

# Evaluación De Las Propiedades Dinámicas De Un Edificio Patrimonial De Mampostería Y Su Relación Con Las Variables Ambientales

## Evaluation Of The Dynamic Properties Of A Heritage Masonry Building And Its Relationship With Environmental Variables

Presentación: 4 y 5 de octubre de 2022

Doctorando:

**Francisco Alberto Calderón**

Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional – Argentina  
francisco.calderon@frm.utn.edu.ar

Director:

**Gustavo L. Palazzo**

Codirector:

**Arnaud Deraemaeker**

### Resumen

El presente trabajo presenta el monitoreo de la salud estructural de un edificio patrimonial de mampostería. Se presenta la determinación de frecuencias y amortiguamientos. Para esto se realizaron dos campañas de mediciones, una a la cual se denominó “corto plazo” y otra denominada “largo plazo”. Para la primera se utilizaron 3 acelerómetros triaxiales y se realizaron seis mediciones de 10 minutos de duración. La segunda campaña de medición se realizó a lo largo de cuatro meses, estas se realizaron con un acelerómetro triaxial en la misma posición que una de las posiciones de los tres acelerómetros de la medición a corto plazo. Se realizó un análisis estadístico de las mediciones a corto plazo y a largo plazo. Las mediciones a largo plazo presentan una variación en función de las variables ambientales. En las conclusiones se presentan hipótesis sobre el comportamiento de las propiedades dinámicas del edificio estudiado.

Palabras clave: Frecuencia, Amortiguamiento, Variables Ambientales, Mampostería.

### Abstract

This work presents the structural health monitoring of a masonry heritage building. The determination of frequencies and damping is presented. For this, two measurement campaigns were carried out, one to which it was called “short term”, and another called “long term”. For the first, 3 triaxial accelerometers were used and six 10-minute measurements were made. The second measurement campaign was carried out over four months, these were carried out with a triaxial accelerometer in the same position as one of the positions of the three short term measurement accelerometers. A statistical analysis of short-term and long-term measurements was performed. Long term measurements have a variation depending on environmental variables. In the conclusions there are hypotheses about the behavior of the dynamic properties of the studied building.

Keywords: Frequencies, Damping, Ambient Variables, Masonry.

## Introducción

Para conocer el estado de salud estructural de un edificio, se ha desarrollado muchos métodos de detección de daños. Estos métodos se basan principalmente en medición de vibraciones y los parámetros generales elegidos son cambios en las frecuencias, formas modales, amortiguación modal y muchos otros (Palazzo, 2002). Pero el problema es que los cambios en estos parámetros debido a las condiciones ambientales son importantes y, en muchos casos, mayores a los cambios debidos al daño estructural (Deraemaeker et al, 2008). Por estas razones, es un paso importante tener conocimiento sobre los límites alrededor de los parámetros dinámicos antes para implementar un método de monitoreo de salud estructural ya que diferentes tipos de estructuras tienen una sensibilidad diferente a las condiciones ambientales, por ejemplo, la Figura 1 muestra tres gráficas (frecuencia vs. temperatura). La primera figura muestra esta relación para un estudio de puente de hormigón conocido, Z-24 por Peeters (2000), la segunda muestra la misma relación para una iglesia gótica y la tercera grafica es de una torre de mampostería de piedra, ambos edificios estudiados por Ramos (2007). Como se muestra en los gráficos, el comportamiento de estas tres estructuras es muy diferente. En el caso del puente RC, la frecuencia es inversamente proporcional a la temperatura, mientras que en el caso de la iglesia y la estructura de mampostería de piedra (Figura 1.b y c) la frecuencia propia parece estar aumentando con la temperatura, pero de dos maneras diferentes para cada edificio.

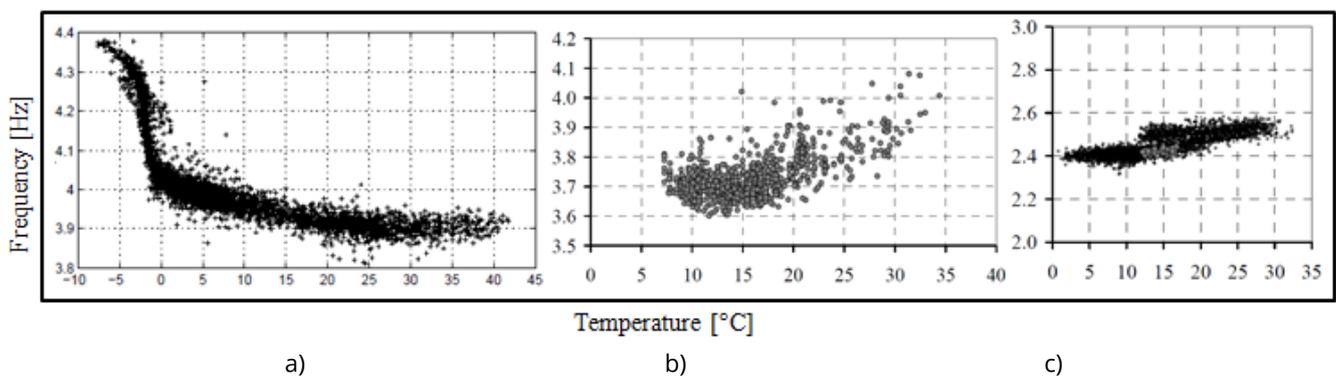


Figura 1: relación entre frecuencia y temperatura de: a) El puente Z-24, b) Iglesia del Monasterio de Jerónimos y c) Torre del reloj Mogadouro (adaptada).

Teniendo esto en cuenta, el objetivo de este documento es conocer la relación entre la temperatura vs. frecuencia y humedad relativa vs. frecuencia para un antiguo edificio de mampostería no confinado en Mendoza Argentina, donde la temperatura sufrió una variación entre  $-3^{\circ}\text{C}$  y  $25^{\circ}\text{C}$  (rango térmico). El edificio en estudio es el Emiliano Guñazú - Museo de Bellas Artes de Mendoza con frescos del pintor Fernando Fader (Wikipedia, 2022). Esta casa fue construida antes de 1880, y luego en 1889, cuando Emiliano Guñazú la compró, la casa fue modificada. En 1905, Fader comenzó a pintar murales en la casa. La casa está construida en mampostería no reforzada sobre la base de piedra y la estructura tiene varios daños causados por dos fuentes, la primera, falta de mantenimiento y la segunda, la falta de diseño sísmico (Figura 2).

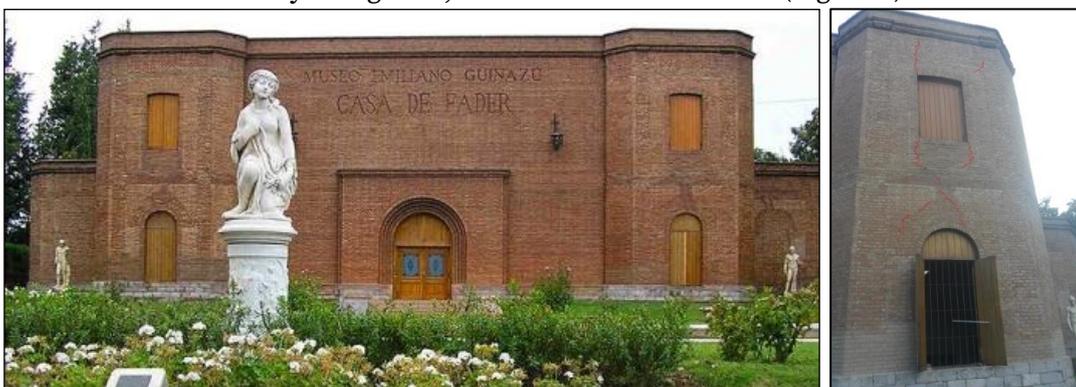


Figura 2: fachada del Museo de Bellas Artes de Mendoza - Emiliano Guñazú.

El edificio presenta patologías estructurales, el primer problema está en los cimientos ya que el edificio se funda en dos profundidades diferentes, una parte del edificio en un estrato de limos (con una profundidad de hasta  $-3.00\text{ m}$ ) y otra parte del edificio fundado a mayor profundidad en un estrato de grava. La base más

profunda se encuentra en el sector del sótano (el sector fundado en grava Figura 3) alrededor de -4.00 m y el resto del edificio tiene un nivel de base de -1.50 m en suelo de limoso. Estas diferencias en el nivel de fundación han resultado en un asentamiento diferencial. Otro efecto agravante han sido los varios terremotos ocurridos en Mendoza: San Juan 1944 (ML: 7.0), Caucete 1977 (ML: 7.4), Mendoza 1985 (ML: 5.9), Mendoza 2005 (ML: 4.9), Mendoza 2006 (ML: 5.5) (INPRES, 2022), (Frau, 2009) y Mendoza 2012 (ML: 5.0) (FRM-UTN, 2022). La Figura 3 también muestra la planta y el sector en el estudio. El museo fue cerrado a las personas debido a los diversos problemas en la estructura; algunas grietas se muestran en la Figura 2. En 2012, el gobierno de Mendoza solicitó estudiar una propuesta de refuerzo y puesta en valor de este. Parte del estudio consiste en obtener los parámetros dinámicos con dos objetivos. El primer objetivo es la posibilidad de hacer una evaluación después del refuerzo estructural a fin de comparar las frecuencias. El segundo objetivo es la actualización de un modelo de elemento finito de la estructura. Parte del primer objetivo se presenta en este documento.

## Desarrollo

Se realizaron dos conjuntos de pruebas. Las primeras pruebas se hicieron para conocer las características dinámicas del edificio. Llamamos a esta prueba como "mediciones a corto plazo". Se emplearon tres acelerómetros triaxiales BASALT (marca Kinimetrics). Se obtuvieron seis mediciones (series temporales) de aceleración en el edificio durante 10 minutos cada una, con una relación de muestreo de 200 Hz en dos sensores (P1 y P2) y 250 Hz en el sensor del techo (P3). Estos registros se sincronizaron a través del tiempo GPS. Para el análisis modal se empleó MACEC (Reynder, 2010). El método utilizado para obtener las frecuencias y la amortiguación modal fue la identificación del subespacio estocástico covariance-driven (Peters, 1999). La frecuencia de muestreo fue de 50 Hz porque este es el mayor divisor común entre 200 Hz y 250 Hz. El orden esperado fue 80. La Tabla 1 y la Tabla 2 muestran los resultados. En la prueba se identifican varios modos como se puede ver en la Figura 4, pero solo tres modos están presentes en la mayoría de las mediciones, 4.15 Hz, 5.04 Hz y 7.47 Hz. La segunda prueba se realizó a lo largo de cuatro meses. Llamamos a esta prueba como "mediciones a largo plazo" para diferenciar la prueba anterior. Las mediciones a largo plazo se realizan solo con el acelerómetro ubicado en la posición P2 (Figura 3). Las dos primeras frecuencias obtenidas en el primer conjunto de prueba se tomaron como referencia para la identificación automática en mediciones a largo plazo. Una medición de frecuencia, temperatura se realizó una humedad relativa ambiente cada tres horas durante cuatro meses, las mediciones del historial de tiempo se obtuvieron en el edificio durante 10 minutos con una relación de muestreo de 200 Hz. La serie temporal (60 días) de temperatura y humedad, y la aceleración se muestran en la Figura 5 y la Figura 6.

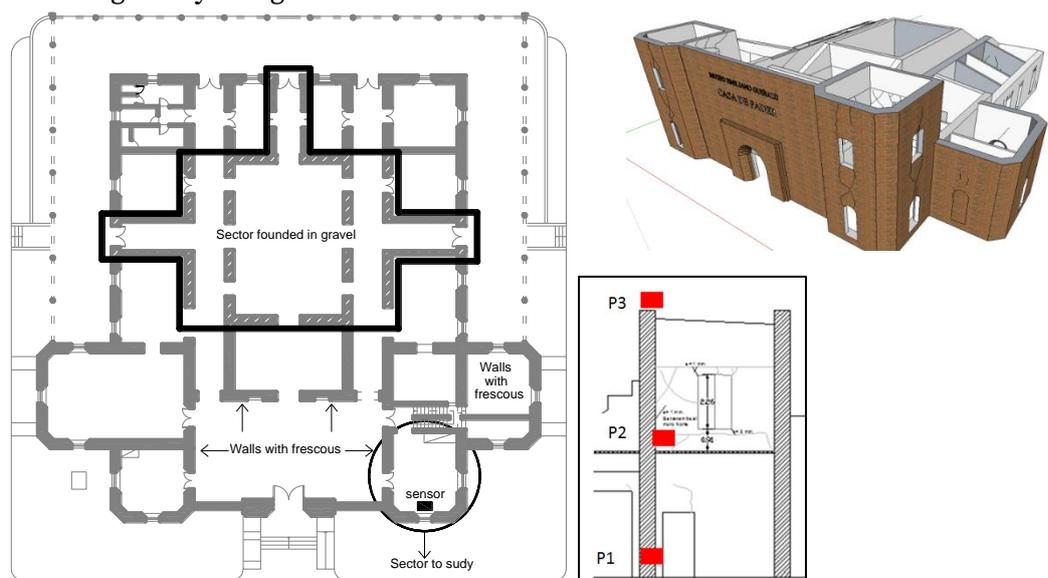


Figura 3: planta, elevación del sector medido y 3D. Los rectángulos rojos representan la posición de los acelerómetros de la primera medición (corto plazo).

La segunda prueba se realizó a lo largo de cuatro meses. Llamamos a esta prueba como "mediciones a largo plazo" para diferenciar la prueba anterior. Las mediciones a largo plazo se realizan solo con el acelerómetro ubicado en la posición P2 (Figura 3). Las dos primeras frecuencias obtenidas en el primer conjunto de prueba se tomaron como referencia para la identificación automática en mediciones a largo plazo. Se realizó una medición de frecuencia, temperatura y humedad relativa ambiente cada tres horas durante cuatro meses. La

medición de aceleraciones en el tiempo se obtuvo en el edificio durante 10 minutos con una frecuencia de muestreo de 200 Hz. La serie temporal (60 días) de temperatura y humedad, y la aceleración se muestran en la Figura 5 y la Figura 6. La Figura 7 representa las distribuciones estadísticas.

La temperatura y humedad relativa ambiente fue proporcionada por el INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agrícola), que está a cargo de la estación meteorológica en los terrenos del museo. La Figura 8 muestra la evolución de las frecuencias de dos modos, y la Figura 10 muestra la relación entre estas frecuencias y la temperatura y la humedad. La Figura 9 presenta el movimiento de las frecuencias en el tiempo y la variación en un día típico.

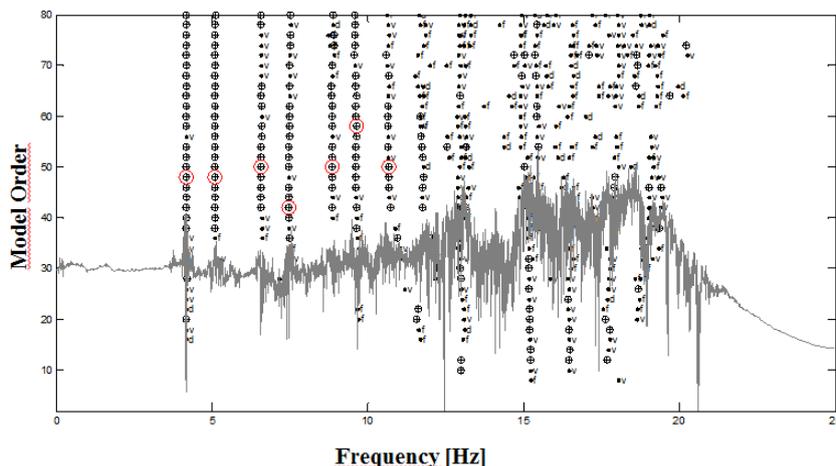


Figura 4: diagrama de estabilización de la medición #1 (medición a corto plazo).

Mode	Measurements											
	1		2		3		4		5		6	
	Freq. [Hz]	Damp. [%]	Freq. [Hz]	Damp. [%]	Freq. [Hz]	Damp. [%]	Freq. [Hz]	Damp. [%]	Freq. [Hz]	Damp. [%]	Freq. [Hz]	Damp. [%]
1	4.144	2.189	4.138	2.150	4.165	2.682	4.150	2.594	4.163	2.697	4.164	1.774
2	5.034	2.458			5.042	2.361	5.033	2.084	5.030	3.362	5.099	2.914
3	7.500	1.786			7.506	2.279	7.443	2.722	7.470	2.218	7.470	2.133

Tabla 1: resultados de las mediciones a corto plazo.

Mode	Frequencies [Hz]					Damping [%]				
	$\mu$	$\sigma$	CV [%]	max	min	$\mu$	$\sigma$	CV [%]	max	min
	1	4.154	0.012	0.28	4.165	4.138	2.348	0.371	15.80	2.697
2	5.047	0.029	0.58	5.099	5.030	2.636	0.504	19.13	3.362	2.084
3	7.478	0.026	0.34	7.506	7.443	2.227	0.336	15.07	2.722	1.786

Table 2: parámetros estadísticos de las mediciones a corto plazo.

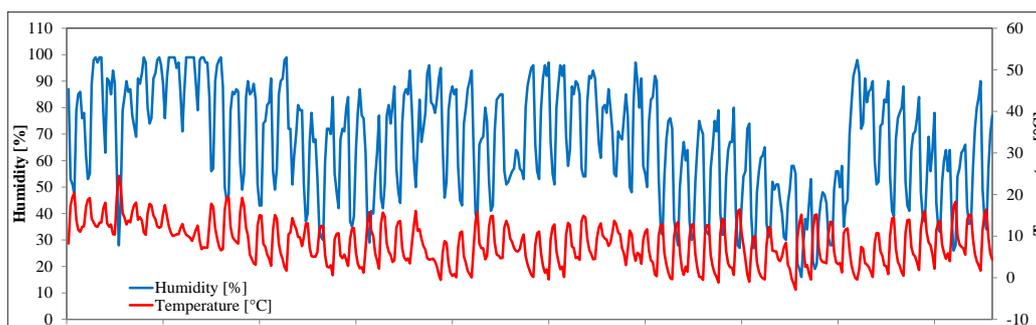


Figura 5: serie temporal (60 días) de temperatura y humedad ambiente relativa.

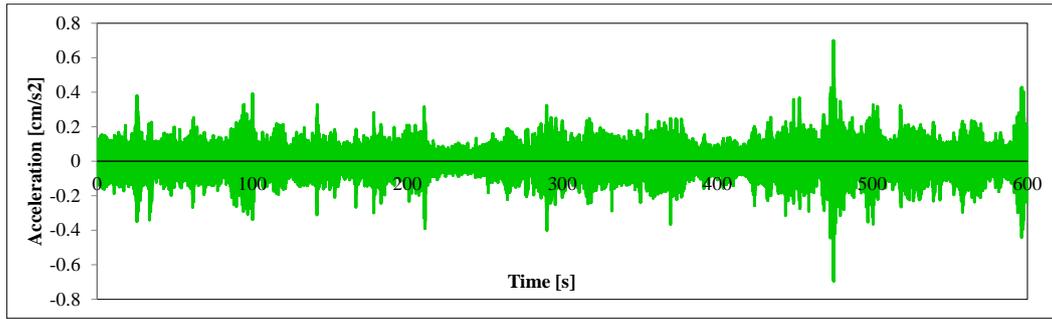


Figura 6: serie temporal de aceleración (10 minutos).

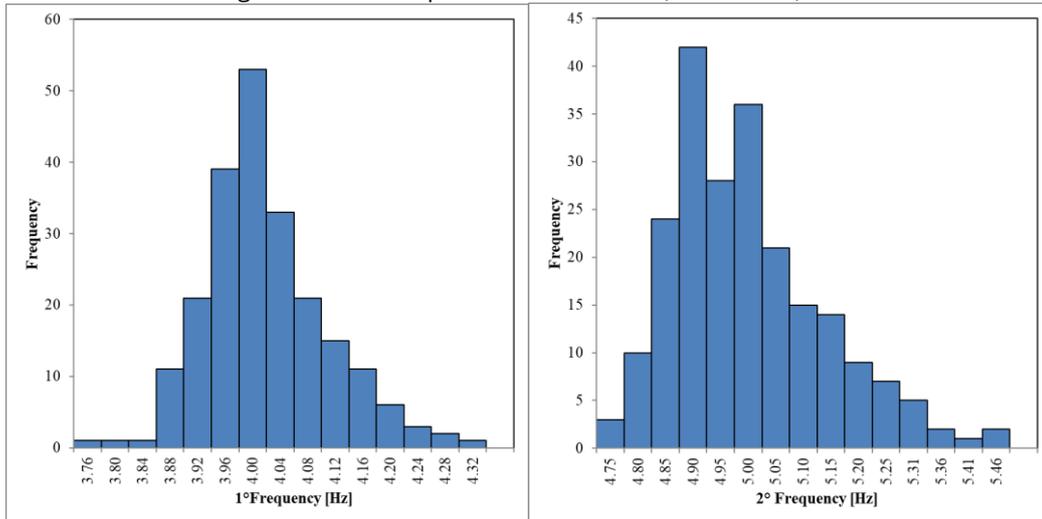


Figura 7: relación entre las frecuencias y temperatura de dos modos de vibración.

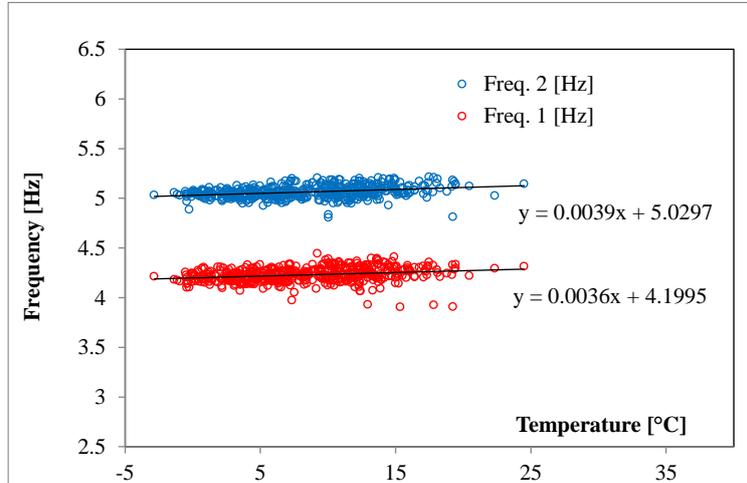


Figura 8: relación entre las frecuencias y temperatura de dos modos de vibración.

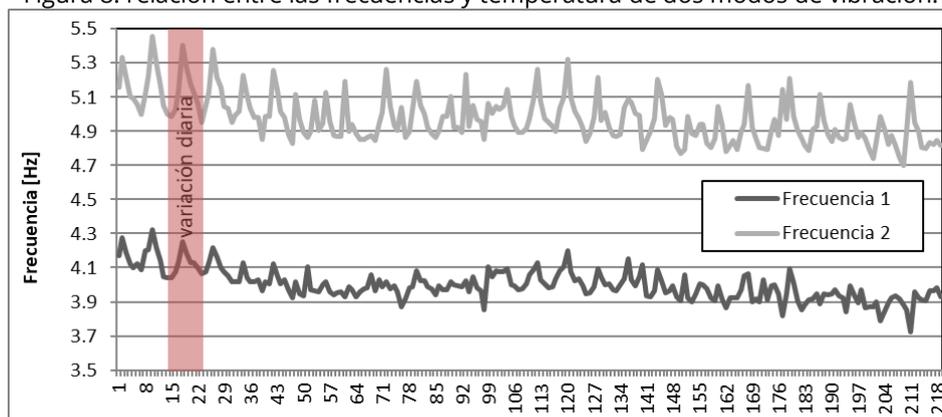


Figura 9: variación en las frecuencias de dos modos de vibración en el tiempo.

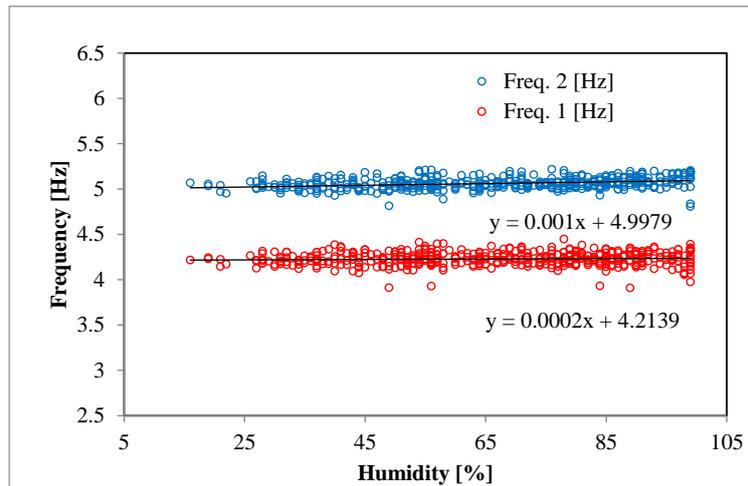


Figura 10: relación entre las frecuencias y humedad ambiente relativa de dos modos de vibración.

## Conclusiones

Este artículo presenta un estudio de las características dinámicas de un antiguo edificio de mampostería. Estas características se estudian en dos etapas, condiciones a corto plazo y a largo plazo. En las condiciones a corto plazo se identificaron tres modos (frecuencias y amortiguación modal), con baja variación como se ve en la Tabla 2. Estas mediciones se realizaron con tres acelerómetros triaxiales. En medición a largo plazo, solo las frecuencias de dos modos se evaluaron a lo largo de cuatro meses. Los resultados de estas mediciones se correlacionaron con la temperatura y la humedad relativa ambiente, como puede ver en la Figura 7 y la Figura 8. De estas relaciones entre frecuencia y temperatura, y frecuencia y humedad; puede deducir que la frecuencia aumenta ligeramente con la temperatura, y las dos frecuencias aumentan en una proporción similar (ver pendiente de las líneas de tendencia). Por otro lado, la relación entre las frecuencias una humedad relativa ambiente parecería constante. Del estudio realizado se propone la hipótesis de que la variación de las frecuencias es a causa del daño presente en la estructura.

## Referencias

- Deraemaeker, A., Reynders, E., De Roeck, G. & Kullaa, J. (2008). *Vibration-based structural health monitoring using output-only measurements under changing environment*. Mechanical Systems and Signal Processing 22, 34–56.
- Frau, C. D. (2009). *Demanda sísmica, incluidos los efectos de directividad de las zonas cercanas a la falla de Argentina*. Argentina: Tesis doctoral. Universidad Tecnológica Nacional.
- INPRES. <http://www.inpres.gov.ar/seismology/historicos.html>
- Palazzo, G.L. (2002). *Identificación del daño estructural a través de cambios en las propiedades dinámicas*. Argentina: Tesis de maestría. Universidad Nacional de Tucumán.
- Peeters, B. & De Roeck, G. (1999). *Reference-based stochastic subspace identification for output-only modal analysis*. Mechanical Systems and Signal Processing 13(6), 855-878.
- Peeters, B. (2000). *System identification and damage detection in civil engineering*. Belgium: PhD thesis, Department of Civil Engineering, Katholieke Universiteit Leuven.
- Ramos, L.F. (2007). *Damage identification on masonry structures based on vibration signatures*. Portugal: PhD Thesis. Escola do Engenharia. Universidade do Minho.
- Reynders, E., Schevenels, M., & De Roeck, G. (2010). Macec 3.1: a Matlab toolbox for experimental and operational modal analysis. Report BWM-2010-05, Department of Civi Engineering, K.U.Leuven.
- UTN-FRM. <http://www1.frm.utn.edu.ar/sismos/>
- Wikipedia. [http://es.wikipedia.org/wiki/Fernando\\_Fader](http://es.wikipedia.org/wiki/Fernando_Fader)