

Estudio paramétrico de características dinámicas de bóvedas de mampostería

Susana B. Gea¹, Carla M. Flores² & Mario W. E. Toledo³

(1) Consejo de Investigación, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Salta.
geas@unsa.edu.ar

(2) Consejo de Investigación, Universidad Nacional de Salta.
carlaflores@live.com

(3) Consejo de Investigación, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Salta.
mwtoledo@unsa.edu.ar

RESUMEN: En el estudio de vulnerabilidad sísmica estructural de edificios históricos, como las iglesias, las bóvedas de mampostería de ladrillo constituyen unas de las principales subestructuras a analizar y su modelación numérica requiere de la determinación de parámetros que no pueden siempre ser evaluados con precisión, como las características mecánicas de los materiales, el tipo de sustentación y geometría de la sección transversal de los arcos de sustentación de las bóvedas. La determinación de frecuencias naturales por medio de ensayos de vibración ambiental resulta muy útil para calibrar el modelo, pero es necesario establecer el rango de frecuencias propias de la bóveda para interpretar adecuadamente los resultados experimentales. Por ello, se realizó un estudio paramétrico de las frecuencias fundamentales de un caso particular de bóveda de mampostería (Iglesia Ntra. Sra. De la Viña, en Salta) por medio de un modelo de elementos finitos, tomando como parámetros las características de resistencia de los materiales componentes, como también el tipo de sustentación y el espesor de los arcos formeros. Los resultados obtenidos son presentados en este trabajo.

1 INTRODUCCIÓN

En el marco del estudio de la vulnerabilidad sísmica estructural de edificios históricos, es necesario establecer de antemano algunos parámetros para introducirlos en el modelo numérico. En el caso de iglesias, las bóvedas de mampostería constituyen unas de las principales subestructuras de los edificios. Cuando se trata de construcciones antiguas de valor patrimonial que no sufrieron daño, resulta muy difícil la determinación de algunas características mecánicas que impliquen ensayos destructivos, pues debe preservarse no sólo la estructura, sino las pinturas y frescos originales y este criterio impide cateos y toma de muestras (Gea et al., 2011).

Es por eso que se suelen realizar mediciones de respuestas ante vibraciones ambientales para calibrar el modelo numérico (Gentile & Saisi, 2007; Aras et al., 2011). De las numerosas frecuencias obtenidas por esta vía experimental,

influidas por el conjunto de construcción, se debe identificar aquellas que corresponden al elemento estructural que se estudia, por lo que resulta necesario entonces conocer de antemano el rango esperado de frecuencias propias.

A tal fin, en este trabajo se presenta un estudio en el que se determina por vía numérica la variación de frecuencias naturales de una bóveda de mampostería representativa de un caso de estudio, tomando la variación de resistencia de los materiales como parámetro, como también el tipo de sustentación de la estructura y la presencia de cargas provenientes de otras subestructuras.

2 CARACTERÍSTICAS DE LA BÓVEDA ANALIZADA

2.1 Caso de estudio

Se confeccionó el modelo numérico de una estructura real, respetando la geometría relevada.



IX JORNADAS DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE FACULTADES DE INGENIERÍA DEL NOA

Santiago del Estero, 3 y 4 de Octubre de 2013



Se trata de una de las bóvedas de una nave lateral de la Iglesia Ntra. Sra. de la Viña, en la ciudad de Salta, edificio del s. XIX (Figura 1). La bóveda descarga sobre cuatro arcos, los que a su vez apoyan sobre columnas (Gea et al., 2010), como se puede observar en la Figura 2.

Los trabajos realizados por Kohan et al. (2011) y Toledo et al. (2011) en torres de campanario de Salta, estructuras sencillas constituidas por muros de cal y canto, muestran módulos de elasticidad de 1.96GPa a 2.39GPa obtenidos por ensayos de vibración ambiental.



(a)

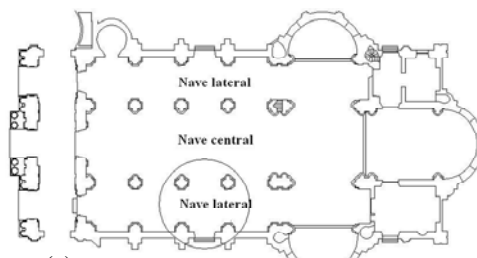


(b)

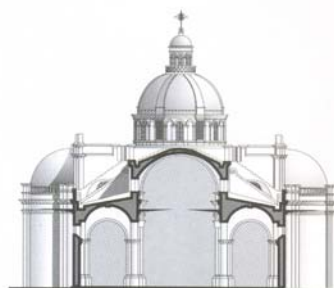
Figura 1. (a) Fachada de la Iglesia Ntra. Sra. de la Viña; (b) bóveda de la nave lateral en estudio.

2.2 Materiales

Las bóvedas están construidas con mampostería de ladrillo y mortero de cal, materiales que se muestran en la Figura 3, mientras que los muros de la iglesia son de mampostería de piedra, ladrillo cerámico y mortero de cal (llamados de cal y canto), como se observa en la Figura 4.



(a)



(b)

Figura 2. (a) Planta y (b) corte de la Iglesia Ntra. Sra. de la Viña. El círculo indica la bóveda analizada



Figura 3. Sector de mampostería y arco de la bóveda de cañón de la nave central, construidos con mampostería de ladrillo



IX JORNADAS DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE FACULTADES DE INGENIERÍA DEL NOA

Santiago del Estero, 3 y 4 de Octubre de 2013



Por otra parte, sobre el lado exterior del edificio se pudo efectuar ensayos con esclerómetro sobre los tres materiales componentes de la mampostería. De los ensayos realizados se concluyó que los ladrillos tienen resistencias a compresión que superan los 20MPa, mientras que el mortero presenta resistencias que van desde 0.5MPa a 10MPa, con una variación de espesores de 1.8cm a 3cm.



Figura 4. Cateo de muro exterior en donde se realizaron ensayos no destructivos sobre cada uno de los materiales componentes de la mampostería

2.3 Resistencia y rigidez de la mampostería

Meli (1998) propone la expresión empírica (1) para obtener la resistencia de la mampostería en función de la resistencia de sus componentes.

$$\sigma_{\text{mam}} = \frac{1}{3}\sigma_p + \frac{2}{3}\sigma_m \quad (1)$$

Donde:

σ_{mam} es la resistencia a compresión de la mampostería;

σ_p es la resistencia a compresión del ladrillo;

σ_m es la resistencia a compresión del mortero.

Para las resistencias determinadas para los materiales en forma aproximada, se tendría, empleando la expresión (1), una resistencia de la mampostería de 8MPa.

El módulo de elasticidad dinámico para la mampostería (INPRES, 1991) se puede estimar como:

$$E_{\text{din}} = 800 \sigma_{\text{mam}} \quad (2)$$

De donde se obtiene $E_{\text{din}}=6.4\text{GPa}$.

2.4 Sistema estructural

El vínculo entre las bóvedas está dado por su propia continuidad en el sentido longitudinal de la nave lateral. Los apoyos están constituidos por cuatro arcos formeros de la misma mampostería de las bóvedas, los cuales apoyan sobre columnas de mampostería de ladrillos (Figura 1.b). Cada arco que atraviesa la nave recibe la carga de dos bóvedas. Aquellos en la dirección longitudinal reciben carga de parapetos y, en el caso de los interiores, también parte de la bóveda de la nave central.

La sección transversal de los arcos formeros no puede determinarse con precisión, como se dijo. Del sistema constructivo revelado por cateos en otros arcos de la iglesia (Figura 3) se podría inferir que su altura es de 0.60m. El ancho de 0.60cm se obtiene del relevamiento arquitectónico.

3 PARÁMETROS PARA EL ANÁLISIS

3.1 Modelo numérico

Para efectuar el análisis paramétrico se construyó un modelo de elementos finitos con elementos de cáscara delgada para la bóveda y tipo cáscara gruesa para los arcos formeros, empleando el programa SAP 2000 (2009) (Figura 5)

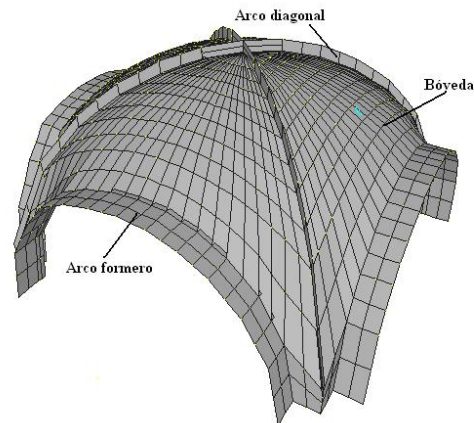


Figura 5. Modelo de elementos finitos

3.2 Características mecánicas

Se debe tener en cuenta que la expresión (1) no contempla la variación de espesores de mortero, los cuales, por encima de 2cm reducen



IX JORNADAS DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE FACULTADES DE INGENIERÍA DEL NOA

Santiago del Estero, 3 y 4 de Octubre de 2013



notablemente la resistencia de la mampostería. Es por esta razón que aparecen incertidumbres respecto del valor preciso de E_{din} . Una prueba de ello son los valores obtenidos para las torres de campanario, bastante menores al obtenido a partir de la expresión (1). El presente estudio evaluará las características dinámicas de bóvedas para E_{din} que toma valores de 1.6GPa, 3.2GPa y 5GPa.

3.3 Sistema de apoyos

Para los arcos formeros las columnas de mampostería representan apoyos elásticos, cuyas características mecánicas presentan incertidumbres al momento de introducirlas en el modelo numérico. También es de difícil cuantificación el vínculo con las columnas, el cual está dado por la traba de la mampostería. En

esta instancia del estudio se considerarán dos situaciones: apoyo fijo de la bóveda en la columna por un lado, y por el otro, empotramiento perfecto.

3.4 Altura de los arcos formeros

El desconocimiento de las dimensiones precisas de la sección transversal induce a evaluar cómo se modifica su comportamiento dinámico cuando varía la altura de los arcos formeros. Uno de los valores a tomar será 0.60m, que es la altura de otros arcos del edificio. También se analizó el comportamiento para alturas de 0.45m y 0.30m.

Tabla 1. Formas modales correspondientes a los modos de vibración que involucran mayor participación de masa

Modo de vibración	Participación de masa [%]	Descripción	Forma modal	
1	$U_x=20$ $U_y=63$ $U_z=0$ $R_x=7$ $R_y=10$ $R_z=17$	Modo traslacional en dirección y-y		
2	$U_x=63$ $U_y=20$ $U_z=0$ $R_x=2$ $R_y=34$ $R_z=51$	Modo traslacional en dirección x-x		
3	$U_x=0$ $U_y=0$ $U_z=0$ $R_x=0$ $R_y=0$ $R_z=13$	Modo rotacional en el eje z		
4	$U_x=0$ $U_y=0$ $U_z=43$ $R_x=33$ $R_y=0$ $R_z=0$	Modo traslacional en dirección z-z		



IX JORNADAS DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE FACULTADES DE INGENIERÍA DEL NOA

Santiago del Estero, 3 y 4 de Octubre de 2013



4 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

4.1 Frecuencias naturales

Se analiza la variación paramétrica de las cuatro primeras frecuencias naturales, ya que estas son las que involucran el mayor porcentaje de participación de masa, como se muestra en la Tabla 1.

4.2 Variación de parámetros

Las Tablas 2 y 3 presentan la variación de las frecuencias naturales para los diferentes valores del módulo de elasticidad dinámico, E_{din} , mencionados anteriormente (Cap. 3.2).

Tabla 2. Frecuencias naturales [Hz] en bóveda para diferentes módulos de elasticidad, con arcos de 0.60m de altura simplemente apoyados.

Modo	E_{din} [GPa]		
	1,6	3,2	5,0
1	11,4	16,2	20,2
2	11,5	16,2	20,3
3	18,1	25,7	32,1
4	22,6	32,0	40,0

Tabla 3. Frecuencias naturales [Hz] en bóveda para diferentes módulos de elasticidad, con arcos de 0.60m de altura empotrados.

Modo	E_{din} [GPa]		
	1,6	3,2	5,0
1	12,8	18,1	22,6
2	12,8	18,2	22,7
3	20,6	29,1	36,3
4	23,9	33,9	42,3

Las Tablas 4 y 5 muestran cómo varían las frecuencias naturales de los primeros cuatro modos cuando los espesores de los arcos formeros toman valores de 0.30m, 0.45m y 0.60m, tomando constante E_{din} , para el caso de arcos con apoyos simples y empotrados, respectivamente.

Tabla 4. Frecuencias naturales [Hz] en bóveda para diferentes espesores de arcos formeros simplemente apoyados, $E_{din}=3.2\text{GPa}$.

Modo	Espesor de los arcos formeros [m]		
	0,30	0,45	0,60
1	14,0	15,4	16,2
2	14,1	15,5	16,2
3	23,2	24,9	25,7
4	27,0	29,9	32,0

Tabla 5. Frecuencias naturales [Hz] en bóveda para diferentes espesores de arcos formeros empotrados, $E_{din}=3.2\text{GPa}$.

Modo	Espesor de los arcos formeros [m]		
	0,30	0,45	0,60
1	14,6	16,5	18,1
2	14,7	16,7	18,2
3	24,2	26,9	29,1
4	27,9	31,5	33,9

4.3 Análisis de resultados

De los resultados obtenidos se observa que variaciones de E_{din} producen modificaciones en las frecuencias fundamentales del orden de 41% y hasta 77% cuando este parámetro se incrementa de 1.6GPa a 3.2GPa y a 5GPa.

Si se analiza el comportamiento variando el tipo de sustentación de los arcos formeros, se observa una diferencia promedio de 12% en las frecuencias, comparando arcos con apoyos simples y empotrados.

Las variaciones en la altura de la sección transversal de los arcos produce diferencias en las frecuencias analizadas con respecto a arcos de 0.60m de espesor: 9% para espesores de 0.45m y 19% para espesores de 0.30m.

5 CONCLUSIONES

Para una bóveda de una de las naves laterales de la iglesia Ntra. Sra. de la Viña, se desea conocer el rango de frecuencias esperado al momento de su determinación experimental por medio de



IX JORNADAS DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE FACULTADES DE INGENIERÍA DEL NOA

Santiago del Estero, 3 y 4 de Octubre de 2013



ensayos de vibración ambiental, ya que estos ensayos proveen información de un vasto rango de frecuencias dadas por la interacción del resto del edificio.

Se eligieron aquellos parámetros de análisis que presentan incertidumbres al momento de cuantificarlos para generar el modelo numérico con el que se efectúa el análisis sísmico: E_{din} y tipo de sustentación y espesor de los arcos de soporte de la bóveda

El estudio se realizó con un modelo de elementos finitos en los que se variaron estos parámetros.

Analizando los cuatro primeros modos de vibración, que son los que involucran mayor participación porcentual de masa, se concluye que en el caso en que hay gran incertidumbre respecto de las características mecánicas de los materiales (y por lo tanto del módulo de elasticidad dinámico) se debería analizar respuestas experimentales en un rango amplio de 11Hz y 42Hz, lo cual complica la interpretación de los registros experimentales.

En cambio, si se puede determinar de manera experimental con cierta precisión las características mecánicas de la mampostería, las incertidumbres respecto del tipo de sustentación y espesor de los arcos formeros sólo ampliará el rango de las frecuencias esperadas en un rango del 9 al 19%, simplificando la interpretación de resultados experimentales.

6 REFERENCIAS

Aras, F., L. Krstevska, G., Altay & L. Tashkov, Experimental and numerical modal analyses of a historical masonry palace, *Construction and Building Materials*, 25, 81-91, 2011.

Gea S., M. Toledo, X. Milia & A. Carrió, Evaluación de la Vulnerabilidad Sísmica de la

Iglesia Nuestra Señora de la Candelaria de la Viña. *XXXIV Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural*, 2010.

Gea S., C. Demergassi, M. Toledo & G. Gea, Patrimonio histórico: una propuesta metodológica para su conservación en entornos urbanos cambiantes y sitios de peligrosidad sísmica. *2º Congreso Iberoamericano y X Jornada Técnicas de Restauración y Conservación del Patrimonio*, 2011.

Gentile, C. & A. Saisi, Ambient vibration testing of historic masonry towers for structural identification and damage assessment, *Construction and Building Materials* 21, 1311-1321, 2007.

Instituto Nacional de Prevención Sísmica. *Inpres-Cirsoc 103. Normas Argentinas Para Construcciones Sismorresistentes*. Argentina, 1991.

Kohan P.H., L.G. Nallim & S.B. Gea, Dynamic characterization of beam type structures: analytical, numerical and experimental applications, *Applied Acoustics*, 72 975-981, 2011.

Meli, R., *Ingeniería Estructural de los Edificios Históricos*, Fundación ICA, México DF, 1998

SAP 2000 Versión 14 Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis and Design of Three-Dimensional Structures, Inc. Berkeley, California. USA., 2009.

Toledo M.W.E., I. Vargas, S.B. Gea & L.G. Nallim, Características dinámicas del campanario de la basílica de San Francisco (Salta), *9º Encuentro de Investigadores y Profesionales Argentinos de la Construcción*. Salta, 2011.