

EVALUACIÓN DE LA VARIABILIDAD DE LOS PARÁMETROS MODALES DE UN MURO DE ALBAÑILERÍA DEBIDO A CONDICIONES CLIMATICAS.

Bastian Garrido Luengo¹ Claudio Oyarzo Vera² Diego Caamaño Avendaño³

RESUMEN:

El presente estudio tiene como objetivo analizar la variación de las propiedades dinámicas de un muro de albañilería expuesto a variables meteorológicas. La estructura analizada es un muro de albañilería simple de 1,8 m de alto, 2,4 m de largo y 0,14 m de espesor, que está construido sobre una cimentación de hormigón armado y expuesto a la intemperie. Las propiedades dinámicas se determinaron a través de un Monitoreo de Salud Estructural (SHM), el cual consiste en capturar la respuesta de las vibraciones de una estructura provocadas por excitaciones no destructivas, para lo cual se utilizó un martillo con cabeza de goma, el cual sirvió para excitar el muro periódicamente por un periodo de seis meses, entre los meses de agosto y diciembre. La respuesta vibratoria del muro fue recolectada mediante acelerómetros uniaxiales, y procesada mediante el software ARTeMIS Modal Pro versión 6.0.2.0 a través de los métodos FDD y SSI. Para complementar la información modal, se recolectaron datos ambientales como temperatura, humedad y precipitación, obtenidos a través de una estación climatológica ubicada en las inmediaciones del muro de albañilería ensayado. Ambos grupos de datos fueron correlacionados para entender cómo influyen en los 5 diferentes modos de vibración encontrados, además de evaluar el efecto de la humedad acumulada hasta por 5 días y diferentes temperaturas extremas, así como la promedio.

PALABRAS CLAVES: Modal; Clima; Albañilería

ABSTRACT:

The present study aims to analyze the variation of the dynamic properties of a masonry wall due to meteorological variables. The analyzed structure is a unreinforced masonry wall of 1.8 m high, 2.4 m long and 0.14 m thick, built on a reinforced concrete foundation and exposed to the weather. The dynamic properties were determined through a Structural Health Monitoring (SHM), which consists of capturing the response of the vibrations of a structure caused by non-destructive excitations, for which a rubber-headed hammer was used, which served to periodically excite the wall for a period of six months between August and December. The vibrational response of the wall was collected using uniaxial accelerometers, and processed using the ARTeMIS Modal Pro software version 6.0.2.0 through the FDD and SSI methods. In order to complement the modal information, environmental data such as temperature, humidity and precipitation were collected, obtained through a climatological station located in the immediate vicinity of the tested masonry wall. Both groups of data were correlated in order to understand how they influence in the 5 different vibration modes found, in addition to evaluating the effect of accumulated humidity up to 5 days and different extreme temperatures, as well as the average.

KEYWORDS: Modal; Weather; Masonry

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, bgarrido@ing.ucsc.cl

² Profesor Guía, D. de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, coyarzo@ucsc.cl

³ Profesor Informante, D. de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, dcaamano@ucsc.cl

1. INTRODUCCIÓN

El clima es un factor importante que afecta a la integridad estructural de los edificios y estructuras. La lluvia, el viento y otros factores meteorológicos pueden causar daños en los materiales de los que se compone toda construcción, donde la exposición directa a los elementos puede debilitar su estructura y aumentar el riesgo de deslizamientos o colapso. Para evitar esto se han ideado múltiples soluciones, dependiendo del tipo de material en uso.

Existen muchas formas de edificar estructuras, sin embargo, para efectos de este documento, nos referiremos de manera específica a la albañilería. La albañilería se basa en la unión de elementos individuales (bloques, rocas o ladrillos), mediante mezclas adhesivas de argamasas (morteros), logrando formar un único elemento monolítico que, se espera, se comporte como un todo. Existen muchas formas también de trabajar la albañilería, pero estas pueden resumirse en tres tipos: albañilería simple, albañilería armada, y albañilería confinada; el primero comprende solo el uso de ladrillos de arcilla y mortero, sin refuerzos ni confinamientos a excepción de la posible implementación de una cadena superior para evitar la disgregación de los ladrillos; en el segundo destaca la aplicación de refuerzos metálicos para lograr un trabajo conjunto entre estos, los ladrillos perforados y el mortero; por último, en el tercer tipo se hace uso de elementos de refuerzo (verticales u horizontales) que contribuyan a mantener la integridad del muro, lo que en la mayoría de casos implica confinarlo, de modo que las fuerzas aplicadas sean principalmente de compresión [1].

No es inusual que, sin importar los materiales que se ocupen en la elaboración de una estructura, estos puedan quedar directamente expuesta a los cambios de temperatura y humedad del ambiente. Estos cambios pueden afectar su desempeño y causar daños en los materiales de construcción a través de diferentes mecanismos como; la humedad causada por las lluvias, las fisuras y grietas provocadas por la expansión y contracción debido al cambio de temperatura, y el desprendimiento o la erosión causada por las heladas que pueden contribuir al deterioro de la albañilería con el tiempo [2].

Dada la variación de las características físicas de una estructura a lo largo del tiempo se hace necesario un mecanismo que sea capaz de diagnosticar a la misma en distintos momentos de su vida útil, y para lograr esto se debe recurrir a criterios intrínsecos que sean capaces de definir a cada estructura individualmente. La variación de los parámetros modales como la frecuencia, amortiguamiento y formas modales son una herramienta de diagnóstico fiable, esto gracias a diversos estudios realizados donde se establece una relación entre los parámetros ambientales y las frecuencias naturales [3], dejando constancia que la albañilería es especialmente propensa a la absorción de humedad, lo que implica una variación en la masa y la rigidez.

En los últimos años, la cantidad de estudios que avalan el cambio de las propiedades dinámicas en relación con los componentes medioambientales han aumentado de manera importante. Un ejemplo de esto es el estudio postsísmico que se hizo a la Torre-Portal de Viviers, una estructura de albañilería ubicada en el valle del Ródano (Sudeste de Francia), construida en el siglo XI y analizada luego de que el 11 de noviembre del 2019 un sismo de intensidad 4.9 se produjese a 5 kilómetros de esta. La torre fue instrumentada con sensores de alta sensibilidad para poder detectar las excitaciones ambientales, de esta manera se pudo establecer una concordancia entre las propiedades modales de la estructura, la temperatura, y la humedad del ambiente, estos factores fueron los principales responsables de una variación de alrededor del 3% en las frecuencias [4]. De manera parecida, el campanario de la iglesia San Vittore en Arcisate, Italia, que también data del siglo XI, fue analizado con 15 puntos de medición diferentes. Sus componentes modales fueron extraídas y correlacionadas, así se identificó que las frecuencias naturales y la temperatura son directamente proporcionales, lo cual implica que una evaporación o acumulación de masa de agua en la albañilería, generará una elevación o disminución de las frecuencias naturales, respectivamente [5]. Sin embargo, cabe mencionar que, en los casos donde la temperatura ambiente alcanza el punto de congelación, como es la situación del campanario de San Pietro en Perugia, Italia [6], el comportamiento difiere de lo usual, ya que los resultados del estudio recién presentado indican, no una bajada en las frecuencias naturales, sino que se puede dar el caso de un crecimiento abrupto y exacerbado de estas, la explicación de este fenómeno yace en el congelamiento de las partículas de agua atrapadas en la albañilería y que, al congelarse, sumado al hecho de obstruir las micro fisuras por las que

entraron e impidiendo con esto que el agua que sigue líquida pueda salir, se generase un cambio en la rigidez general de la estructura. Estas y más situaciones se repiten en buena parte de los análisis hechos sobre estructuras compuestas por albañilería, al correlacionar sus propiedades modales con los factores climáticos.

Gracias a la posibilidad de poder cuantificar las propiedades dinámicas de una edificación sin necesidad de alterar o comprometer su integridad estructural, es que se logra hacer un estudio a largo plazo en múltiples edificios que, ya sea por su tamaño o importancia sociocultural, necesitan mantenerse lo más intactos posible. A esta clase de muestreo se le conoce como Monitoreo de Salud Estructural o SHM por sus siglas en inglés [7]. De esta manera, pueden además establecerse parámetros y umbrales que nos indiquen una discordancia desmedida entre las propiedades dinámicas de dos momentos diferentes [8], lo que resulta útil a la hora de querer diagnosticar estructuras durante largos periodos de tiempo o después de algún evento que se crea pudiera haberla dañado. Los procesos para poder establecer y parametrizar las propiedades son variados, sin embargo, para efectos de este estudio se hará uso de 2 métodos; uno de estos es el Frequency Domain Decomposition (FDD). Este enfoque analiza las frecuencias resonantes del sistema mediante la detección de picos en la función de respuesta, para posteriormente utilizar la función espectral que convierte las medidas de aceleración al dominio de la frecuencia mediante la transformada de Fourier discreta, para luego ser promediada y normalizada, siendo este un método mejorado del método Peak Picking [9]. El segundo método corresponde al Stochastic Sub-space Identification (SSI), un proceso de análisis de datos en el dominio del tiempo que utiliza técnicas matemáticas como la factorización QR y la descomposición del valor singular para identificar las matrices de un modelo dinámico de estado-espacio. Este método se utiliza a menudo en el análisis de sistemas dinámicos para entender su comportamiento y puede ser útil para la toma de decisiones en distintos campos de aplicación [10]. Además de estos métodos es necesario destacar el Modal Assurance Criterion (MAC), un indicador utilizado en el análisis de estructuras dinámicas para comparar distintas formas modales y determinar su similitud o relación. Las formas modales son una de las principales propiedades dinámicas de una estructura y representan los modos de vibración natural de la misma. El MAC se calcula a partir de las matrices de masa y rigidez de la estructura y se utiliza para comparar dos formas modales específicas, dicho valor varía entre 0 y 1, siendo 0 un valor que indica que las formas modales comparadas son ortogonales y no tienen relación entre sí, mientras que un valor cercano a 1 indica una alta similitud entre las formas modales [11].

En este estudio, se examina cómo el clima puede afectar a las propiedades dinámicas de un muro de albañilería simple, a través de ensayos experimentales y mediante el análisis modal operacional, para poder determinar el comportamiento intrínseco del muro (frecuencias naturales, formas modales y amortiguamiento) bajo distintos escenarios de temperatura y humedad.

2. METODOLOGÍA

2.1. Descripción de la estructura ensayada

Se construyó un muro de albañilería simple que mide 240 [cm] de largo, 180 [cm] de alto y 14 [cm] de espesor. Este muro se apoya sobre una base y una viga superior hechas de hormigón armado. Los ladrillos macizos utilizados para su construcción tienen un tamaño de 28 [cm] de largo, 14 [cm] de ancho y 5 [cm] de espesor, y se unieron siguiendo una disposición de aparejo en soga mediante mortero predosificado de la marca Topex con una relación de agua y mortero de 3.75 litros de agua por cada 25 [kg] de mortero. Los ensayos estandarizados determinaron que el mortero tiene una resistencia a compresión de 5.1 [MPa], de 0.2 [MPa] en adherencia, y la resistencia a compresión de los prismas de albañilería es de 3.2 [MPa].

El muro de albañilería se encuentra ubicado al aire libre, junto al laboratorio de ingeniería San José Obrero en las dependencias del campus San Andrés de la UCSC (36°47'45.8"S 73°03'30.9"W). Debido a su emplazamiento a la intemperie, el muro fue expuesto a las condiciones meteorológicas y las temperaturas ambientales que se registraron entre agosto y noviembre de 2022.



Figura 1: Muro de albañilería ensayado

2.2. Instrumentación

Para llevar a cabo los ensayos, se instalaron 12 acelerómetros de la marca PCB Piezotronics en una cara del muro con el fin de captar de manera óptima sus formas modales en dirección normal al plano. De estos acelerómetros, 8 son del modelo 352CO3 y 4 son del modelo 333B50. Estos acelerómetros fueron colocados en el muro con el propósito de obtener información precisa sobre su comportamiento durante los ensayos.



(a)



(b)



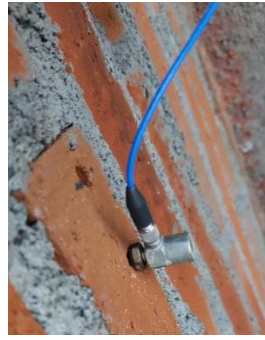
(c)

Figura 2. (a) Distribución de los acelerómetros en el muro, ordenados de izquierda a derecha y de abajo hacia arriba, (b) Acelerómetro PCB modelo 333B50, (c) Acelerómetro PCB modelo 352CO3. (Fuente: Elaboración propia)

Los acelerómetros se conectaron mediante cables blindados (Figura 3.b) a módulos de adquisición de datos modelo NI-9234, que tienen capacidad para 4 acelerómetros cada uno. Se utilizaron 3 de estos módulos para poder conectar los dos cables, que a su vez se vincularon a un chasis modelo cDAQ-9178 (Figura 3.a). A través de este chasis, los datos obtenidos en los ensayos se enviaron a una computadora que utiliza el software LabView para digitalizar los datos a través de una rutina previamente programada.



(a)



(b)



(c)

Figura 3: (a) Módulo de adquisición NI-9234 conectado al chasis cDAQ-9178, (b) Conexión de acelerómetro con cable blindado, (c) Conexiones y modelo del chasis. (Fuente: Elaboración propia)

2.3. Procedimiento experimental

El muro ensayado fue sometido a excitaciones mediante golpes con un martillo de goma, los cuales fueron aplicados en 6 diferentes puntos en una de las caras del muro y cada ensayo constó de 18 golpes con una duración total de 360 segundos por prueba. El orden de los golpes se muestra en la Figura 4.



(a)



(b)



(c)

Figura 4. (a) Martillo de goma utilizado para excitar el muro por medio de impactos, (b) Disposición de los golpes en el muro, (c) Ejecución de ensayo. (Fuente: Elaboración propia).

Se utiliza el software LabVIEW V2.5.20 para recopilar los datos. La respuesta del muro al estímulo proporcionado por el martillo de goma se registró mediante la variable *Acceleration* y se configuró el rango de entrada de señal correspondiente a los modelos de acelerómetros utilizados de acuerdo con sus sensibilidades. La tasa de muestreo utilizada para medir la respuesta vibratoria del muro fue de 1652 datos por segundo, mientras que para procesar los datos una vez digitalizados con LabVIEW, se utilizó la aplicación ARTeMIS Modal Pro versión 6.0.2.0, con la que se pudieron obtener las diferentes frecuencias naturales, formas modales y amortiguamiento. Para mejorar los resultados, se realizó una decimación en el rango de frecuencias de los datos, reduciéndolo al orden de los 40 – 45 Hz, ya que valores por encima de estas frecuencias no representan las formas modales fundamentales de la estructura, lo que dificulta la interpretación de la forma modal asociada a una frecuencia de interés. Posteriormente, se utilizaron dos técnicas para realizar el análisis modal del sistema: FDD en el dominio de la frecuencia y SSI-UPC en el dominio del tiempo.

2.4. Frecuencia de ensayos

Los ensayos se llevaron a cabo de manera periódica, teniendo una distribución de 3 días a la semana (lunes, miércoles y viernes), con un mínimo de 4 ensayos por día. El periodo de ensayo fue desde fines de agosto hasta fines de noviembre, teniendo un total de 27 días (Tabla 1 y Figura 5).

Tabla 1: Fechas y cantidad de ensayos.
(Fuente: Elaboración propia)

2022

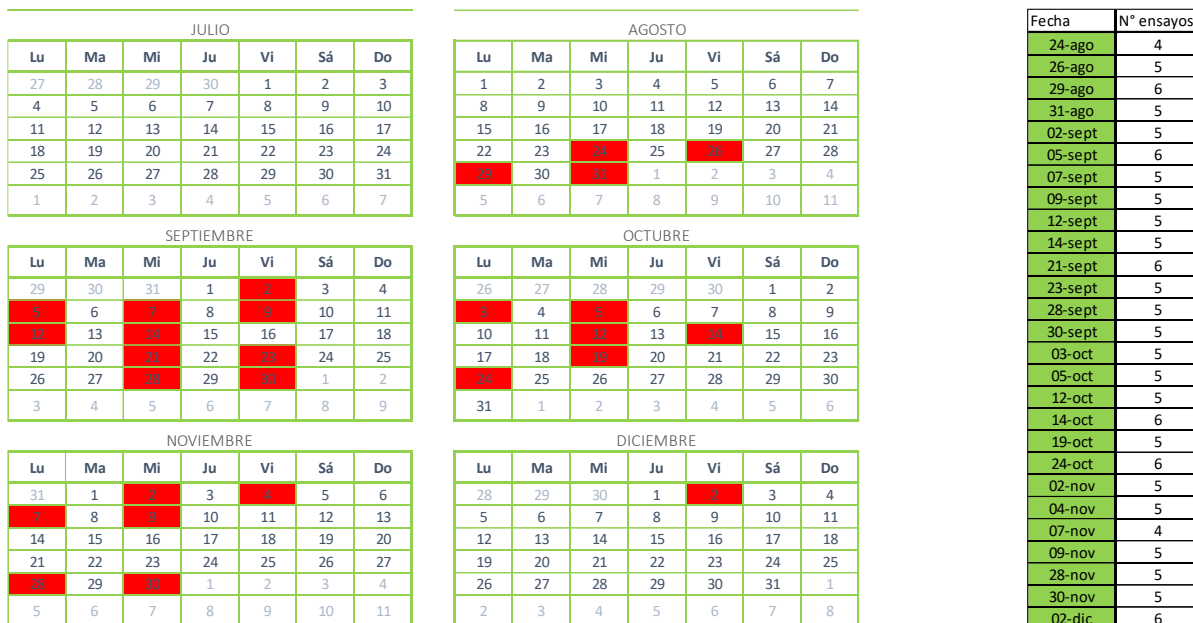


Figura 5: Fechas de días ensayados. (Fuente: Elaboración propia)

3. DATOS CLIMÁTICOS

Los datos sobre el clima fueron recopilados por la estación meteorológica de la Universidad Católica de la Santísima Concepción, situada en el Campus San Andrés, a una distancia de 150 [m] del muro ensayado. Esta estación registra información sobre la temperatura, humedad ambiental, precipitación, velocidad del viento y otras variables meteorológicas. Para efectos del presente estudio solo serán necesarias las variables de temperatura y precipitaciones registrados durante el periodo establecido.

3.1. Temperatura

La estación meteorológica está programada para recoger datos de temperatura cada 5 minutos, haciendo un total de 288 datos en 24 horas de monitoreo. Para el análisis se tomaron en consideración tanto las temperaturas máximas como las mínimas de manera que logren apreciarse las incidencias de temperaturas extremas, además de calcular la media aritmética de los valores, a fin de poder expresar la variación con valores representativos (Figura 6).

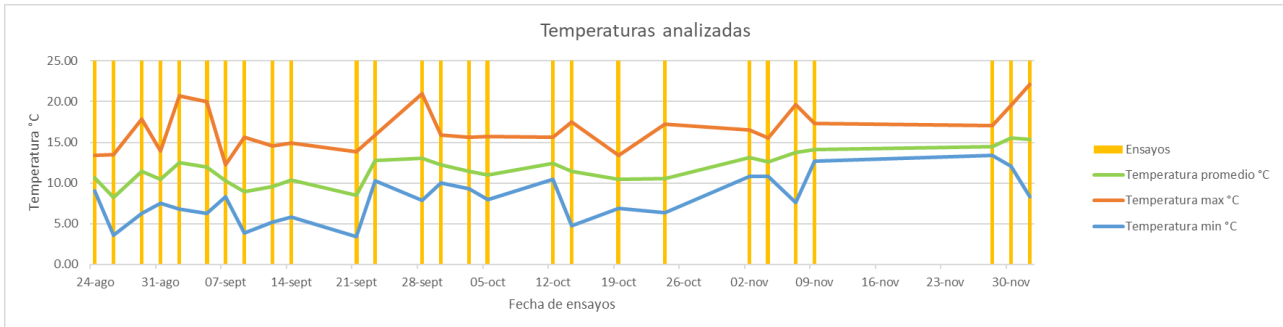


Figura 6: Temperatura en °C a lo largo del periodo de ensayo. (Fuente: Elaboración propia)

3.2. Precipitación

Igual que para las temperaturas, los registros se tomaron cada 5 minutos, sin embargo, la cantidad de datos efectivamente medidos (distinto de 0) es mucho menor que el de las temperaturas. Se estableció la suma total de precipitaciones por cada día, para luego poder observar como las precipitaciones acumuladas (5 días) afecta al muro de albañilería (Figura 7).

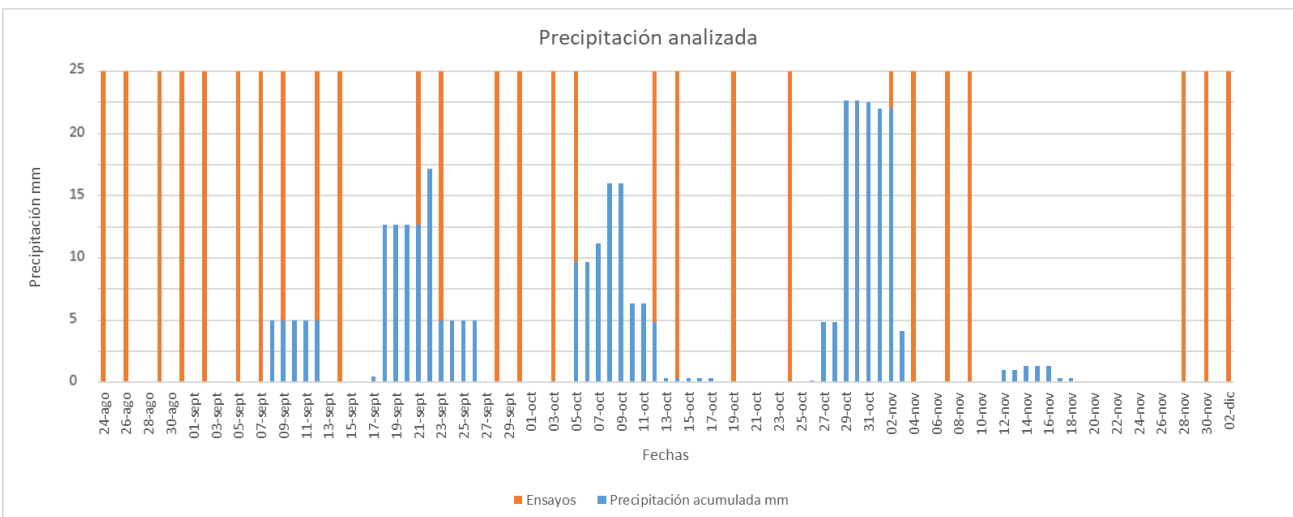


Figura 7: Precipitación registrada en mm a lo largo del periodo de ensayo. (Fuente: Elaboración propia)

3.3. Humedad

A falta de sensores especializados para medir la humedad de los ladrillos de forma directa, se tomó la decisión de monitorear 3 probetas expuestas al ambiente (Figura 8), ubicadas en la misma locación que el muro ensayado, de manera que pudiesen mantenerse las mismas condiciones en ambos equipos de control. El agua retenida en el muro y las probetas se refleja como un aumento en sus masas por lo que, conociendo la masa inicial seca de las probetas, se logra obtener la variación de la humedad del ambiente y que es efectivamente absorbida por la albañilería. Para establecer este cambio de forma numérica se emplea la expresión:

$$\text{Humedad en base húmeda} = \frac{m_{\text{agua}}}{m_{\text{total}}} \cdot 100 \quad (1)$$

Donde:

m_{agua} : Corresponde a la masa del agua contenida por la muestra

m_{total} : Corresponde a la masa total de la muestra húmeda

Cabe mencionar que para poder aplicar correctamente la ecuación (1) se deben conocer con exactitud todos los escenarios de las probetas, por lo cual, para asegurarse de obtener la masa de los ladrillos, además de mantener un seguimiento continuo concordante con las fechas de ensayo. Para poder asegurarse de que las probetas están secas, se tomó como su masa seca aquella menor masa registrada en los días de ensayo. Los resultados de dichas mediciones se presentan en la Tabla 2 y 3, además de la Figura 9.

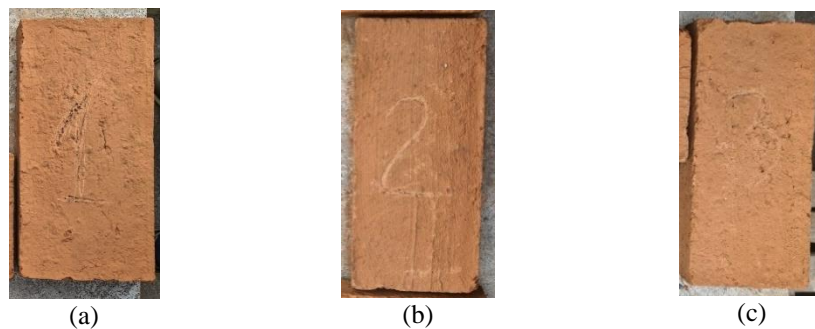


Figura 8: Probetas expuestas al ambiente, (a) Probeta 1, (b) Probeta 2, (c) Probeta 3.
(Fuente: Elaboración propia)

Tabla 2: Masas de probetas a lo largo del tiempo y masa seca destacada. (Fuente: Elaboración propia)

	Peso (kg)		
	Ladrillo 1	Ladrillo 2	Ladrillo 3
14-09-2022	3.766	3.697	3.656
21-09-2022	3.855	3.95	3.891
23-09-2022	3.658	3.688	3.632
28-09-2022	3.53	3.511	3.461
30-09-2022	3.522	3.502	3.458
03-10-2022	3.506	3.479	3.436
05-10-2022	3.981	3.982	3.932
12-10-2022	3.554	3.532	3.492
14-10-2022	3.522	3.498	3.457
19-10-2022	3.504	3.474	3.429
24-10-2022	3.475	3.444	3.398
02-11-2022	3.537	3.499	3.473
04-11-2022	3.514	3.475	3.446
09-11-2022	3.498	3.434	3.427
28-11-2022	3.48	3.447	3.411
30-11-2022	3.47	3.435	3.398
02-12-2022	3.463	3.433	3.394

Tabla 3: Humedades extraídas de las probetas. (Fuente: Elaboración propia)

	Humedad %
14-sept	7.45
21-sept	12.01
23-sept	6.27
28-sept	2.02
30-sept	1.83
03-oct	1.26
05-oct	13.49
12-oct	2.72
14-oct	1.79
19-oct	1.12
24-oct	0.26
02-nov	2.08
04-nov	1.39
07-nov	1.03
09-nov	0.66
28-nov	0.46
30-nov	0.13
02-dic	0.00

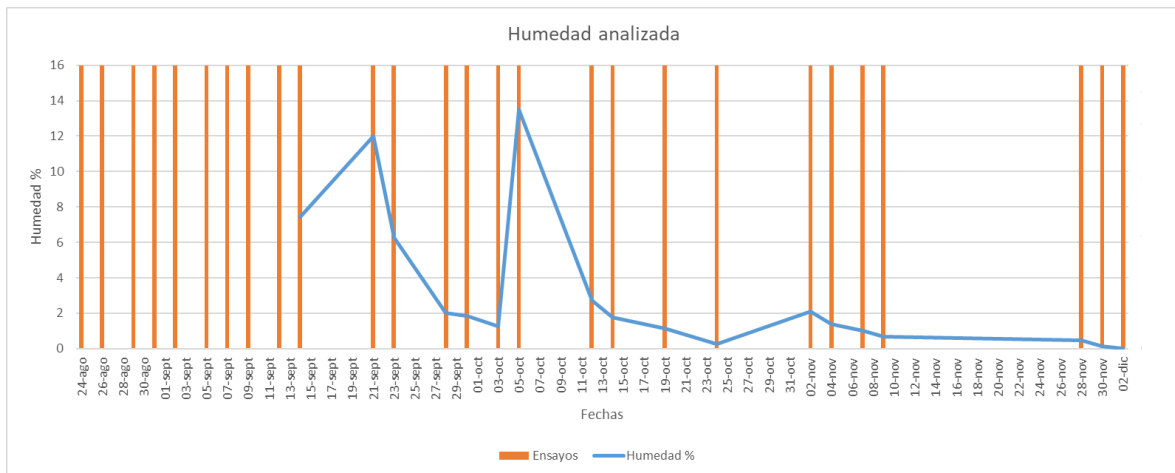


Figura 9: Porcentaje de humedad extraída de las probetas a lo largo del periodo de ensayo. (Fuente: Elaboración propia)

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados por métodos FDD y SSI

Una vez procesados los datos mediante el uso del software, se tabularon los resultados de ambos métodos para luego ser promediados y establecer una muestra menor pero que mantuviese una representatividad fiable de los datos originales. Los resultados de ambos métodos se presentan en las Tablas 4 y 5, agrupando datos de un total de 27 días de ensayo. Cabe mencionar que los promedios generales de cada método son: 1.425 Hz, 6.134 Hz, 10.946 Hz, 23.511 Hz y 27.573 Hz para el método FDD; y, 5.716 Hz, 10.62 Hz, 23.044 Hz y 27.266 Hz para el método SSI. Como es posible apreciar, el método SSI reconoce únicamente 4 frecuencias naturales, mientras que el FDD reconoce 5, esto se da debido a que, el proceso de identificación de frecuencias de este último método se hace de manera manual, mientras que el SSI es automático. Es relevante comentar que el método FDD tiende a entregar frecuencias de una mayor magnitud que las del SSI.

En la Figura 10 se puede observar la variación de estas mediciones de frecuencia a lo largo del experimento.

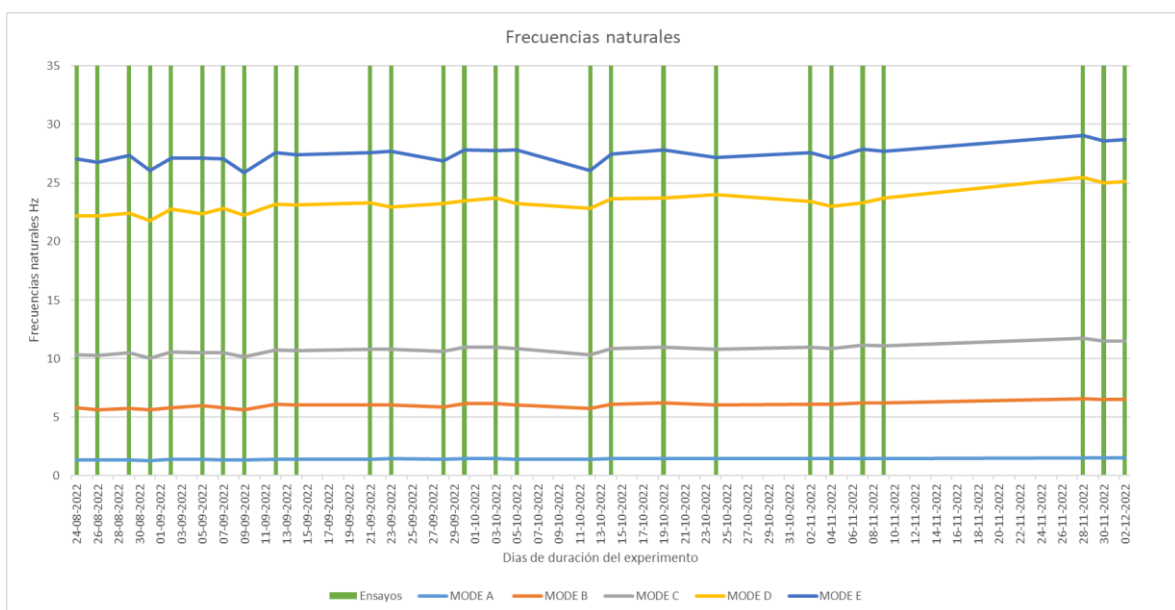


Figura 10: Promedio de frecuencias naturales de ambos métodos y su evolución en el periodo de ensayo. (Fuente: Elaboración propia)

Tabla 4: Promedios de frecuencias en Hz de todos los ensayos hechos por día mediante método FDD.
(Fuente: Elaboración propia)

	MODE 1 FDD	MODE 2 FDD	MODE 3 FDD	MODE 4 FDD	MODE 5 FDD
24-ago	1.341	5.788	10.507	22.394	27.184
26-ago	1.331	5.759	10.398	22.392	26.885
29-ago	1.351	5.882	10.702	22.707	27.473
31-ago	1.315	5.687	10.204	22.070	26.183
02-sept	1.379	5.929	10.712	22.981	27.289
05-sept	1.392	6.023	10.681	22.653	27.292
07-sept	1.371	5.961	10.680	23.054	27.192
09-sept	1.331	5.791	10.285	22.433	26.038
12-sept	1.420	6.154	10.898	23.385	27.781
14-sept	1.412	6.138	10.833	23.352	27.603
21-sept	1.432	6.137	10.970	23.494	27.762
23-sept	1.436	6.146	10.970	23.175	27.869
28-sept	1.428	6.090	10.793	23.433	27.022
30-sept	1.460	6.267	11.115	23.683	28.031
03-oct	1.468	6.259	11.108	23.949	27.926
05-oct	1.420	6.171	11.019	23.473	28.014
12-oct	1.379	6.001	10.494	23.070	26.240
14-oct	1.445	6.231	11.038	23.883	27.634
19-oct	1.460	6.284	11.132	23.965	28.014
24-oct	1.439	6.251	11.004	24.240	27.332
02-nov	1.468	6.219	11.180	23.643	27.740
04-nov	1.452	6.155	11.003	23.223	27.280
07-nov	1.482	6.282	11.303	23.534	28.061
09-nov	1.476	6.267	11.245	24.243	27.861
28-nov	1.549	6.622	11.914	25.692	29.168
30-nov	1.513	6.550	11.672	25.280	28.757
02-dic	1.519	6.581	11.690	25.389	28.838

Tabla 5: Promedios de frecuencias en Hz de todos los ensayos hechos por día mediante método SSI.
(Fuente: Elaboración propia)

	MODE 1 SSI	MODE 2 SSI	MODE 3 SSI	MODE 4 SSI	MODE 5 SSI
24-ago			10.203	21.936	26.943
26-ago		5.468	10.092	21.934	26.676
29-ago		5.624	10.369	22.180	27.190
31-ago		5.537	9.898	21.524	25.943
02-sept		5.679	10.363	22.574	26.990
05-sept		5.893	10.369	22.094	26.961
07-sept		5.696	10.327	22.658	26.896
09-sept		5.483	9.970	22.112	25.797
12-sept		5.993	10.572	22.940	27.407
14-sept		5.976	10.526	22.885	27.254
21-sept		5.969	10.648	23.085	27.418
23-sept		5.995	10.669	22.745	27.548
28-sept		5.621	10.484	23.041	26.720
30-sept		6.080	10.797	23.242	27.679
03-oct		6.093	10.793	23.445	27.570
05-oct		5.967	10.695	23.067	27.670
12-oct		5.502	10.131	22.649	25.903
14-oct		6.000	10.674	23.479	27.313
19-oct		6.143	10.801	23.475	27.636
24-oct		5.873	10.627	23.814	27.068
02-nov		5.995	10.822	23.228	27.468
04-nov		6.033	10.717	22.828	27.008
07-nov		6.155	10.999	23.120	27.705
09-nov		6.119	10.966	23.220	27.518
28-nov		6.517	11.572	25.229	28.924
30-nov		6.468	11.320	24.780	28.446
02-dic		6.466	11.334	24.898	28.533

4.2. Formas modales

Analizadas ya las frecuencias, se utilizó el mismo software para conocer las formas modales correspondientes al muro de albañilería e, igual que para el caso de las frecuencias, el método SSI omite la primera forma modal que sí es considerada por el método FDD. De las 5 formas encontradas (A, B, C, D y E), 3 de estas (A, C y E) deforman el muro al flectarlo, mientras que los otros 2 (B y D) lo deforman al torsionarlo (Figura 11). Aunque parecidas en el efecto deformante, queda claro que las formas no son las mismas y que, dentro del rango de frecuencias especificado en un inicio, solo pueden encontrarse las 5 formas definidas a continuación.

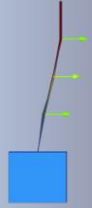
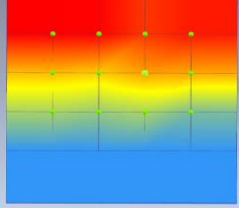
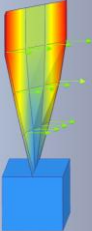
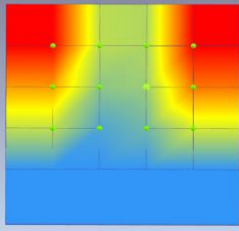
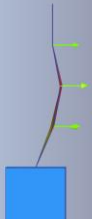
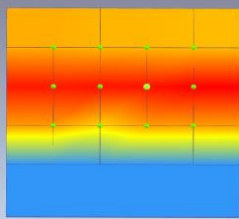
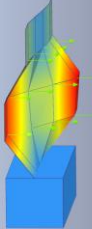
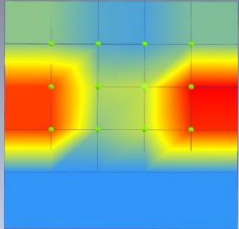
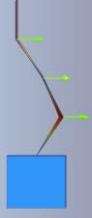
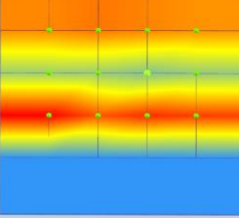
MODO	METODO Y FRECUENCIAS	FORMA MODAL (LATERAL)	FORMA MODAL (FRONTAL)
A	FDD 1.425		
B	FDD 6.134 SSI 5.716		
C	FDD 10.946 SSI 10.62		
D	FDD 23.511 SSI 23.044		
E	FDD 27.573 SSI 27.266		

Figura 11: Formas modales y sus frecuencias respectivas a cada método. (Fuente: Elaboración propia)

4.3. Criterio de aseguramiento modal (MAC)

Es importante tener en cuenta que el MAC o criterio de aseguramiento modal, es sólo una métrica de comparación, que cuantifica el grado de similitud entre vectores de distintas o la misma forma modal. Sin embargo, se debe ser consciente de que no proporciona información sobre el comportamiento dinámico de un sistema en sí. No obstante, no carece de importancia, ya que permite visualizar una correspondencia matemática que puede llegar a revelar incongruencias en el análisis o certificar un correcto procedimiento de este. Para obtener una comprensión más completa del comportamiento dinámico de cualquier sistema, siempre será necesario realizar un análisis modal completo y considerando otros factores, como la estabilidad y la amortiguación.

Para poder establecer un correcto análisis y evitar posibles errores en la deducción de información, se opta por analizar el MAC de un día representativo de cada semana de ensayo, separando el criterio para ambos métodos de análisis. Los resultados de esos análisis se presentan en la Tabla 6 y 7.

Tabla 6: Valores MAC de cada día representativo, analizado mediante el método FDD.
(Fuente: Elaboración propia)

FDD 31-AGO	1.331	5.808	10.325	22.142	26.78
1.331	1	0.05000	0.7463	0.0002753	0.009806
5.808	0.05000	1	0.0001969	0.5174	0.002789
10.325	0.7463	0.0001969	1	0.002222	0.05727
22.142	0.0002753	0.5174	0.002222	1	0.002134
26.78	0.009806	0.002789	0.05727	0.002134	1
FDD 07-SEPT	1.331	5.888	10.486	22.667	26.619
1.331	1	0.001611	0.7809	0.0008534	0.04259
5.888	0.001611	1	0.0004757	0.531	0.002997
10.486	0.7809	0.0004757	1	0.002154	0.06549
22.667	0.0008534	0.531	0.002154	1	0.003262
26.619	0.04259	0.002997	0.06549	0.003262	1
FDD 14-SEPT	1.412	6.13	10.769	23.272	27.466
1.412	1	0.0005486	0.7808	0.0003064	0.03924
6.13	0.0005486	1	0.0008553	0.5024	0.0007807
10.769	0.7808	0.0008553	1	0.001068	0.06473
23.272	0.0003064	0.5024	0.001068	1	0.0006629
27.466	0.03924	0.0007807	0.06473	0.0006629	1
FDD 21-SEPT	1.412	6.09	10.809	23.151	27.506
1.412	1	0.004202	0.8171	0.001169	0.03175
6.09	0.004202	1	0.0008251	0.5203	0.003672
10.809	0.8171	0.0008251	1	0.001006	0.05277
23.151	0.001169	0.5203	0.001006	1	0.0001624
27.506	0.03175	0.003672	0.05277	0.0001624	1
FDD 28-SEPT	1.412	6.009	10.567	23.191	26.458
1.412	1	0.0003967	0.7951	0.00008746	0.04061
6.009	0.0003967	1	0.0002329	0.5101	0.0009091
10.567	0.7951	0.0002329	1	0.001073	0.06174
23.191	0.00008746	0.5101	0.001073	1	0.0001534
26.458	0.04061	0.0009091	0.06174	0.0001534	1
FDD 05-OCT	1.412	6.13	10.93	23.312	27.708
1.412	1	0.0003488	0.8359	0.00000612	0.02173
6.13	0.0003488	1	0.001038	0.5336	0.001009
10.93	0.8359	0.001038	1	0.0005811	0.05915
23.312	0.00000612	0.5336	0.0005811	1	0.0001943
27.708	0.02173	0.001009	0.05915	0.0001943	1

Tabla 6: Valores MAC de cada día representativo, analizado mediante el método FDD. (Continuación)
(Fuente: Elaboración propia)

FDD 12-OCT	1.371	5.969	10.365	22.868	26.054
1.371	1	0.0003683	0.8233	0.00009685	0.02389
5.969	0.0003683	1	0.0006667	0.512	0.0006654
10.365	0.8233	0.0006667	1	0.001474	0.06229
22.868	0.00009685	0.512	0.001474	1	0.001987
26.054	0.02389	0.0006654	0.06229	0.001987	1
FDD 19-OCT	1.452	6.251	11.051	23.796	27.748
1.452	1	0.02211	0.8548	0.02758	0.006575
6.251	0.02211	1	0.02726	0.5485	0.004613
11.051	0.8548	0.02726	1	0.03498	0.08211
23.796	0.02758	0.5485	0.03498	1	0.004155
27.748	0.006575	0.004613	0.08211	0.004155	1
FDD 24-OCT	1.412	6.211	10.849	23.998	26.982
1.412	1	0.00005057	0.779	0.0006908	0.05104
6.211	0.00005057	1	0.0007763	0.4968	0.0005157
10.849	0.779	0.0007763	1	0.002007	0.05695
23.998	0.0006908	0.4968	0.002007	1	0.0009501
26.982	0.05104	0.0005157	0.05695	0.0009501	1
FDD 02-NOV	1.452	6.211	11.091	23.635	27.426
1.452	1	0.001035	0.8112	0.0003176	0.03688
6.211	0.001035	1	0.0005329	0.5602	0.00275
11.091	0.8112	0.0005329	1	0.001336	0.05452
23.635	0.0003176	0.5602	0.001336	1	0.001053
27.426	0.03688	0.00275	0.05452	0.001053	1
FDD 09-NOV	1.452	6.251	11.212	23.594	27.668
1.452	1	0.01439	0.7784	0.001649	0.03782
6.251	0.01439	1	0.0007355	0.5515	0.0009494
11.212	0.7784	0.0007355	1	0.0009737	0.0585
23.594	0.001649	0.5515	0.0009737	1	0.0005859
27.668	0.03782	0.0009494	0.0585	0.0005859	1
FDD 28-NOV	1.533	6.574	11.737	25.45	28.837
1.533	1	0.01071	0.7173	0.002298	0.05954
6.574	0.01071	1	0.000197	0.522	0.002406
11.737	0.7173	0.000197	1	0.002072	0.05742
25.45	0.002298	0.522	0.002072	1	0.001541
28.837	0.05954	0.002406	0.05742	0.001541	1



Tabla 7: Valores MAC de cada día representativo, analizado mediante el método SSI.
(Fuente: Elaboración propia)

SSI 31-AGO	5.7	10.119	21.534	26.468
5.7	1	0.00051	0.5096	0.002038
10.119	0.00051	1	0.0009459	0.04788
21.534	0.5096	0.0009459	1	0.0009296
26.468	0.002038	0.04788	0.0009296	1
SSI 07-SEPT	5.553	10.135	22.232	26.438
5.553	1	0.00023	0.5656	0.005412
10.135	0.00023	1	0.0008843	0.04963
22.232	0.5656	0.0008843	1	0.0007714
26.438	0.005412	0.04963	0.0007714	1
SSI 14-SEPT	5.957	10.469	22.798	27.12
5.957	1	0.00100	0.5498	0.002998
10.469	0.00100	1	0.0008744	0.04366
22.798	0.5498	0.0008744	1	0.000456
27.12	0.002998	0.04366	0.000456	1
SSI 21-SEPT	5.938	10.524	22.705	27.133
5.938	1	0.00104	0.5487	0.001298
10.524	0.00104	1	0.000697	0.04172
22.705	0.5487	0.000697	1	0.0001999
27.133	0.001298	0.04172	0.0001999	1
SSI 28-SEPT	5.408	10.279	22.838	26.157
5.408	1	0.00303	0.5658	0.004287
10.279	0.00303	1	0.0002379	0.04729
22.838	0.5658	0.0002379	1	0.00001874
26.157	0.004287	0.04729	0.00001874	1
SSI 05-OCT	5.878	10.56	22.902	27.442
5.878	1	0.00226	0.5656	0.003162
10.56	0.00226	1	0.0006765	0.0401
22.902	0.5656	0.0006765	1	0.001227
27.442	0.003162	0.0401	0.001227	1
SSI 12-OCT	5.473	10.05	22.459	25.722
5.473	1	0.00077	0.5676	0.0008973
10.05	0.00077	1	0.001121	0.04674
22.459	0.5676	0.001121	1	0.0007945
25.722	0.0008973	0.04674	0.0007945	1
SSI 19-OCT	6.084	10.701	23.285	27.382
6.084	1	0.02146	0.5839	0.006626
10.701	0.02146	1	0.03039	0.06363
23.285	0.5839	0.03039	1	0.00615
27.382	0.006626	0.06363	0.00615	1
SSI 24-OCT	5.804	10.49	23.57	26.711
5.804	1	0.00188	0.5574	0.0009329
10.49	0.00188	1	0.001569	0.04244
23.57	0.5574	0.001569	1	0.000489
26.711	0.0009329	0.04244	0.000489	1
SSI 02-NOV	5.906	10.726	23.213	27.18
5.906	1	0.00276	0.6071	0.003933
10.726	0.00276	1	0.0007051	0.04321
23.213	0.6071	0.0007051	1	0.0003219
27.18	0.003933	0.04321	0.0003219	1
SSI 09-NOV	6.099	10.902	23.141	27.35
6.099	1	0.00230	0.5804	0.001267
10.902	0.00230	1	0.0004411	0.0468
23.141	0.5804	0.0004411	1	0.0007875
27.35	0.001267	0.0468	0.0007875	1
SSI 28-NOV	6.452	11.412	24.96	28.549
6.452	1	0.00075	0.5477	0.003182
11.412	0.00075	1	0.001093	0.04574
24.96	0.5477	0.001093	1	0.001641
28.549	0.003182	0.04574	0.001641	1

4.4. Correlación entre frecuencias naturales y datos ambientales

A fin de constatar el comportamiento del muro a lo largo del periodo de evaluación se midieron las principales variables climatológicas que podían llegar a perturbar de manera significativa (que tenga potencialidad de dañar) a la estructura. Entre estas variables destacan; la temperatura, humedad y precipitación, cada una de las cuales fueron correlacionadas con las frecuencias naturales extraídas de los ensayos. Dicha correlación fue dimensionada a través de una herramienta estadística por la que se pudiese conocer la variación de la variable respuesta, para este fin se escogió el coeficiente de correlación múltiple R^2 . Cabe mencionar que para establecer las correlaciones se promediaron las frecuencias de ambos métodos y de todos los días de ensayo, a fin de quedar con una cantidad acotada y representativa de los resultados experimentales.

4.4.1. Correlación entre frecuencias naturales y temperaturas

Con el objetivo de tener un espectro amplio del comportamiento de la temperatura y el cómo esta afecta a las propiedades dinámicas del muro, se tomaron en consideración tanto las temperaturas extremas, como el promedio de estas por cada día de ensayo.

A vista de las correlaciones se aprecia una baja coherencia entre las variables que involucran a las temperaturas extremas, mientras que en las temperaturas promedio, aunque se observa una mejor relación relativa, siguen siendo bajas. Para cada caso de temperatura, dentro del periodo de muestreo y en los rangos registrados, no existe evidencia sólida de la variación de frecuencias naturales por efecto del clima. En el caso del análisis de las temperaturas máximas (Figura 12) el factor R^2 no alcanzó a superar el valor de 0.18 en ninguno de los modos considerados (modo C de 0.1757), y lo único que puede deducirse de los gráficos a continuación es que todos los modos demuestran una tendencia directamente proporcional. De manera parecida, es imposible establecer una relación definitiva entre las temperaturas mínimas (Figura 13) y las frecuencias, no pudiendo superar un R^2 de 0.31 (modo A de 0.3014). A su vez, las temperaturas promedio (Figura 14) fueron las que mostraron más correlación general entre las variables, llegando hasta un R^2 de 0.5035 en el caso del modo C, sin embargo, esta medida sigue sin ser suficiente para atribuirla lógicamente como una consecuencia de la variación de la temperatura.

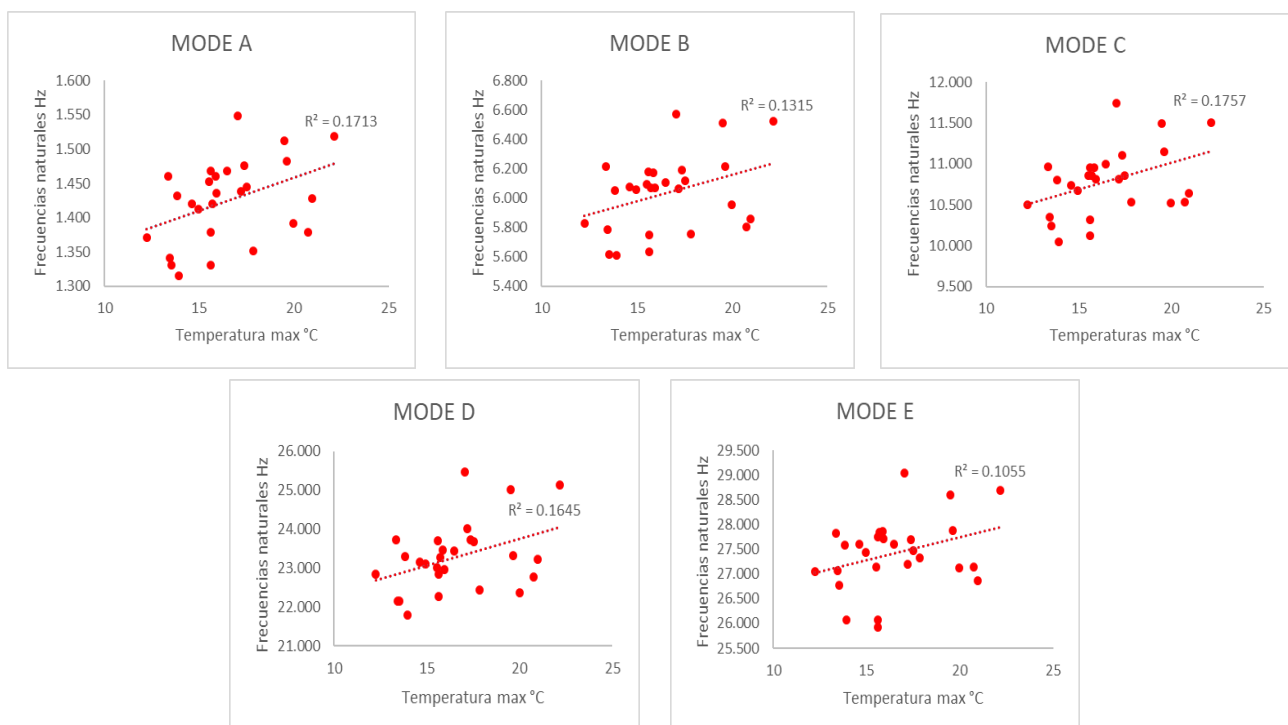


Figura 12: Correlación entre temperaturas máximas y frecuencias naturales para los 5 modos encontrados. (Fuente: Elaboración propia)

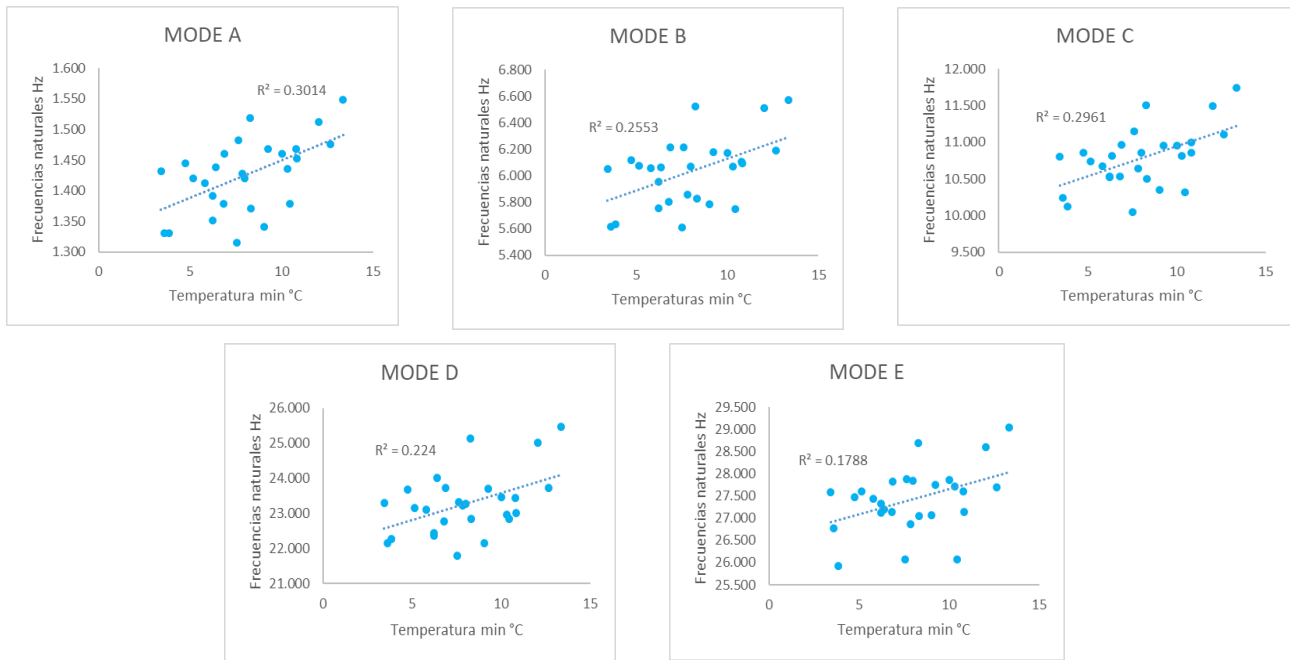


Figura 13: Correlación entre temperaturas mínimas y frecuencias naturales para los 5 modos encontrados. (Fuente: Elaboración propia)

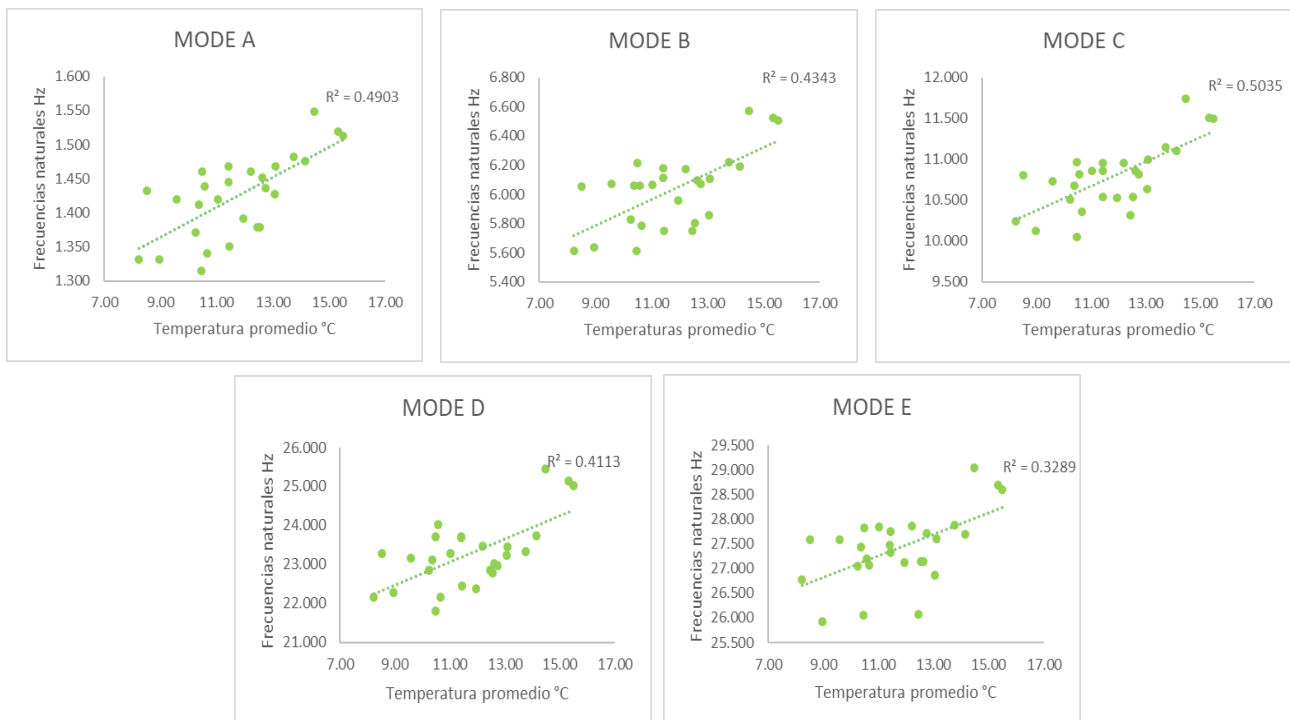


Figura 14: Correlación entre temperaturas promedio y frecuencias naturales para los 5 modos encontrados. (Fuente: Elaboración propia)

4.4.2. Correlación entre frecuencias naturales y humedad

Dada la exposición tan directa de la albañilería en el muro ensayado, tanto las precipitaciones como la humedad general del ambiente fueron siempre una constante a tomar en consideración, debido a la facilidad de los ladrillos de absorber y retener agua en su interior. Es por esta misma razón que se decidió que las probetas fuesen ladrillos individuales, de esa manera, se tendrían 3 elementos de control que podrían promediarse para obtener un solo valor representativo por cada día de ensayo.

A diferencia del caso que se presenta en las temperaturas, la tendencia de la relación entre la humedad y las frecuencias registradas es inversamente proporcional, lo que supone una disminución en la intensidad de las frecuencias de cada modo a medida que la humedad aumenta. No obstante, la coherencia entre variables sigue con una correlación muy baja, alcanzando un máximo en el modo A con un R^2 igual a 0.2757, un valor que deja en evidencia, nuevamente, una incapacidad de asegurar una dependencia entre ambas variables (Figura 15).

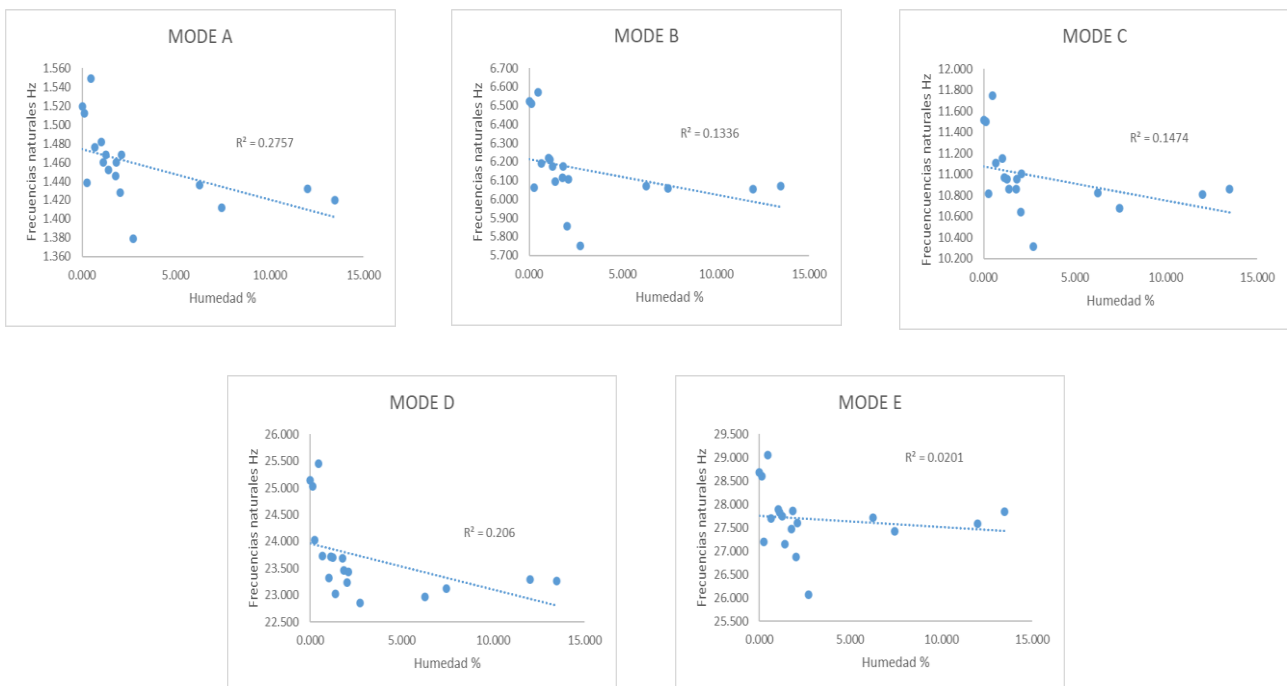


Figura 15: Correlación entre humedad y frecuencias naturales para los 5 modos encontrados.
(Fuente: Elaboración propia)

4.4.3. Correlación entre frecuencias naturales y precipitación

En un principio se analizarían las diferentes correlaciones que tendría la precipitación para varios días de acumulación, sin embargo, dado que durante el periodo de ensayo las precipitaciones fueron muy escasas, la cantidad inusitada de valores 0 registrados, terminaban alterando el análisis a la hora de establecer una correlación entre las variables, por ello se decidió eliminar los valores que no registrasen precipitaciones importantes y trabajar con los datos restantes (Figura 16).

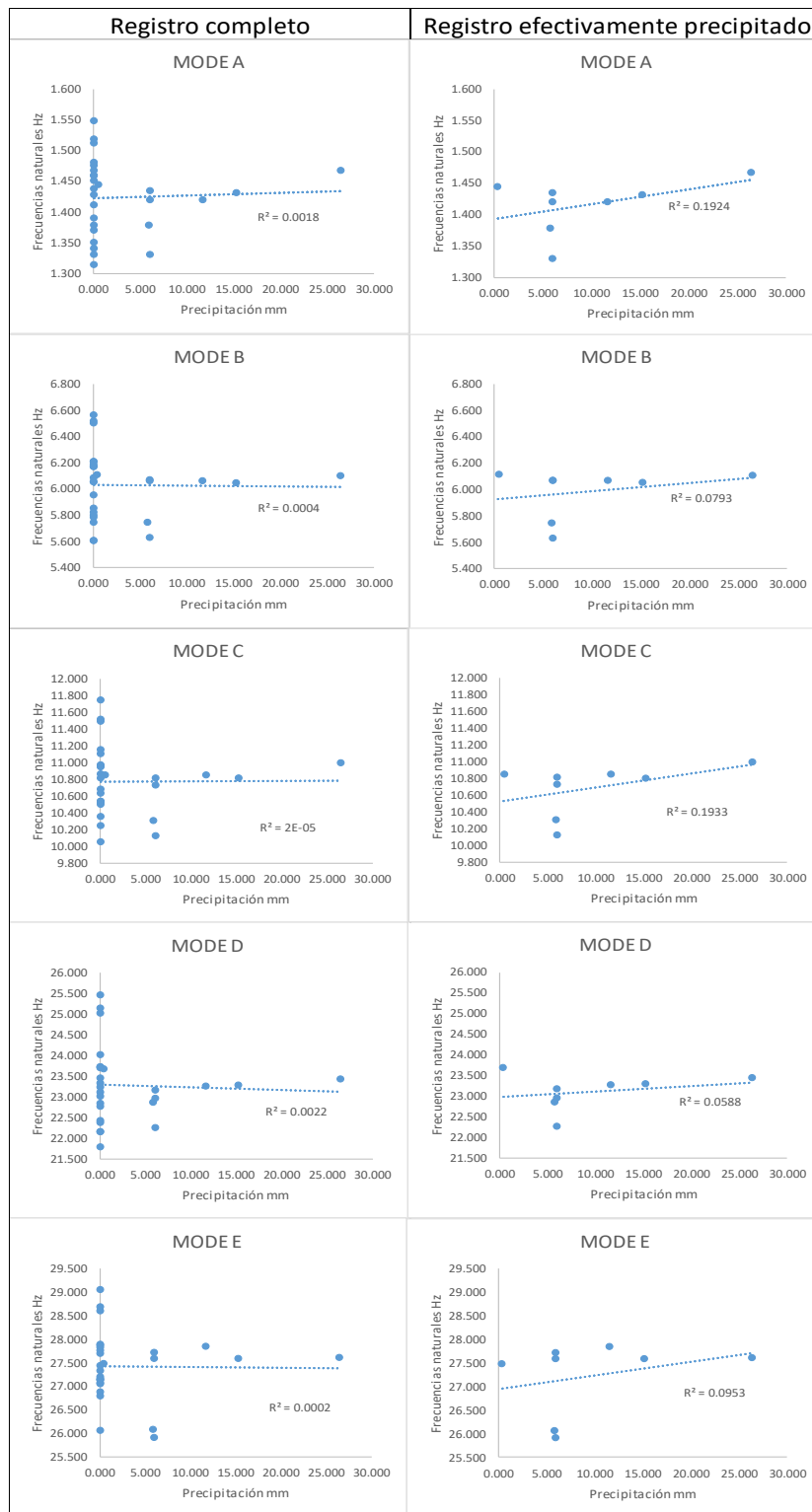


Figura 16: Correlación entre precipitación y frecuencias naturales con registro completo y parcial para los 5 modos encontrados. (Fuente: Elaboración propia)

Como se había comentado, los resultados del registro completo carecen de una interrelación que sea mínimamente viable para asegurar una dependencia entre ambas variables, sin embargo, una vez se limpia el registro de todas las mediciones que no contengan precipitaciones importantes surge una relación mínima, no del todo concluyente, entre las precipitaciones y las frecuencias naturales del muro, siendo el modo C el que

presenta un mayor valor de R^2 igual a 0.1933. Cabe mencionar que la tendencia de todos los modos es directamente proporcional entre frecuencias y precipitación, esto debido a la variación de masa en el muro.

4.5. Correlación entre frecuencias naturales y datos ambientales (datos complementados)

Dada la imposibilidad de obtener conclusiones correctamente fundadas del procedimiento anterior es que se decidió complementar los datos con aquellos obtenidos por un estudio previo [12]. Los ensayos previamente presentados en este documento corresponden a la época de temperaturas elevadas, mientras que un estudio previo, desarrollado bajo la misma configuración y en la misma estructura, se concentró en la época de menores temperaturas (junio – julio), por lo que, a fin de expandir la base de muestreo, se unieron los datos obtenidos de ambas experimentaciones. En la Tabla 8 se presentan los resultados de las frecuencias obtenidas en los ensayos previos, mientras que en la Figura 17 se presenta la evolución completa de las frecuencias en el tiempo considerando ambos estudios.

Tabla 8: Promedios de frecuencias de ambos métodos por cada día de ensayo.
(Fuente: Novoa et al [p. 9])

	MODE 1	MODE 2	MODE 3	MODE 4	MODE 5
10-06-2022	1.553	6.014	11.730	23.882	30.163
13-06-2022	1.505	6.026	11.375	22.873	29.854
15-06-2022	1.495	5.954	11.358	23.186	29.392
17-06-2022	1.482	5.983	11.235	22.684	29.311
24-06-2022	1.474	5.940	11.196	22.970	29.198
30-06-2022	1.482	5.994	11.366	22.982	29.650
04-07-2022	1.487	5.829	11.269	23.289	29.482
07-07-2022	1.467	5.891	11.251	22.787	29.297
11-07-2022	1.446	5.738	11.162	22.823	29.291
15-07-2022	1.438	5.822	10.893	22.270	28.401

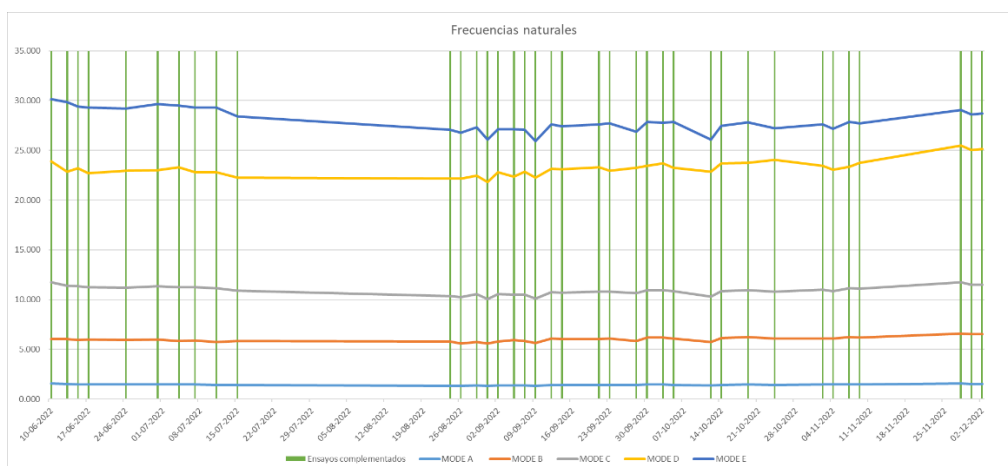


Figura 17: Días ensayados durante ambos periodos de ensayo (datos complementados). (Fuente: Elaboración propia)

Una vez unidos ambos datos modales, también se unieron las variables correspondientes a los factores climáticos registrados durante el día de ensayo respectivo. Es así como se logró hacer una nueva correlación entre las frecuencias naturales y cada una de las variables ambientales relevantes, pero esta vez teniendo los datos adicionales en consideración. Cabe mencionar que, para evitar cualquier anomalía estadística a la hora de comparar los datos, se decide omitir los valores que fuesen nulos (iguales a 0) en las variables de precipitación y humedad.

4.5.1. Correlación entre frecuencias naturales y temperaturas (datos complementados)

Una vez añadidos los datos adicionales, se logran establecer las correlaciones de interés. En el caso de las temperaturas máximas (Figura 18), las tendencias sufren un cambio importante, dejando de coincidir todas como directamente proporcionales, y pasando a comportarse de manera heterogénea. Así; los modos A, B y D, mantienen una relación directamente proporcional entre las variables, mientras que en el modo E pasa a ser indirectamente proporcional, siendo el caso del modo C uno independiente, ya que el mismo no muestra una tendencia predominante, ya sea directa o indirecta. En cuanto al factor R^2 , el mismo presentó un mayor valor en el modo D, siendo igual a 0.2129, lo cual, aunque supera al resultado obtenido con los datos no complementados, sigue sin ser suficiente para asegurar la existencia de una relación entre las variables. De forma parecida, en las temperaturas mínimas (Figura 19) se aprecia una disparidad entre las tendencias de cada modo, siendo en los modos A, C y E de carácter indirectamente proporcional, pero directamente proporcional en los modos B y D. En lo correspondiente a la relación entre las variables, el modo E es el que se registró con un mayor R^2 , siendo igual a 0.4841. Por último, las temperaturas promedio (Figura 20) fueron las más perjudicadas en términos de interrelación, ya que el factor R^2 , de todos los modos, disminuyó mucho a comparación de los valores rescatados del análisis con datos no complementados, siendo el mayor R^2 para este caso igual a 0.1297, correspondiente al modo E. Se rescata, además, que las tendencias también cambiaron, resultando igual que en el caso de las temperaturas mínimas; los modos A, C y E indirectamente proporcionales, mientras el B y D directamente proporcionales.

Para el caso de temperaturas, en general, no se presenta ninguna mejoría en los resultados que favorezca a la determinación viable de una correlación existente entre las variables.

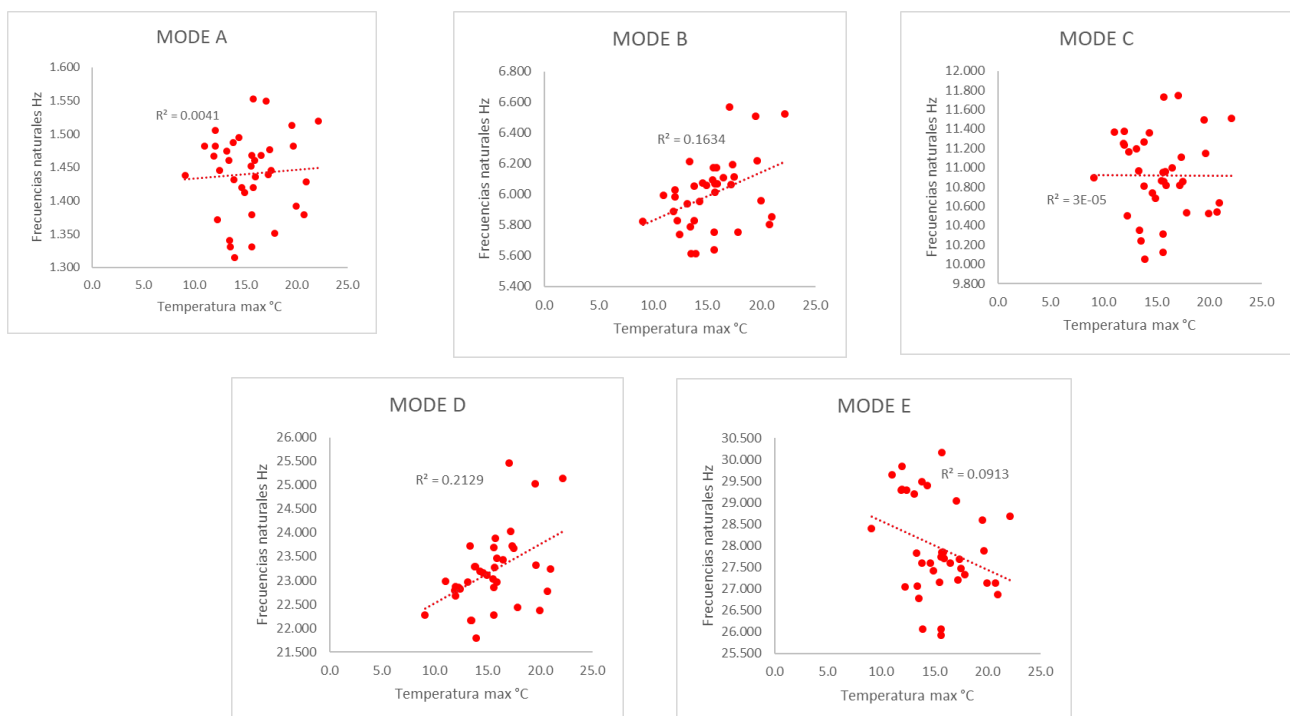


Figura 18: Correlación entre temperaturas máximas y frecuencias naturales para los 5 modos encontrados (datos complementados). (Fuente: Elaboración propia)

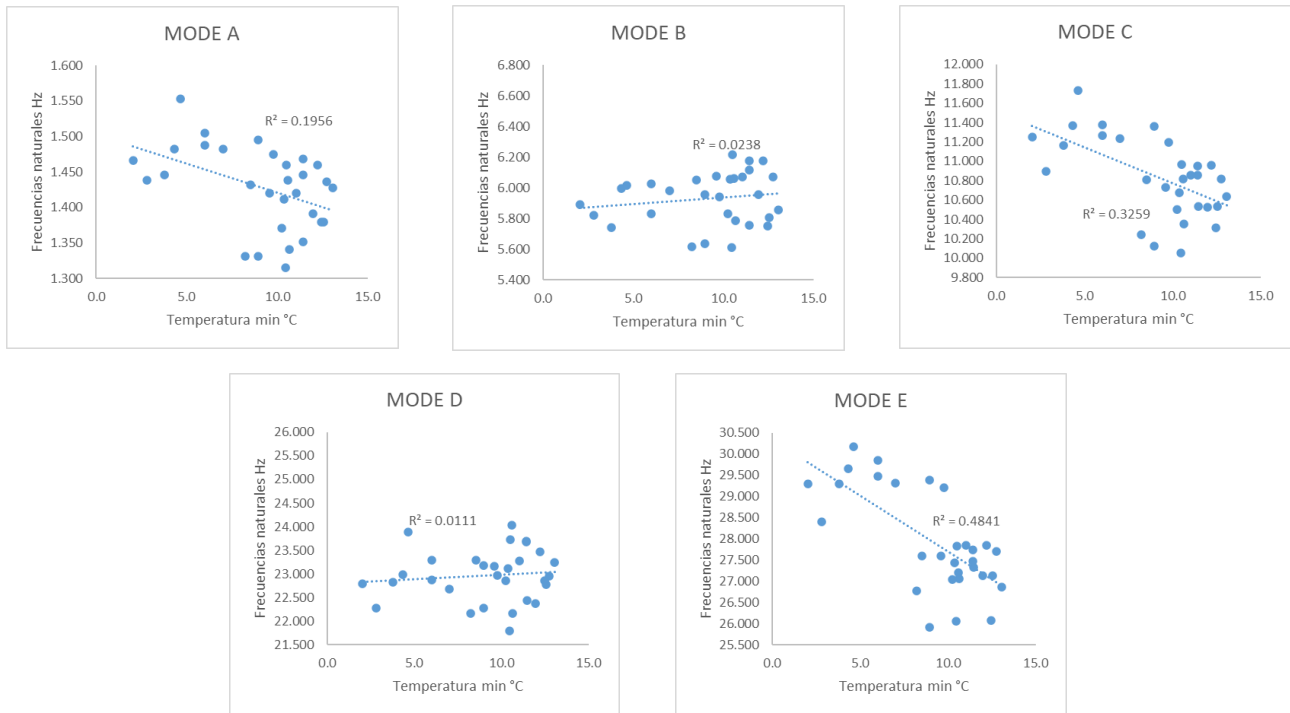


Figura 19: Correlación entre temperaturas mínimas y frecuencias naturales para los 5 modos encontrados (datos complementados). (Fuente: Elaboración propia)

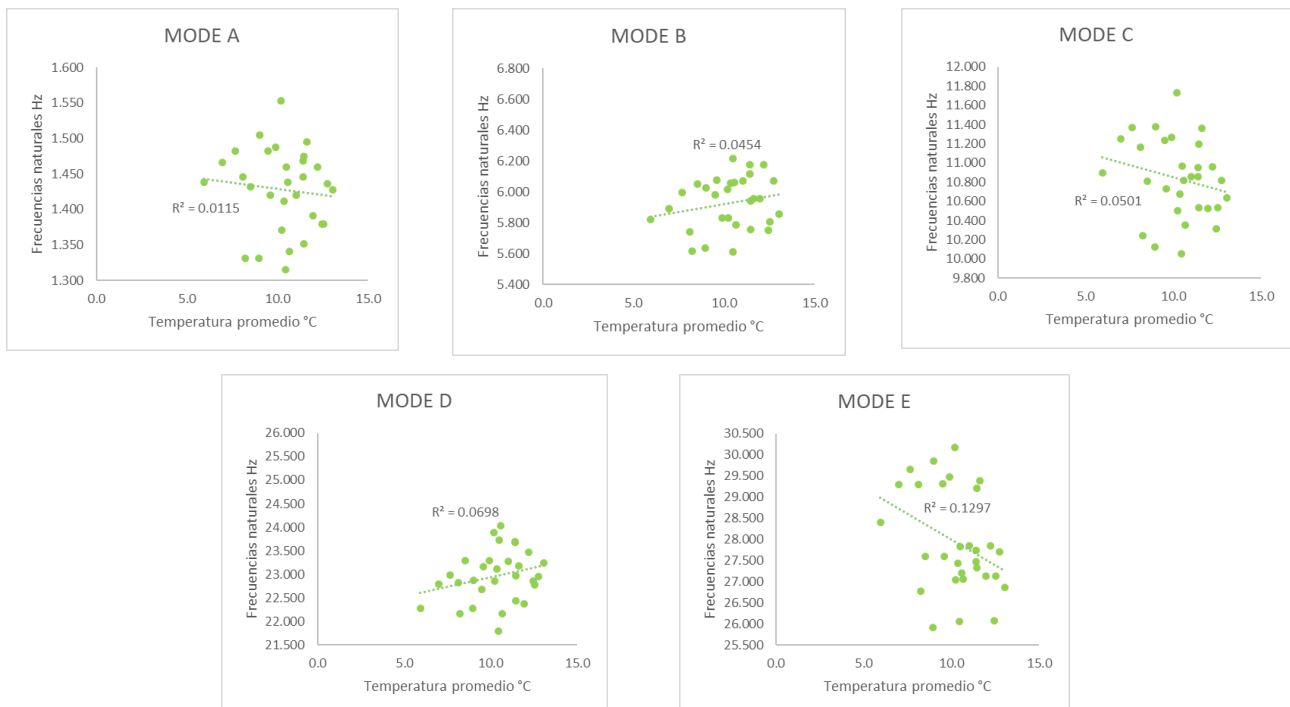


Figura 20: Correlación entre temperaturas promedio y frecuencias naturales para los 5 modos encontrados (datos complementados). (Fuente: Elaboración propia)

4.5.2. Correlación entre frecuencias naturales y humedad (datos complementados)

La complementación de datos de humedad fue posible gracias a que el método ocupado para calcularla fue el mismo en ambos estudios, el cual consistía en la medición periódica de la masa de distintas probetas expuestas a la intemperie.

Nuevamente, los modos A, C y E cambiaron su tendencia a indirectamente proporcional, dejando el resto en el caso contrario. Por otro lado, la coherencia entre variables sigue con una correlación baja, alcanzando un máximo en el modo E con un R^2 igual a 0.4707, un valor que deja en evidencia, nuevamente, una incapacidad de asegurar una dependencia entre ambas variables (Figura 21).

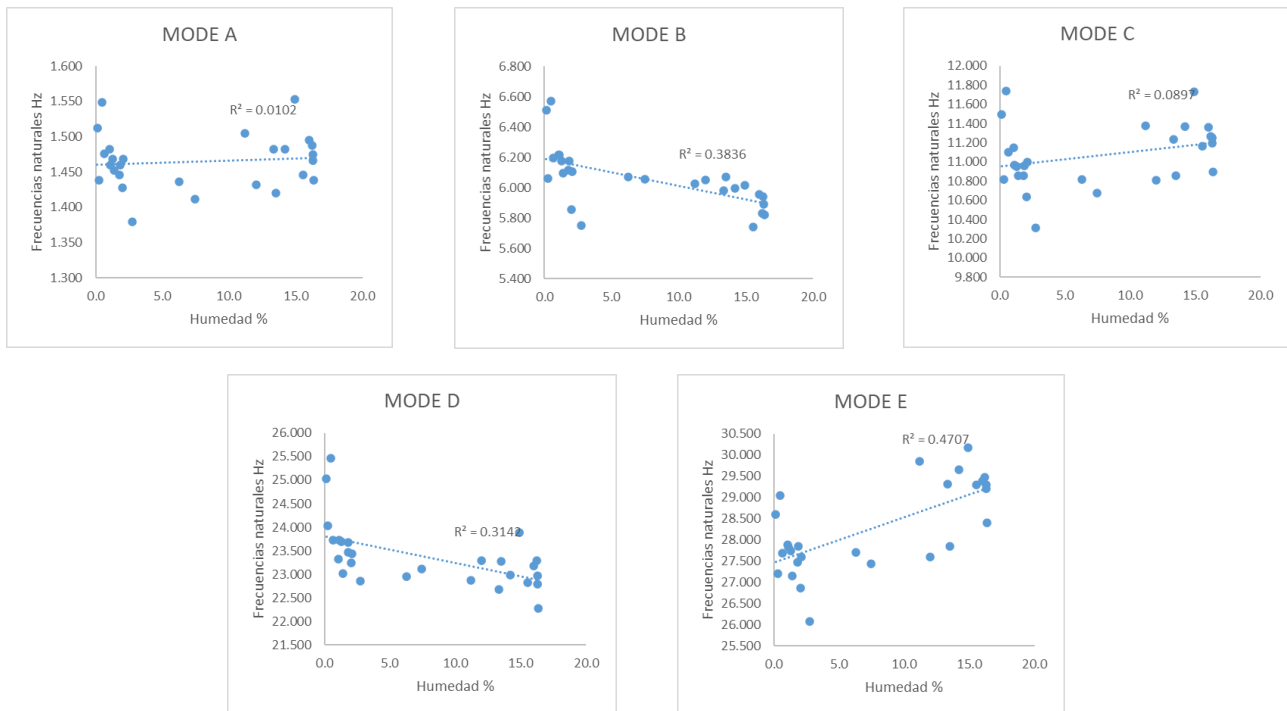


Figura 21: Correlación entre humedad y frecuencias naturales para los 5 modos encontrados (datos complementados). (Fuente: Elaboración propia)

4.5.3. Correlación entre frecuencias naturales y precipitación (datos complementados)

Una vez más queda expuesta la incapacidad matemática de las relaciones presentadas para poder afirmar una dependencia entre las propiedades dinámicas y los factores climáticos. Evidencia de ello son los bajos valores de R^2 obtenidos en todos los modos, los mismo que, en términos generales, son menores a los obtenidos a través del análisis hecho con los datos no complementados. Para este caso el modo D resultó ser el que tuvo mejor resultado, con un R^2 de 0.1208, el cual, como ya se mencionó, no supera a los resultados del análisis original. A su vez, las tendencias de los modos A, C y E volvieron a cambiar, tomando la tendencia opuesta a la que tenían en los primeros análisis, siendo este caso directamente proporcional, mientras que los modos B y D se mantuvieron indirectamente proporcional (Figura 22).

Con todo lo anterior se puede observar que, a pesar de haber aumentado la cantidad de datos, las correlaciones no lograron alcanzar los valores buscados en ninguna de las variables climáticas, por lo cual es posible que sea necesario contar con series de tiempo más largas que permitan implementar análisis de datos estacionales.

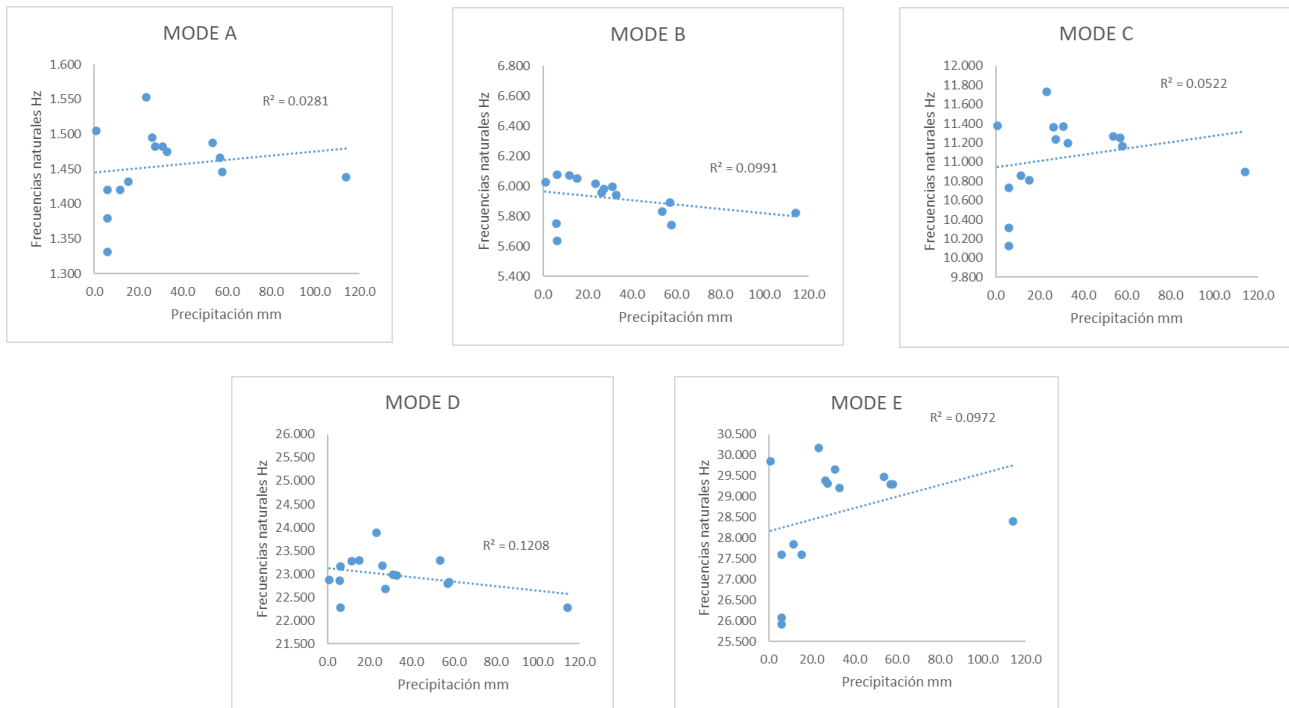


Figura 22: Correlación entre precipitación y frecuencias naturales con registro completo y parcial para los 5 modos encontrados (datos complementados). (Fuente: Elaboración propia)

5. CONCLUSIONES

Como fue mencionado al inicio de este estudio, cualquier estructura, expuesta el suficiente tiempo a la intemperie y puede desarrollar cambios en sus propiedades intrínsecas, lo que por extensión implica un cambio en la composición misma de la estructura. Es así como luego de un análisis de 6 meses se logra asegurar que dicha variación no solo existe, sino que es posible atribuirla a los factores medioambientales, los cuales fueron las únicas constantes de esfuerzo aplicadas al muro de albañilería ensayado.

A partir de las técnicas FDD y SSI se lograron encontrar 5 modos de vibrar para cada método, los cuales, al ser promediados, se registraron valores de 1.425 Hz, 5.925 Hz, 10.783 Hz, 23.278 Hz y 27.42 Hz; que serían el modo A, B, C, D y E, respectivamente. Por su parte, el MAC analizó los resultados obtenidos de un mismo día, comparando los datos consigo mismos, con el fin de encontrar irregularidades o discrepancias entre los modos. Los resultados exhibieron valores inusualmente altos además de la diagonal que se mantiene siempre como 1. Estos valores se dan al comparar el modo A con el modo C, que ronda el 0.7 – 0.8 y el modo B con el modo D, que presentan un valor MAC entre 0.5 – 0.6. Dichos valores, sobre todo los del primer par, no pueden considerarse bajos o irrelevantes, por lo que se hizo necesario analizar las formas modales mencionadas, al hacerlo se dedujo que estos valores no son consecuencia de irregularidades o errores de procesamiento, sino que se debe a que los modos son similares entre sí, lo cual queda claro al apreciar en su esquematización computacional que tanto el modo A y C sufren deformación flectora, mientras que el B y D de torsión, siendo así, es lógico que el MAC arroje valores altos en estos puntos. Además de estos, todos los demás MAC fueron muy bajos y completamente inocuos e irrelevantes para ser considerados en este análisis.

Tanto las frecuencias naturales como los modos de vibración registrados coinciden con lo esperado en las conjeturas previas al experimento, al estos expresar las formas fundamentales de manera claramente distinguibles y coherentes. Por otro lado, el aumento sostenido de las frecuencias (Figura 10) a lo largo del periodo de ensayos demuestra tener relación a la cada vez menor cantidad de agua contenida por el muro, siendo esta evaporada por las altas temperaturas, reduciendo así su masa general y elevando las frecuencias en consecuencia. No obstante, dichas relaciones guardan una baja coherencia entre las variables contrastadas, lo

que inhabilita cualquier aseveración concluyente con respecto a la influencia de las variables de Temperatura, Humedad y Precipitación (ninguna correlación alcanzó un R^2 del 0.8).

La evidente disonancia que se aprecia entre los parámetros expuestos puede deberse, principalmente, a que las precipitaciones y, consecuentemente, humedades del ambiente fueron muy escasas y bajas, lo que implica una baja variabilidad de las propiedades del sistema a nivel macro. Por motivo de lo anterior, se establecieron dos análisis de resultados; uno correspondiente al análisis de los datos obtenidos mediante los ensayos expuestos en este documento, y un segundo análisis donde se complementaron los datos actuales con los de un estudio hecho previamente en la época invernal y, de esta manera, poder establecer, en un periodo más amplio de tiempo, una correlación que delate una dependencia entre las componentes modales y ambientales.

En el primer análisis, donde se toman en consideración únicamente los datos actuales, se aprecia que la temperatura promedio presenta mejor relación con las frecuencias naturales que las temperaturas extremas, teniendo al modo C como representante de la mejor relación entre los factores analizados ($R^2 \approx 0.5$), una cifra insuficiente, pero no descartable del todo. La principal observación que puede desligarse de estas relaciones es que, la tendencia, tanto en temperaturas extremas y promedio, se mantuvo siempre de un carácter directamente proporcional, lo cual concuerda con lo lógicamente esperado en un inicio ya que, a mayores temperaturas, la humedad atrapada en las microfisuras de la albañilería se termina por evaporar, restándole masa al sistema completo y logrando, por tanto, que las frecuencias aumenten su intensidad. De manera parecida, las correlaciones que involucraron a la humedad mantienen una coherencia con lo esperado, ya que su tendencia indirectamente proporcional guarda relación con lo expuesto anteriormente; mientras mayor humedad (mayor masa) contenga el muro ensayado, las frecuencias disminuirán. Por último, la situación de las correlaciones correspondientes a la precipitación resulta contradictoria, ya que la tendencia indica que tanto las frecuencias como las precipitaciones se incrementan a la par. Esto, por obvias razones, se contrapone a los análisis llevados a cabo con las variables anteriores, teniendo su posible explicación en la escasa presencia de precipitaciones continuas durante el periodo de estudio. Dado que las mediciones se hicieron durante un periodo de tiempo relativamente seco, puede que las mismas no se hayan hecho en el momento indicado, cuando el muro seguía lo suficientemente húmedo como para verse reflejado en sus propiedades modales; sino que se hicieron, o antes de las precipitaciones, o tan posteriormente a las mismas que el muro simplemente se secó. Se aconseja entonces que, para próximos ensayos, no solo se ensaye la estructura de forma periódica (y lo más continuamente que sea posible), sino que también en momentos del día específicos, que puedan ser fuente de conocimiento clave de su comportamiento dinámico.

En el segundo análisis, donde se complementaron datos del presente documento y los de un estudio anterior que trató el mismo tema en otra época del año, se apreciaron resultados discordantes. Lo anterior debido a que buena parte de los factores de correlación R^2 disminuyeron, y aunque algunos de ellos se elevaron, parece existir una incompatibilidad a la hora de querer juntar ambos grupos de datos y analizarlos. Las razones para esto podrían ser varias, sin embargo, teniendo en cuenta que los periodos de tiempo entre los dos grupos de ensayo son relativamente amplios, se puede llegar a culpar a la gran diferencia en las condiciones ambientales entre uno y otro experimento sin el debido seguimiento y recolección de datos entre el fin de un periodo de ensayos y el comienzo del siguiente.

Otra cosa rescatable del análisis conjunto es que existió una constante a lo largo del mismo, donde los modos A, C y E fueron los que con más frecuencia invirtieron sus tendencias con respecto al análisis hecho únicamente sobre los datos actuales. Esta singularidad, que en un principio podría atribuirse a una mera disonancia entre las variables, tiene sentido si nos fijamos en la Figura 17, donde se aprecia que al principio de los ensayos anteriores (10 de junio), las frecuencias son mayores que al finalizar los ensayos actuales (02 de diciembre) precisamente en los 3 modos mencionados, mientras que para los modos B y D, el caso es el contrario (frecuencias mayores al final de los ensayos), lo cual provoca que se inviertan y se mantengan sus tendencias, respectivamente, con respecto al primer análisis.

En definitiva, se logra extraer las propiedades dinámicas del muro ensayado mediante métodos de diagnóstico estructural a lo largo de un periodo establecido de tiempo y establecer su variación en el tiempo. El alza efectiva

de las frecuencias demuestra que, desde agosto hasta diciembre, existen alteraciones internas en el muro debido a excitaciones externas, las cuales son únicamente atribuibles a las excitaciones ambientales. A pesar de este hecho, el cual se puede deducir con facilidad gracias a la información entregada en este estudio, ninguna correlación de las propiedades dinámicas con los factores climáticos arrojó evidencia matemática sólida de una relación causal entre ambas, principalmente debido a la poca continuidad de los registros que conlleva a una baja densidad muestral relativa. Todo lo anterior nos lleva a sugerir realizar un análisis contando con series de tiempo más largas que permitan implementar análisis de datos estacionales.

6. REFERENCIAS

- [1] Bartolomé, S. Á., Quiun, D. & Silva, W. (2020). *Diseño y construcción de estructuras sismorresistentes de albañilería* (2.a ed.). Fondo Editorial de la PUCP.
- [2] Oliva, L. J., García, P. J. & Ordoñez, S. M. (2018). *Trabajos de albañilería*. EOCB0108 (2.a ed.). IC Editorial.
- [3] Marrongelli, G; Gentile, C; Saisi, A. (2018). “Automated modal identification of a historic bell-tower”. Dept. of Architecture, Built environment and Construction engineering (ABC), Politecnico di Milano Piazza Leonardo da Vinci.
- [4] Andy Combeya, E. Diego Merceratb, Philippe Gueguena, Mickaël Langlaisa and Laurence Audina (2022). “Postseismic Survey of a Historic Masonry Tower and Monitoring of Its Dynamic Behavior in the Aftermath of Le Teil Earthquake (Ardèche, France)”. Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, IRD, UGE, ISTerre, 38000 Grenoble, France.
- [5] Cabboi, A; Gentile, C; Saisi, A. (2013). “Frequency tracking and F.E. model identification of a masonry tower”. 5th International Operational Modal Analysis Conference.
- [6] Ubertini, F; Comanducci, G; Cavalagli, N; Pisello A. L; Materazzi, A. L; Cotana, F. (2016). “Environmental effects on natural frequencies of the San Pietro bell tower in Perugia, Italy, and the irremoval for structural performance assessment”. University of Perugia.
- [7] Pallarés, F. J; Betti, M; Bartoli, G; Pallarés, L. (2021). “Structural health monitoring (SHM) and Nondestructive testing (NDT) of slender masonry structures: A practical review”. Polytechnic university of Valencia.
- [8] Aguilar, R; Boroschek, R; Lourenço, B; Lozno, G; Zonno, G. (2019). “Vibration-Based Damage Detection in Historical Adobe Structures: Laboratory and Field Applications”. International Journal of Architectural Heritage, DOI: 10.1080/15583058.2019.1632974.
- [9] Brincker, R; Andersen, P; Jacobsen, N. (2007). “Automated Frequency Domain Decomposition for Operational Modal Analysis”. In Conference Proceedings: IMAC-XXIV : A Conference & Exposition on Structural Dynamics Society for Experimental Mechanics.
- [10] Dohler, M; Andersen, P; Mevel, L. (2010). “Data Merging for Multi-Setup Operational Modal Analysis with Data-Driven SSI”. Society for Experimental Mechanics Inc.
- [11] Pastor, M; Binda, M; Harčarik, T. (2012). “Modal Assurance Criterion”. Procedia Engineering, Volume 48, Pages 543-548, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.551>.
- [12] Novoa, G; Oyarzo, C; Caamaño, D. (2022). “Análisis de la variabilidad de las propiedades dinámicas de un muro de albañilería simple debido a factores climáticos.”, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción (UCSC), Concepción, Chile.