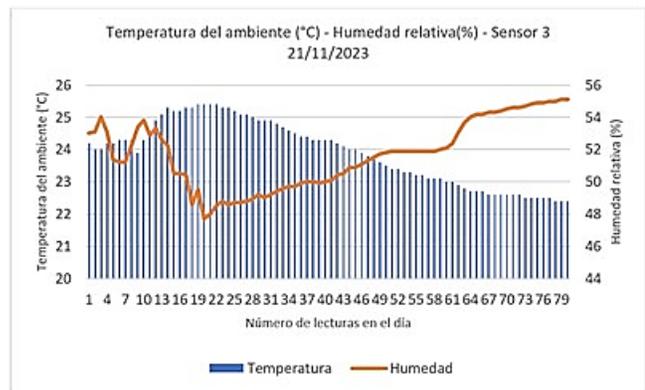


Figura 27. Temperatura ambiente (°C)-Humedad relativa (%), registro en el sensor 3. Coeficiente de correlación -0.83747453.
Fuente: Los autores, Microsoft Excel.

Las gráficas de temperatura del ambiente muestran que las más altas temperaturas se encuentran entre las 12:40:00 p.m. y las 02:40:00 p.m., posteriormente, empiezan a descender. La humedad relativa desciende en ese intervalo y va aumentando en el resto del día. La variación de la temperatura no es significativa y la humedad relativa no rebasa el 70%, por lo tanto, estas variables no representan un riesgo para la edificación. Sin embargo, en los muros y en la bóveda de la zona del coro, así como en el exterior de la estructura, se observaron patologías del tipo mecánico provocadas por grietas y fisuras no reparadas en tiempo y forma, lo cual se infiere que fueron parte del origen de humedades. Para restaurar las áreas afectadas, se propone inyectar con mezcla de morteros y resinas epóxicas, las cavidades, vacíos o grietas, tratando previamente todas las zonas que presenten esas patologías, con el objetivo de mejorar las características del material y después aplicar pintura con efecto loto (nanolotos) que sea auto lavable, para proteger la estructura de la contaminación ambiental.

Los sensores también registraron vibración, entendiéndose como la vibración de un sistema o estructura, que puede ser causada por una perturbación instantánea y ajena a toda excitación permanente, en estas condiciones el sistema vibra por su estado natural, o pueden existir fuerzas

perturbadoras, que lo hagan vibrar, por ejemplo, el ruido o vibración ambiental proveniente del tráfico vehicular, oleaje, etc.

El modelo que describe el fenómeno de vibración, es un sistema masa-resorte, donde la masa posee características energéticas cinéticas, y el resorte, características restauradoras. Por tanto, para que un sistema vibre es necesario que posea por lo menos un elemento inercial (energía cinética) y un elemento restaurador (energía potencial). Los elementos restauradores se generalizan como elementos elásticos y elementos restauradores que sin ser elásticos tienen el mismo comportamiento, como lo es el péndulo (oscilador simple). Las ecuaciones básicas de la dinámica y el análisis del movimiento de este tipo de osciladores son:

La segunda ley de Newton eq. (1), donde F es la fuerza de inercia, m es la masa y a es la aceleración.

$$F = ma \tag{1}$$

La fuerza aplicada a sistemas elásticos está dada por eq. (2), donde F es la fuerza elástica, k es la rigidez y Δ el desplazamiento.

$$F = k\Delta \tag{2}$$

La fuerza amortiguadora del movimiento eq. (3) donde F es la fuerza aplicada, C es el coeficiente de amortiguamiento y v la velocidad.

$$F = Cv \tag{3}$$

En el caso de una estructura sujeta a vibración, la respuesta está dada en deflexiones, esfuerzos, etc., y tales parámetros varían con el tiempo. De acuerdo con lo anterior, una diferencia importante entre el Análisis estático y el Análisis dinámico es que el análisis dinámico presenta soluciones (distintas) para cada instante de tiempo. Cuando a una estructura se le aplica la carga en forma dinámica, las deformaciones que varían con el tiempo producen aceleraciones, y de acuerdo al principio D'Alembert, inducen fuerzas de inercia, que resisten el movimiento del elemento. Entonces, el elemento queda sujeto a dos cargas: la fuerza externa $P(t)$, que causa el movimiento, y las fuerzas de inercia, $F(t)$, que resisten la aceleración inducida.

Las vibraciones, se miden generalmente, en unidades métricas de acuerdo con los requisitos ISO mostrados en la Tabla 3 [11].

Los parámetros desplazamiento, velocidad y aceleración están estrechamente relacionados en los movimientos oscilatorios. Si se conoce la aceleración de un sistema, la velocidad y el desplazamiento de la vibración, se pueden obtener mediante integraciones de la señal, haciendo uso de softwares que realicen de forma rápida y confiable estas operaciones.

Tabla 3. Unidades según los requisitos ISO.

Desplazamiento	Felicidad	Aceleración
m, mm, μ m	m/s, mm/s	m/s^2

Fuente: Adaptado de Rodríguez Súnico-Manuel, 2005 [11].

Los sensores que se diseñaron y fabricaron para registrar la vibración ambiental en el templo de Nuestra Señora de la Merced, registran aceleraciones en las direcciones ortogonales X (este-oeste) e Y (norte-sur) y de lo expuesto anteriormente, las aceleraciones están relacionadas con los desplazamientos, la velocidad y el amortiguamiento de las estructuras.

Una de las características de los templos construidos en la época colonial, es su gran peso, debido al tipo de mampostería con que fueron construidos. Por tanto, una fuerza dinámica de gran magnitud, produciría aceleraciones, velocidades y desplazamientos relativamente grandes.

Las aceleraciones producidas por la vibración ambiental que afectan al templo, son muy bajas, debido al tipo de mampostería combinada (rocas de la región) y a las grandes dimensiones de las secciones transversales de los muros, principalmente. Por tanto, los niveles de aceleración, no representan un problema para la estabilidad y seguridad estructural del templo.

Las Fig. 28-32, muestran gráficas de aceleración registrada en los sensores 1 y 3.

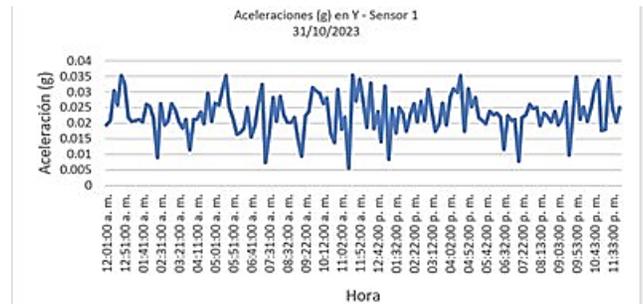


Figura 28. Aceleración máxima 0.03547226 g, hora 11:32:00 a. m. Fuente: Los autores, Microsoft Excel.

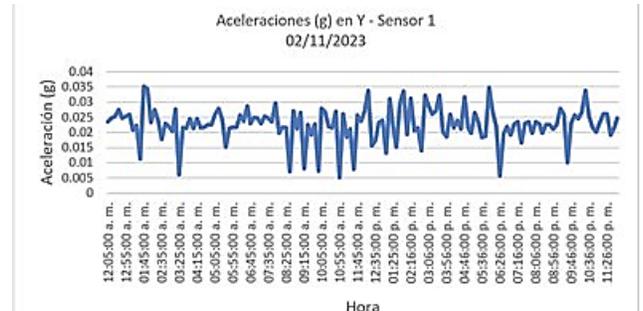


Figura 29. Aceleración máxima 0.034739838 g, hora 05:56:00 p. m. Fuente: Los autores, Microsoft Excel.

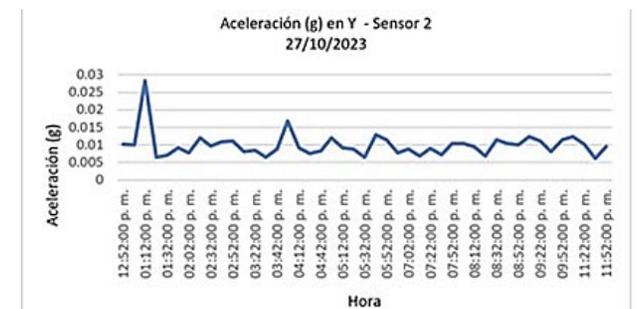


Figura 30. Aceleración máxima 0.028258615 g, hora 01:12:00 p. m. Fuente: Los autores, Microsoft Excel.

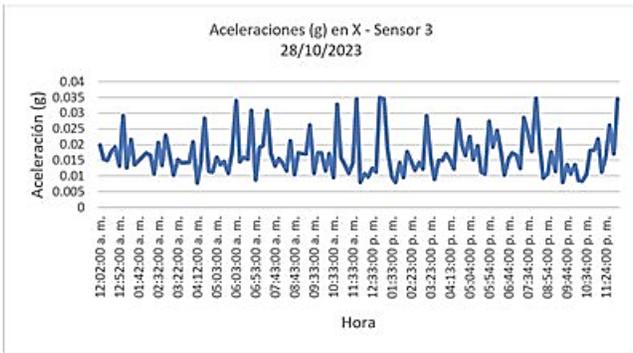


Figura 31. Aceleración máxima 0.034702846 g, hora 08:14:00 p. m.
Fuente: Los autores, Microsoft Excel.

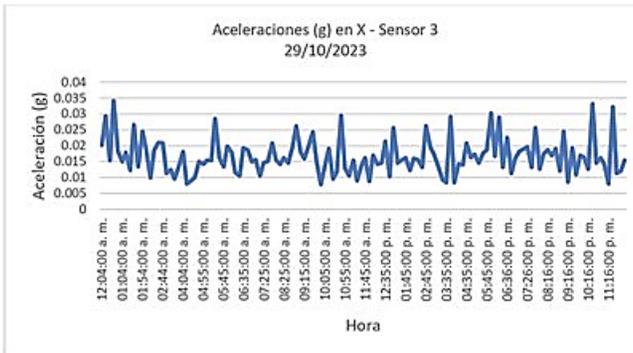


Figura 32. Aceleración máxima 0.034214565, hora 12:44:00 a. m.
Fuente: Los autores, Microsoft Excel.

El templo se ubica en el Centro Histórico de la ciudad de Puebla, Méx., donde el tráfico vehicular en horas pico es intenso. Las aceleraciones registradas en los tres sensores, cuyas gráficas se presentan como ejemplo, muestran un rango de variación entre 0.028258615 g y 0.03547226 g, sin olvidar que estos parámetros dependen del tiempo, es decir, de la hora de registro y de la vibración ambiental, lo cual significa que los desplazamientos de la estructura también son muy pequeños y que los registros de los sensores son consistentes.

2.3 Levantamiento topográfico del muro de la fachada principal

Se realizó el reconocimiento del inmueble con el apoyo de personal del templo, así como de estudiantes de servicio social, cuyo objetivo fue identificar las zonas de trabajo, los sitios de importancia y los lugares para estacionar los aparatos a utilizar para realizar, exclusivamente, el levantamiento topográfico del muro de la fachada principal, debido a que se observó un ligero desplazamiento, pero se tenía que comprobar a través de mediciones. En un templo, el muro de la fachada, las bóvedas y las cúpulas, entre otros, son macroelementos que trabajan de forma independiente, respecto a toda la estructura cuando es sometida a un sismo, por tanto, existe la posibilidad de que ese muro se haya desplazado al estar desligado.

La Fig. 33 muestra el equipo que se utilizó para realizar el levantamiento del interior de la fachada principal.



Figura 33. Levantamiento topográfico del interior de la fachada.
Fuente: Fotografía tomada por Morales-González, 2023.



Figura 34. Levantamiento topográfico del exterior de la fachada.
Fuente: Fotografía tomada por Cárdenas-López, 2023.

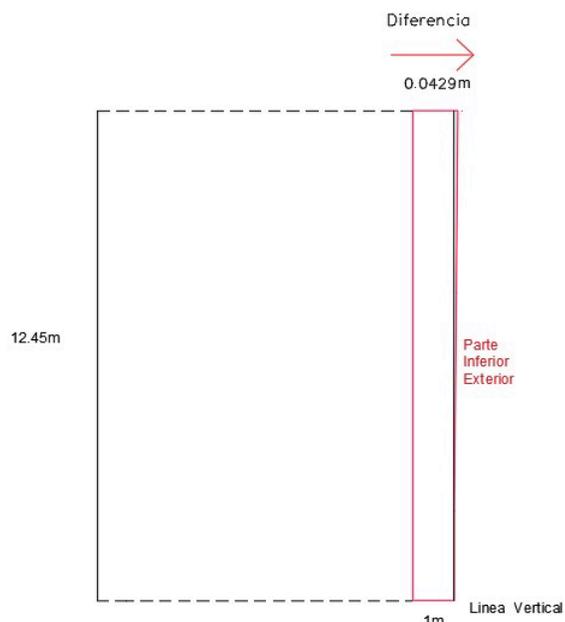


Figura 35. Croquis del desplazamiento del muro de la fachada a una altura de 12.45 m.

Fuente: Los autores, AutoCAD versión 2018.

El levantamiento de la fachada se realizó con una estación total para recolectar puntos y saber si ésta perdía verticalidad respecto a los ejes X e Y. Los datos se exportaron a Auto CAD versión 2018, donde se modeló un muro totalmente vertical, paralelo a la fachada para comparar el cambio de distancias.

En la Fig. 34 se puede observar que hay líneas verticales dentro de la fachada exterior, esto se debe a que hay cambio de material o textura, lo que ocasionaba que fueran diferentes las coordenadas de referencia.

En la planta baja (acceso), el muro se encuentra desplazado hacia el oriente 0.0429 m, a una altura de 12.45 m, medida a partir del nivel de piso hasta el lecho inferior del entrepiso, tal como se muestra en la Fig. 35.

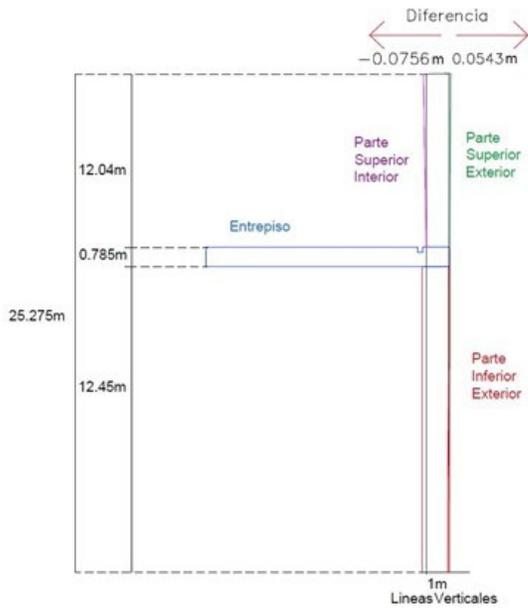


Figura 36. Croquis del desplazamiento del muro de la fachada a una altura de 25.275 m.

Fuente: Los autores, AutoCAD versión 2018.

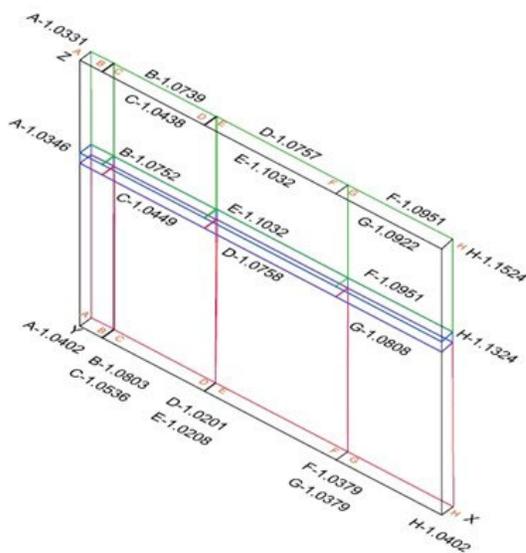


Figura 37. Croquis del desplazamiento de los muros de la fachada exterior con los desplazamientos totales.

Fuente: Los autores, AutoCAD versión 2018.

Posteriormente, se ejecutó el levantamiento topográfico del muro del coro medido a partir del entrepiso. El resultado del levantamiento y procesamiento de los datos, mostró que el muro se encuentra desplazado hacia el poniente en 0.0572 m, a una altura de 12.04 m, como se muestra en la Fig. 36.

Los detalles de los desplazamientos totales de la fachada exterior se observan en la Fig. 37 y se pueden consultar en la Tabla 4.

Tabla 4. Variación de coordenadas en el muro de la fachada exterior.

	Planta Inferior – Entrepiso (m)	Entrepiso – Planta Superior (m)	Planta Inferior – Planta Superior (m)
A	-0.0056	-0.0015	-0.0071
B	-0.0051	-0.0013	-0.0064
C	-0.0087	-0.0011	-0.0098
D	0.0557	0.0001	0.0556
E	0.0824	0	0.0824
F	0.0572	0	0.0572
G	0.0429	0.0114	0.0543
H	0.0921	0.02	0.1121

Fuente: Los autores.

Los desplazamientos en el interior de la fachada, del entrepiso al lecho inferior de la bóveda se muestran en la Fig. 38 y en la Tabla 5.

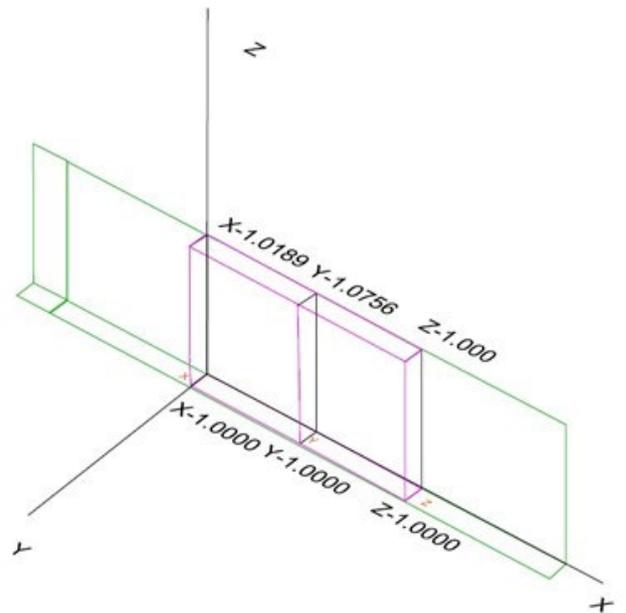


Figura 38. Croquis del desplazamiento del muro de la fachada a una altura de 25.275 m.

Fuente: Los autores, AutoCAD versión 2018.

Tabla 5. Desplazamientos en el interior de la fachada interior del coro.

Entrepiso – Planta Superior (m)
0.0189
0.0756
0

Fuente: Elaborada por Ávila-Cruz, 2023.

2.4 Levantamiento fotogramétrico

El levantamiento fotogramétrico sirvió para obtener información detallada del exterior de todo el templo y su geometría mediante el vuelo de un dron que realizó el reconocimiento ortofotográfico.



Figura 39. Calibración y configuración del dron.
Fuente: Fotografía tomada por Cárdenas-López, 2023.



Figura 40. Orientando al dron para volar.
Fuente: Fotografía tomada por Cárdenas-López, 2023.

El plan de vuelo del dron se hizo en la aplicación pix4d, en la Fig. 39 se ve el dron en el proceso de Calibración y configuración para realizar el reconocimiento, en la Fig. 40 se observa el dron listo para volar. Cuando el dron terminó el vuelo, se bajaron todas las fotos y su procesamiento se realizó el programa Agisoft Metashape, posteriormente se hizo el post proceso de corrección y se georeferenciaron para armar la ortofoto mostrada en la Fig. 41.

Agisoft Metashape

Processing Report
30 June 2023



Figura 41. Ortofoto del exterior del templo.
Fuente: Los autores, Agisoft Metashape.

Camera Locations



Fig. 3. Camera locations and error estimates.
Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total error (cm)
18.4001	12.3316	45.9946	22.1502	51.0503

Table 3. Average camera location error.
X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.

Figura 42. Ortofoto del exterior del templo.
Fuente: Los autores, Agisoft Metashape.

La Fig. 42 muestra con detalle el estado físico de la fachada del templo, por ejemplo, desprendimiento de pintura, reparaciones inconclusas, fisuras, principalmente, y los errores de medición de las fotos tomadas por la cámara del dron.

Los estudios realizados en el templo de Nuestra Señora de la Merced son un referente para futuras investigaciones, formando parte del histórico que deberá guardarse en un expediente para futuras intervenciones, con el objetivo de contribuir a su conservación.

Las técnicas que se aplicaron se conocen como “no destructivas” debido a que no se daña físicamente a la estructura.

Los resultados obtenidos muestran que es una edificación con posibilidades de daño sísmico casi nulas, tomando en cuenta que es una edificación de gran peso por el tipo de mampostería utilizada para su construcción y las dimensiones de las secciones transversales de los muros. Pero, después del sismo del 19 de septiembre de 2017, los encargados del templo, tenían la idea de que el muro de la fachada principal se había desplazado, hecho que se corroboró con los resultados de las mediciones topográficas que se realizaron y que mostraron desplazamientos en ese muro.

Se recomienda seguir monitoreando el templo e implementar el uso de nuevas tecnologías para cocer su salud estructural en la línea del tiempo, ya que los materiales se van degradando con el tiempo, la contaminación ambiental de la zona, también influye. Además, de la constante vibración ambiental debida al constante tráfico de vehículos particulares y de carga.

El mantenimiento en tiempo y forma de templo será fundamental para reducir su vulnerabilidad ante eventos sísmicos extraordinarios y conservarlo como parte del Patrimonio Cultural del Estado de Puebla, México, declarado en 1987 por la UNESCO “Patrimonio Cultural de la Humanidad.

Este trabajo se realizó con fines de investigación académica con el apoyo del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Puebla (convenio 274/2023), y de las autoridades eclesíásticas del templo y personal de apoyo.

Referencias

- [1] Servicio Geológico Mexicano, Sismología de México, Gobierno de México. [en línea], 2017. Disponible en: <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Sismologia-de-Mexico.html>
- [2] Centro Nacional de Prevención de Desastres. El sismo de Tehuacán del 15 de junio de 1999, México, D.F., Centro Nacional de Prevención de Desastres. [en línea], 1999, pp. 158-168. Disponible en: <https://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/178-informetnicoelsismodetehuacandel15dejuliodede1999.PDF>
- [3] Reporte especial: Sismo de Tehuantepec (2017-09-07 23:49 Mw 8.2). [en línea], 2017. Recuperado de http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2017/SSNMX_rep_esp_20170907_Tehuantepec_M82.pdf
- [4] Reporte especial: Sismo del día 19 de septiembre de 2017, Puebla-Morelos (M7.1). [en línea], 2017. México. Disponible en: http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2017/SSNMX_rep_esp_20170919_Puebla-Morelos_M71.pdf
- [5] Núñez, E. Detalla el INAH daños en 241 templos en Puebla tras sismo | e-consulta.com. E-consulta Puebla | Referencia Obligada. 2017. <https://www.e-consulta.com/nota/2017-11-20/ciudad/atlixco-el-municipio-con-mas-danos-en-monumentos-y-templos>
- [6] Carolina. Manual de Procedimientos del Patrimonio Monumental de Puebla para Efectos de Sismo. Scribd. [En línea]. S.f. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/360436591/Manual-de-Procedimientos-Del-Patrimonio-Monumental-de-Puebla-Para-Efectos-de-Sismo>
- [7] Leicht, H., Las calles de Puebla. Editorial: Secretaría de Cultura del Gobierno del Estado de Puebla, Ayuntamiento de Puebla. SIC MÉXICO, Sistema de Información Cultural. Gobierno de México. [En línea]. 2002. ISBN: 968-5122-54-7. [Citado el: 11-11-2021]. Disponible en: https://sic.cultura.gob.mx/ficha.php?table=fondo_editorial&table_id=3230
- [8] La Historia del Templo de la Merced de Puebla. [En línea]. 2020. Disponible en: https://issuu.com/santuariodenustrasenoradelame/docs/los_mercedarios_en_puebla
- [9] NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings. Washington, D.C., [online]. 1997. Available at: <https://www.conservatiotech.com/FEMA-publications/FEMA273-1997.pdf>
- [10] Calderín-Cruz, Y., Hernández-Columbié, D., y Frómata-Salas, Z.P., Influencia de variables medioambientales en la humedad por capilaridad en muros de la iglesia Santa Lucía. Ciencia en su PC, 1(4), [En línea]. pp. 55-63, 2020. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/1813/181366194005/html/>
- [11] Rodríguez-Sunico, M., (2005). Análisis Modal Operacional: Teoría y Práctica. [En línea]. Disponible en: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/3828/fichero/Cap%C3%ADTulos%252F2+Conceptos+de+vibraciones.pdf>

P. Máximo-Romero, es profesora investigadora de la Facultad de Ingeniería de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Posgrado en Ingeniería Estructural, línea de investigación en ingeniería estructural y patrimonio edificado, perfil PRODEP, miembro del Cuerpo Académico 344 Ciencias de la Tierra aplicada a la gestión de desastres naturales, miembro del Padrón de Investigadores de la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado (VIEP), asesora de programas Jóvenes Investigadores, Haciendo Ciencia en la BUAP, del programa Delfin. Publicaciones nacionales e internacionales y ponente en congresos nacionales e internacionales. Responsable de proyectos nacionales e internacionales. ORCID:0000-0002-2698-842X.

R. Ramos-Aguilar, es profesor investigador de la Facultad de Ingeniería en el Colegio de Ingeniería Topográfica y Geodésica en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Posgrado en Ciencias de la Tierra, líneas de investigación en ciencias de la tierra y atmosféricas, miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores, registro de evaluadores acreditados CONAHCYT, Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior, International Association of Hydrological Sciences, Instituto Panamericano de Geografía e Historia, Programa Delfin, PRODEP. Responsable del Cuerpo Académico 344 Ciencias de la Tierra aplicada a la gestión de desastres naturales. Ponencias y publicaciones nacionales e internacionales, responsable de proyectos nacionales e internacionales. ORCID:0000-0001-5660-6608.

M. Ávila-Cruz, es profesor investigador de la Facultad de Ingeniería, Colegio de Ingeniería Topográfica y Geodésica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Posgrado en Ingeniería, línea de investigación en geodesia. Miembro del Cuerpo Académico 344 Ciencias de la Tierra aplicada a la gestión de desastres naturales. Publicaciones nacionales e internacionales. ORCID:0000-0002-8024-2119.

V. Galindo-López, es profesor Investigador de la Facultad de Ingeniería, Colegio de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Posgrado en Ingeniería, línea de investigación en Mecánica. Perfil PRODEP. Miembro del Cuerpo Académico 344 Ciencias de la Tierra aplicada a la gestión de desastres naturales. Publicaciones nacionales e internacionales. ORCID:0000-0003-0112-2432.

J.G.O. Muñoz-Flores, es egresado del Colegio de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Fue becado por el programa "Haciendo Ciencia en la BUAP, 2019" de la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado. Actualmente es analista de calidad en Cemex concretos Tren Maya.
ORCID: 0009-0000-8212-2850.

L. Cárdenas-López, es becaria del Colegio de Ingeniería Topográfica y Geodesia de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.
ORCID:0009-0006-8762-7683.

A.E. Morales-González, es becario del Colegio de Ingeniería Topográfica y Geodesia de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.
ORCID:0009-0006-8302-5108.

A.A. Salas-Xochipa. Es estudiante de la Licenciatura en Ingeniería Civil de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Becario del programa "Haciendo Ciencia en la BUAP primavera 2024".
ORCID: 0009-0003-7444-8633.