



COMPORTAMIENTO DINÁMICO EXPERIMENTAL DE UNA EDIFICACIÓN HISTÓRICA A ESCALA: IGLESIA DE SAN RAYMUNDO

Rolando Torres¹, Janeth De Paz², Jorge Campo³, Alberto Blanco⁴

Instituto de Investigaciones de Ingeniería, Matemática y Ciencias Físicas,
Universidad Mariano Gálvez, Guatemala, ¹rtorres@umg.edu.gt, ²milianjs@yahoo.com.mx, ³campo@umg.edu.gt

⁴Institute of Technology, MIT, alberto.blanco@mts.com

Palabras clave: adobe, modelo a escala, modelo analítico, mesa vibradora, daños.

Resumen

Guatemala posee un enorme conjunto de iglesias, edificios y monumentos de arquitectura colonial que datan del siglo XV. Muchos de estos monumentos históricos son considerados parte del patrimonio cultural de la Nación y están bajo la protección del Estado. Es por ello que dado a la importancia que tienen para su conservación es necesaria la identificación de las características dinámicas de los edificios históricos ya que permite conocer la respuesta de la estructura bajo movimientos sísmicos fuertes y permite hacer un análisis de los materiales utilizados en esa época. En la actualidad la información sobre el comportamiento dinámico de estructuras históricas es muy escasa, es por ello que se propuso realizar un estudio a la Iglesia de San Raymundo, iglesia de tipo colonial que presentó severos daños por el terremoto en Guatemala el 4 de Febrero de 1976. Este estudio se llevó a cabo en el Laboratorio de Sismología del Instituto de Investigaciones de Ingeniería, Matemática y Ciencias Físicas (in3) de la Universidad Mariano Gálvez de Guatemala, como aporte a los estudios de edificaciones de carácter histórico y de conservación patrimonial. El modelo de la Iglesia de San Raymundo fue construido a escala 1:8,75, con dimensiones 2,80 x 3,00 x 1,75 metros. El modelo fue instrumentado con acelerómetros y sensores de deformación para registrar el comportamiento de la estructura y fue sometido a sismos locales registrados en el Servicio Sismológico del in3. Teniendo como resultado daños en la estructura, el colapso de la cúpula y bóveda con el sismo escalado del terremoto del 7 de noviembre de 2012 en el departamento de San Marcos. Los resultados obtenidos permiten evaluar y adquirir experiencia del comportamiento dinámico de edificios históricos y que dichos resultados sean comparados con los del modelo matemático para futuros estudios de estructuras de similares características.

1 INTRODUCCIÓN

La Iglesia de San Raymundo está localizada en Departamento de Guatemala, municipio de San Raymundo. Su construcción empezó en el año de 1.559 y finalizó en el año de 1.604. Esta iglesia de la época colonial fue elaborada con materiales y mano de obra local. Según Wever (1991, p. 30), los cimientos son de mampostería de piedra unida con mezcla de tierra arcillosa o cal y arena; este material tiene condiciones para resistir la humedad del subsuelo y las fuerzas de compresión. Las dimensiones de la Iglesia son 14 metros de ancho, 51 metros de longitud y 15 metros de alto en la parte más alta de la fachada.

En el año 1976 Guatemala vivió uno de los más grandes terremotos¹, que dejó dolor, muerte y destrucción en todo el país, afectando en su mayoría las edificaciones coloniales. “Las cifras² de este terremoto fueron más de 23.000 muertos, 76 mil heridos, 258.000 casas destruidas y alrededor de 1,2 millones de personas sin hogar” CONRED (2016, p.1). El epicentro se localizó a 150 kilómetros al noreste de la ciudad de Guatemala, en la Falla de Motagua con magnitud de 7.5 escala de Richter y 5 kilómetros de profundidad. El sismo

¹ Terremoto del 4 de febrero de 1976 a las 3:01:43 hora local.

² Estadísticas mostradas en el Boletín informativo No.4130, correspondiente a la conmemoración de los 40 años del terremoto de 1976.

duro 49 segundos y causo una ruptura visible de 230 kilómetros a lo largo de la falla. Debido a este terremoto la iglesia de San Raymundo quedo seriamente dañada.

Los daños presentados en la iglesia por el terremoto de 1.976 fueron; colapso en la parte central de la fachada, colapso de la cúpula y bóveda. También notables grietas por tensión diagonal y por flexión en muros.

La Iglesia de San Raymundo fue reconstruida con concreto reforzado en la bóveda y la cúpula. Se le incorporo soleras de amarre superior e intermedio como refuerzo en los muros. La fachada fue reconstruida con mampostería.



Figura 1. Iglesia de San Raymundo (fuente: M. Hernandez / angelcorp)

El 7 de noviembre del año 2012 ocurrió un sismo de magnitud 7.4 en las costas del pacífico³ USGS (2012). Este evento sucedió a las 16:35:48 (UTC) y fue sensible en partes de México, El Salvador y Guatemala, dejando daños materiales considerables a edificios, hospitales, escuelas y casas, en el Departamento de San Marcos a 110 km de distancia del epicentro. El terremoto se generó en la frontera entre la placa de Cocos y la del Caribe. Los registros fueron grabados en la estación del Servicio Sismológico del in3 en la Ciudad de Guatemala, con coordenadas Latitud 14°39'24.63"N y Longitud 90°30'50.68"O, ubicado a 188 kilómetros del epicentro.

Otra muestra de incidencia de la actividad sísmica en esta área, se registra un nuevo terremoto el 12 de junio de 2013 con intensidades mayores al anterior, pero no se registraron daños materiales debido a que las edificaciones dañadas por el terremoto anterior, ya habían sido demolidas. Y por último el 7 de Julio de 2014 se registró un evento fuertemente sensible en San Marcos con epicentro en Puerto Madero México, de magnitud 6.9 provocando alerta de tsunami en las costas de Guatemala sin reporte de daños.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Identificar las características dinámicas de los edificios históricos bajo movimientos sísmicos fuertes y conocer su respuesta estructural.

2.2 Objetivos específicos

- a. Realizar un análisis de mecánico del adobe como principal material constructivo de la época.
- b. Determinar los mecanismos de falla de la estructura al ser sometida al sismo del 7 de noviembre de 2012 en San Marcos, Guatemala.

³ El epicentro del sismo se situó a 35 kilómetros de las costas de Champerico.

c. Comparar los resultados del modelo matemático con los resultados del modelo a escala.

3 ESTRATEGIA METODOLÓGICA

Para el análisis del modelo, los registros sísmicos del evento del 7 de noviembre de 2012 se escalan de acuerdo con las características de la estructura. El escalado se hace tomando como referencia el espectro de diseño del estándar guatemalteco, AGIES (2010). Se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros, clase de sitio: D, índice de sismicidad $I_0 = 4$.

Parámetro espectral, en la roca: período breve: $S_{cr} = 1.50g$ y período 1s. $S_{1r} = 0.55g$

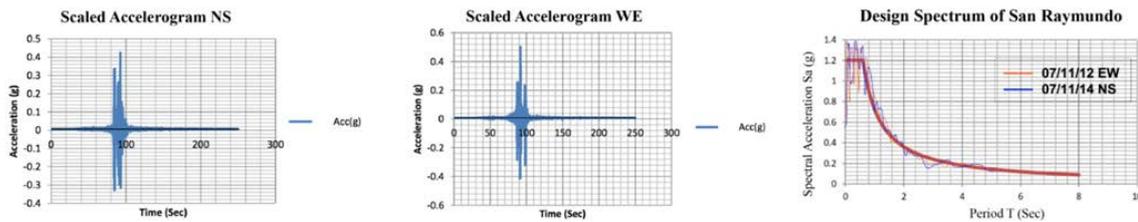


Figura 2. Aceleración escalada en dirección NS (izquierda), aceleración escalada en dirección EO (centro) y señal ajustada al espectro de diseño (derecha).

3.1 Criterios de la escala

El modelo de la Iglesia de San Raymundo fue construida a una escala geométrica de 1:8,75 en el eje transversal, basado en las dimensiones de la plataforma de la mesa vibradora y tomando en cuenta que las dimensiones de los elementos estructurales encajaran dentro de los límites posibles para su construcción. También se consideró el peso del modelo que no sobrepasara la capacidad máxima de operación de la mesa.

El modelo fue construido para evaluar el comportamiento del material y las propiedades elásticas representativas del comportamiento de la estructura, (Meli, 2000). El material principal utilizado es el adobe⁴, un material aun utilizado en las zonas rurales del país. Los bloques de adobe fueron elaborados en la región de Tecpán, Chimaltenango donde se producen ladrillo cerámico y adobe.

El modelo quedó con una longitud de 3,00 metros por 1,60 metros de ancho y una altura de fachada de 1,70 metros. La altura de la bóveda de 1,20 metros. Los muros con espesor de 0,10 metros y 0,05 metros de espesor en la bóveda y cúpula.

En esta primera fase se elaboró el modelo basado en el objetivo básico de la investigación que es conocer el comportamiento del material, la respuesta de los elementos estructurales, las líneas de falla en la estructura y la comprobación del modelo analítico. Debido que fue la primera iglesia elaborada a escala con materiales de características similares a las existentes, no se enfatizó en la relación peso y masa de la cúpula y la bóveda por lo que las propiedades mecánicas de estas se mantuvieron en la escala real. Este tema se desarrollara en la segunda fase de esta investigación enfocado a la cúpula y bóveda.

Un modelo fue elaborado en software como guía de fabricación del espécimen en la mesa vibradora. Este modelo sirvió para cuantificar los materiales, el peso de la estructura y ubicar el molde metálico anclado a la mesa para fijar la cimentación. Fueron necesarios 750 adobes dando como resultado un espécimen de 3,2 toneladas.

⁴ Las construcciones a base de adobe disminuyeron en las zonas afectadas por el terremoto del 4 de febrero de 1976 y fueron sustituidas por construcciones con mejores propiedades mecánicas, aunque probablemente de menor vida útil en condiciones independientes del fenómeno sísmico.

3.2 Instrumentación

Los datos fueron registrados por ocho dispositivos electrónicos que midieron las fuerzas de aceleración, estos acelerómetros⁵ ES-U, uniaxiales con sensibilidad 1.25mv/g, rango de respuesta 4G y proporción de muestreo de 100 muestras/s.

Un sensor triaxial ubicado en la base de la mesa como referencia conectado a un dataloger Granite, Kinemetrics. Y tres sensores de desplazamiento LDVT OMEGA de 0-10V.



Figura 3. Proceso de elaboración de la iglesia desde el modelo en software hasta el terminado final.

Los acelerómetros fueron colocados en la parte alta de la fachada, muros laterales y bóveda. El criterio de colocación se debió a que estos fueron los elementos estructurales que mostraron daño y colapso en el terremoto de 1976.

3.3 Modelo matemático

Se conformó un modelo matemático de la estructura en sus dimensiones originales por medio del Software SAP 2000, con la finalidad de estudiar el comportamiento sísmico en su estado original y las posibles formas de colapso que la estructura presento en el terremoto del 4 de febrero 1976. El modelo incorporo las propiedades geométricas de cada uno de los elementos (secciones transversales de muros, bóveda, contrafuertes y cúpula) que conforman la edificación y propiedades mecánicas de los materiales correspondientes. El análisis se efectuó por medio del método de elemento finito, la malla está conformada por 6.066 elementos. Se obtuvo como periodo fundamental de vibración 1,42 segundos.

3.4 Modelo escalado

Se realizó un análisis modal espectral del modelo empleado en el ensayo, con la finalidad de determinar las frecuencias fundamentales de vibración y definir cuáles son las acciones sísmicas más perjudiciales al modelo. Para este análisis lineal, se aplicó el método de elemento finito con una malla de 1.169 elementos y se estimó el comportamiento del modelo sometido a la acción sísmica del evento escalado.

Los principales modos de vibración del modelo se determinaron en frecuencias ente 5,86 Hz y 8,77 Hz.

		Earthquake in X					
		ACCELERATION (m/s ²)		VELOCITY (m/s)		DISPLACEMENT (m)	
		X	Y	X	Y	X	Y
MATHEMATICAL MODEL (ORIGINAL DIMENSIONS)	WALL	2.38	0.1078	0.2039	0.0073	0.0312	0.00054
	VAULT	4.88	0.182	0.41	0.009	0.0356	0.0004
	FACADE	4.83	1.256	0.242	0.17	0.01292	0.026
MATHEMATICAL MODEL (SCALE)	WALL	2.248	0.353	0.0271	0.0043	0.001	0.000057
	VAULT	3.14	0.26	0.0377	0.0041	0.0004	0.00067
	FACADE	1.39	1.981	0.0168	0.034	0.0002	0.0019
EXPERIMENTAL MODEL (SHAKING TABLE)	WALL	1.67	0.23	0.0198	0.00318	0.00073	0.000043
	VAULT	2.76	0.17	0.0032	0.0036	0.00035	0.000576
	FACADE	1.23	0.589	0.0139	0.0392	0.00018	0.00169

		Earthquake in Y					
		ACCELERATION (m/s ²)		VELOCITY (m/s)		DISPLACEMENT (m)	
		X	Y	X	Y	X	Y
MATHEMATICAL MODEL (ORIGINAL DIMENSIONS)	WALL	0.7171	0.088	0.0612	0.0047	0.018	0.000308
	VAULT	1.46	0.35	0.12	0.017	0.0108	0.0009
	FACADE	1.45	4.189	0.072	0.569	0.0039	0.089
MATHEMATICAL MODEL (SCALE)	WALL	0.822	0.29	0.0112	0.0035	0.00093	0.000052
	VAULT	0.94	0.88	0.0113	0.0136	0.00013	0.000839
	FACADE	0.41	6.39	0.005	0.0008	0.000059	0.003
EXPERIMENTAL MODEL (SHAKING TABLE)	WALL	0.702	0.23	0.0098	0.003115	0.000762	0.000046
	VAULT	0.792	0.748	0.0096	0.01142	0.00011	0.000587
	FACADE	0.294	4.608	0.00365	0.000592	0.0000436	0.0024

⁵ Dispositivo que registra la aceleración y detecta la orientación del movimiento.

Figura 4. Aceleración, velocidades y desplazamiento en dirección X y Y.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se evaluaron las aceleraciones, velocidades y desplazamientos en los diferentes elementos estructurales del modelo como muro lateral, bóveda y fachada, también el modelo matemático en dimensiones originales, el modelo a escala⁶ y el modelo experimental de mesa vibratoria.

Las aceleraciones máximas obtenidas en dirección X en los modelos a escala, oscilan entre 0.35g y 0.5g, siendo estas medidas en la bóveda de la estructura.

Las aceleraciones máximas obtenidas en dirección Y en los modelos a escala, oscilan entre 0.43g y 0.65g. Ocurriendo estas en la facha de la edificación.

El modelo experimental empieza a presentar fallas al ser sometido a una acción sísmica con una frecuencia entre 4-7 Hz.

4.1 Esfuerzos en la estructura

Cuando el sismo actúa en la dirección de Y, se observa una mayor concentración de esfuerzos en las áreas de la pared de la fachada, estos esfuerzos varían de 0,58 kgf/cm² en compresión a 2,5 kgf/cm² en tensión, respectivamente. La fachada es el elemento estructural que puede causar el mayor daño cuando el evento actúa en la dirección Y.

Las paredes laterales trabajan a 0,96 kgf/cm² en compresión hasta 1,35 kgf/cm² en tensión. Estos elementos presentan un pequeño cambio de estrés debido a la gran rigidez que estos contribuyen en la dirección Y.

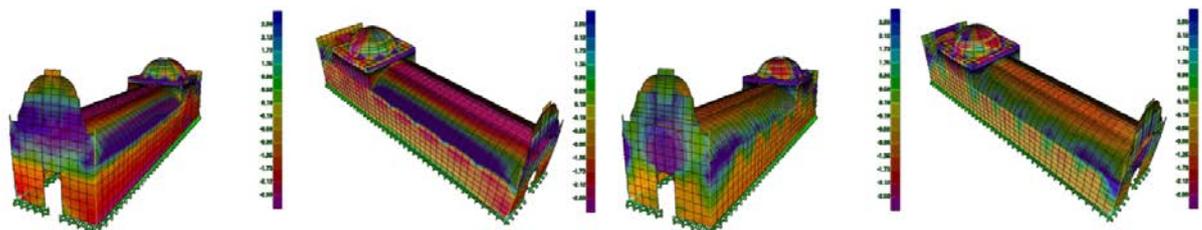


Figura 5. Esfuerzos perpendiculares a la dirección de la pared (primeros dos) y Esfuerzos paralelos a la dirección de la pared (dos últimos).

Cuando el modelo se somete a una acción sísmica en la dirección X, se observa una mayor concentración de tensiones entre la bóveda y las paredes laterales, varias tensiones desde 0,96 kgf/cm² en compresión hasta 2,5 kgf/cm² en tensión.

La pared de la fachada trabaja a 0,58 kgf/cm² en compresión a 1,76 kgf/cm² en tensión.

4.2 Propiedades mecánicas del adobe

Los resultados de laboratorio muestran esfuerzos a compresión entre 18,40 kgf/cm² y 20,22 kgf/cm² de los adobes. Según Meli, (1998, p. 25), estos valores están dentro del rango de resistencia para este material (5-20 kgf/cm²), esta resistencia es con adición de paja o algún material orgánico que disminuya la contracción del material y aumente su resistencia.

Se presentó el modelo de falla típico de una bóveda por el efecto de la carga externa, con mecanismo de cuatro articulaciones. La posición de las articulaciones depende de la geometría del arco y de la forma de carga. "Para cargas concentradas elevadas, se presentan mecanismo de falla local o falla por esfuerzo cortante en las juntas" (Meli, 1998, p. 57). En muros se presentaron grietas por tensión diagonal y grietas por flexión, producidos

⁶ El modelo a escala tiene la finalidad de determinar el comportamiento de muros y bóveda, no haciendo énfasis en el comportamiento de la cúpula, para el cual se realizara un estudio adicional.

por las fuerzas de empuje laterales uniformemente distribuidas que la bóveda ejerce hacia los muros portantes.

4.3 Daños observados

Los daños por sismo en edificaciones colonias se han debido principalmente a la falta de resistencia a la tensión de los materiales de construcción. “Los elementos estructurales presentan fallas debido a que los materiales carecen de ductilidad, es decir, no son capaces de aceptar deformaciones apreciables sin fracturarse” (Wever, 1991, p. 52). En el ensayo fueron muy notables las grietas producidas por el movimiento sísmico, estas grietas se fueron presentando en los elementos estructurales, según aumentaba la intensidad del sismo.

Se introdujo la señal del evento en dirección longitudinal obteniendo daños en el muro de la fachada observando daños en la fachada ya que este muro tiene tendencia al volteo por ser un elemento muy pesado y de mayor altura, el cual proporciona fuerzas inerciales durante el evento. Cuando el modelo es sometido al sismo en dirección perpendicular a la fachada, esta vibra alejándose del resto de la estructura produciendo grietas de flexión en la parte superior del elemento estructural.

El muro trasero presenta daños debido al empuje en dirección longitudinal ya que este no posee ninguna restricción contra el desplazamiento en dirección perpendicular a su plano, debido a que no existe un elemento que le proporcione rigidez al muro.



Figura 6. Daño a la fachada (1), grietas en la pared posterior (2), colapso de la parte superior de la fachada (3), daños a la pared debido a la presión lateral (4) y colapso de la bóveda (5).

5 CONCLUSIONES

El modelo matemático fue validado con el modelo experimental y presento como resultado que las frecuencias de vibración coinciden con las frecuencias que fueron necesarias inducir en el modelo experimental para que este empezara a presentar falla. En el modelo matemático presento falla con la frecuencia fundamental de 5,86 Hz mientras el modelo experimental necesitó de 6,0 Hz.

El modelo experimental simulado al terremoto (San Marcos 2012, Magnitud 7.4), presentó daños similares a los presentados en la Iglesia de San Raymundo en 1976, bajo el terremoto de magnitud 7.5. Entre estos daños se destacan fallas por tensión diagonal, fisuras por flexión, fallo de la fachada por flexión y colapso total de la cúpula y bóveda. Se continuara experimentando en próximas investigaciones con modelos enfocados a la bóveda y cúpula, aplicando cargas representativas. Este tipo de estructuras requiere de un reforzamiento en muros laterales dado que la bóveda induce fuerza de empuje perpendicular al eje fuerte del muro.

Es fundamental para Guatemala continuar con este estudio e investigar las mejores prácticas de reforzamiento, que no sea invasivo a la estructura y que permita conservar la arquitectura de la edificación dado que son estructuras consideradas patrimonio cultural.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CONRED (2016). Conmemoración por 40 años del terremoto de 1976. Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres. Boletín informativo No. 4130.

Meli, R. (1998). Ingeniería estructural de los edificios históricos. Mexico: Fundación ICA.

AGIES (2010). Normas de seguridad estructural de edificaciones y obras de infraestructura para la República de Guatemala.

AGIES NSE 1-10 Generalidades, Administración de las normas y supervisión técnica. Disponible en <https://conred.gob.gt/site/normas/Doc-3-NSE-1.pdf>

AGIES NSE 2-10 Demandas estructurales, condiciones de sitio y niveles de protección. Disponible en <https://conred.gob.gt/site/normas/Doc-4-NSE-2.pdf>

AGIES NSE 3-10 Diseño estructural de edificaciones. Disponible en <https://conred.gob.gt/site/normas/Doc-6-NSE-3.pdf>

USGS (2012). M7.4 Coastal Guatemala earthquake of 07 November 2012. Retrieved from <https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/20121107.pdf>

Wever, E. (1991). Edificaciones de la época colonial en Guatemala análisis y restauración. Licenciatura en Ingeniería. Guatemala: Universidad Mariano Gálvez.

AGRADECIMIENTOS

Las actividades aquí descritas son parte del proyecto de investigación organizado la oficina de "SismoResistencia" en colaboración con el Centro de Instrumentación y Registro Sísmico (CIRS) y el Servicio Sismológico del Instituto de Investigación de Ingeniería, Matemáticas y Ciencias Físicas (in3). Se hace una mención especial a los miembros y asistentes del Laboratorio de Sismología, "SismoLab" por su esfuerzo y dedicación para llevar a cabo la obra que se muestran en la investigación.

AUTOR

Rolando Torres, maestro en ingeniería estructural, ingeniero civil; director del instituto de investigaciones de ingeniería, matemática y ciencias físicas (in3) de la Universidad Mariano Gálvez de Guatemala.

Janeth De Paz, maestra en ingeniería estructural, ingeniera civil; profesora de la facultad de ingeniería, matemática y ciencias físicas de la Universidad Mariano Gálvez de Guatemala, profesora investigadora del instituto de investigaciones de ingeniería (in3).

Jorge Campo, ingeniero civil; profesor investigador del instituto de investigaciones de ingeniería, matemática y ciencias físicas (in3) de la Universidad Mariano Gálvez de Guatemala.

Alberto Blanco, maestro en planeación urbana; gerente; socio comercial; LATAM, MTS Systems Corporation