

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

CARACTERIZACIÓN DINÁMICA EMPLEANDO ANÁLISIS MODAL OPERACIONAL (OMA), CASO DE ESTUDIO: TORRE EXENTA DEL TEMPLO COLONIAL DE NUESTRA SEÑORA DE NATIVIDAD, DISTRITO DE CHINCHERO, PROVINCIA URUBAMBA, DEPARTAMENTO DEL CUSCO

PRESENTADO POR:

Br. VLADIMIR JERSON ALFEREZ VARGAS

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO CIVIL**

ASESOR:

Mg. Ing. MIJAIL MONTESINOS ESCOBAR

CUSCO-PERÚ

2026



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro. CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor MIJAIL MONTESINOS ESCOBAR

..... quien aplica el software de detección de similitud al trabajo de investigación/tesis titulada: CARACTERIZACIÓN DINÁMICA

EMPLEANDO ANÁLISIS MODAL OPERACIONAL (OMA), CASO DE ESTUDIO: TORRE EXENTA DEL TEMPLO COLONIAL DE NUESTRA SEÑORA DE NATIVIDAD, DISTRITO DE CHINCHERO, PROVINCIA URUBAMBA, DEPARTAMENTO DEL CUSCO

Presentado por: VLADIMIR JERSON ALFEREZ VARGAS DNI N° 70757244

presentado por: DNI N°:

Para optar el título Profesional/Grado Académico de INGENIERO CIVIL

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 veces, mediante el Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de Similitud en la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 5 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 20 de AGOSTO de 2026

Firma

Post firma MIJAIL MONTESINOS ESCOBAR

Nro. de DNI 44 88 5194

ORCID del Asesor 0000-0001-8965-5000

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: oid: 27259:615476603

VLADIMIR JERSON ALFEREZ VARGAS

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO TESIS 2026 REPOSITORIO.pdf

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:615476603

Fecha de entrega

19 ago 2026, 11:20 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

19 ago 2026, 11:25 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO TESIS 2026 REPOSITORIO.pdf

Tamaño del archivo

18.6 MB

254 páginas

43.426 palabras

245.061 caracteres

5% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

- 5%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 2%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

DEDICATORIA

*A las personas que siempre estuvieron
para mí: Mi Madre Maximiliana, mi
padre Juan Urbano, a mis hermanos, tíos,
abuelos que me acompañaron en cada etapa
de este proceso y a la persona especial que
siempre llevare conmigo: Mi abuelo Nazario
Vargas Pari, en el cielo.*

AGRADECIMIENTO

A mis padres, hermanos, y a todos quienes se tomaron un momento de sus vidas para darme el aliento y su apoyo incondicional.

A mis tíos Miguel y Janet quienes me dieron su apoyo en todo momento y fueron como mis segundos padres aquí.

Para Marco, Mario y Victor mis tíos, siempre agradecido por su apoyo.

A mi abuela Alejandrina y mi tío Victor por su preocupación constante en esta etapa de mi vida universitaria.

Al ingeniero Julio Rojas Bravo por las enseñanzas dentro y fuera de las aulas universitarias por incentivar en mí este mundo de la investigación de estructuras históricas.

Al ingeniero Mijail Montesinos Escobar por su apoyo como asesor de este trabajo de investigación.

Al Doctor Diego Mercerat y Andy Combey por su apoyo en las campañas de medición y a la orientación en este tipo de investigación referido a monumentos históricos.

A Jose Bravo Fuentes quien desde el principio estuvo conmigo en este largo camino mostrando su apoyo a ti amigo mi más profundo agradecimiento. A mis amigos del quinto piso por su compañía diaria y aliento constante.

Por último y no por ello menos importante, es necesario expresar la más sincera y profunda gratitud a todas aquellas personas que han tenido un papel relevante en este proceso, así como en el cierre de esta etapa de mi vida.

¡¡¡ Gracias totales!!!

RESUMEN

El propósito de esta investigación es conocer la respuesta dinámica de una estructura de carácter histórico, a través del Análisis Modal Operacional (OMA), la cual emplea una metodología no destructiva y no invasiva. Este método es una herramienta eficaz en la fase de control y verificación de proyectos de rehabilitación estructural con carácter histórico; además facilita la calibración de modelos numéricos.

La presente investigación expone los resultados del estudio realizado en la torre exenta de la iglesia Nuestra Señora de la Natividad de Chinchero (XVI), situado en Chinchero (Cusco), la cual esta edificada en base de albañilería de adobe y piedra, además incluye el estudio de la respuesta sísmica del terreno mediante el método HVSR o Ensayo de Nakamura.

La generación del modelo geométrico se logró mediante la tecnología LiDAR y los programas de la compañía Autodesk Inc., permitiendo así representar la estructura real en un entorno digital (3D). Este modelo fue exportado a un software denominado Diana Fea (Elementos Finitos), el cual se utilizó para el análisis estructural.

Los ensayos de vibraciones ambientales empleando acelerómetros en la estructura, proporcionaron lecturas que, tras su procesamiento en el software Artemis Modal Pro, permitieron determinar el comportamiento dinámico de la torre a través de un modelo experimental.

Finalmente se presenta el modelo numérico calibrado con las propiedades mecánicas finales, las condiciones de frontera elegidas y las características geométricas definitivas. Lo anterior se apoyó en estudios previos y fundamentos teóricos relacionados con los aspectos principales de este estudio.

Palabras clave: Levantamiento por Lasergrametría (Lídar), Análisis Modal Operacional (OMA), Propiedades Dinámicas, Modelo Numérico Calibrado, Ensayo de Nakamura.

ABSTRACT

The focus of this research is to understand the dynamic response of a historic structure through Operational Modal Analysis (OMA), which employs a non-destructive and non-invasive methodology. This method is an effective tool in the monitoring and verification phase of structural rehabilitation projects involving historic structures; it also facilitates the calibration of numerical models.

This research presents the results of a study conducted on the freestanding tower of the Church of Our Lady of the Nativity in Chinchero (16th century), located in Chinchero (Cusco), which is constructed of adobe and stone masonry; it includes a study of the site's seismic response using the HVSR method or Nakamura test.

The geometric model was generated using LiDAR technology and software from Autodesk Inc., thereby enabling the representation of the actual structure in a digital (3D) environment. This model was exported to software called Diana Fea (Finite Elements), which was used for structural analysis.

Environmental vibration tests using accelerometers on the structure provided readings that, after processing Artemis Modal Pro software, allowed the dynamic behavior of the tower to be determined through an experimental model.

Finally, the calibrated numerical model is presented, incorporating the final mechanical properties, the selected boundary conditions, and the definitive geometric characteristics. All the above was supported by previous studies and theoretical foundations related to the main aspects of this study.

Keywords: LiDAR Surveying, Operational Modal Analysis (OMA), Dynamic Properties, Calibrated Numerical Model, Nakamura Test.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	iii
RESUMEN	v
ABSTRACT.....	vi
ÍNDICE GENERAL	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE TABLAS	xviii
ÍNDICE DE ECUACIONES	xx
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN	1
1. Motivación	1
2. Justificación de la Investigación	4
2.1. Lagunas Sísmicas - Silencio Sísmico	5
3. Planteamiento del Problema de Investigación	9
3.1. Identificación del Problema.....	9
3.2. Formulación del Problema Objeto de Investigación	11
3.2.1. Problema General.....	11
3.2.2. Problemas específicos.....	12
3.2.2.1 Problema Específico 1:.....	12
3.2.2.2 Problema Específico 2:.....	12
3.2.2.3 Problema Específico 3:.....	12
3.3. Limitaciones y Viabilidad de la Investigación	12
3.3.1. Limitaciones.....	12
3.3.2. Viabilidad de la Investigación	13
4. Objetivos de la Investigación.....	13
4.1. Objetivo General.....	13
4.2. Objetivos Específicos	14
4.3. Recopilación Histórica	14
5. Formulación de Hipótesis	15
5.1. Hipótesis General	15

5.2. Hipótesis Específicas	15
6. Identificación de Variables de Estudio	15
6.1. Variables Independientes.....	15
6.2. Variables Dependientes	15
6.3. Operacionalización de Variables	15
7. Metodología de Investigación.....	17
7.1. Enfoque de la Investigación	17
7.2. Alcance de la Investigación.....	17
7.3. Diseño de la Investigación.....	17
8. Procedimiento de la tesis	18
9. Estructura de la Tesis.	19
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	22
10. Antecedentes de la Investigación.....	22
10.1. Antecedentes Internacionales	22
10.2. Antecedentes Nacionales.....	25
11. Bases Teóricas	27
11.1. Modelamiento Geométrico	27
12. Modelamiento Numérico	30
12.1. Método de Elementos Finitos (FEM).....	30
12.1.1. Elemento Finito.....	32
13. Análisis Numérico	32
13.1. Análisis Estructural.....	32
14. Dinámica Estructural	32
14.1. Análisis Dinámico Estructural.....	32
14.2. Características Esenciales de un Problema Dinámico	35
15. Marco Conceptual	41
15.1. Análisis Modal Operacional	41
15.1.1. Análisis Modal	41
15.1.2. Análisis Modal Tradicional.....	42
15.1.3. Análisis Modal Operacional	45
15.1.3.1 Conceptos Básicos.....	46

15.1.3.1.1. Planificación de los ensayos	48
15.1.3.1.2. Sistema de medición	52
15.1.3.1.3. Transductores de Respuesta.....	53
15.1.3.1.3.1. Acelerómetros	54
15.2. Procesamiento de Señales y Extracción de Parámetros Modales.....	60
15.2.1. Preprocesamiento de Señales.....	60
15.2.2. Técnicas de Identificación Modal.....	61
15.2.2.1 Métodos en el Dominio de Frecuencia.....	62
15.2.2.2 Métodos en el del Dominio del Tiempo.....	64
15.3. Calibración del Modelo de Elementos Finitos	70
15.4. Efecto de resonancia.....	77
CAPITULO III: TORRE EXENTA DE CHINCHERO	81
16. Resumen histórico.....	81
17. Ubicación de la torre en estudio.....	84
18. Composición de la torre	85
18.1. Cuerpo de la Torre.....	86
18.2. Base de la Torre.....	88
18.3. Cobertura de la Torre.....	92
19. Propiedades de los materiales	94
19.1. Albañilería de adobe	95
19.1.1. Propiedades mecánicas de albañilería de adobe	95
19.1.1.1 Compresión simple en bloques de adobe (muestras originales extraídas y talladas)	96
19.1.1.2 Compresión simple en muretes de adobe (muestras elaboradas).....	98
19.1.1.3 Ensayos de compresión diagonal en muretes de adobe (muestras elaboradas).....	99
19.1.2. Cálculo de módulo de elasticidad y módulo de Poisson.....	100
19.1.2.1 Módulo de elasticidad	100
19.1.2.2 Módulo de Poisson.....	101
19.2. Albañilería de piedra	103
19.3. Elementos de madera.....	106
20. Resumen de las propiedades mecánicas	107

CAPÍTULO IV: MODELAMIENTO GEOMÉTRICO Y NUMÉRICO	108
21. Torre exenta	108
21.1. Levantamiento con Escáner Laser Terrestre (TLS).....	108
21.1.1. Procedimiento y plan de levantamiento	108
22. Modelamiento geométrico	114
23. Modelamiento numérico	120
23.1. Condiciones iniciales, de contorno y de carga	122
23.2. Modelo de elementos finitos (FEM).....	123
24. Evaluación estructural numérica.....	125
24.1. Peso de la estructura	128
24.2. Análisis estructural lineal	130
24.2.1. Análisis Estructural Lineal; Torre de Campanario.	130
24.2.1.1 Análisis ante Cargas Verticales Gravitacionales.....	130
24.2.1.2 Análisis de equilibrio	130
24.2.1.3 Análisis modal.....	132
CAPITULO V	135
25. Pruebas de vibración ambiental	135
25.1. Vista general	135
25.2. Acelerómetros.....	135
25.2.1. Colocación y número de sensores.....	135
25.2.2. Número mínimo de sensores.....	136
25.2.3. Duración de las campañas de medición	140
25.3. Especificaciones	141
25.4. Software.....	143
25.5. Ensayos de Vibración Ambiental	143
25.5.1. Pruebas de campo y configuraciones	144
25.5.2. Datos obtenidos.....	148
25.5.2.1 Procesamiento de datos (Campaña 02)	153
25.5.2.2 Procesamiento de datos (Campaña 03)	156
25.5.3. Trabajo en gabinete.....	157
CAPITULO VI.....	162

26. Calibración del modelo numérico	162
27. Análisis de sensibilidad.....	164
28. Ensayos de vibración en superficie adyacente a la torre.....	176
CAPITULO VII	182
29. Análisis y Discusión de Resultados	182
29.1. Caracterización dinámica	182
29.2. Optimización del modelo numérico	184
30. Conclusiones	185
31. Recomendaciones	186
Bibliografía	189
ANEXOS	194
A). Matriz de consistencia	195
B). Protocolo de ensayo	196
C). Diagramas SVD de acelerómetros para cada configuración.....	197
D). Hojas de calibración de los sensores de aceleración empleados	219
E). Certificado de calibración de Scanner Láser utilizado.....	227
F). PLANOS	228
G). PANEL FOTOGRÁFICO	231

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de ensayos modales en estructuras	3
Figura 2. Zona de subducción entre la placa de Nazca (oceánica) y la placa Sudamericana (Continental)	5
Figura 3. Mapa sísmico del Perú. Periodo: 1690 – 2024	6
Figura 4. Diagrama de flujo - Procedimiento de tesis.....	18
Figura 5. Modos de vibración antes y después de las labores de rehabilitación	23
Figura 6. Frecuencias y modos obtenidos mediante OMA vs modelo numérico calibrado.....	24
Figura 7. Comparación de los modos experimentales y numéricos a través de los valores MAC, y las formas de modo.....	25
Figura 8. Modos identificados en la torre de la iglesia de San Cristobal.....	26
Figura 9. Representación gráfica de Lasergrametría	29
Figura 10. Flujo de modelamiento geométrico	30
Figura 11. Sistema de masa concentrada (izq) y masa distribuida con elasticidad (dcha)	30
Figura 12. Características y fuentes de cargas dinámicas típicas	34
Figura 13. Sistema de un grado de libertad idealizado	36
Figura 14. Influencia de la amortiguación en un sistema	37
Figura 15. Respuesta en vibración libre sin amortiguación	39
Figura 16. Formas modales de una viga en voladizo.....	40
Figura 17. Modos de vibración de una viga en voladizo	41
Figura 18. Enfoque del Análisis Modal Operacional (OMA).....	45
Figura 19. Esquema explicativo de la aplicación del OMA	47
Figura 20. Ejemplos de sensores de referencia y sensores movibles.....	49
Figura 21. Sistemas de medición	50
Figura 22. Sistema de Adquisición de Datos	53
Figura 23. Acelerómetro piezoeléctrico (PCB, 2019).....	54
Figura 24. Acelerómetro piezoresistivo	55

Figura 25. Acelerógrafo Híbrido – Lunitek	56
Figura 26. Acelerómetro de fuera balaceada	57
Figura 27. NI CompactDAQ (Izquierda) y la tecnología NI System Timing Controller (NI-STC)(Derecha)	58
Figura 28. Software del sistema y software de aplicación	59
Figura 29. Técnicas de preprocesamiento de señales: (a) promediado; (b) diezmado; (c) filtrado	61
Figura 30. Métodos y características paramétricos y no paramétricos	62
Figura 31. Ejemplo de un diagrama EFDD – Peak Picking y las frecuencias identificadas.....	63
Figura 32. Proceso secuencial de la transformada de Fourier.....	64
Figura 33. Ajuste de un Modelo Matemático a Datos Experimentales.....	65
Figura 34. Diagrama de estabilización.....	66
Figura 35. Representación Tridimensional de Frecuencia (Espectro) – Tiempo – Magnitud (Amplitud)	67
Figura 36. Función periódica arbitraria	68
Figura 37. Señal de audio de una ballena azul descompuesta en sus componentes de frecuencia empleando FFT	70
Figura 38. Ejemplo de un procedimiento de evaluación basado en análisis dinámicos para campanarios	71
Figura 39. Índice de sensibilidad local	76
Figura 40. Esquema de Aceleraciones de Nakamura.....	78
Figura 41. Izquierda: Diagrama de Flujo para obtención de la razón H/V a partir de vibración ambiental. Derecha: Curva mHVSr y Gráfico direccional que muestra la amplitud H/V en función del azimut.	79
Figura 42. Virgen de Monserrat (1963) por Francisco Chihuantito	81
Figura 43. Torre de Chinchero, hornacinas y arco de entrada	82
Figura 44. Evolución de la Torre Exenta de Chinchero a través del tiempo	83
Figura 45. Localización del templo de Chinchero	84
Figura 46. Ubicación de la Torre de Chinchero.....	85
Figura 47. Espesores de muro a diferentes cotas (alturas) de la Torre de Chinchero	86

Figura 48. Izquierda: Vista isométrica de nube de puntos de la torre. Derecha: Fachadas Norte y Este de la torre	87
Figura 49. Tomas fotográficas de la cimentación de la Torre de Chinchero	88
Figura 50. Planta, alzado y corte de una excavación en el ángulo N - O de la Iglesia de Chinchero	89
Figura 51. Excavaciones próximas a la Torre Exenta de Chinchero	90
Figura 52. Registro fotográfico de la cimentación de la Iglesia Nuestra Señora de la Natividad de Chinchero.....	91
Figura 53. Axonometría de sistema de cobertura de par y nudillo	92
Figura 54. Armadura de madera	93
Figura 55. Vista frontal de la armadura de madera.....	93
Figura 56. Vista en planta de la armadura de madera.....	93
Figura 57. Izquierda: Modelo 3D de la Torre. Derecha: Descomposición de la estructura de Techo	94
Figura 58. Excavación, extracción y transporte de muestras de bloques de adobe.....	96
Figura 59. Procesamiento de nube de puntos y registro de escaneos en software Scene v.7.1.....	109
Figura 60. Distribución de los puntos de estación del escáner Laser en Recap Pro	110
Figura 61. Zona de estudio y limpieza de la Nube de Puntos en el software Autodesk Recap 2025	110
Figura 62. Visualización de la nube de puntos en el software Autodesk Revit 2026	111
Figura 63. Vistas isométricas de la Nube de Puntos densa de la torre campanario obtenida mediante lasergrametría.....	112
Figura 64. Visualización de la configuración interna de la torre mediante segmentación del modelo escaneado	113
Figura 65. Modelo 3D sólido y nube de puntos	114
Figura 66. Nube de Puntos, sección de corte en elevación.....	116
Figura 67. Modelo 3D final en Revit.....	117
Figura 68. Modelo Revit 3D de los alzados oeste y este	118
Figura 69. Modelo Revit 3D alzado norte y sur.....	119

Figura 70. Materiales y condiciones de contorno de la Torre de Chinchero	121
Figura 71. Leyenda de materiales y condiciones de frontera de la Torre Exenta de Chinchero	122
Figura 72. Mallado de modelo y detalles interiores.....	124
Figura 73. Ejes locales y coordenadas globales para los elementos solidos tetraédricos (izquierda) y hexaédricos (derecha)	125
Figura 74. Grados de libertad de elementos tipo Sólido	126
Figura 75. Deformación de un elemento infinitesimal	126
Figura 76. «Tensiones de Cauchy» en un elemento finito unitario en su dirección positiva.....	127
Figura 77. Desplazamiento vertical en el tope (Izquierda) y esfuerzo vertical en la albañilería de adobe (Derecha) debido a cargas verticales gravitacionales	131
Figura 78. Formas modales del modelo numérico modos 1,2,3 y 4	133
Figura 79. Formas modales del modelo numérico, modos 5,6 y 7	134
Figura 80. Ejemplo de un estudio en 2D: plan de medición para un edificio rectangular sencillo «tipo caja» en el que se desprecian los desplazamientos verticales	136
Figura 81. Disposición de sensores recurrentes para edificios y estructuras en forma de torre.....	137
Figura 82. Esquemas de sensores de aceleración cableados	138
Figura 83. Modos de vibración de la torre de Santa Ana (Cusco)	139
Figura 84. Campaña 01: Configuración en planta y elevación de la ubicación de sensores (acelerómetros)	145
Figura 85. Campaña 02: Configuración en planta y elevación de la ubicación de sensores (acelerómetros)	146
Figura 86. Campaña 03: Configuración en planta y elevación de la ubicación de sensores (velocímetros)	147
Figura 87. Setup 01. Registros de acelerómetros empleados en la medición	148
Figura 88. Setup 02. Registros de acelerómetros empleados en la medición	149
Figura 89. Setup 03. Registros de acelerómetros empleados en la medición	150

Figura 90. Setup 04. Registros de acelerómetros empleados en la medición	151
Figura 91. Setup 05. Registros de acelerómetros empleados en la medición	152
Figura 92. Setup 01. Campaña 03: Registros de velocímetros empleados en la medición.....	154
Figura 93. Setup 02. Campaña 03: Registros de sensores empleados en la medición	155
Figura 94. Gráfico SVD por el método EFDD (Velocímetros/Geófonos).....	157
Figura 95. Gráfico SVD por el método SSI – UPCX (Velocímetros/Geófonos).....	158
Figura 96. SVDs global (Velocímetros/Geófonos).....	158
Figura 97. SVDs Setup 01 (Velocímetros/Geófonos).....	159
Figura 98. SVDs Setup 02 (Velocímetros/Geófonos).....	159
Figura 99. Frecuencias y modos de vibración experimentales	160
Figura 100. Instrumentación de la torre de Chinchero con geófonos	161
Figura 101. MAC antes de la calibración	163
Figura 102. FMAC antes de la calibración	164
Figura 103. Sensibilidad de la primera frecuencia natural para el modelo	167
Figura 104. Sensibilidad de la segunda frecuencia natural para el modelo	167
Figura 105. Sensibilidad de la tercera frecuencia natural para el modelo	167
Figura 106. Sensibilidad de la cuarta frecuencia natural para el modelo.....	168
Figura 107. Sensibilidad de la quinta frecuencia natural para el modelo	168
Figura 108. Sensibilidad de la sexta frecuencia natural para el modelo	168
Figura 109. Sensibilidad de la séptima frecuencia natural para el modelo.....	169
Figura 110. Valores MAC después del proceso de optimización	174
Figura 111. Valores MAC después del proceso de optimización	174
Figura 112. Modos de vibración finales después de la calibración.....	175
Figura 113. Puntos de monitoreo	176
Figura 114. Punto A: Frecuencias pico 2.71 Hz, 10.12 Hz y 28.82 Hz	178
Figura 115. Punto B: Frecuencia pico 2.60 Hz	179

Figura 116. Punto C: Frecuencia pico 2.63 Hz	180
Figura 117. Toma de medidas en los puntos descritos	181

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de variables	16
Tabla 2. Actualización de los parámetros para la identificación estructural.....	77
Tabla 3. Peso unitario de los adobes (bloques tallados).....	97
Tabla 4. Resultados de ensayos a compresión simple en bloques	97
Tabla 5. Resultados de ensayos a compresión simple en pilas	98
Tabla 6. Peso unitario de los muretes.....	99
Tabla 7. Esfuerzo último de corte en muretes.....	99
Tabla 8. Fórmulas empíricas para el cálculo del módulo de Elasticidad en Albañilería.....	100
Tabla 9. Fórmulas empíricas para el cálculo del módulo de Elasticidad en Albañilería.....	100
Tabla 10. <i>Módulo de Poisson</i>	101
Tabla 11. Propiedades mecánicas de albañilería de adobe obtenidas de literatura	102
Tabla 12. Resistencia a compresión de roca tipo inca.....	103
Tabla 13. Datos experimentales disponibles en la bibliografía sobre la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad de las unidades de piedra	104
Tabla 14. Propiedades mecánicas de algunos tipos de albañilería de edificios históricos	105
Tabla 15. Valores de parámetros mecánicos (máximo y mínimo) para diferentes tipos de albañilería...	105
Tabla 16. Propiedades de los materiales de las diferentes especies de madera adoptadas.....	107
Tabla 17. Dimensiones claves de la torre.....	118
Tabla 18. Propiedades mecánicas lineales de los materiales del modelo numérico.....	122
Tabla 19. Propiedades mecánicas iniciales	127
Tabla 20. Carga muerta (DW).....	128
Tabla 21. Carga muerta de techo (DWt)	128
Tabla 22. Carga viva de techo (LWt).....	129
Tabla 23. Carga viva total en techo.....	129
Tabla 24. Cargas verticales gravitacionales	129

Tabla 25. Sumatoria de reacciones en la base (Dir +Z)	131
Tabla 26. Intervalo de tiempo estimado para los ensayos de vibración	141
Tabla 27. Especificaciones técnicas del equipo de adquisición de datos	141
Tabla 28. Especificaciones técnicas de los sensores utilizados	142
Tabla 29. Parámetros modales por el método EFDD en el dominio de la frecuencia.....	153
Tabla 30. Parámetros modales por el método SSI – UPCX en el dominio del tiempo	153
Tabla 31. Parámetros modales por el método EFDD en el dominio de la frecuencia.....	156
Tabla 32. Parámetros modales por el método SSI – UPCX en el dominio del tiempo	156
Tabla 33. Propiedades mecánicas iniciales consideradas en el Modelo numérico	162
Tabla 34. Comparación entre las frecuencias experimentales/numéricas, MAC y FMAC, antes del proceso de optimización	163
Tabla 35. Parámetros considerados para el análisis de sensibilidad	165
Tabla 36. Métricas del proceso de calibración (MAC/FMAC) y frecuencias numéricas	170
Tabla 37. Métricas de calibración (MAC/FMAC) y frecuencias numéricas	171
Tabla 38. Métricas de calibración (MAC/FMAC) y frecuencias numéricas	172
Tabla 39. Propiedades mecánicas de los materiales después de la calibración.....	173
Tabla 40. Valores finales de MAC y FMAC después de la calibración	173
Tabla 41. Datos geográficos de los puntos de medición	176
Tabla 42. Frecuencia fundamental del terreno	177
Tabla 43. Resultados de la caracterización dinámica empleando acelerómetros uniaxiales.....	182
Tabla 44. Resultados de la caracterización dinámica empleando geófono triaxial.....	182
Tabla 45. Variación de frecuencias medidas con acelerómetros y geófonos	183
Tabla 46. Correspondencia entre frecuencias y las formas modales antes del proceso de calibración....	184
Tabla 47. Correspondencia entre frecuencias y las formas modales antes del proceso de calibración....	184

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. <i>Cálculo de coordenadas analíticas</i>	29
Ecuación 2. <i>Cálculo del rango de disparo</i>	29
Ecuación 3. <i>Ecuación de movimiento de un sistema dinámico básico</i>	36
Ecuación 4. <i>Frecuencia de vibración, cuyas unidades son ciclos por segundo (Hz) f; y ω en (rad/seg)</i> .	38
Ecuación 5. <i>Función periódica</i>	67
Ecuación 6. <i>Serie de Fourier</i>	68
Ecuación 7. <i>Transformada de Fourier</i>	69
Ecuación 8. <i>Transformada discreta de Fourier</i>	69
Ecuación 9. <i>Modal Assurance Criterion (MAC)</i>	73
Ecuación 10. <i>Ecuación de segundo grado planteada por Douglas-Reid, para frecuencias (f)</i>	74
Ecuación 11. <i>Ecuación de segundo grado planteada por Douglas-Reid, para formas modales (ϕ)</i>	74
Ecuación 12. <i>Índice de sensibilidad</i>	75
Ecuación 13. <i>Normalización con valores iniciales de los parámetros estructurales.</i>	76
Ecuación 14. <i>Normalización con valores iniciales del MEF</i>	76
Ecuación 15. <i>Función de transferencia</i>	78
Ecuación 16. <i>Resistencia ultima</i>	98
Ecuación 17. <i>Cargas verticales gravitacionales</i>	130
Ecuación 18. <i>Ecuación de equilibrio</i>	131
Ecuación 19. <i>Frecuencia natural según la ASCE 07-16 (2017)</i>	140
Ecuación 20. <i>Frecuencia natural según la norma italiana NTC-2008 (2008)</i>	140
Ecuación 21. <i>Ecuación de sensibilidad de parámetros</i>	165

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

1. Motivación

La historia cultural, religiosa y colectiva de la evolución humana se manifiesta en las estructuras patrimoniales que nos han sido heredadas. Estas estructuras abarcan desde catedrales de carácter europeo hasta iglesias coloniales erigidas sobre cimientos incas. A pesar de la antigüedad de estas estructuras, la importancia de comprender su diseño arquitectónico, así como su edificación ingenieril, es esencial para preservar estos legados para futuras generaciones. En este sentido, es relevante destacar que muchas de estas estructuras poseen una significativa importancia cultural y religiosa, no solo desde una perspectiva histórica, sino también en el ámbito turístico, ya que representan una fuente de ingresos económicos directos para numerosos países.

La degradación de las estructuras patrimoniales a causa de los peligros naturales es incontrolable; sin embargo, es de suma importancia para su conservación hacer hincapié en prolongar la vida útil de estas estructuras mediante la supervisión y las intervenciones planificadas. Los programas y dispositivos destinados a la conservación de estructuras patrimoniales mediante la supervisión han experimentado un notable progreso tecnológico en años recientes. El empleo de técnicas de evaluación como las pruebas de vibración ambiental (AVT) y el análisis modal en estado de servicio (OMA) ha permitido ejecutar el proceso de identificación y monitoreo de la respuesta dinámica de estructuras vulnerables.

En este sentido, para la conservación de las edificaciones históricas, son fundamentales el diagnóstico y la evaluación estructural. Esta mayor conciencia de los impactos sociales y económicos que tiene el deterioro del patrimonio arquitectónico está relacionada con la necesidad de realizar tareas de control y reconocimiento estructural.

El desarrollo de software ha permitido que al momento de controlar o realizar intervenciones a estructuras clasificadas como históricas, las condiciones estructurales puedan ser analizadas mediante la elaboración de modelos computacionales. No obstante, realizar un modelo gemelo digital o modelo de elementos finitos (FEM), para comprender el comportamiento estructural de la edificación tipo histórica es una tarea compleja, debido a varios factores, que van desde una representación precisa de la geometría de carácter estructural, hasta los intrincados comportamientos de los materiales que la integran o las condiciones de contorno o interacción entre los elementos estructurales.

Las técnicas de identificación de los parámetros modales de una estructura (frecuencias naturales, modos de vibración y coeficientes de amortiguamiento modal) basadas en ensayos dinámicos no invasivos y/o destructivos, aparecen como una alternativa muy ideal y de gran interés. A partir de los ensayos experimentales se identifican las propiedades dinámicas antes mencionadas, las cuales servirán para el proceso de actualización del modelo numérico, mediante el empleo de diversos algoritmos matemáticos. En este sentido, calibrar un modelo numérico es corregir las deficiencias inherentes en el modelo de elementos finitos (FEM), logrando aproximar los resultados de este con los experimentales captados en campo y en estado de operación.

La gran virtud que ofrece dicho proceso es la generación de modelos matemáticos geoméricamente confiables y mecánicamente óptimos, para así lograr un comportamiento dinámico que se ajuste a lo real.

Los participantes en la evaluación de monumentos históricos han dedicado décadas a la calibración de modelos numéricos, y en ese tiempo se han desarrollado técnicas que empleamos actualmente.

Los ensayos modales aplicados a estructuras básicamente se clasifican en dos grupos (ver **Figura 1**) por un lado, encontramos al análisis modal experimental (EMA) y por el otro al análisis modal operacional (OMA), el primero emplea fuerza de excitación forzadas y el segundo emplea fuerza operacionales .

Figura 1.

Tipos de ensayos modales en estructuras



Nota. (Izq.) Ensayos de vibración forzada, carga cíclica (Cismid, Lima, 2003). (Der.) Ensayos de vibración ambiental, puente By Pass (Wanchaq, Cusco, 2024).

Las evaluaciones dinámicas que emplean vibración forzada o inducida sobre estructuras en general se enfrentan a dos problemas principales: por un lado, el elevado costo económico derivado de la logística y operación de la maquinaria especializada necesaria para provocar las vibraciones, y en segundo lugar la necesidad de suspender temporalmente las funciones del edificio durante las pruebas .

A los inconvenientes antes mencionados se debería añadir que aplicar vibraciones forzadas a estructuras de carácter histórico sería un gran problema en la estabilidad global (degradación de

rigidez, fatiga de materiales, desajuste en las juntas o interfaces, etc.) de la misma. Por todas estas razones, en patrimonio arquitectónico se prefiere realizar ensayos de vibración ambiental (no invasiva) en lugar de la vibración forzada, que es la mejor opción para el análisis modal. Y en definitiva, estas técnicas permiten obtener información dinámica relevante sin alterar las condiciones de operación ni amenazar la integridad de la estructura.

Las pruebas basadas en vibraciones ambientales, por su parte, prescinden de excitación forzada. Estos procedimientos posibilitan la identificación de los rasgos dinámicos de la estructura en estado de operación o servicio. Se aprovecha de las fuentes de excitación de carácter natural a las que la estructura está expuesta, como el tráfico o el viento con el fin de establecer las propiedades modales dinámicas de la estructura. Lo que más resalta de este tipo de ensayos es que no altera la estabilidad estructural por la aplicación de fuerzas artificiales, más por el contrario este método se nutre de las condiciones naturales de servicio de la estructura siendo así la mejor opción para caracterizar este tipo de estructuras.

Debido a los motivos mencionados previamente, la tesis centra su estudio en la aplicación del Análisis Modal Operacional u OMA (Operational Modal Analysis) a través de ensayos de vibración ambiental AVT (Ambient Vibration Test), y en su funcionalidad como procedimiento para describir de manera dinámica estructuras históricas. La aplicación de esta técnica se desarrollará en la torre exenta del templo Nuestra Señora de la Natividad de Chinchero anteriormente perteneciente a la parroquia Nuestra Señora de Monserrate.

2. Justificación de la Investigación

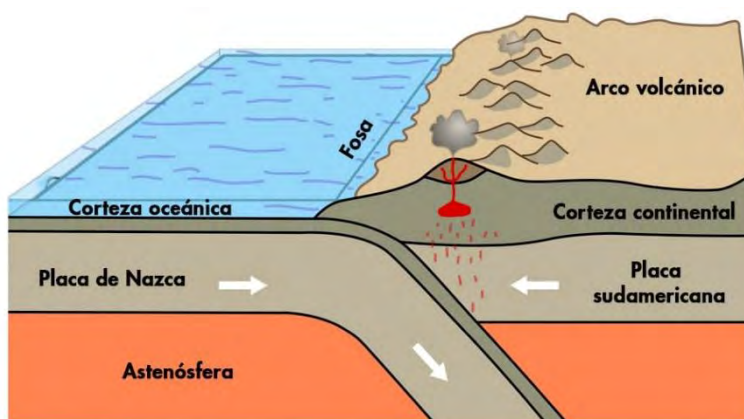
Para establecer la importancia potencial de la presente investigación, antes desarrollaremos conceptos clave como “Lagunas sísmicas - silencio sísmico”, términos que nos mostrarán un mayor panorama antes de establecer las razones que justifiquen el presente trabajo:

2.1. Lagunas Sísmicas - Silencio Sísmico

El escenario geodinámico y las características morfoestructurales del territorio peruano son el resultado de la transmisión de energía mecánica derivada de la convergencia de placas. La aproximación de la placa oceánica de Nazca hacia la Sudamericana (ver **Figura 2**), a una velocidad de desplazamiento promedio de 70-80 mm/año, constituye la fuerza motriz que gobierna la deformación cortical y la configuración del relieve peruano. (Norabuena, et al., 1998)

Figura 2.

Zona de subducción entre la placa de Nazca (oceánica) y la placa Sudamericana (Continental)

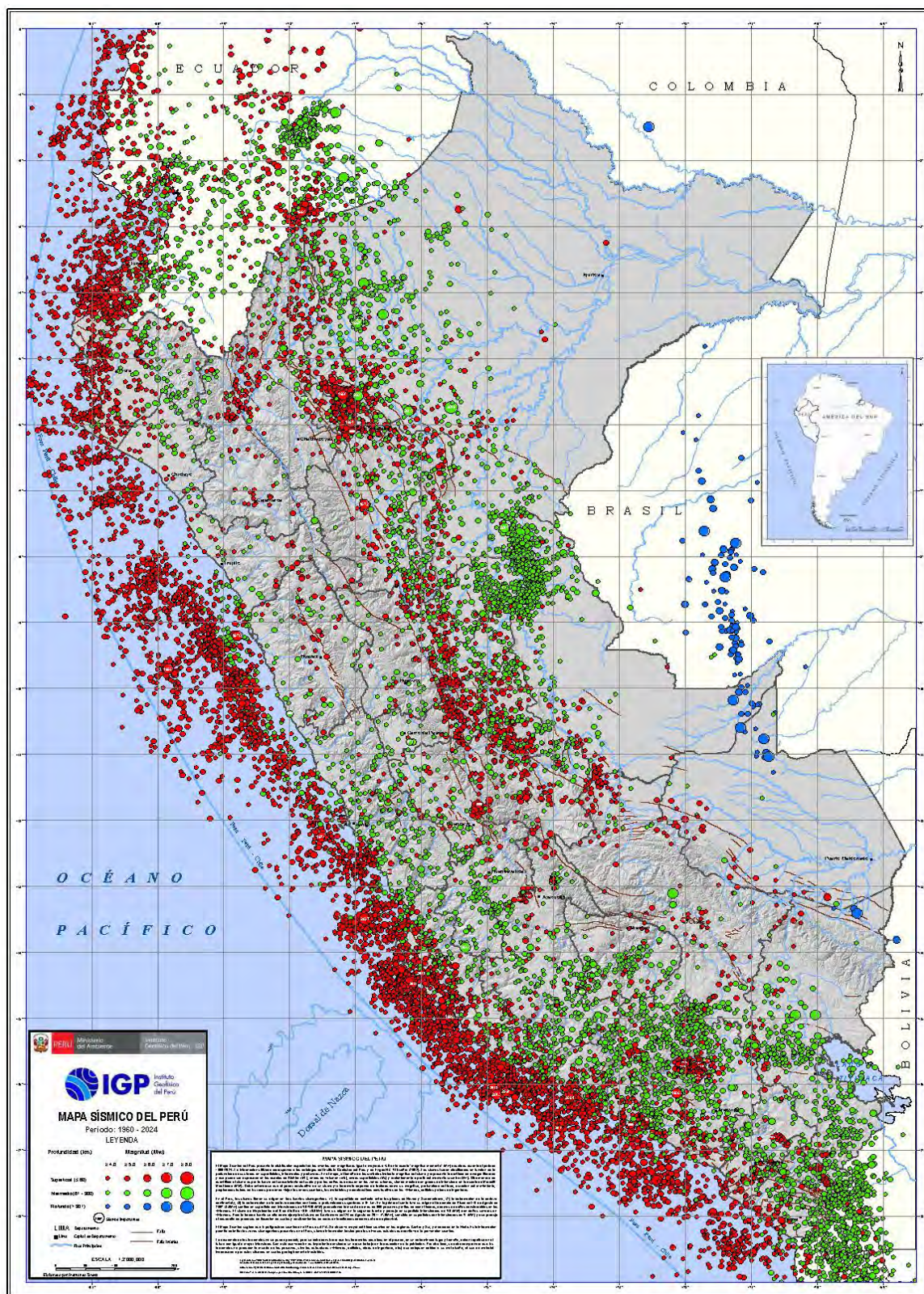


Nota. Adaptado de *Tipos de corteza terrestre*, Mundo Geología, 2017, Mundo geología: tipos de corteza terrestre (<https://mundogeologia.blogspot.com/2017/10/tipos-de-corteza-terrestre.html>). CC BY 4.0

Una *laguna o brecha sísmica* es una zona geográfica donde no ha ocurrido un evento sísmico considerable durante un periodo de tiempo; sin embargo, en el pasado han experimentado sismos de magnitud elevada que a la fecha no se repiten; este periodo de inactividad o *silencio sísmico* incrementa su probabilidad de ocurrencia. Actualmente estas áreas geográficas (ver **Figura 3**) están rodeadas por otras que tienen actividad sísmica reciente. Es, en esencia, un segmento inactivo rodeado de actividad. (Tavera & Bernal, 2005)

Figura 3.

Mapa sísmico del Perú. Periodo: 1690 – 2024



Nota. Fuente Instituto Geofísico del Perú (IGP).

Mencionado lo anterior, a continuación se exponen las siguientes razones que justifican el *porqué* de la presente investigación:

- a. Las estructuras históricas de mampostería, como esta torre, son inherentemente vulnerables a los sismos debido a su rigidez, falta de ductilidad y posibles daños acumulados a lo largo del tiempo. Sin un conocimiento preciso de su comportamiento dinámico actual, cualquier intervención o plan de gestión de riesgos sería ineficaz, poniendo en peligro tanto la estructura como la seguridad de las personas.
- b. Los modelos analíticos (FEA) de estructuras patrimoniales suelen basarse en supuestos sobre las propiedades de los materiales (que pueden variar enormemente en mampostería antigua), el estado de las uniones, y los daños preexistentes. Estos modelos, aunque útiles, rara vez capturan con exactitud el comportamiento real de la estructura en operación. La variabilidad e incertidumbre en las propiedades de los materiales históricos y las condiciones de contorno hacen que un modelo puramente teórico sea insuficiente. Se requiere una validación experimental para calibrar y refinar estos modelos, asegurando que representen fielmente la realidad física de la torre.
- c. Las estructuras patrimoniales exigen métodos de evaluación que sean lo menos invasivos posible para evitar daños adicionales. El Análisis Modal Operacional (OMA) es una técnica no invasiva que permite obtener las propiedades dinámicas (frecuencias naturales, amortiguamientos y formas modales) de la estructura bajo vibraciones ambientales. Esto es crucial porque proporciona información vital

sobre el estado estructural sin comprometer la integridad del monumento, lo que es fundamental para la ética de la conservación y la preservación histórica.

- d. Aunque existen estudios sobre edificaciones patrimoniales, la caracterización dinámica específica de torres exentas coloniales en zonas sísmicas como el Cusco, utilizando técnicas OMA, es un campo con oportunidades de investigación. Estas torres, con su particular geometría esbelta y configuración estructural, presentan desafíos únicos en su respuesta dinámica. Un estudio detallado sobre la torre de Chinchero contribuirá a llenar esta laguna, proporcionando datos empíricos valiosos para futuros proyectos de conservación y reforzamiento en la región

Definidas las justificaciones principales de la presente investigación se describirá la aplicabilidad de esta, respondiendo a la interrogante ¿Para qué?:

- a. Los parámetros dinámicos (frecuencias, modos, amortiguamientos) obtenidos mediante OMA son la base fundamental para el diagnóstico del estado de salud estructural de la torre. Estos datos permitirán identificar posibles debilidades, cambios en la rigidez o masa, o la presencia de daños que podrían no ser visibles a simple vista. Esta información es crucial *para* evaluar la vulnerabilidad sísmica de la torre y desarrollar estrategias de gestión de riesgos más efectivas y realistas ante futuros eventos sísmicos.
- b. Los resultados del OMA servirán *para* calibrar y validar modelos de elementos finitos (FEM) de la torre. Al ajustar las propiedades del modelo numérico para que sus frecuencias y modos coincidan con los obtenidos experimentalmente, se logrará un modelo más preciso y confiable. Un modelo calibrado es esencial para realizar análisis sísmicos avanzados (como análisis no lineales tiempo-historia) y para

simular el efecto de diferentes estrategias de reforzamiento o rehabilitación, optimizando el diseño de intervenciones y asegurando su efectividad.

- c. Con una comprensión profunda del comportamiento dinámico actual y un modelo numérico validado, se *podrán* proponer y evaluar intervenciones de reforzamiento estructural que sean no solo efectivas para mejorar su desempeño sísmico, sino también respetuosas con el valor patrimonial de la torre. Esto significa diseñar soluciones que minimicen la alteración de la estructura original, sean reversibles si es posible, y utilicen materiales compatibles, garantizando la durabilidad y sostenibilidad de la intervención a largo plazo.
- d. Este estudio no solo beneficiará a la torre de Chinchero, sino que también *establecerá* una metodología robusta y *replicable* para la caracterización dinámica de otras estructuras patrimoniales similares en el Cusco y otras regiones sísmicas. Los resultados y la experiencia adquirida en este caso de estudio contribuirán a las mejores prácticas en ingeniería sísmica del patrimonio, sirviendo como referencia para investigadores, ingenieros y conservadores involucrados en la protección de bienes culturales frente a desastres naturales.

3. Planteamiento del Problema de Investigación

3.1. Identificación del Problema

Saber el estado estructural de construcciones históricas es un desafío para la ingeniería civil, especialmente por dos motivos: primero las construcciones antiguas de carácter histórico y patrimonial no usaron normas técnicas para su construcción y por ende se desconoce el comportamiento que podría tener ante fuentes de excitación, en especial los sismos, y lo segundo tiene que ver con los estudios que se requerirían para conocer las propiedades mecánicas de los

materiales y sus condiciones geotécnicas en las que se han edificado, ya que es difícil realizar ensayos con materiales extraídos o realizar estudios geotécnicos en sus alrededores, esto debido a su valor patrimonial. Es por ello por lo que al requerir estudios que no alteren el carácter histórico y patrimonial de estas estructuras, surge el Análisis Modal Operacional (OMA), el cual utiliza fuentes de naturaleza ambiental para estudiar las características dinámicas de las estructuras en estado operacional. En la presente investigación se analizará la “*Torre Exenta del templo colonial Nuestra Señora de Natividad del distrito de Chinchero, provincia de Urubamba, departamento del Cusco*”, instrumentándola con acelerómetros ubicados en puntos estratégicos de acuerdo con un análisis numérico previo. La torre presenta una sección transversal poligonal de cuatro lados tanto exterior como interior, en cuanto a los materiales que la conforman consta: primero; de una base o cimentación de albañilería de piedra, seguida por el cuerpo la cual está constituida por albañilería de adobe; para finalmente cerrar el tope con un techo de madera de cuatro aguas sobre la cual descansan el enchaclado de carrizo, las tejas de arcilla y torta de barro. A lo largo de la historia las estructuras sufren daños a causa de sismos, deterioros a causa del clima, condiciones geomorfológicas, intervenciones humanas, etc., Estas alteraciones las podemos ver en registros fotográficos y a través de los propios pobladores que con la experiencia cuentan y detallan cada cambio de dichas estructuras. Mencionado lo anterior, surge la preocupación de hasta cuándo estas estructuras seguirán en pie, ya que con el pasar de los años vemos cómo sufren alteraciones influenciadas por la intervención irresponsable de los humanos o por fenómenos naturales. Nuestra región al igual que otras albergan una serie de estructuras construidas de albañilería de adobe, piedra, etc., muchas de ellas ubicadas en zonas rurales alejadas de sus principales urbes, la ubicación geográfica quizá sea otro factor importante para tomar en cuenta ya que por muchos años varias de estas torres exentas de sus propias iglesias estuvieron abandonadas y el pasar del

tiempo las estaba deteriorando hasta provocar en muchas de ellas su colapso. Con estos antecedentes las principales entidades encargadas de velar por nuestro patrimonio empezaron a intervenir en la restauración y conservación de ellas, pero a pesar del esfuerzo por parte de los encargados de preservar estas estructuras, nadie puede predecir los fenómenos naturales, en especial, los sismos y terremotos que ocasionaron grandes pérdidas humanas y materiales, las cuales seguirán presentes en nuestra región y surgirán en cualquier momento. Es por ello, que arquitectos, ingenieros y todo especialista relacionado a la preservación del patrimonio unen esfuerzos por brindar propuestas para reforzar y reducir los daños a un mínimo. Para ello, la investigación de nuevas metodologías que brinden resultados que se puedan aplicar a este tipo de estructuras fue y está siendo desarrollada, tal es el caso del Análisis Modal Operacional (OMA), método de caracterización dinámica que se utiliza para supervisar y evaluar intervenciones estructurales, así como para calibrar modelos numéricos de cálculo estructural. El conocimiento humano va evolucionando y con ello nuevas formas de estudio referidas a estas estructuras están siendo desarrolladas y perfeccionadas. Por ello es nuestra obligación proteger, preservar y salvaguardar la integridad de estas estructuras históricas.

3.2. Formulación del Problema Objeto de Investigación

3.2.1. Problema General

¿Cuáles son las propiedades dinámicas de la Torre Exenta de la Iglesia Nuestra Señora de la Natividad de Chinchero, obtenidas mediante la caracterización dinámica empleando análisis modal operacional (OMA)?

3.2.2. Problemas específicos

3.2.2.1 Problema Específico 1:

¿Cuál es el procedimiento a seguir para la generación del modelo 3D que replique el comportamiento real de la torre de Chinchero?

3.2.2.2 Problema Específico 2:

¿Cómo se desarrollará la campaña experimental en campo para obtener las propiedades dinámicas de la torre de Chinchero?

3.2.2.3 Problema Específico 3:

¿Cuáles son los criterios de optimización y métricas de correlación necesarios para la calibración del modelo numérico de la torre de Chinchero?

3.3. Limitaciones y Viabilidad de la Investigación

3.3.1. Limitaciones

- a. La etapa de instrumentación se limitará por el momento a la ubicación de cinco acelerómetros, tomando a tres de ellos como referencia, es decir, su colocación será fija en la estructura y los dos restantes se colocarán en diferentes puntos alrededor de esta, sus ubicaciones serán elegidas de acuerdo con un modelo en elementos finitos previamente modelado y analizado que muestren teóricamente las zonas más vulnerables o de mayor daño.
- b. Falta de excitación de algunos modos de vibración: Esto significa que al no inducir fuentes de excitación forzadas y desconociendo su respuesta espectral y ubicación espacial, algunos modos de vibración no serán bien excitados y por lo tanto pueden no ser identificables.

- c. Incertidumbre estadística: Los errores aleatorios pueden presentarse en menor o mayor grado; estos son: ruido eléctrico, ligeras variaciones en las condiciones de ensayo, efectos medioambientales como la temperatura o viento, etc.

3.3.2. Viabilidad de la Investigación

- a. Para realizar los ensayos experimentales de identificación dinámica se cuenta con disponibilidad de acelerómetros piezoeléctricos y todo el sistema de adquisición de datos.
- b. Se dispone de software especializado para las fases de procesamiento y análisis de datos. Dicho software es Artemis Modal Pro.
- c. Como se trata de una investigación de monumentos históricos, serán necesarias las autorizaciones pertinentes para las diferentes etapas de esta investigación, que van desde cartas dirigidas al arzobispado del Cusco, entidad a cargo de estos templos, pasando por las entidades municipales y finalmente por la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

4. Objetivos de la Investigación

4.1. Objetivo General

El objetivo principal de esta investigación es **determinar** las propiedades dinámicas (frecuencia, modo de vibración y amortiguamiento) de la torre histórica de albañilería mixta (adobe y piedra) de la iglesia Nuestra Señora de la Natividad de Chinchero, mediante el empleo del Análisis Modal Operacional (OMA) y los Ensayos de Vibración Ambiental (AVT). Esta información será utilizada para la generación de diversos modelos tanto experimentales como numéricos (elementos finitos FE) fundamentados en datos provenientes de estudios previos e

información obtenida de la propia torre; dichos datos obtenidos experimentalmente podrán ser utilizados para distintos tipos de análisis estructural de la torre en estudio.

Se utilizará software de elementos finitos (FE) para evaluar diferentes modelos numéricos y valorarlos en relación con los datos AVT adquiridos. Además, se evalúa, debate e implementa en la investigación el uso de escáneres láser 3D con el fin de modelar estructuras históricas.

Se empleará también el uso de software para la generación de modelos experimentales para su comparación con los modelos numéricos.

4.2. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos de la investigación son:

- a. **Crear** el modelo geométrico de la torre con ayuda de la nube de puntos generados por la aplicación de escáneres láser 3D y fotogrametría aérea.
- b. **Ejecutar** los ensayos de vibración ambiental, procesamiento de datos y obtención de resultados.
- c. **Calibrar** los modelos numéricos utilizando el criterio MAC (Criterio de Exactitud Modal).

4.3. Recopilación Histórica

Las fuentes de información histórica respecto a la torre exenta de la iglesia de Nuestra Señora de la Natividad de Chinchero serán:

- a. La Dirección Desconcentrada de Cultura Cusco
- b. Instituto Geofísico del Perú
- c. Municipalidad Distrital de Chinchero
- d. Entrevistas a los pobladores.

5. Formulación de Hipótesis

5.1. *Hipótesis General*

Los parámetros modales (propiedades dinámicas) obtenidos mediante la CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE ESTRUCTURAS EMPLEANDO ANÁLISIS MODAL OPERACIONAL (OMA) son confiables y estarán dentro de los parámetros lógicos para este tipo de estructura.

5.2. *Hipótesis Específicas*

- a. Los modelos numéricos de las estructuras a estudiar serán determinantes para conocer el comportamiento estructural teórico y mostrarán los puntos de mayor incidencia dinámica, los cuales servirán para ser seleccionados como zonas de monitoreo prioritarias.
- b. La ejecución de los ensayos de vibraciones ambientales, procesamiento de datos y obtención de los resultados cumplirá los requerimientos necesarios para el Análisis Modal Operacional aplicado al caso de investigación propuesto.
- c. Los resultados logrados mediante la actualización de los modelos numéricos cumplirán con el Criterio de Exactitud Modal (MAC).

6. Identificación de Variables de Estudio

6.1. *Variables Independientes*

Excitación dinámica ambiental.

6.2. *Variables Dependientes*

Propiedades dinámicas de vibración.

6.3. *Operacionalización de Variables*

Los detalles de la operacionalización de variables se describen en la **Tabla 1**.

Tabla 1.

Operacionalización de variables

Variable		Definición conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala/Unidad	Herramienta
VARIABLE INDEPENDIENTE	Excitación Dinámica Ambiental	Solicitaciones aleatorias de origen natural y antrópico (viento, micro tremores sísmicos, tránsito vehicular) que actúan de forma no controlada sobre la estructura en sus condiciones normales de operación.	Medición continua en el tiempo de la respuesta en aceleración de la torre exenta, generada por las fuerzas ambientales y capturada mediante instrumentación en puntos estratégicos.	➤ Respuesta en Aceleración Ambiental	➤ Nivel aceleración ambiental (a_t) ➤ Espectro amplitud vibración	➤ Razón ➤ m/s^2 o g	➤ Acelerómetros de alta sensibilidad ➤ Sistema de Adquisición de Datos (DAQ)
				➤ Procesamiento de Señales Dinámicas	➤ Densidad Espectral Potencia (PSD) ➤ Métodos de identificación modal (FDD/SSI)	➤ Razón ➤ $m/s^2/\sqrt{Hz}$ (Adimensional)	➤ ARTeMIS Modal PRO
VARIABLE DEPENDIENTE	Propiedades Dinámicas de Vibración	Conjunto de propiedades modales intrínsecas (frecuencias de resonancia, razones de amortiguamiento y formas modales) que caracterizan la respuesta y el comportamiento estructural.	Valores cuantitativos y geométricos obtenidos experimentalmente mediante Análisis Modal Operacional (OMA) a partir del procesamiento de las señales de aceleración registradas en la torre.	❖ Frecuencias naturales	❖ Frecuencias de resonancia (f_i)	❖ Hz	❖ ARTEMIS Modal PRO
				❖ Factores de amortiguación	❖ Ratio de amortiguamiento crítico (ξ)	❖ Porcentaje (%)	❖ ARTEMIS Modal PRO
				❖ Formas modales	❖ Modos de vibración (flexionales, torsionales y axiales)	❖ Vectores modales	❖ ARTEMIS Modal PRO ❖ Excel/MATLAB

Nota. Elaboración propia.

7. Metodología de Investigación

7.1. Enfoque de la Investigación

La presente investigación es de tipo cuantitativa, porque esta se basa en la recolección de datos como; la medición de vibraciones ambientales y en estado de operación de la estructura en estudio. Esto con la finalidad de establecer una comparación de las propiedades dinámicas del modelo experimental y el modelo numérico. Todo ello siguiendo un conjunto de procesos establecidos en el ítem 6.

7.2. Alcance de la Investigación

El alcance de esta investigación es explicativo, según Hernández et al., (2014) “una investigación de carácter explicativo está dirigido a responder por las causas de los eventos y fenómenos físicos, además se enfoca en explicar por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se manifiesta, o por qué se relacionan dos o más variables”.

Para nuestro caso como las vibraciones ambientales afectan la respuesta dinámica de la estructura (caso de la torre exenta del templo de Nuestra Señora de la natividad de Chinchero) a través de sus características dinámicas.

7.3. Diseño de la Investigación

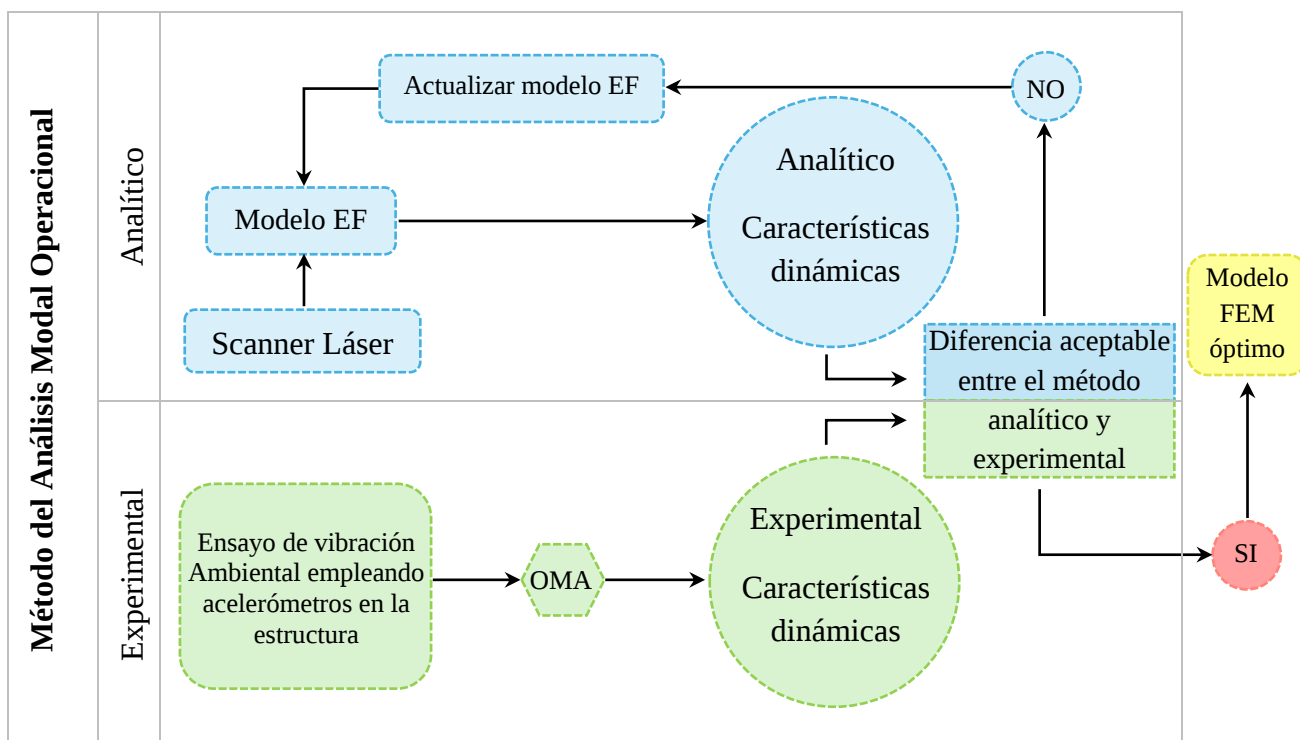
El diseño aplicado en esta investigación es de tipo No Experimental. Según Hernández et al., (2014) el diseño No Experimental es “un estudio que se realiza sin la manipulación deliberada de variables y en los que solo se observa los fenómenos en su ambiente natural para analizarlos” (pág. 152).

8. Procedimiento de la tesis

La **Figura 4** presenta un diagrama de flujo que representa la metodología que se empleará para abordar esta tesis, mediante la aplicación de los ensayos de vibración ambiental (AVT), el análisis modal operacional (OMA), la generación de modelos numéricos (FE) y experimentales.

Figura 4.

Diagrama de flujo - Procedimiento de tesis



Nota. Elaboración propia.

La tesis se divide en cuatro etapas principales, tal como se ilustra en el diagrama anterior, y las cuales se describen a continuación:

I. Modelo de elementos finitos – escáner láser

Se procede a la elaboración de un modelo FEM, en el que se extraen las características dinámicas de la torre. Para lograr una geometría precisa de la torre, se implementan escáneres láser 3D en su cartografía.

II. Ensayos de vibración ambiental

Para determinar las características dinámicas de la torre en condiciones normales de funcionamiento diario, se emplearon acelerómetros y velocímetros en los ensayos de vibración ambiental (AVT).

III. Comparación de los resultados analíticos y experimentales.

En esta etapa, se procede a la comparación y evaluación de los datos analíticos y experimentales obtenidos a partir del modelo FEM y el AVT, respectivamente.

IV. Actualización del modelo FEM.

En este punto, se procede a la comparación y evaluación de las distinciones entre los datos analíticos y los datos experimentales. En caso de que la precisión deseada (MAC) no se alcance, el modelo FE se actualiza manualmente o mediante métodos automáticos. El procedimiento se ejecuta desde el punto (III) tantas veces como se requiera hasta que se logre la aproximación deseada y el modelo sea ideal.

9. Estructura de la Tesis.

La tesis actual está compuesta por siete capítulos y anexos. A continuación, se presenta una breve descripción de cada capítulo:

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

El primer capítulo describe una introducción general de la tesis. Se desarrollan la justificación de la presente investigación, el planteamiento del problema, objetivos, hipótesis, la metodología de la investigación, identificación de variables y la metodología de investigación. Para finalizar esta sección, se explica el procedimiento y la estructura de la tesis.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

En el segundo capítulo se exponen los aspectos teóricos fundamentales y conceptos claves de términos relacionados con esta investigación. Para una mejor comprensión se desarrollarán temas relacionados con el modelamiento geométrico y numérico, añadidos a esto, conceptos de análisis numérico y dinámica estructural. Se desarrollará el análisis modal operacional. Así mismo, el procesamiento de señales y la extracción de los parámetros modales serán desarrollados. Complementariamente, se abordarán aspectos teóricos relacionados a la actualización de modelos de elementos finitos, conceptos relacionados con el efecto de resonancia. Para finalizar se presentan antecedentes internacionales y nacionales.

CAPÍTULO III: CASO DE ESTUDIO

En el tercer capítulo de esta tesis, se presenta una perspectiva general del objeto de estudio que constituye la base de la investigación. Se incluye información de referencia sobre la torre; como un resumen histórico, su localización, su composición y las propiedades mecánicas iniciales o de referencia, toda esta información contribuye a un entendimiento más profundo del objeto de estudio.

CAPÍTULO IV: MODELAMIENTO GEOMÉTRICO Y NUMÉRICO

En este capítulo se aborda el procedimiento para levantamiento geométrico de la torre. Desarrollaremos la metodología empleada durante la fase de escaneo láser 3D y mapeo (fotogrametría) de la torre, con el propósito de obtener un modelo tridimensional de la torre y su entorno. Se proporciona las bases para su modelización y el procedimiento de transformación de la información proveniente de la nube de puntos para el modelamiento 3D.

Consecuentemente se desarrolla el modelo numérico con el fin de realizar la evaluación estructural numérica. Este proceso consiste en tomar el modelo geométrico y convertirlo en un

modelo numérico para el análisis por elementos finitos. Se presenta el modelo discretizado final, acompañado de los resultados de la evaluación modal inicial realizado en el modelo numérico, así como el análisis gravitacional para su verificación.

CAPÍTULO V: PRUEBAS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL

En este capítulo se presenta la fundamentación teórica del AVT, centrándose en la torre como elemento central de análisis. En esta sección se aborda la descripción y explicación del procedimiento, así como los resultados obtenidos. El capítulo aborda la estrategia implementada para la realización de las pruebas, así como los fundamentos teóricos bajo los cuales se tomaron las decisiones en relación con el número de sensores empleados y su localización, asimismo, el tiempo de lectura para cada configuración.

CAPÍTULO VI: CALIBRACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

En este capítulo, se hace uso de los elementos conceptuales expuestos previamente en los capítulos anteriores para abordar la descripción del procedimiento de calibración del modelo de elementos finitos (FEM) y el método empleado. Finalmente, se exponen los hallazgos del análisis modal para los modelos calibrados. Adicional a ello se presenta el estudio realizado para obtener la frecuencia fundamental del suelo a través del método de Nakamura para luego compararlo con las frecuencias de la torre.

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este apartado se discuten y desarrollan los siguientes temas: resultados de la investigación, se analizan y discuten los mismos para luego desarrollar las conclusiones y recomendaciones.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

10. Antecedentes de la Investigación

En este apartado se presenta una revisión de las aplicaciones de OMA relacionadas a estructuras similares como antecedentes (Nacionales e internacionales). El objetivo es mostrar las consideraciones tanto teóricas como prácticas, una visión general de la forma de proceder, englobando: el tipo y número de acelerómetros empleados, el número de medidas a realizar, los métodos de identificación modal empleados, los resultados obtenidos. También se recoge la finalidad por la que OMA es aplicado, así como la utilización o no de los resultados para validar modelos de elementos finitos.

10.1. Antecedentes Internacionales

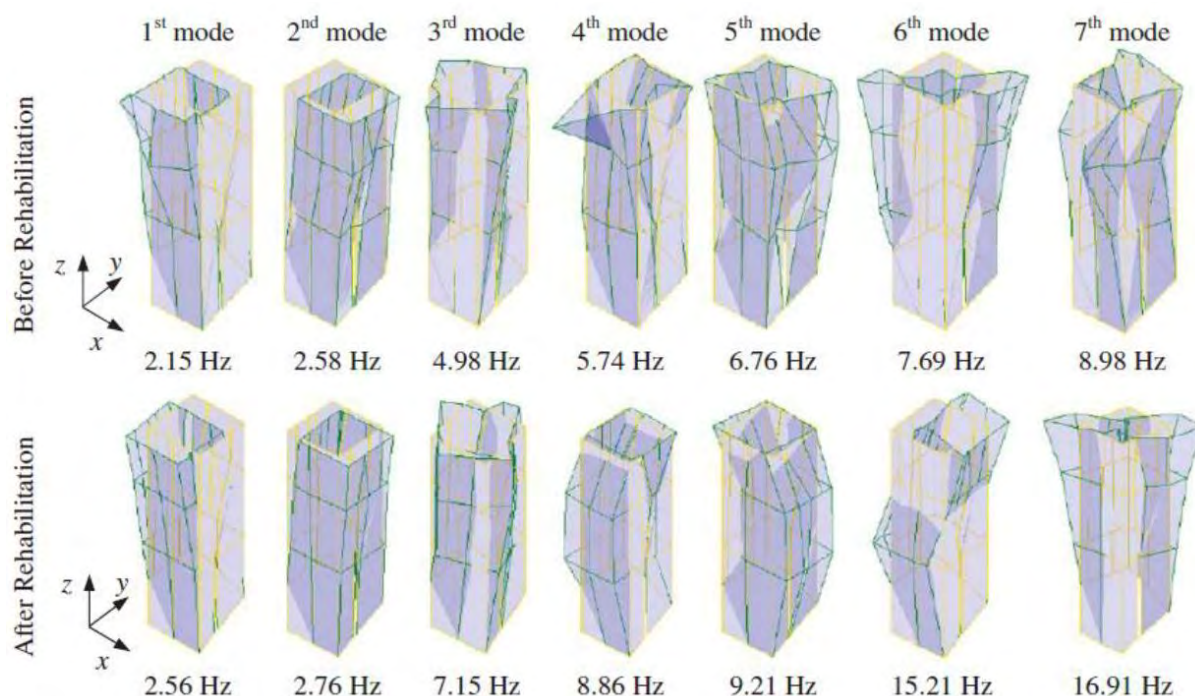
Torre del reloj de Mogadouro. Portugal (L.F. Ramos et al., (2010))

En la torre del reloj de Mogadouro, se llevó a cabo la técnica de OMA, la estructura construida en 1559 tiene una sección transversal de 4.7 x 4.5 m² y una altura de 20.4 m. la torre presentaba daños severos (2004) que posteriormente se intervinieron (2005). Se realizaron dos campañas de ensayos dinámicos de identificación modal antes y después de las intervenciones. El equipo de medida estaba compuesto por 4 acelerómetros piezoeléctricos uniaxiales, conectados a un sistema de adquisición de datos con un ADC de 24 – bits. Se midieron 24 puntos (11 medidas) con dos acelerómetros de referencia. El tiempo total de cada configuración fue de 10 minutos y 40 segundos.

En lo que se refiere al tratamiento de los datos, se utilizó el método de identificación subespacio estocástico (SSI) para estimar los principales parámetros modales. A partir del incremento detectado en las frecuencias naturales de la estructura (**Figura 5**), se estimó un aumento de la rigidez estructural, concluyéndose así la eficacia de las labores realizadas.

Figura 5.

Modos de vibración antes y después de las labores de rehabilitación



Nota. Tomado de Pachón García (2016, pág. 42).

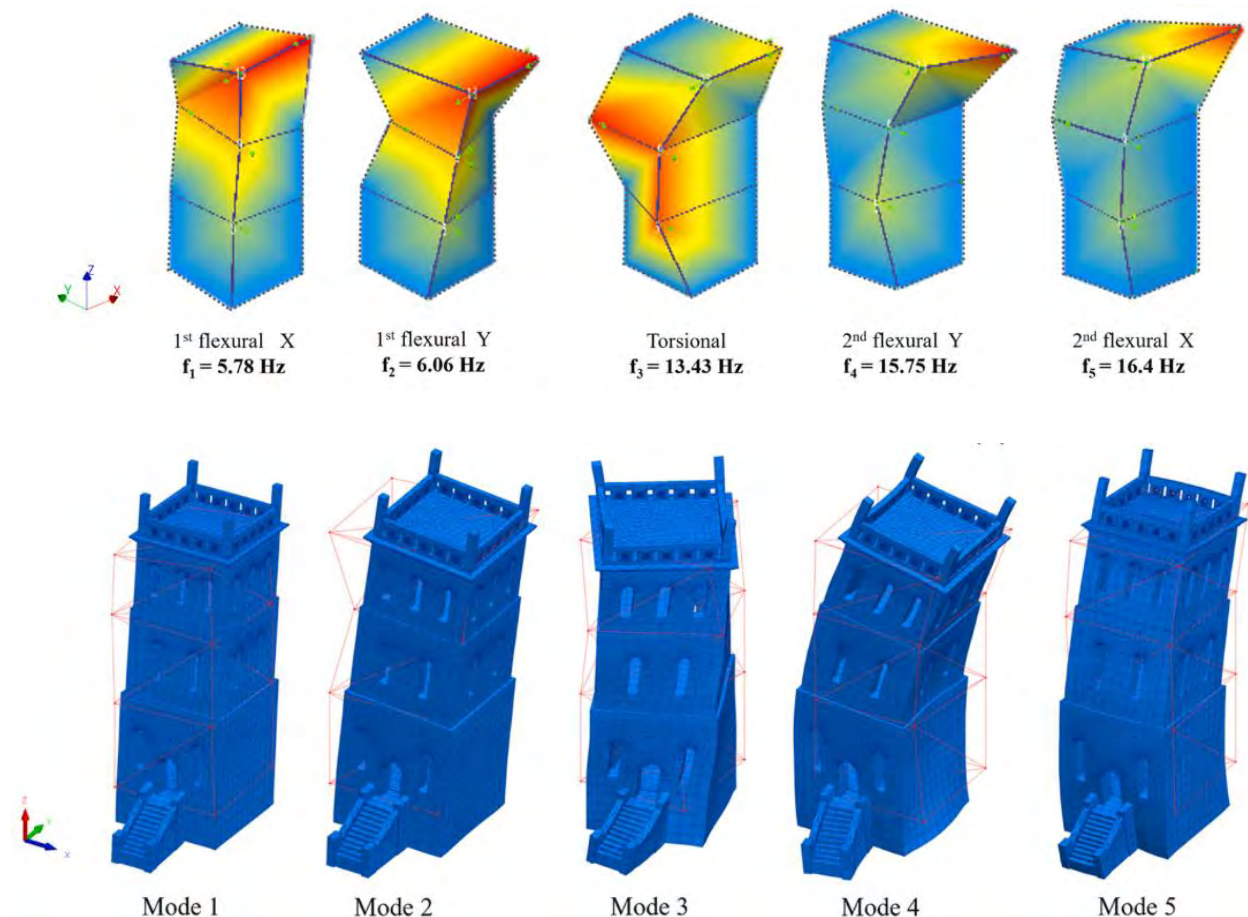
Actualización del modelo de una torre de mampostería basada en el análisis modal operativo: el papel de la interacción suelo-estructura. (Shabani, Feyzabadi, & Mahdi, 2022)

En el presente trabajo se aplicó el análisis modal a la torre Tønsberg en Noruega construida en el año de 1888. Edificada con albañilería de piedra (rocas ígneas noruegas) tiene una altura de 21 m y sección variable de tres cuerpos. Para el ensayo de vibración ambiental se emplearon 7 acelerómetros digitales triaxiales de la marca Unquake con una frecuencia de muestreo de 250 Hz, el tiempo de medición fue de 180 minutos. Se realizaron dos campañas una por día, en la primera campaña se midieron 7 puntos y en la segunda 6 puntos. Para el tratamiento de datos y posterior análisis para la obtención de las propiedades dinámicas se utilizó los métodos de identificación en el dominio de la frecuencia. El objetivo de esta investigación era la actualización del modelo numérico. Se identificó 5 modos (2 en traslación, una torsión y dos de flexión) (ver **Figura 6**) . Se

modelaron tres escenarios respecto a la interacción de la torre con el suelo: la primera consideración fue la de considerar el empotramiento de la base, el segundo caso se consideró resortes bajo la torre, según (Shabani, Feyzabadi, & Mahdi, 2022) el método de Winkler, “los resortes presentan rigidez en tres direcciones para soportar las rigideces normales y de corte”, y por último se consideró un modelo considerando el efecto de la interacción suelo – estructura de la torre y el suelo de fundación. Este último tuvo mejores resultados al momento del proceso de calibración. Se emplearon análisis de sensibilidad, efectos de resonancia y análisis dinámicos para los tres escenarios.

Figura 6.

Frecuencias y modos obtenidos mediante OMA vs modelo numérico calibrado



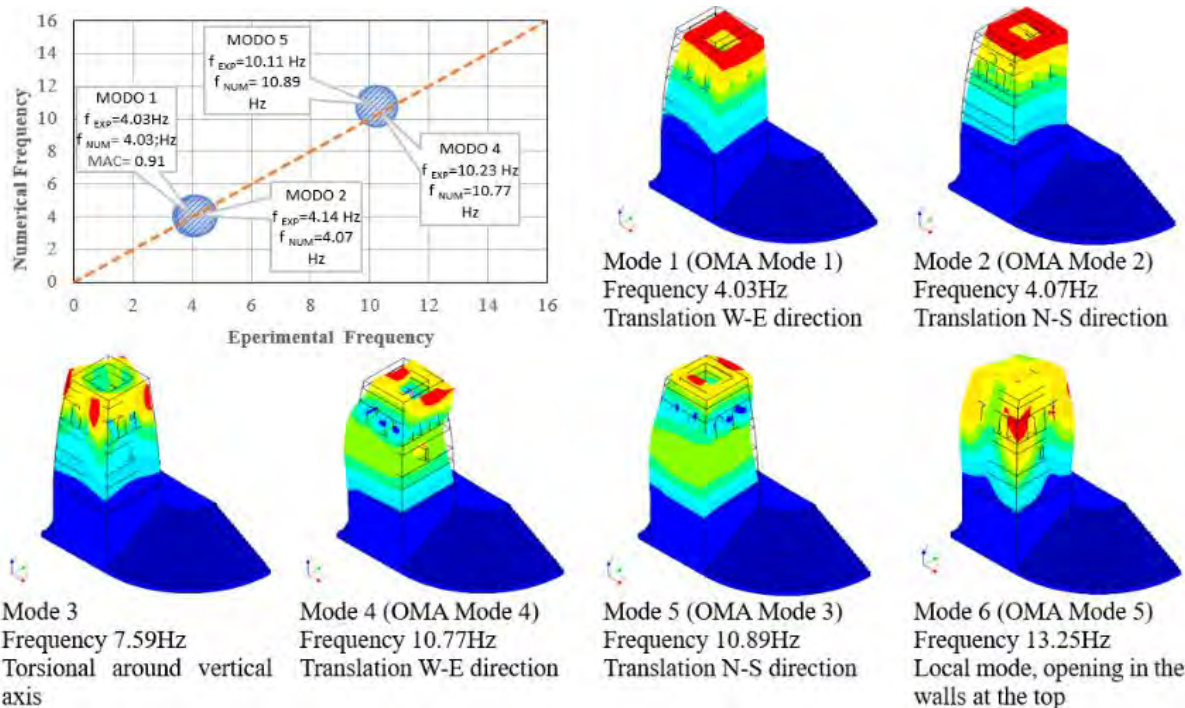
Nota. Fuente (Shabani, Feyzabadi, & Mahdi, 2022).

10.2. Antecedentes Nacionales

Análisis sísmico de un campanario independiente de adobe en el centro histórico de Cuzco (Perú): ensayos de vibración ambiental, calibración del modelo y evaluación de la capacidad sísmica (Montesinos et al., (2025))

Una torre exenta representativa y de las primeras en aplicarse el análisis modal operacional fue la torre exenta de la iglesia de Santa Ana. La estructura de 18 metros desde su base hasta la cumbre y con sección transversal variable en altura, y su ubicación estratégica fueron puntos clave para elegirla objeto de estudio. Edificada con una base de albañilería de piedra y cuerpo de albañilería de adobe. Se realizaron tres mediciones en distintos años (2019, 2024 y 2025). Una particularidad de esta torre fue la fuente de excitación que recibe (tránsito vehicular elevado), esto ayudo con notoriedad a la identificación de las propiedades dinámicas de la torre (ver **Figura 7**). **Figura 7.**

Comparación de los modos experimentales y numéricos a través de los valores MAC, y las formas de modo



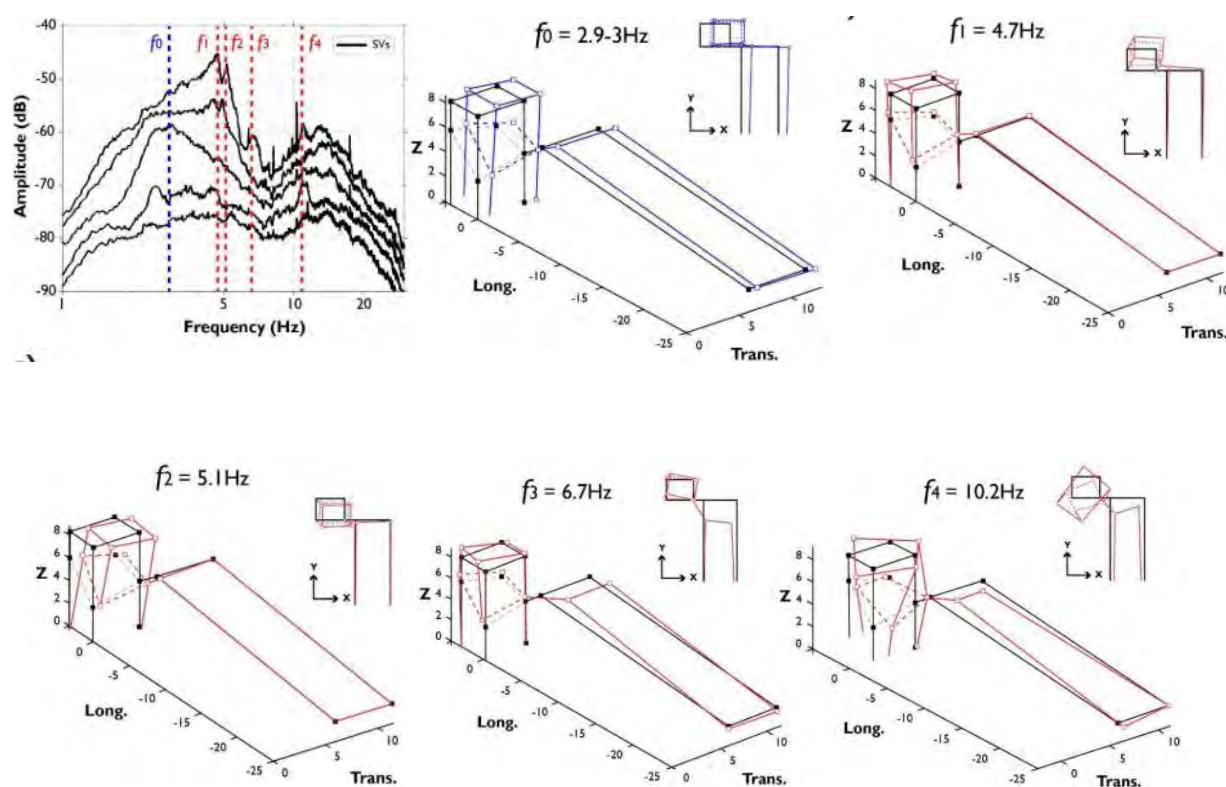
Nota. Fuente (Montesinos, Mercerat, Rojas, Alferez, & Combey, 2025).

Monitorización sísmica continua de una iglesia colonial en Cusco, Perú: revelación de una notable interacción suelo-estructura y de una dinámica no lineal. (Combey & Mercerat, 2024)

En este artículo se muestra los resultados de la monitorización realizada en la iglesia de San Cristóbal y paralelamente en la torre. Para la caracterización dinámica de la torre su interacción con parte de la iglesia, se usaron seis sismómetros de banda corta Lennartz Le-3Dlite MkIII (1-100 Hz) conectados a un registrador de datos CityShark de Keas. Se realizó 16 mediciones en tres configuraciones diferentes, cada una de ellas con una duración de 40 minutos y una frecuencia de muestreo de 200 Hz. Los resultados de dicha investigación se muestran en la **Figura 8**.

Figura 8.

Modos identificados en la torre de la iglesia de San Cristobal



Nota. Fuente (Combey & Mercerat, 2024).

11. Bases Teóricas

11.1. Modelamiento Geométrico

Con el propósito de llevar a cabo el análisis modal operacional exitoso de una estructura un paso importante es la generación de modelos CAD/BIM (modelos estáticos) o gemelos digitales (modelos dinámicos) que representen el objeto físico a estudiar. Esta representación puede ser muy básica simplificando muchas características de la estructura o muy compleja generando hasta el más mínimo detalle del objeto. Para ello existe una variedad de procedimientos que van desde una simple observación para su representación a la aplicación de equipos de alta precisión milimétrica.

Entre los procedimientos para la generación de modelos 3D podemos encontrar:

❖ **Levantamiento manual:** la generación parte de mediciones realizadas en campo usando instrumentos como cintas métricas, distanciómetros etc., y llevando un apunte de todas las medidas realizadas realizando un bosquejo en una libreta. Una vez culminada esta etapa, se emplea un programa CAD para la generación de los modelos a partir de los apuntes.

❖ **Levantamiento por fotogrametría:** el modelo tridimensional se genera a partir de fotografías 2D, dichas fotos pueden ser tomadas por drones para objetos de tamaño considerable o cámaras para entidades pequeñas. Las etapas de este procedimiento son los siguientes:

- a. Tomas múltiples fotos de un objeto (un edificio, un terreno) desde diferentes ángulos.
- b. Las fotos deben tener *solape* (superposición) entre ellas.
- c. Un software identifica "puntos clave" que aparecen en varias fotos a la vez.
- d. Mediante triangulación matemática, el software calcula la posición exacta (X, Y, Z) de cada píxel en el espacio, creando una *Nube de Puntos*.

❖ **Levantamiento por lasergrametría:** esta técnica de generación 3D utiliza un haz de luz láser para medir directamente la distancia entre el sensor y millones de puntos en la superficie de

un objeto (ver **Figura 9**). El resultado es una *Nube de Puntos* densa y extremadamente precisa (con coordenadas X, Y, Z) que representa la geometría exacta del objeto escaneado. Las fases de este procedimiento son los siguientes:

- a. El escáner emite un pulso láser.
- b. El láser rebota en la pared, columna o estatua.
- c. El sensor capta el retorno.
- d. Calcula la distancia basándose en el "Tiempo de Vuelo" (cuánto tardó en ir y volver la luz) o en el desfase de onda. Esto se repite millones de veces por segundo mientras el aparato gira.

(My Digital Buildings, n.d.) una empresa francesa define el termino lasergrametría como: “Técnica que utiliza sensores LiDAR y radiación láser para escanear un área y generar una nube de puntos 3D”, este proceso lásergramétrico se divide de la siguiente manera:

- ☐ Los sensores LiDAR colocados en el escáner emiten un haz de luz que escanea el área horizontal y verticalmente hasta que encuentran obstáculos (suelo, pared, muebles, máquinas, etc.).
- ☐ Luego se mide la distancia a cada obstáculo y se coloca un punto en el espacio.

La repetición de este procedimiento de escaneo posibilita la recolección de muestras del entorno, mediante la colocación de un punto en cada sitio donde haya un obstáculo, con el objetivo de formar una nube completa de puntos.

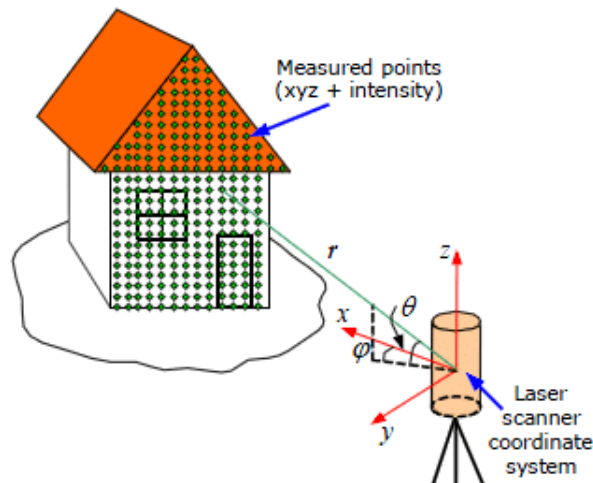
El flujo del proceso para generar un modelo 3D a partir del levantamiento lásergramétrico se muestra en la **Figura 10**.

Ecuación 1.*Cálculo de coordenadas analíticas*

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \cos \varphi \cos \theta \\ r \sin \varphi \cos \theta \\ r \cos \theta \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} x, y, z = \text{Coordenadas} \\ \theta, \varphi = \text{Ángulos ortogonales} \end{array} \quad (1)$$

Ecuación 2.*Cálculo del rango de disparo*

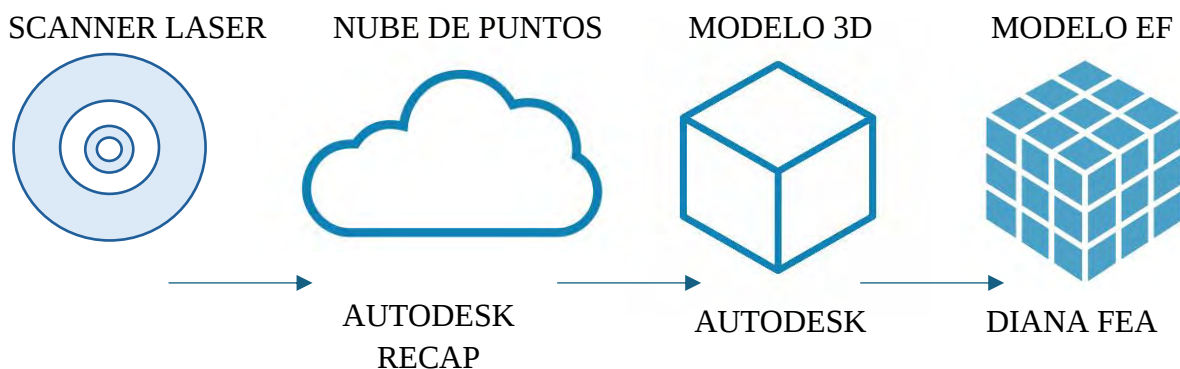
$$r = \frac{ct}{2} \quad \begin{bmatrix} r \\ c \\ t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Rango} \\ \text{Velocidad de la luz en el aire} \\ \text{El tiempo de recorrido bidireccional del impulso láser} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Figura 9.*Representación gráfica de Lasergrametría**Nota.* Tomado de (RESHETYUK, 2009).

La **Ecuación 1** y **Ecuación 2**, nos muestran la interpretación matemática del proceso de levantamiento mediante la lasergrametría, es necesario conocer estas ecuaciones para poder plantear las modificaciones necesarias durante el trabajo en campo, ya que estas relaciones de coordenadas y ángulos nos permiten ejecutar mejores procesos de levantamiento.

Figura 10.

Flujo de modelamiento geométrico



Nota. Elaboración propia. Adaptado de (Ademi, 2020).

12. Modelamiento Numérico

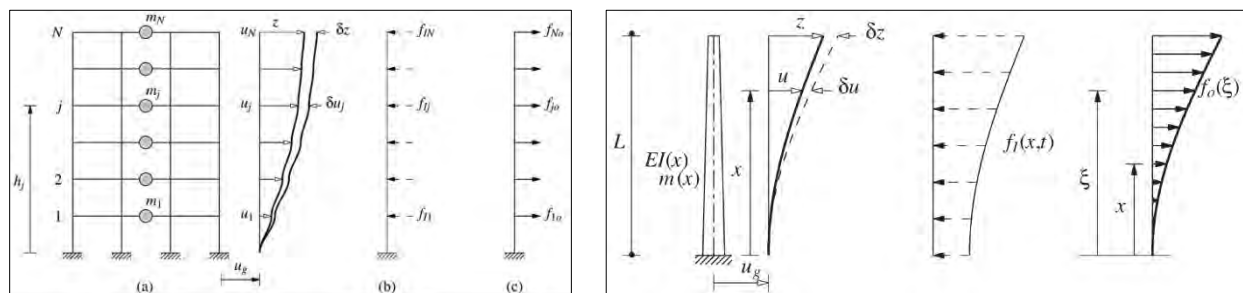
12.1. Método de Elementos Finitos (FEM)

El método de los elementos finitos (FEM) es un término acuñado en 1960 por el profesor Ray Clough en su artículo “The Finite Element Method in Plane Stress Analysis”.

En esencia, el método de elementos finitos es una técnica de discretización, que encuentra la solución a un problema complejo sustituyéndolo por otro más sencillo, por lo que la solución obtenida será aproximada en lugar de ser exacta, esta posición combina ciertas características de los procedimientos de masa concentrada y de coordenadas generalizadas (ver **Figura 11**).

Figura 11.

Sistema de masa concentrada (izq) y masa distribuida con elasticidad (dcha)



Nota. Fuente Chopra (2012, pág. 324 & 311).

El método de elementos finitos se puede aplicar a estructuras de todo tipo: desde conjuntos de elementos unidimensionales (vigas, columnas, etc.); estructuras tipo placas, membranas y cáscara), compuestas por elementos bidimensionales, y sólidos tridimensionales generales.

Al aplicar este enfoque se toma las siguientes hipótesis:

- a. La estructura analizada se segmenta mediante líneas, superficies o sólidos, normalizadas, contiguas y disjuntas, denominadas elementos finitos.
- b. Los elementos finitos se hallan interconectados por un número finito de puntos, denominados nodos.
- c. Los desplazamientos articulares $\{\delta\}$ son los valores desconocidos básicos del problema. Estos definen la manera en que la estructura se deforma, siendo los únicos independientes.
- d. El desplazamiento de cualquier junta se determina de forma unívoca para los desplazamientos de las juntas del elemento al que pertenece la junta. Para ello, cada elemento cuenta con un modelo de interpolación predefinido, a partir del cual es posible calcular el desplazamiento de cualquier junta interior mediante la interpolación de los desplazamientos de las juntas.
- e. Los desplazamientos articulares y los modelos de interpolación definen de manera inequívoca el estado de deformación $\{\delta\}$ dentro del elemento. Este último define el estado de tensión $\{\sigma\}$ en el elemento y su contorno a través de las ecuaciones constitutivas.
- f. Para cada elemento, hay un sistema de fuerzas concentradas en las intersecciones que contrarresta las tensiones presentes en el límite del elemento y las fuerzas externas que lo afectan. Es importante tomar en cuenta este punto al momento del análisis de los resultados, puesto que una correcta interpretación de estos nos permitirá realizar conclusiones lógicas con el análisis y el tipo de estructura analizada.

12.1.1. Elemento Finito

Según (Clough R. W., 1960) define el termino de elemento finito como una discretización del medio continuo (solido) en elementos de tamaño finito.

En palabras simples, se divide el objeto en partes *pequeñas y simples* (triángulos, cuadrados, tetraedros, etc.), la conexión de estos elementos en puntos específicos se denominan *nodos*, se calcula el comportamiento de cada elemento individualmente para finalmente *ensamblar* todas las respuestas individuales para predecir el comportamiento de la *estructura completa*.

13. Análisis Numérico

13.1. Análisis Estructural

Según (Kassimali, 2015) el análisis estructural es la predicción del desempeño de una estructura ante las solicitaciones prescritas y/o efectos externos, tales como movimientos en los apoyos y cambios de temperatura. La ingeniería estructural es la ciencia y el arte de concebir, planificar y construir estructuras funcionales que sean eficientes y seguras.

Para estructuras de carácter histórico a lo citado anteriormente (Meli, 1998) añade los procedimientos de inspección de las propiedades de los materiales, el diagnóstico del estado de la estructura, el monitoreo del comportamiento, y la evaluación de las técnicas para corregir deficiencias y restablecer las condiciones adecuadas de comportamiento.

14. Dinámica Estructural

14.1. Análisis Dinámico Estructural

Las estructuras están sometidas a todo tipo de fuerzas externas e internas, estáticas o dinámicas; que al considerarlas durante un análisis dan origen a esfuerzos y deformaciones. Las zonas vulnerables o daños estructurales son el fiel reflejo de estas magnitudes. Si bien podemos

controlar unas más que otras, las cargas dinámicas por su origen arbitrario establecen lineamientos y métodos más rigurosos para entender mejor el efecto que puedan causar en la estructura a estudiar.

No obstante, resulta útil diferenciar entre los elementos estáticos y dinámicos de la carga aplicada al analizar una estructura lineal para evaluar la respuesta a cada tipo de carga por separado y luego combinar ambas en una sola.

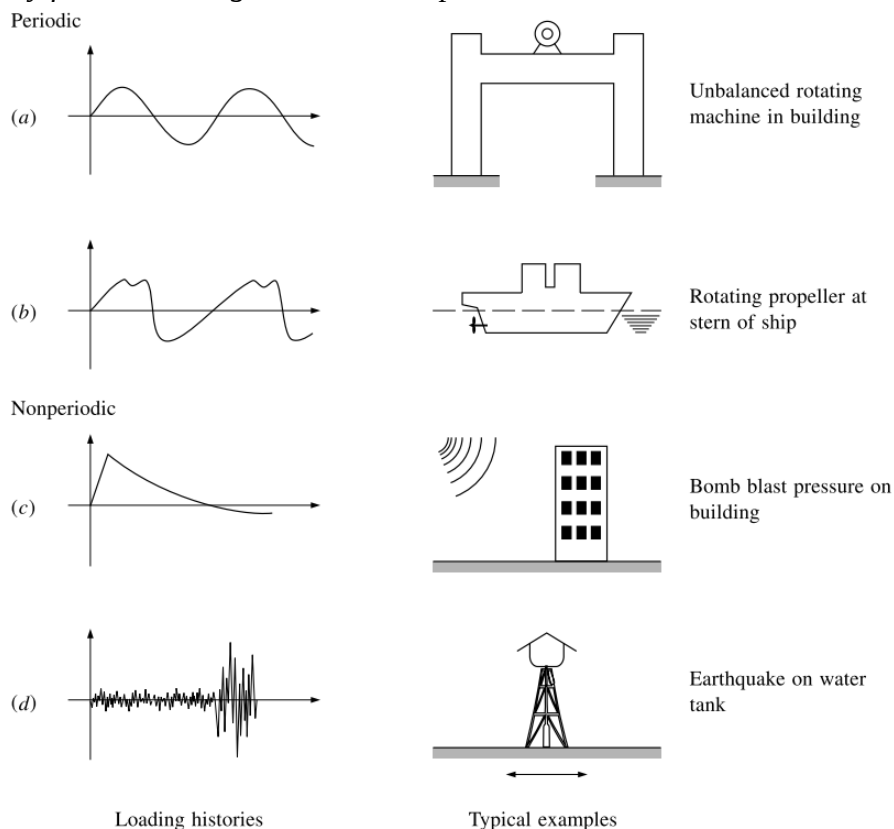
“Hablar de dinámica en una estructura es sinónimo de tiempo, en este sentido una carga dinámica es cualquier carga que, en magnitud, dirección y/o posición varia con el tiempo, por ende, las deformaciones y esfuerzos también varían con el tiempo” .

Para evaluar la respuesta estructural ante cargas dinámicas existen dos enfoques básicamente diferentes: el determinista y el no determinista.

Determinísticas: la variación temporal de la carga es totalmente conocida a pesar de que su irregularidad o gran oscilación. A estas cargas también se les denomina prescritas.

No determinísticas: la variación temporal de la carga no es completamente conocida, pero puede ser definido de manera estadística. A estas cargas también se les denomina aleatorias. Generalmente, la respuesta estructural de una carga dinámica se describe en términos de "*desplazamientos*". Consecuentemente, en una fase subsiguiente del análisis se consiguen otras magnitudes de respuesta relacionadas, como fuerzas internas, tensiones, deformaciones y más.

En este contexto existen numerosos tipos de análisis dinámico estructural desde análisis dinámico-sencillos como el Modal hasta los más complejos como tiempo – historia, mientras que los primeros solo necesitan la masa y rigidez de la estructura plasmada en el modelo numérico a través de las propiedades mecánicas de los materiales, el segundo grupo necesita además de lo mencionado registros de sismos ocurridos, los cuales se emplean durante el análisis elegido. Antes de elegir el tipo de análisis a realizar es necesario conocer el objetivo de nuestra investigación.

Figura 12.*Características y fuentes de cargas dinámicas típicas*

Nota. (a) armónicas simples; (b) complejas; (c) impulsivas; (d) de larga duración. Fuente: Clough & Penzien (2003, pág. 3).

Las estructuras a lo largo de su vida útil están sujetos a experimentar una diversidad de cargas dinámicas. Desde una perspectiva analítica, resulta pertinente clasificar las cargas determinísticas en dos categorías fundamentales: periódicas y no periódicas (ver **Figura 12**).

Una carga periódica exhibe la misma oscilación temporal repetidamente a lo largo de una serie extensa de ciclos; claros ejemplos son: vibraciones producidas por maquinarias o producidos por motores de equipos. Las cargas de naturaleza no periódica pueden ser impulsivas, de corta duración o generalizadas, de larga duración; como ejemplos podemos citar los siguientes casos: la detonación de explosivos o los producidos por sismos.

14.2. Características Esenciales de un Problema Dinámico

Para Clough & Penzien (2003) resolver un problema de carácter dinámico a diferencia de uno estático estructural, requiere tomar en cuenta dos aspectos muy importantes propios del primer grupo (dinámico). La primera diferencia por definición es su “*naturaleza variable en el tiempo*”, debido a que tanto la carga como la respuesta cambian con el paso del tiempo. La segunda y más fundamental distinción entre problemas estáticos y dinámicos es “*la fuerza inercial*” la cual resiste las aceleraciones de la estructura. Así, estas fuerzas constituyen la característica principal que distingue un problema de dinámica estructural. [*traducción propia*].

Según Paz & Hoon Kim (2018) para el diseño y análisis de estructuras que puedan soportar los efectos generados por movimientos o fuerzas dependientes del tiempo, se necesita idealizaciones conceptuales y suposiciones que faciliten la simplificación del sistema físico. Este sistema es representado a través de un modelo analítico o matemático, conocido como modelo idealizado. Estas idealizaciones o supuestas simplificaciones pueden ser categorizadas en tres grupos (Paz & Hoon Kim, 2018):

Suposiciones geométricas: El modelamiento, análisis y diseño de estructuras físicas en entornos digitales nos otorga la posibilidad de un infinito número de combinaciones o casos de análisis que podemos realizar, es así como podemos establecer ciertas conjeturas.

Suposiciones de cargas: Algunas hipótesis generales de carga implican la consideración de fuerzas concentradas aplicadas en un punto geométrico, la suposición de una aplicación repentina de las fuerzas o la premisa de que las fuerzas externas son invariables o cíclicas.

Suposiciones de los materiales: Estas simplificaciones o hipótesis abarcan características de los materiales, como la isotropía o la homogeneidad, así como comportamientos de dichos materiales, como la elasticidad o la linealidad.

Grados de Libertad

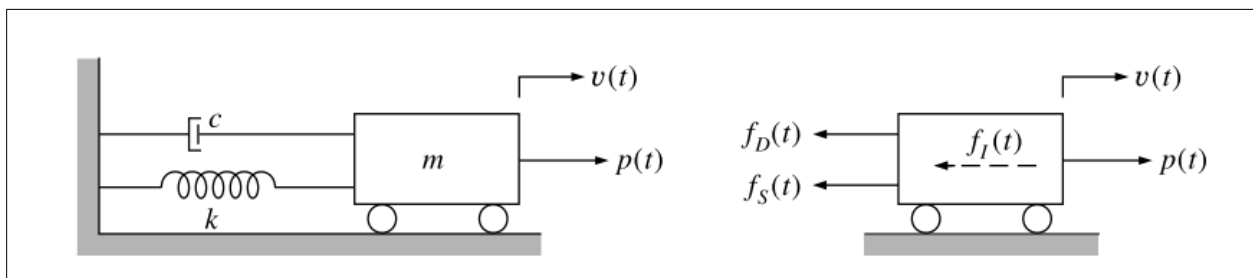
Según Paz & Hoon Kim (2018) el número de grados de libertad es el término que se usa para referirse a la cantidad de coordenadas independientes requeridas para determinar la posición o configuración de un sistema en cualquier instante, según la dinámica estructural. En términos generales, una estructura continua cuenta con una cantidad infinita de grados de libertad. No obstante, el procedimiento de idealización o elección de un modelo matemático adecuado posibilita disminuir a una cantidad discreta de grados de libertad.

Componentes del sistema dinámico básico

Clough & Penzien (2003) mencionan que las propiedades físicas esenciales de cualquier sistema estructural o mecánico linealmente elástico sometido a una fuente externa de excitación o carga dinámica son su masa, sus propiedades elásticas (flexibilidad o rigidez) y el mecanismo de pérdida de energía o amortiguamiento (p. 15). La **Figura 13** ilustra el concepto antes mencionado.

Figura 13.

Sistema de un grado de libertad idealizado



Nota. (Izquierda) componentes básicos; (Derecha) fuerzas en equilibrio. Fuente: (Clough & Penzien, 2003).

Ecuación 3.

Ecuación de movimiento de un sistema dinámico básico

$$f_I(t) + f_D(t) + f_S(t) = p(t) \quad (3)$$

Como se muestra en la **Ecuación 3**, las fuerzas que actúan en la dirección de la libertad de desplazamiento $v(t)$ son la carga aplicada $p(t)$ y las tres fuerzas de resistencia resultantes del movimiento, es decir, la fuerza de inercia $f_I(t)$, la fuerza de amortiguación $f_D(t)$ y la fuerza elástica $f_s(t)$.

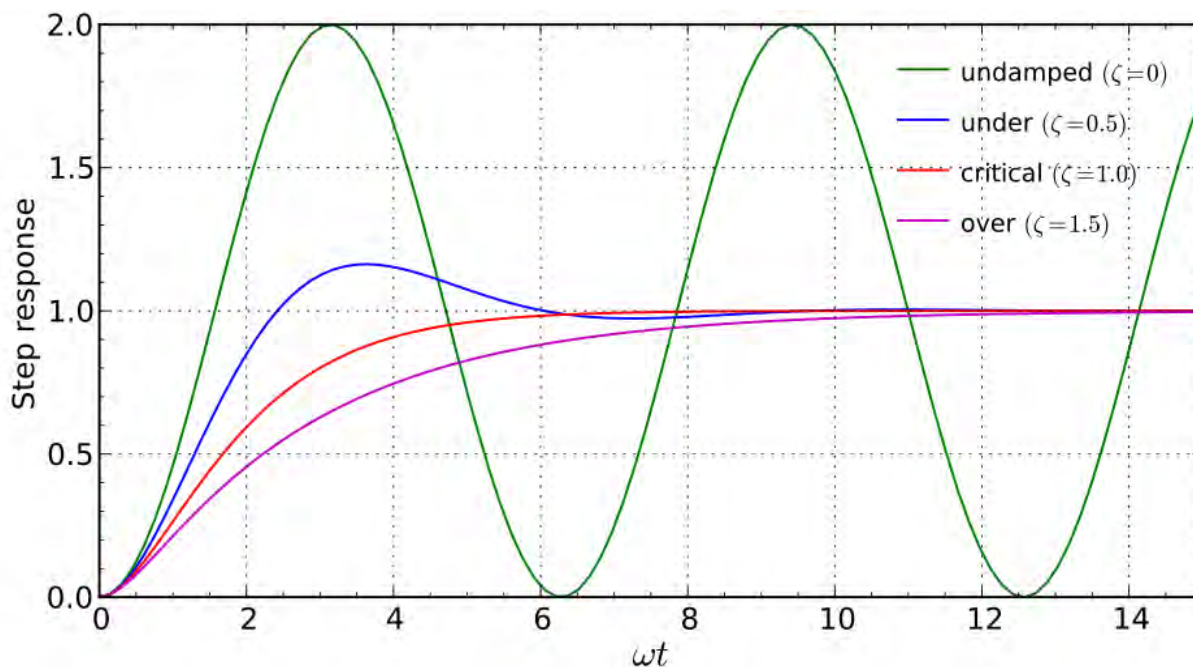
Respuesta Libre de un Sistema sin Amortiguación

Si consideramos un sistema sobre el que no actúan fuerzas externas, salvo unas fuerzas de amortiguación muy pequeñas que pueden despreciarse, nos encontramos ante la respuesta libre de un sistema no amortiguado. En ese caso, se puede considerar lo siguiente: $p(t) = 0$ y $f_D(t) = 0$.

La respuesta del sistema varía en función de su amortiguación. Se trata de una característica importante a la hora de abordar el análisis modal, tanto en el método de elementos finitos como en los datos experimentales. El efecto de la amortiguación se ilustra en la **Figura 14**, donde se muestra en verde la respuesta libre de un sistema sin amortiguación.

Figura 14.

Influencia de la amortiguación en un sistema



Nota. Fuente: (Krishnavedala, 2011).

Frecuencia Natural

La frecuencia natural (**Ecuación 4**) de una estructura es la frecuencia a la que vibra la estructura cuando se ve perturbada (sometida a alguna acción). Cada estructura puede tener varias frecuencias naturales. La cantidad de grados de libertad que tiene un sistema determinado es equivalente a la cantidad de frecuencias naturales que tiene dicho sistema.

Coeficiente de Amortiguación

El coeficiente de amortiguación de una estructura es un parámetro que describe cómo decaen las oscilaciones de un sistema tras recibir una perturbación. Por lo tanto, un sistema sin amortiguación seguirá moviéndose sin detenerse.

Resonancia

Cuando se amplifica la frecuencia natural de una estructura, esta queda expuesta a la resonancia. Esto ocurre cuando la estructura recibe una acción externa cuya frecuencia coincide con su frecuencia natural. El fenómeno de la resonancia puede compararse con una persona en un columpio que aumenta la altura del balanceo en cada impulso al ejercer esta fuerza en el momento adecuado.

Período

La relación entre la frecuencia (Hz) y el período (s) viene dada por la siguiente fórmula:

Ecuación 4.

Frecuencia de vibración, cuyas unidades son ciclos por segundo (Hz) f ; y ω en (rad/seg)

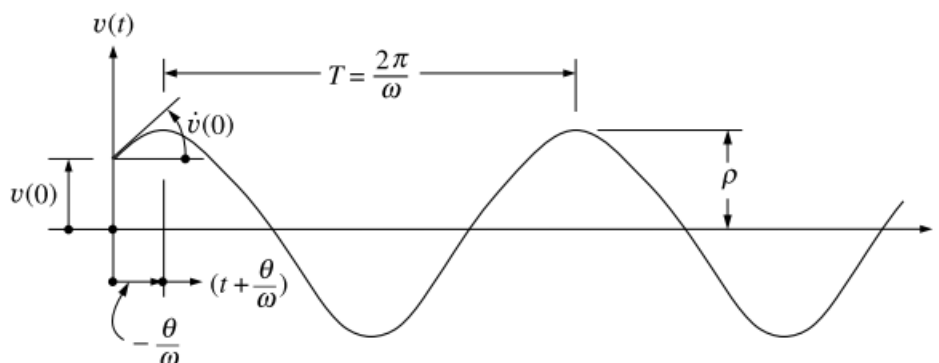
$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}; \omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4)$$

Tal y como se muestra en la fórmula anterior, las dos propiedades —la frecuencia y el periodo— son inversamente proporcionales entre sí. En resumen, el periodo es el tiempo (en segundos) que

tarda en completarse un ciclo de vibración, y la frecuencia (en hercios) es el número de ciclos completados en un segundo; la **Figura 15** ilustra esto en un gráfico.

Figura 15.

Respuesta en vibración libre sin amortiguación



Nota. Fuente: (Clough & Penzien, 2003).

Formas Modales

Las formas modales de una estructura determinada son los patrones de vibración que presenta dicha estructura a una frecuencia concreta. Estas formas modales cambian según la frecuencia. El análisis modal permite determinar estas formas modales y las frecuencias correspondientes.

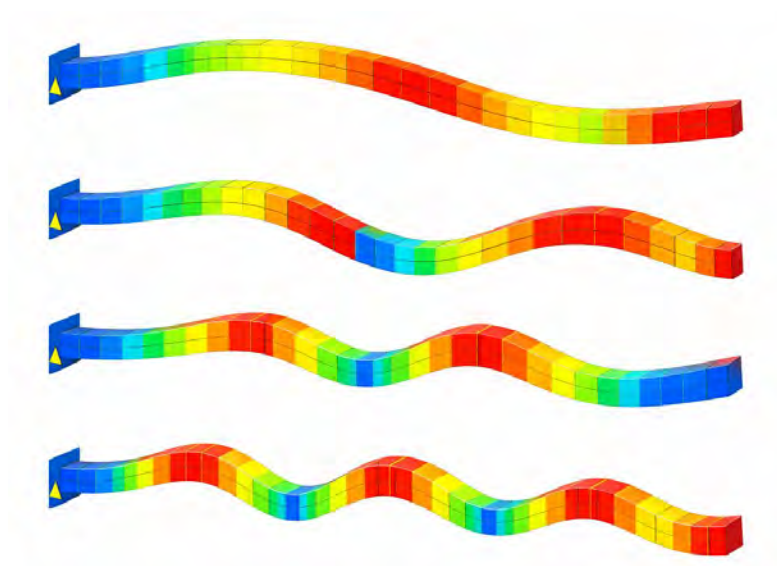
En la **Figura 17** se presenta una viga en voladizo junto con las formas modales previstas. Como se observa en la animación, las dos primeras formas modales corresponden a traslaciones tanto verticales como horizontales, mientras que la tercera es una torsión. Por lo general, se espera que las primeras formas modales sean simples, y que las más complejas —como la torsión de 2do orden y la doble flexión— aparezcan a frecuencias más altas.

Las torres exentas como al igual que las vigas en voladizo; tienen formas modales similares, el orden de estas dependerán de las condiciones de contorno.

Por supuesto, resulta difícil predecir la frecuencia natural de un sistema sin analizarlo, ya sea mediante un análisis modal con sensores o utilizando el análisis modal en un programa de elementos finitos. En el caso de sistemas mucho más complejos que el que se muestra en la **Figura 16**, en los que hay un gran número de vigas, pilares y materiales diferentes, el análisis modal es una herramienta imprescindible para determinar las frecuencias y las formas modales correspondientes.

Figura 16.

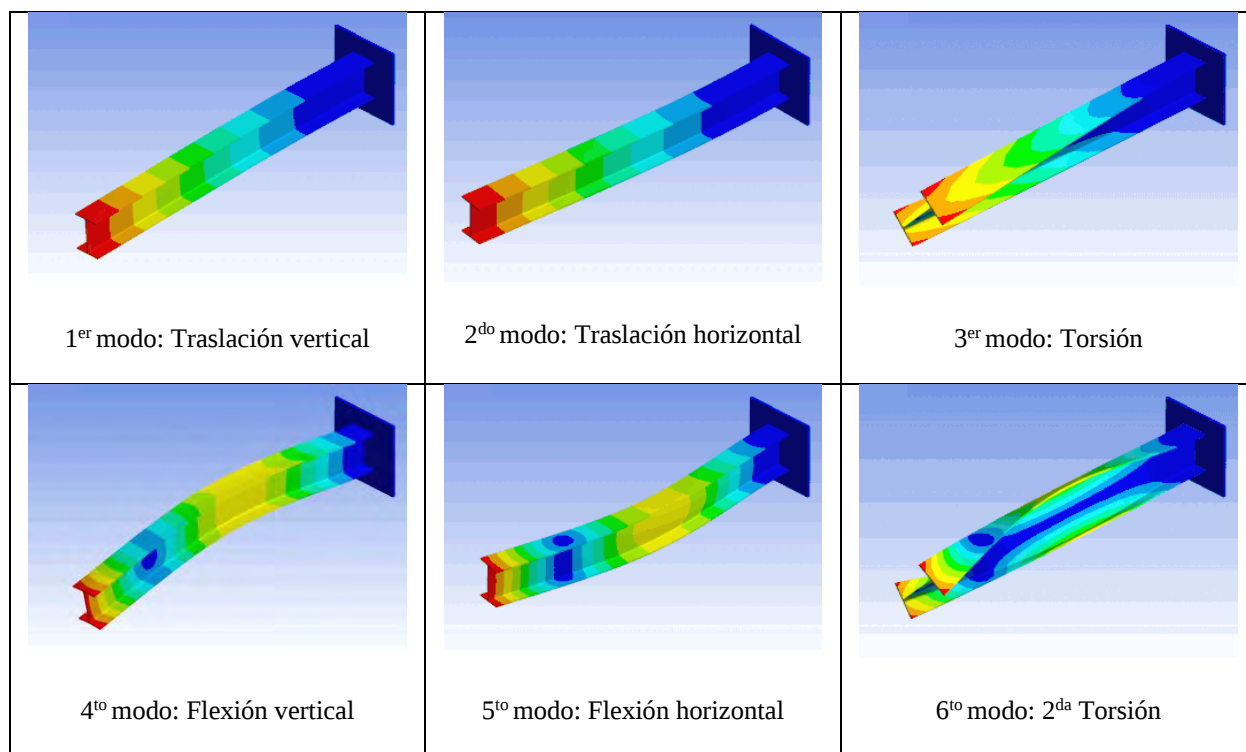
Formas modales de una viga en voladizo



Nota: Formas modales generados en Gemini IA Studio.

Al momento de considerar los modos de interés estos generalmente son los primeros, correspondientes a traslación en X e Y que son modos ortogonales y un tercer modo correspondiente a la torsión de primer orden. Los criterios a tomar en cuenta son la masa participativa, las frecuencias bajas y periodos altos en los primeros modos, además del marco normativo.

Además los primeros modos presentan mayores desplazamientos y fuerzas y/o momentos internos mayores.

Figura 17.*Modos de vibración de una viga en voladizo*

Nota. Fuente: Wikipedia (Lzyvzl & Jahobr, 2011).

15. Marco Conceptual

15.1. Análisis Modal Operacional

15.1.1. Análisis Modal

El análisis modal es el procedimiento mediante el cual se identifican las propiedades dinámicas que son propias de un sistema determinado, expresadas en términos de frecuencias naturales, factores de amortiguación y formas modales. Posteriormente, dichas características son utilizadas para la elaboración de un modelo matemático que refleje su comportamiento dinámico. El modelo matemático formulado se denomina modelo modal del sistema y la información sobre las características se conoce como datos modales. (Jimin & Zhi-Fang, 2001)).

Existen diversos procedimientos para llevar a cabo ensayos dinámicos en una estructura con el propósito de obtener sus características dinámicas. La clasificación de los métodos en cuestión se puede realizar en dos grupos principales: 1) Forzadas y 2) No forzadas o AVTs.

15.1.2. Análisis Modal Tradicional

El análisis modal experimental (EMA) fueron y son hoy en día uno de los métodos más empleados para la determinación de las propiedades dinámicas de las estructuras convencionales y no convencionales, si bien se puede aplicar a todo tipo y tamaño de estructuras es recomendable su ejecución en estructuras pequeñas y medianas. En estructuras muy grandes, estas técnicas se emplean en raras ocasiones a causa de la complejidad que conlleva proporcionar niveles significativos de excitación a una estructura tan grande y masiva. En estas pruebas se ejercen fuerzas controladas sobre la estructura para inducir vibraciones y como consecuencia se logra determinar las propiedades dinámicas del sistema. (Brincker & Ventura, 2015, pág. 5)

Diversas técnicas permiten imponer a una estructura fuerzas de excitación controladas.

Las vibraciones forzadas son todos los movimientos que se producen en la estructura de manera artificial, por encima del nivel ambiental.

Algunos métodos de inducción de movimiento son los siguientes:

Agitadores de tipo mecánico

- Electromagnéticos
- Masa excéntrica
- Hidráulicos, que abarcan las mesas de agitación de gran tamaño en los laboratorios.

Cargas transitorias

- Liberación y retroceso, desplazamiento inicial
- Impacto, velocidad inicial

Movimientos excitados por el hombre

Movimiento inducido del suelo

- Explosiones subterráneas
- Explosiones con explosivos convencionales por encima del suelo

Los tres métodos más populares para inducir a las estructuras al movimiento son:

Pruebas de agitación: Los vibradores son dispositivos que se utilizan para aplicar fuerzas a las estructuras de manera controlada, con el propósito de excitarlas dinámicamente. Para ello, es necesario que el vibrador genere fuerzas suficientes para excitar eficazmente una estructura de gran tamaño en un rango de frecuencias de interés. Cuando se trata de estructuras de gran tamaño, como edificios altos o puentes de gran envergadura, las frecuencias que se consideran relevantes frecuentemente son inferiores a 1 Hz. Aunque es posible crear fuerzas considerables mediante vibradores de tamaño reducido y alta frecuencia, (similares a los utilizados en la evaluación de sistemas mecánicos), resulta desafiante alcanzar niveles de fuerza suficientes para excitar estructuras de gran envergadura a bajas frecuencias. Por otro lado, es factible la construcción de vibradores masivos de baja frecuencia, sin embargo, estos representan un elevado costo en términos de fabricación, transporte y montaje. En tales circunstancias, resulta imperativo implementar estrategias alternativas para estimular la estructura en cuestión.

Pruebas de impacto: Las pruebas de impacto constituyen otro método de pruebas de vibración forzada. Los ingenieros mecánicos, al desempeñar su actividad profesional, tienden a emplear pruebas de impacto para determinar las características dinámicas de los elementos de las máquinas y los grupos pequeños. El objeto de prueba, comúnmente equipado con acelerómetros, es sometido a impactos mediante un martillo provisto de un transductor de fuerza. Si bien las pruebas de impacto comúnmente se emplean para evaluar estructuras pequeñas, es pertinente

señalar que este método puede generar diversos problemas al ser aplicado en estructuras de mayor envergadura. Para lograr una excitación óptima de los modos inferiores de una estructura de gran magnitud, es imperativo que la masa del martillo de impacto sea considerable. La construcción y utilización de martillos de impacto de gran tamaño con transductores de fuerza se erige como una tarea sumamente ardua.

La producción de daños locales considerables en la estructura de ensayo puede ser ocasionada por la utilización de un martillo de gran magnitud.

Pruebas de retroceso: En el campo de la ingeniería y la construcción, las pruebas de tracción o liberación rápida han sido utilizadas en contadas ocasiones para evaluar la resistencia y la integridad estructural de estructuras de gran envergadura. Este procedimiento metodológico se centra en la inducción de una deformación temporal predeterminada en una estructura, seguida de su liberación rápida, lo que resulta en la vibración libre de la estructura. Para la aplicación de cargas que producen un desplazamiento estático de la estructura, se ha hecho uso de cilindros hidráulicos, cables, excavadoras, remolcadores y polipastos de cadena. El propósito de este procedimiento técnico es la liberación expedita de la carga y la evaluación de las vibraciones libres de la estructura a medida que esta última tiende a retornar a su posición de equilibrio estático.

Los hallazgos que se obtienen a partir de los ensayos de liberación rápida pueden emplearse para establecer las frecuencias naturales, formas modales y las magnitudes de amortiguamiento de los modos primordiales de la estructura. (Paz & Hoon Kim, 2018, pág. 5)

A partir de ahora y hasta la siguiente sección nos enfocaremos en el **Análisis Modal Operacional (OMA) Aplicado a Construcciones Históricas** y toda la fundamentación teórica se basará a ello.

15.1.3. Análisis Modal Operacional

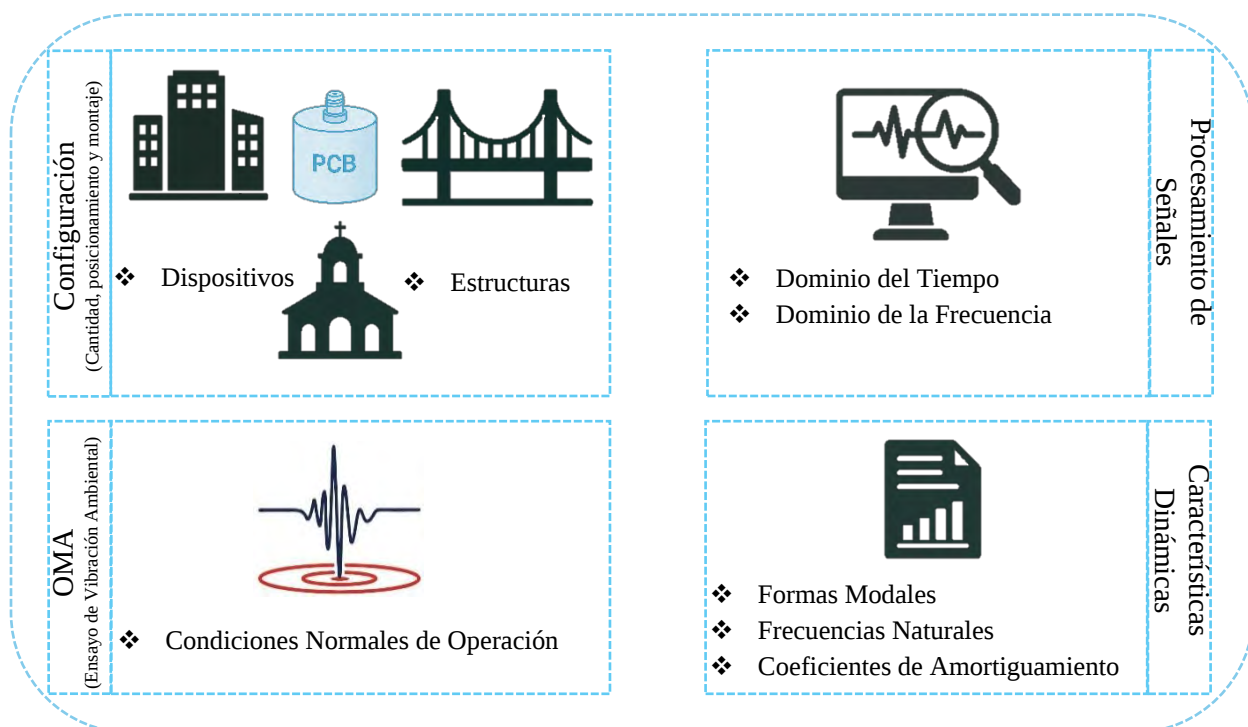
El análisis de la reacción dinámica de las estructuras históricas ha puesto de manifiesto la necesidad de llevar a cabo evaluaciones de tal manera que dichos ensayos no empleen fuerzas inducida hacia la estructura. Dado que las estructuras históricas tienen un gran valor patrimonial inherente a cada región, su conservación se revela como una prioridad máxima. Para garantizar la preservación de este tipo de estructuras resulta necesario conocer su vulnerabilidad sísmica. Por esta razón es de vital importancia implementar medidas que fortalezcan la integridad estructural de estas, y así contribuir a su conservación.

En tal sentido podemos aplicar dos métodos con el propósito de extraer los parámetros dinámicos de una estructura. Por un lado, tenemos a los métodos que requieren una fuente de excitación inducida, y otras fuentes propias de sus condiciones de operación.

La **Figura 18** muestra un diagrama de flujo general del enfoque de la OMA.

Figura 18.

Enfoque del Análisis Modal Operacional (OMA)



15.1.3.1 Conceptos Básicos

La necesidad de salvaguardar las edificaciones de valor histórico se entrelaza con la exigencia de obtener un conocimiento exhaustivo sobre la evaluación estructural de las construcciones y su comportamiento ante eventos sísmicos, empleando metodologías de investigación que minimicen intervenciones invasivas. Además, la complejidad propia de las construcciones históricas, expuestas a deterioros y modificaciones estructurales y arquitectónicas, compromete la capacidad de alcanzar resultados confiables y realistas. No obstante, el empleo de técnicas menores o no destructivas (como ensayos dinámicos, sónicos y de gatos planos) puede resultar sumamente beneficioso para adquirir un conocimiento más profundo sobre las estructuras históricas de albañilería.

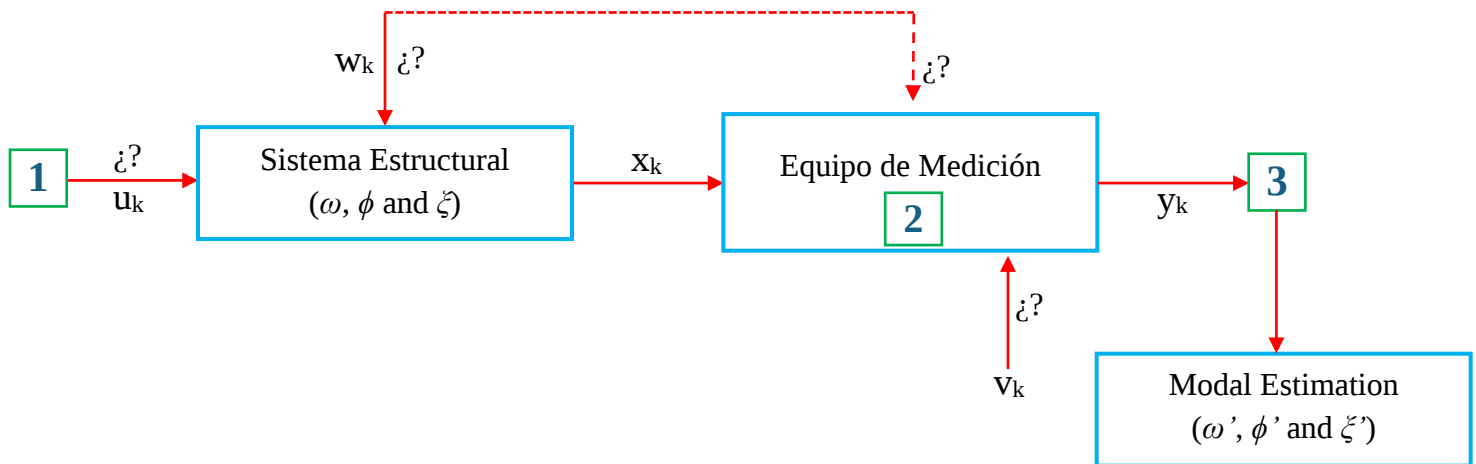
Los procedimientos o test de ensayos dinámicos/modales como el análisis modal operacional (OMA), disciplina desarrollada “recientemente” por la comunidad de ingenieros relacionados al estudio dinámico de estructuras, son herramientas muy potentes que permiten estimar experimentalmente los parámetros modales que tiene una estructura mediante mediciones de la respuesta vibratoria.

Hoy en día las técnicas de identificación que no requieren excitación o fuentes externas inducidas son ampliamente aplicados en estructuras de albañilería de carácter histórico para estimar parámetros dinámicos.

Este procedimiento de identificación se fundamenta en la vibración ambiental. La estructura se ve influenciada por la vibración ambiental, la cual puede ser causada por factores como el viento, el tráfico o incluso la vibración generada por las personas ((Lourenço, Trujillo, Mendes, & Ramos, 2012)).

Figura 19.

Esquema explicativo de la aplicación del OMA



Nota. Fuente: Readaptado por (Pachón García, 2016) de (Da Silva Ramos, 2007).

1: Origen de Excitación

2: Equipo de Medida

3: Método de Identificación Modal

u_k : Contribución Modal de la Fuente de Excitación

v_k : Contribución Modal de las Fuentes Indeseadas

w_k Procesamiento de Ruido

x_k : Contribución Modal del Sistema Estructural

y_k : Respuesta estimada por el equipo de medición

En este contexto, es fundamental indicar que la medición de la respuesta estructural de edificaciones o construcciones históricas solo se puede hacer utilizando sensores muy sensibles, lo cual confirma la necesidad de ser más rigurosos científicamente en el campo del análisis de las respuestas estructurales, trabajos realizados por (Banda Roque & Conya Ascue, 2024) y (Alferez Vargas & Bravo Fuentes, 2024) dan fe de lo expuesto líneas arriba. Este procedimiento (ver **Figura 19**) permite realizar las pruebas de manera eficiente y segura, evitando daños potenciales en las estructuras involucradas. En consecuencia, es posible desarrollar un modelo numérico para

simular la estructura y, en función de los resultados obtenidos en las pruebas dinámicas, dicho modelo numérico puede ser actualizado para que coincida con los valores experimentales en términos de frecuencias y formas modales.

Por causa de la naturaleza de los datos y las metodologías de identificación modal sin fuente de excitación inducida, la respuesta estimada por el equipo de medida (y_k), no solo contempla la aportación de las fuerzas medioambientales (u_k), sino que también incluye la contribución modal del sistema estructural (x_k) y el aporte del ruido de la señal proveniente de fuentes no deseadas (v_k). Por lo tanto, las técnicas de identificación deben ser capaces de extraer la información pertinente de cada una de las fuentes, separándola del ruido o fuentes indeseadas previamente procesadas (W_k).

15.1.3.1.1. Planificación de los ensayos

Las mediciones constituyen uno de los componentes fundamentales en el análisis modal operacional (OMA). La calidad de los datos obtenidos tendrá un impacto significativo en la eficacia del análisis modal operacional, los cuales constituyen un factor determinante en el éxito del análisis modal. Una ejecución óptima de esta fase del proceso resulta fundamental para asegurar la validez y la integridad de los resultados posteriores. Por consiguiente, si esta parte del proceso se realiza adecuadamente entonces todo lo demás que sigue es relativamente «fácil y sencillo». Para garantizar la obtención de datos de alta calidad, es imprescindible seguir una serie de pasos esenciales. Los pasos que se deben seguir se describen a continuación:

- ❑ El proceso de planificación y ejecución de cada ensayo sea desarrollado y gestionado cuidadosamente para garantizar la precisión y la eficacia en su ejecución.

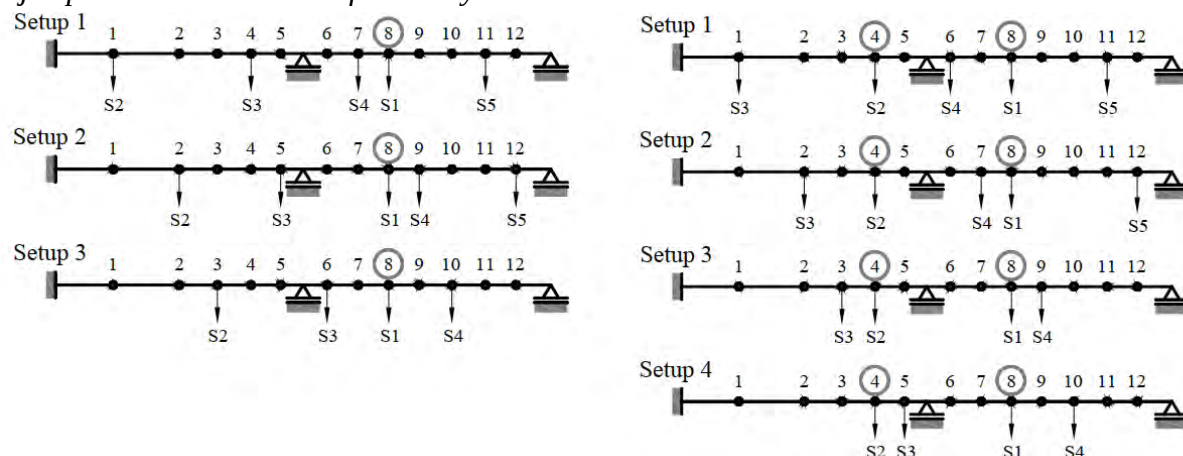
- ❑ En el marco de la investigación, los datos obtenidos para cada serie de señales sean verificadas y aprobadas; y así demostrar la alta calidad recopilada para cada una de las configuraciones de prueba.

Según (Da Silva Ramos, 2007) en teoría, la planificación de los ensayos OMA, debería constar de las siguientes 6 fases (pp. 37-38):

1. La primera fase comprende el análisis modal de un modelo de elementos finitos (FEM) para tener una idea preliminar sobre valores de frecuencias y la configuración de las formas modales de la estructura. Complementariamente, en estructuras históricas, dadas las grandes variaciones que pueden existir en las propiedades mecánicas de los materiales, se aconseja realizar pruebas de laboratorio para calcularlas.
2. La segunda fase se refiere a la definición del número de puntos a ser medidos en concordancia a la demanda de los ensayos de caracterización dinámica y al análisis dinámico preliminar del modelo de elementos finitos. El número de puntos que deben medirse suele ser superior al de los sensores disponibles. En este caso, un punto a medir o grupo de puntos deberán ser asignados como sensores de referencia, mientras que otros sensores serán móviles dentro y fuera de la estructura (Ver **Figura 20**).

Figura 20.

Ejemplos de sensores de referencia y sensores móviles



Nota. (a) Tres ensayos tomando un solo sensor de referencia; y (b) Cuatro ensayos tomando dos sensores de referencia. Fuente: (Da Silva Ramos, 2007).

Recomendaciones:

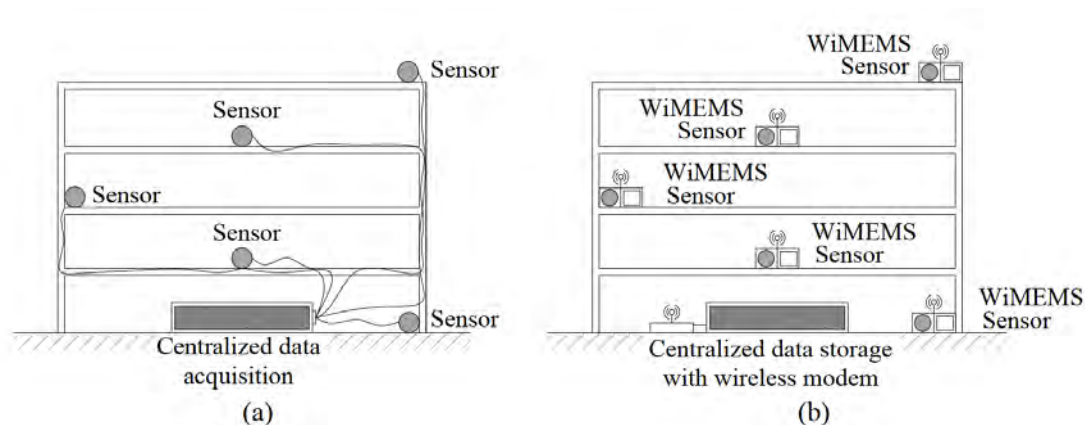
Es importante destacar que al menos uno de los puntos de referencia no debe coincidir con un nodo de las formas modales de la estructura, de lo contrario podrían ocurrir resultados no precisos.

Cada paso de medición se llama configuración o conjunto de datos, y es común que una identificación dinámica simple tenga diez o más configuraciones.

Todos los involucrados en los ensayos deben estar informados sobre todas las pruebas y procedimientos.

Figura 21.

Sistemas de medición



Nota. (a) Sistema convencional basado en cables; (b) Sistema inalámbrico. Fuente: (Lynch, Law, Kiremidjian, Kenny, & Carryer, 2002).

Tomando en cuenta lo anterior hay que decidir en qué puntos o zonas se realizaran las mediciones. La **Figura 21**, muestra dos sistemas diferentes de ejecutar los ensayos y las mediciones correspondientes.

3. En la tercera fase, antes de las mediciones de cada configuración, primero es importante proceder con algunas mediciones de señal localizadas para monitorear el nivel de las

señales, caracterizar la relación señal / ruido y poseer un concepto sobre las frecuencias resonantes implicadas. Esta tarea puede realizarse mediante una simple Transformada Rápida de Fourier (FFT) de mediciones de respuesta en algunos puntos clave, por ejemplo; los puntos de referencia. Después de este análisis de identificación preliminar, los cambios en la planificación de la prueba pueden ser necesario para obtener resultados precisos, como diferentes tipos de sensores, otras posiciones, la necesidad de excitación adicional para aumentar el nivel de señal a ruido o, simplemente, la definición de la frecuencia de muestreo y la duración de medición. Si la relación señal/ruido es muy baja, excitación aleatoria adicional se puede aplicar para que los resultados no sufran influencias significativas (Peeters, 2000).

4. La cuarta fase comprende la ejecución de las mediciones. En lo que concierne a la duración de las mediciones, muchos investigadores llegan a las siguientes afirmaciones:

La primera regla empírica (Rodrigues, 2004) es considerar 2000 veces el periodo natural de mayor interés (la frecuencia más baja), así por ejemplo para una estructura con una frecuencia natural de 4 Hz se debería realizar un ensayo de al menos 9 minutos.

Caetano (2000) basado en la experiencia y en casos de estructuras flexibles, recomienda una duración de la medida comprendida entre el producto de 30 y 40 veces un factor promedio por el máximo periodo de interés. Siendo dicho factor el número de promedios, variando entre 8 y 32, la longitud del ensayo, considerando un rango de bajo de frecuencias propio de estructuras flexibles (0-8 Hz), varía entre 2 y 11 minutos.

Sin embargo, basado en el error de varianza (Bendat y Piersol, 1986). El número de promedios en el análisis de la señal de preprocesamiento debe ser igual a 100 para tener un

error de varianza del 10%. Si la resolución de frecuencia es 0.1 Hz, cada el segmento récord debe tener 10 s, más 100 promedios, lo que resulta en casi 17 minutos.

Según Ramos (2007), la regla empírica de 1000 veces el periodo mayor (con un mínimo de 10 minutos para cada ensayo) puede ser aplicado para obtener resultados precisos si la estructura es bien excitada, pero la duración puede ser convenientemente definida tomando en cuenta el número de sensores disponibles, el número de puntos a ser medidos y el tiempo disponible para completar cada ensayo.

5. La quinta fase es una revisión preliminar de los datos conseguidos. En la fase de preparación de los registros y entre cada configuración, es importante revisar las señales medidas de cada sensor para evitar la pérdida de datos o baja calidad de los registros. Antes de empacar todo el equipo de prueba, también es deseable hacer un análisis modal preliminar para asegurarse de que los resultados experimentales tengan suficiente calidad para el éxito de la identificación modal.
6. En la etapa final, se aconseja analizar el comportamiento dinámico utilizando dos o más métodos de identificación modal. Esto le da al analista confianza en los resultados y puede contribuir a seguir con procedimientos de prueba más objetivos.

Culminada esta introducción de conceptos generales correspondientes a OMA y las recomendaciones para su correcta ejecución, se presenta a continuación el sistema de adquisición de datos y los equipos de medida que se aplican y emplean para este tipo de investigación:

15.1.3.1.2. Sistema de medición

Los datos de cada campaña experimental son recopilados por el sistema de medición (ver **Figura 22**). Este sistema cuenta con transductores, un acondicionador de señal, un convertidor analógico-digital y una computadora para procesar la información de la señal digital.

Figura 22.*Sistema de Adquisición de Datos*

Nota. Fuente: (<https://www.ni.com/es.html>, 2024).

15.1.3.1.3. Transductores de Respuesta

Según (Caetano, 2000) los desplazamientos, velocidades, aceleraciones, deformaciones, fuerzas, etc. son magnitudes físicas que usualmente definen la respuesta de un sistema. Estas dimensiones necesitan de un equipo capaz de transformar dichas medidas en señales eléctricas proporcionales, listas para ser procesadas por el Sistema de Adquisición de Datos (DAQ). Dichos equipos son conocidos como transductores de respuesta. En teoría, las magnitudes físicas mencionadas previamente pueden ser utilizadas para calcular la respuesta dinámica de un sistema. Sin embargo, estas dependerán del rango de frecuencia del sistema.

En estudios dinámicos la magnitud de aceleración es fundamental en cuanto se refiere a conocer como es el comportamiento de la estructura frente a fuentes de excitación ya sean provocadas intencionalmente o de carácter natural y propios de su funcionamiento.

Según (Brincker & Ventura, 2015) existen muchos tipos de sensores para la medición de la respuesta dinámica. Los más comunes son los sensores piezoeléctricos, los sensores electromagnéticos (sismógrafos, geófonos) y los sensores de equilibrio de fuerza balanceada.

15.1.3.1.3.1. Acelerómetros

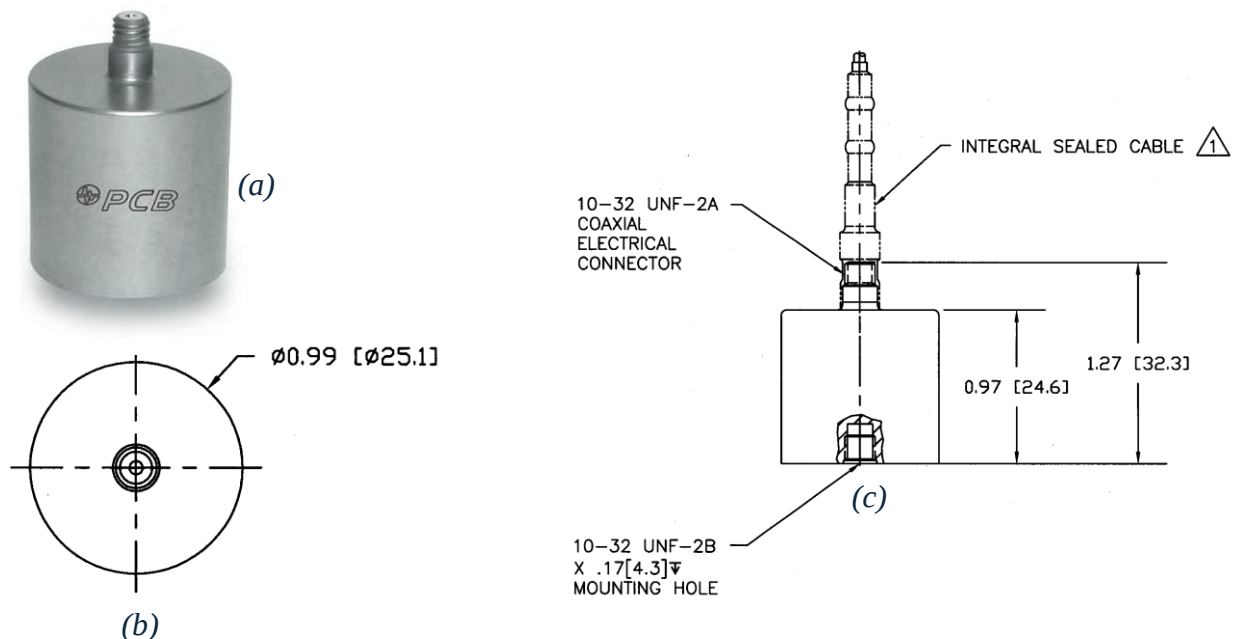
Acelerómetros Piezoeléctricos

Según Ramos (2007) un acelerómetro piezoeléctrico (**Figura 23**) es un sistema conformado por un amortiguador, una masa y un resorte, dicho sistema genera señales eléctricas proporcionales a la aceleración en una banda de frecuencia limitada por su frecuencia de resonancia. La parte activa del acelerómetro está compuesto por cristal de cuarzo o materiales cerámicos, el cual produce una señal de salida eléctrica que se relaciona proporcionalmente con la aceleración [*traducción propia*].

Para Brincker & Ventura (2015) este tipo de acelerómetro es relativamente pequeño, tiene una buena respuesta de frecuencia en una banda de frecuencia grande, su precio es razonable y fácil de usar. Es ampliamente usado en ensayos de ingeniería mecánica e ingeniería civil [*traducción propia*].

Figura 23.

Acelerómetro piezoeléctrico (PCB, 2019)



Nota. (a) PCB Modelo 393B05; (b) Vista en planta; (c) Vista en perfil. Fuente:

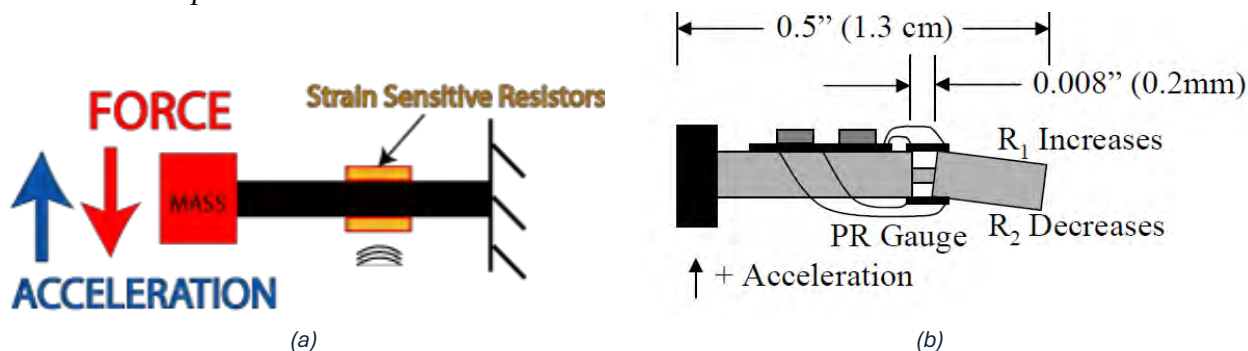
<https://www.pcb.com/>.

Acelerómetros Piezoresistivos

Para la página web de SENSING (2019) los acelerómetros piezorresistivos (ver **Figura 24**) se utilizan para cuantificar la aceleración y vibración a frecuencias medias o bajas, utilizando la tecnología extensiométrica. Entre sus atributos sobresalen la compensación de temperatura, una salida amplificada y su precisión elevada.

Figura 24.

Acelerómetro piezoresistivo



Acelerómetros Capacitivos

Un acelerómetro capacitivo es un instrumento que emplea un sensor capacitivo para medir la aceleración. El componente sensor está compuesto por dos placas que se encuentran separadas por un espacio reducido. Cuando se aplica una aceleración al acelerómetro, las dos placas se desplazan una con relación a la otra y el espacio entre ambas varía. Este cambio en la separación es percibido por el circuito de detección, que lo transforma en una magnitud de aceleración. Los acelerómetros capacitivos se emplean generalmente en usos que necesitan determinar la aceleración de baja frecuencia, como el análisis sísmico, la vigilancia industrial y la seguridad del vehículo. Se emplean, además, en la electrónica de consumo, como son los controles de juegos y los teléfonos inteligentes.

Sensores Electromagnéticos

En este tipo de sensores podemos encontrar sismógrafos y geófonos. Para fines de la presente investigación desarrollaremos el concepto referido a los geófonos, puesto que se empleó este tipo de sensor durante el periodo de ensayos el cual se detallará más adelante.

Según Brincker & Ventura (2015) el geófono (ver **Figura 25**) está formado por una bobina suspendida alrededor de un imán permanente. Según la ley de Faraday, la señal de salida del sensor es proporcional a la velocidad relativa entre la bobina y el imán. A menudo, el geófono cuenta con dos bobinas, de modo que la señal del geófono se genera como la diferencia entre las señales de ambas bobinas. La señal se genera únicamente por el movimiento de la bobina con respecto al imán, por lo que no se necesita energía para producir la señal de salida del sensor *[traducción propia]*.

Este tipo de sensores se pueden aplicar para el monitoreo de salud estructural y ensayos de vibraciones ambientales.

Figura 25.

Acelerógrafo Híbrido – Lunitek



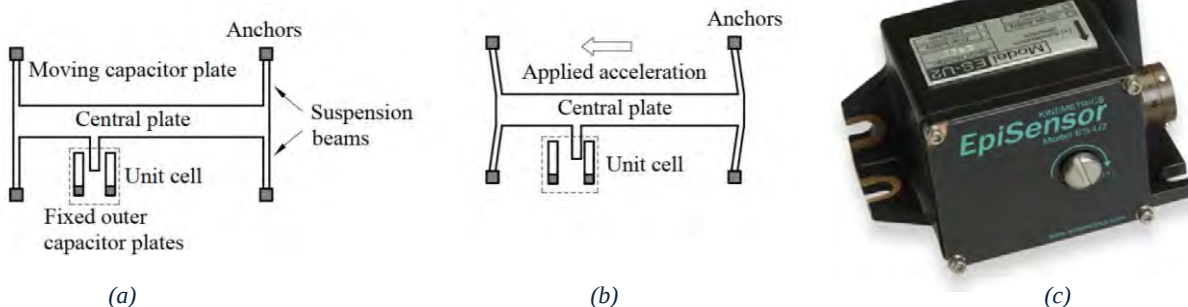
Nota. SENTINEL-GEO es un acelerógrafo de alta calidad con un velocímetro triaxial integrado, diseñado para la monitorización estructural y la sismología en proyectos con limitaciones presupuestarias. Fuente: (LUNITEK, 2026).

Acelerómetros de Fuerza Balanceada

Da Silva Ramos (2007) menciona que al igual que los acelerómetros piezoresistivos y capacitivos, los acelerómetros de equilibrio de fuerza (**Figura 26 (c)**) son transductores pasivos y están compuestos por un sistema de masa - resorte, de modo que, bajo excitación, conducen una señal eléctrica diferencial proporcional a la aceleración. La **Figura 26 (a)** muestra una representación esquemática del transductor, donde se puede observar que la masa se sostiene por medio de cuatro vigas de suspensión. La masa posee un apéndice localizado entre dos placas de capacidad (celda unitaria). Al ser excitado, la masa se desplaza fuera de su punto de equilibrio (ver la **Figura 26 (b)**) y la celda unitaria tiende a forzar a la masa para regresar a su posición inicial, a través de las placas del condensador. El voltaje diferencial necesario para forzar el regreso de la placa central de nuevo a su posición de equilibrio es proporcional a la aceleración. Los acelerómetros de fuerza balanceada se utilizan de manera extensa en la ingeniería civil para realizar pruebas de estructuras que son flexibles. Son recomendables para ensayos de vibración ambiental, por ser robustos y de alta sensibilidad. La desventaja de este tipo de acelerómetros es que son más costosos que los demás.

Figura 26.

Acceptorómetro de fuerza balanceada



Nota. (a) Sistema masa – resorte en posición de equilibrio (Maia y Silva, 1997); (b) Deformación debido a la carga aplicada (Maia y Silva, 1997); y (c) Acelerómetro de fuerza balanceada uniaxial modelo ES – U2 (Kinometrics, 2018).

Sistema de Adquisición de Datos

Da Silva Ramos (2007) define el sistema de adquisición de datos (DAQ) como el conjunto de dispositivos electrónicos (Ver **Figura 27**) que tienen la función de registrar las señales de respuesta. A veces, no es posible procesar directamente la información que un transductor proporciona, por lo que se necesita acondicionar la señal para poder procesarla. *[traducción propia]*.

Brincker & Ventura (2015) afirman que antes de poder utilizar las técnicas de análisis OMA para analizar los datos, las señales analógicas generadas por los sensores deben convertirse en valores numéricos. Esto se realiza a través de un convertidor analógico-digital (ADC) *[traducción propia]*.

Figura 27.

NI CompactDAQ (Izquierda) y la tecnología NI System Timing Controller (NI-STC)(Derecha)



Nota. Fuente Catálogo de productos por Emerson y (National Instruments, 2026).

PC y Software

Un computador que tiene software programable controla la función del dispositivo DAQ y se utiliza para procesar, almacenar y visualizar los datos de medición. Se emplean diferentes clases de computadoras en diversas aplicaciones. Una computadora portátil puede ser empleada por su portabilidad, una computadora de escritorio por su capacidad para procesar información y una computadora industrial en una fábrica debido a su resistencia.

Componentes de Software en un Sistema DAQ

Software Controlador

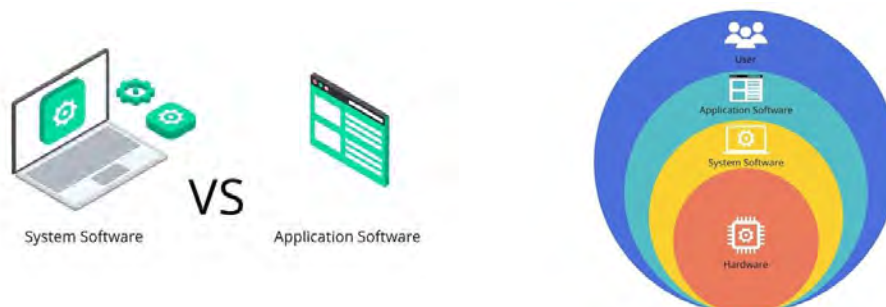
El software controlador (ver **Figura 28**) proporciona al software de aplicación la posibilidad de interactuar con un dispositivo DAQ. Simplifica la comunicación con el aparato DAQ al abstraer las instrucciones de programación y hardware a un nivel inferior. En términos generales, el software controlador DAQ cuenta con una interfaz de programación de aplicaciones (API), que se utiliza en un entorno de programación para crear software de aplicación.

Software de Aplicación

El software de aplicación (ver **Figura 28**) posibilita la comunicación entre el usuario y la computadora para obtener, examinar y exponer datos de mediciones. Puede ser un ambiente de programación para crear aplicaciones con funciones personalizadas o una aplicación precodificada con características definidas previamente. Las aplicaciones personalizadas se utilizan con frecuencia para automatizar diversas funciones de un dispositivo DAQ, implementar algoritmos de procesamiento de señales y presentar interfaces de usuario a medida.

Figura 28.

Software del sistema y software de aplicación



Fuente: Gemini IA Studio.

15.2. Procesamiento de Señales y Extracción de Parámetros Modales

Según Sarah (2020), interpretar las señales adquiridas y entender el procesamiento es fundamental cuando se trata de análisis modal, software como ARTeMIS Modal Pro nos permiten identificar los parámetros dinámicos experimentales de la estructura mediante técnicas de identificación OMA. La estimación se lleva a cabo mediante diversos métodos de identificación del sistema, ya sea en el dominio de la frecuencia o en el dominio del tiempo, que están relacionados con las ecuaciones de movimiento. En general, la identificación de parámetros modales consiste en el preprocesamiento de señales, la identificación modal y la extracción de parámetros, tal y como se describe en las siguientes subsecciones.

15.2.1. Preprocesamiento de Señales

(Brincker & Ventura, 2015) afirman que “el primer paso en la tarea de procesamiento de señales es comprobar la calidad de los datos y convertirlos a un formato estándar” (p. 201).

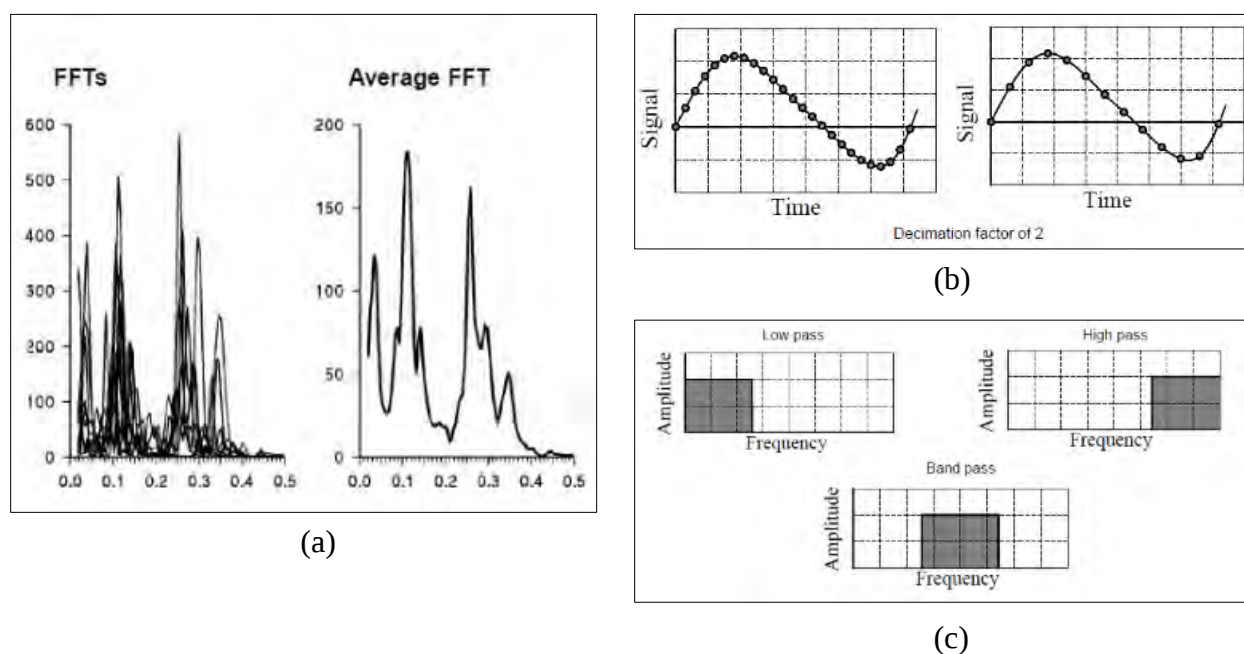
Algunos ejemplos de preprocesamiento se muestran en la **Figura 29**.

- ❑ Promediado: Consiste en calcular la media matemática de múltiples mediciones de una señal experimental. Su objetivo fundamental es mitigar el ruido aleatorio, mejorando la relación señal-ruido a fin de asegurar la precisión, validez y fiabilidad de los datos analizados.
- ❑ Diezmado: Es el proceso de disminuir la frecuencia de muestreo de una señal digital a una tasa inferior. Se aplica cuando la frecuencia original es excesivamente alta para el ancho de banda que realmente se desea estudiar. Su ventaja principal es la reducción drástica del volumen de datos, lo que optimiza y acelera significativamente el tiempo de procesamiento computacional.

- ❑ Filtros de pasa - alto o pasa - bajos: Son herramientas de acondicionamiento de señales diseñadas para permitir el paso de un rango específico de frecuencias y atenuar el resto. Se utilizan para "limpiar" la señal de interés, eliminando ruidos, perturbaciones o interferencias que se encuentran en espectros de frecuencias indeseadas (ya sean muy altas o bajas).

Figura 29.

Técnicas de preprocesamiento de señales: (a) promediado; (b) diezmado; (c) filtrado



Nota. Fuente (Da Silva Ramos, 2007, pág. 24).

15.2.2. Técnicas de Identificación Modal

(Pachón García, 2016, p. 32) menciona que la clasificación de los métodos de identificación modal se agrupa en paramétricos y no paramétricos. El primer grupo se desarrolla en el dominio del tiempo y el segundo en el dominio de la frecuencia (para una mejor ilustración ver **Figura 35**). Cada grupo involucra métodos y características (ver **Figura 30**) que difieren unas a otras, a pesar de ello todos proporcionan buenos resultados en lo que se refiere a la identificación

de las frecuencias naturales de la estructura. No obstante, el método de identificación en el subespacio estocástico (SSI) y el método de descomposición mejorada en el dominio de la frecuencia (EFDD), presentan actualmente una mayor confianza en los resultados.

Figura 30.

Métodos y características paramétricos y no paramétricos

	Method	Characteristics
Frequency Domain	Peak Picking (PP)	Classical SDOF method
	Frequency Domain Decomposition (FDD)	MDOF method; application of SVD to reduce noise
	Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFDD)	MDOF method; application of SVD to reduce noise
	Polimax	MDOF method
Time Domain	Random Decrement (RD)	Operates on time domain series, leading to a free decay curve analysis
	Recursive Techniques (ARMA)	Time series modelling using recursive algorithms
	Maximum Likelihood Methods	Stochastic methods based on the minimization of a covariance matrix
	Stochastic Subspace Identification Methods (SSI-DATA)	Stochastic methods based on the project of state vector on a vector of past realizations

Nota. Fuente (Caetano, 2000, p. 61).

15.2.2.1 Métodos en el Dominio de Frecuencia

Los métodos en el dominio de frecuencia calculan propiedades dinámicas usando la transformada de Fourier. Esto permite expresar cualquier función armónica como una suma de términos periódicos. La transformada de Fourier (**Figura 32**) representa la distribución de frecuencias de todos los componentes armónicos de una señal registrada.

Selección de picos o Peak Picking (PP)

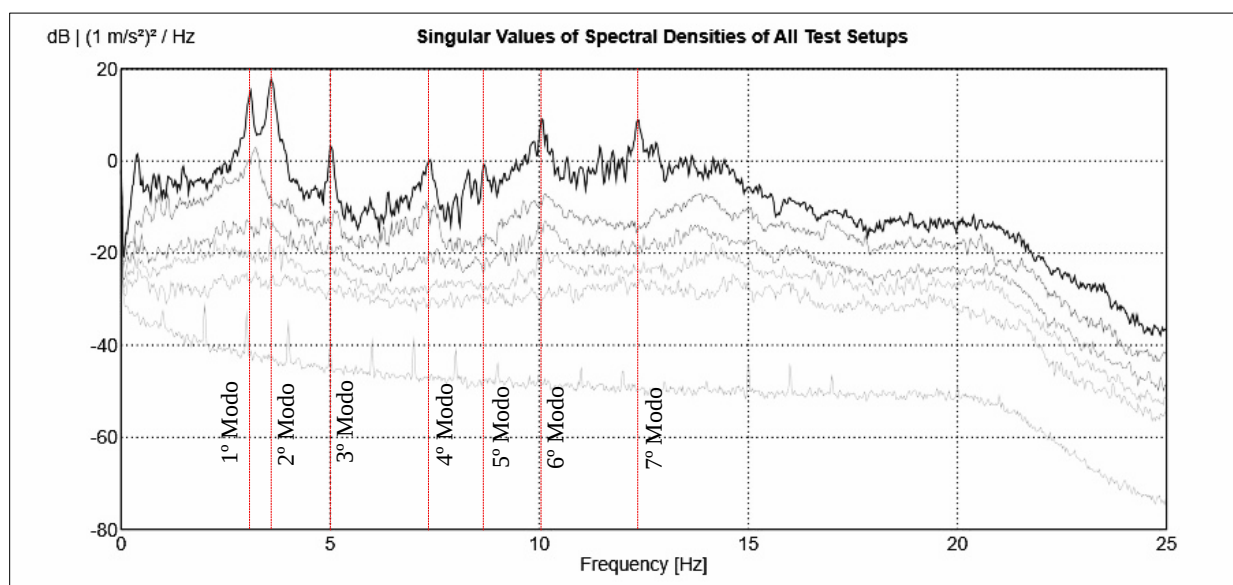
La selección de picos se hace identificando las frecuencias naturales a partir de los picos resonantes en los gráficos de densidad espectral de potencia (PSD), que se obtienen convirtiendo los datos medidos al dominio de la frecuencia mediante la transformada rápida de Fourier (FFT).

Descomposición mejorada del dominio de frecuencia o Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFDD)

El método FDD está limitado por la resolución de frecuencia de las estimaciones de densidad espectral, lo que puede dar lugar a estimaciones modales muy sesgadas. Para aumentar la resolución de frecuencia, se puede utilizar el método de descomposición mejorada en el dominio de la frecuencia, ya que estima los parámetros modales mediante el cálculo de la transformada rápida de Fourier inversa de cada función de densidad espectral para cada forma modal en el dominio del tiempo. La **Figura 31** muestra un diagrama típico obtenido mediante el método EFDD, en el que las líneas rojas identifican las primeras frecuencias modales.

Figura 31.

Ejemplo de un diagrama EFDD – Peak Picking y las frecuencias identificadas

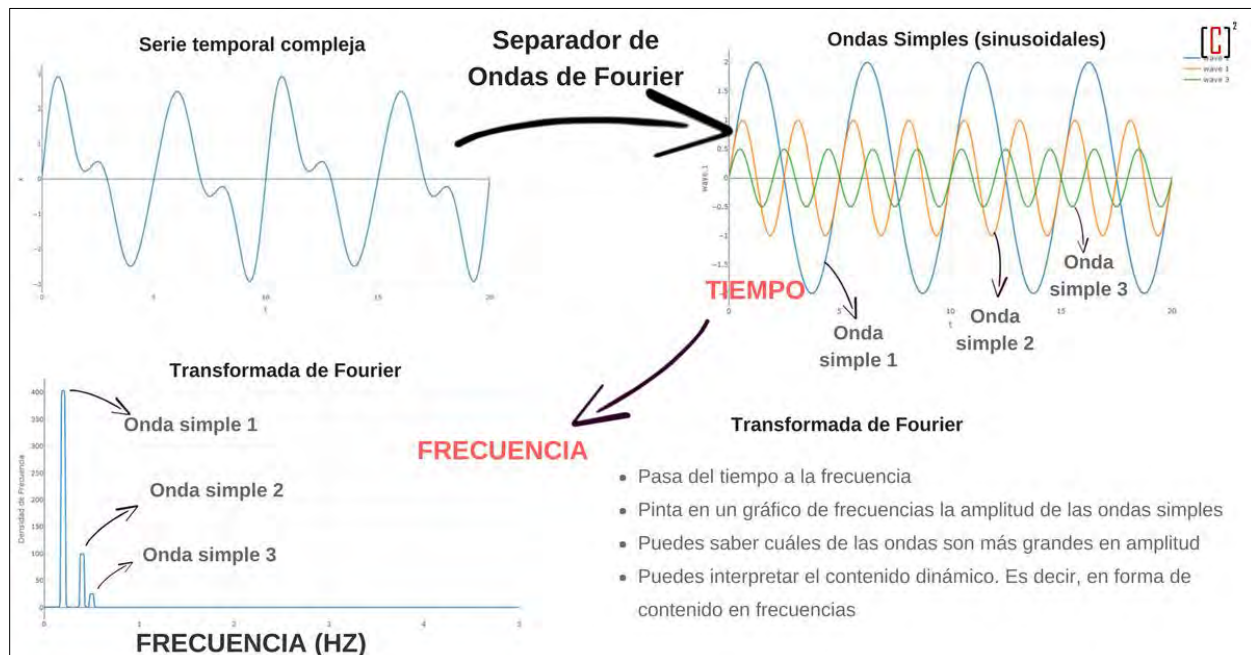


Nota: Elaboración propia en el software Artemis Modal Pro (medición torre Chinchero).

Los picos pronunciados reflejan los modos elegidos para el análisis y estos se relacionan con el comportamiento típico de estructuras exentas y en voladizos. El diagrama no siempre resulta igual al mostrado en la **Figura 31**, para llegar a esto es necesario equipos adecuados

Figura 32.

Proceso secuencial de la transformada de Fourier



Nota. Fuente (<https://conceptosclaros.com/>).

15.2.2.2 Métodos en el del Dominio del Tiempo

Las técnicas del dominio del tiempo identifican los parámetros modales mediante métodos paramétricos que ajustan la respuesta de cada punto de medición a un modelo matemático representativo del comportamiento dinámico de la estructura.

Los acelerómetros miden directamente las series temporales, que son la base de la entrada de datos.

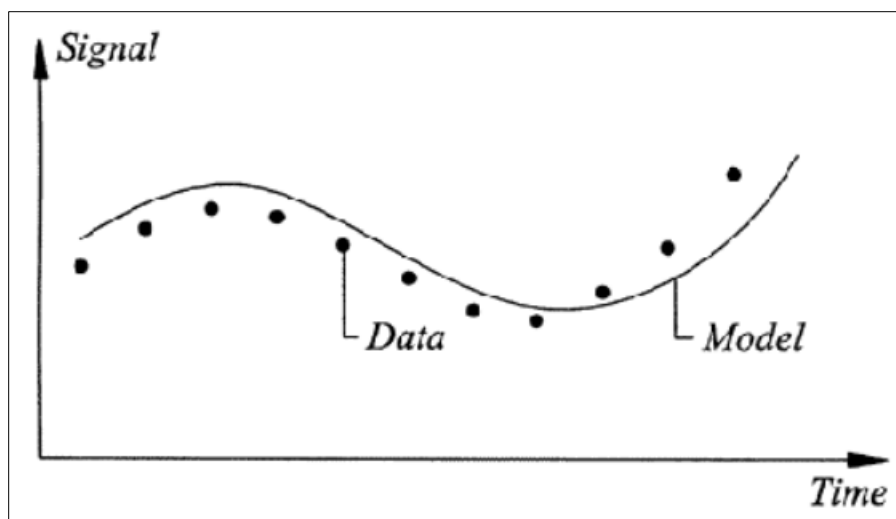
Identificación en el Subespacio Estocástico (SSI)

ARTeMIS Modal Help v7, manual de ayuda en línea de Structural Vibration Solutions

Vibration analysis, señala que las técnicas de identificación estocástica en subespacios (SSI), se adapta un modelo paramétrico directamente a los datos sin procesar de las series temporales. Un modelo paramétrico es un tipo de modelo matemático que tiene una serie de parámetros ajustables para cambiar la forma en la que el modelo se adapta a los datos (ver **Figura 33**). Por lo general, nuestro objetivo es un grupo de parámetros que reduzcan la desviación entre la respuesta del sistema medida (mediciones) y la que el modelo predice. Este proceso se denomina a menudo «calibración del modelo».

Figura 33.

Ajuste de un Modelo Matemático a Datos Experimentales



Nota: Fuente <https://www.svibs.com/>, "Datos Empíricos vs. Modelo Teórico".

ARTeMIS Modal cuenta con cinco implementaciones diferentes de la técnica de identificación estocástica de subespacios. Estas son:

- ❖ Componente principal no ponderado (SSI-UPC)
- ❖ Componente principal no ponderado ampliado (SSI-UPCX)
- ❖ Componente principal (SSI-PC)

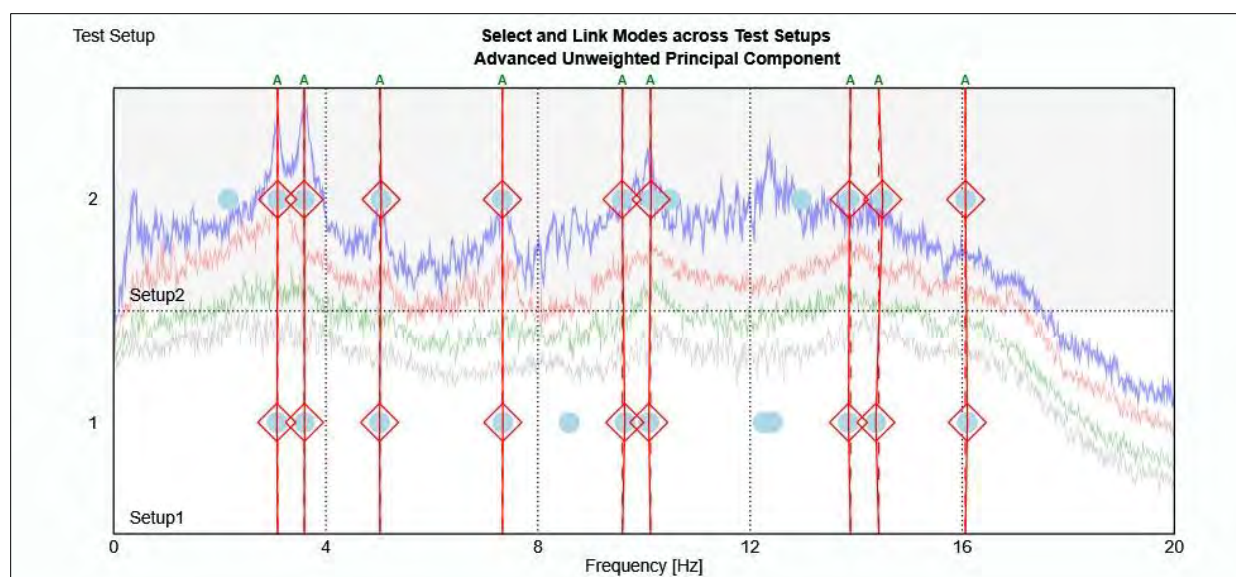
- ❖ Análisis de variables canónicas (SSI-CVA)
- ❖ Configuraciones de prueba combinadas de componentes principales no ponderados (SSI-UPC Merged)

Las cuatro primeras funcionan por configuración de prueba. Esto significa que se extraen los modos de cada configuración de prueba y, a continuación, se utiliza una herramienta llamada «Select & Link» para fusionar los resultados y formar un conjunto global de parámetros modales. La quinta técnica realiza la fusión como parte del procesamiento de señales que se lleva a cabo en la tarea «Prepare Data», y el resultado es que se trabaja con esta herramienta como si solo hubiera una única configuración de prueba, aunque haya varias. Esta técnica está pensada para múltiples configuraciones de prueba.

En la presente tesis emplearemos los siguientes métodos de identificación modal: *Descomposición mejorada del dominio de frecuencia o Enhanced Frequency Domain Decomposition o EFDD* (ver **Figura 31**) y la *Identificación estocástica de subespacios con componentes principales no ponderadas ampliadas, o SSI-UPCX* (ver **Figura 34**).

Figura 34.

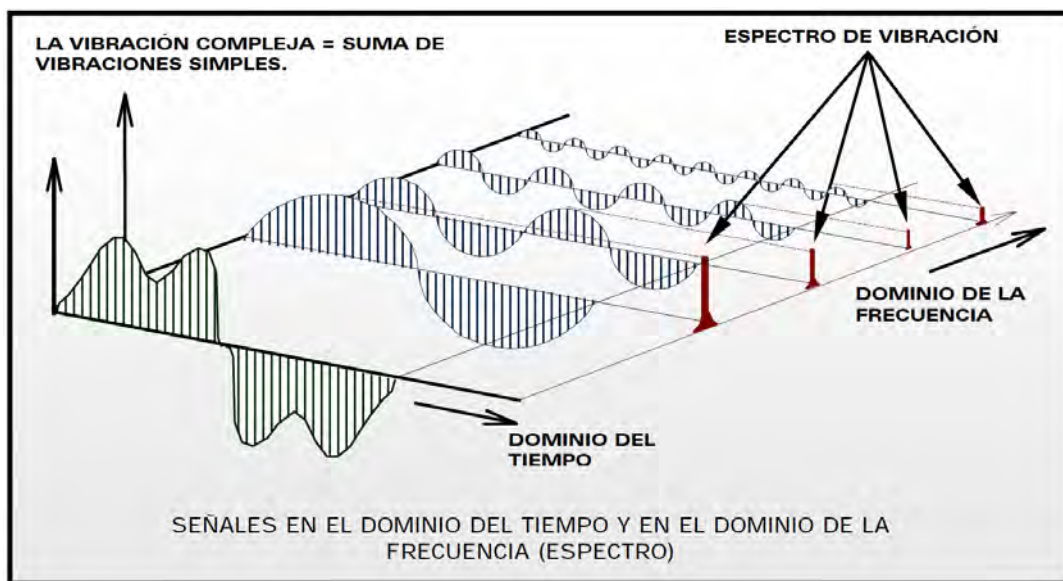
Diagrama de estabilización



Nota. Método estocástico de identificación de subespacios (SSI - UPCX). Fuente: Elaboración propia en el software Artemis Modal Pro (Torre de Chinchero instrumentado con velocímetros).

Figura 35.

Representación Tridimensional de Frecuencia (Espectro) – Tiempo – Magnitud (Amplitud)



Nota. (A-MAQ S.A., 2005).

A continuación desarrollaremos conceptos de ciertos términos mencionados anteriormente para su mejor comprensión:

Función periódica

Una función periódica (**Ecuación 5**) se puede definir como aquella que se repite a intervalos de tiempos fijos, lo que se conoce como el período de la función (T), esta función puede expresarse como la adición de una cantidad infinita de funciones seno y coseno.

Ecuación 5.

Función periódica

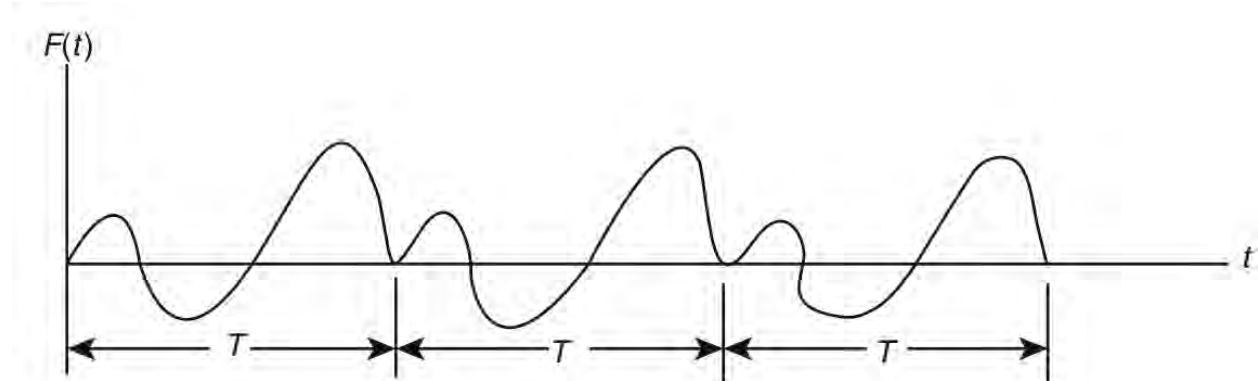
$$f(t + T) = f(t) \quad (5)$$

Serie de Fourier

La serie de Fourier es una representación de una función periódica (ver **Figura 36**), expresada como la suma de un número infinito de términos de seno y coseno. Con la **Ecuación 6** es posible calcular cualquier función periódica dada.

Figura 36.

Función periódica arbitraria



Nota. Fuente (Clough & Penzien, 2003).

Ecuación 6.

Serie de Fourier

$$F(t) = +a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ a_n \cos \frac{2\pi n}{T} + b_n \sin \frac{2\pi n}{T} \right\} \quad (6)$$

Transformada de Fourier

A través de la utilización de la serie de Fourier es posible expresar una señal dada en términos de las frecuencias que la componen. La transformada de Fourier se puede utilizar para descomponer funciones; la **Ecuación 7** que se muestra a continuación, se presenta como una función continua:

Ecuación 7.*Transformada de Fourier*

$$Y(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} y(t)e^{-i\omega t} dt \quad (7)$$

La Transformada de Fourier nos permite ver la misma información desde dos perspectivas diferentes:

1. **Dominio del Tiempo ($f(t)$):** Es como vemos las cosas normalmente. Por ejemplo, una onda de sonido que sube y baja a medida que pasa el tiempo. Nos dice *cuándo* sucede algo.
2. **Dominio de la Frecuencia ($F(\omega)$):** Nos dice *qué tan rápido* ocurren las cosas. En lugar de ver una onda que sube y baja, vemos una gráfica con "picos" que indican qué notas o frecuencias están presentes y con qué intensidad.

Transformada discreta de Fourier

La **Ecuación 8** de la transformada de Fourier se aplica desde $-\infty$ hasta ∞ ; sin embargo, en la práctica este no será el caso, ya que habrá un intervalo de tiempo determinado. Es por eso que aplicaremos la Transformada discreta de Fourier (DFT):

Ecuación 8.*Transformada discreta de Fourier*

$$C_n = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} F(t_j)e^{-2\pi i(\frac{nj}{N})}, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots, (N-1) \quad (8)$$

Transformada rápida de Fourier

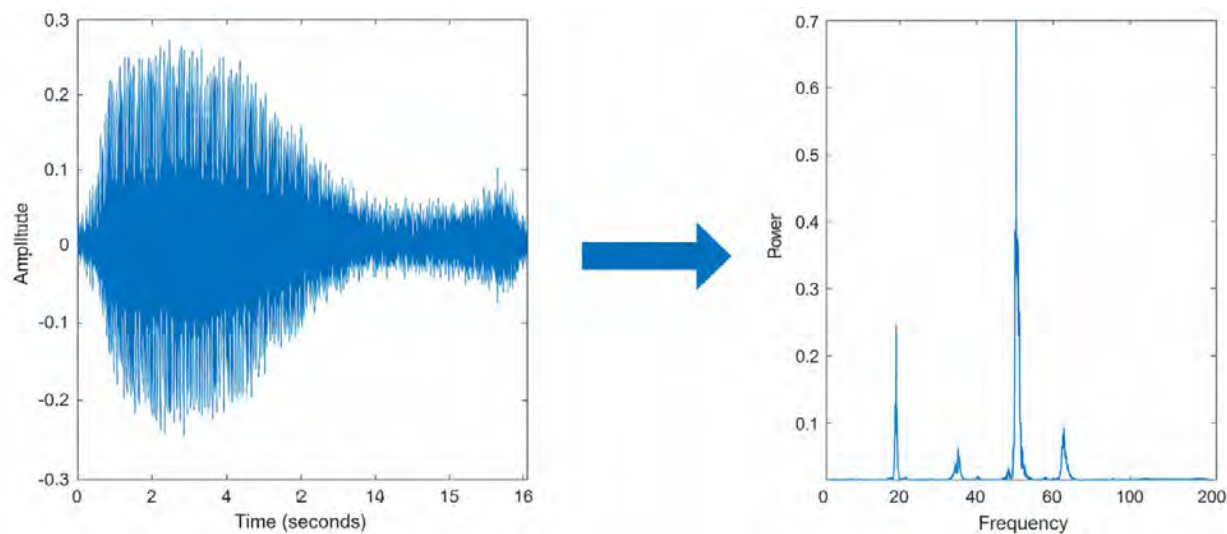
Para la página web de *MathWorks* (2026), la transformada rápida de Fourier (FFT) es una implementación altamente optimizada de la transformada discreta de Fourier (DFT), que convierte

señales discretas del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia (ver **Figura 37**). Los cálculos de FFT proporcionan información sobre el contenido en frecuencia y otras propiedades de la señal.

Figura 37.

Señal de audio de una ballena azul descompuesta en sus componentes de frecuencia empleando

FFT



Nota. Fuente (MathWorks, 2026).

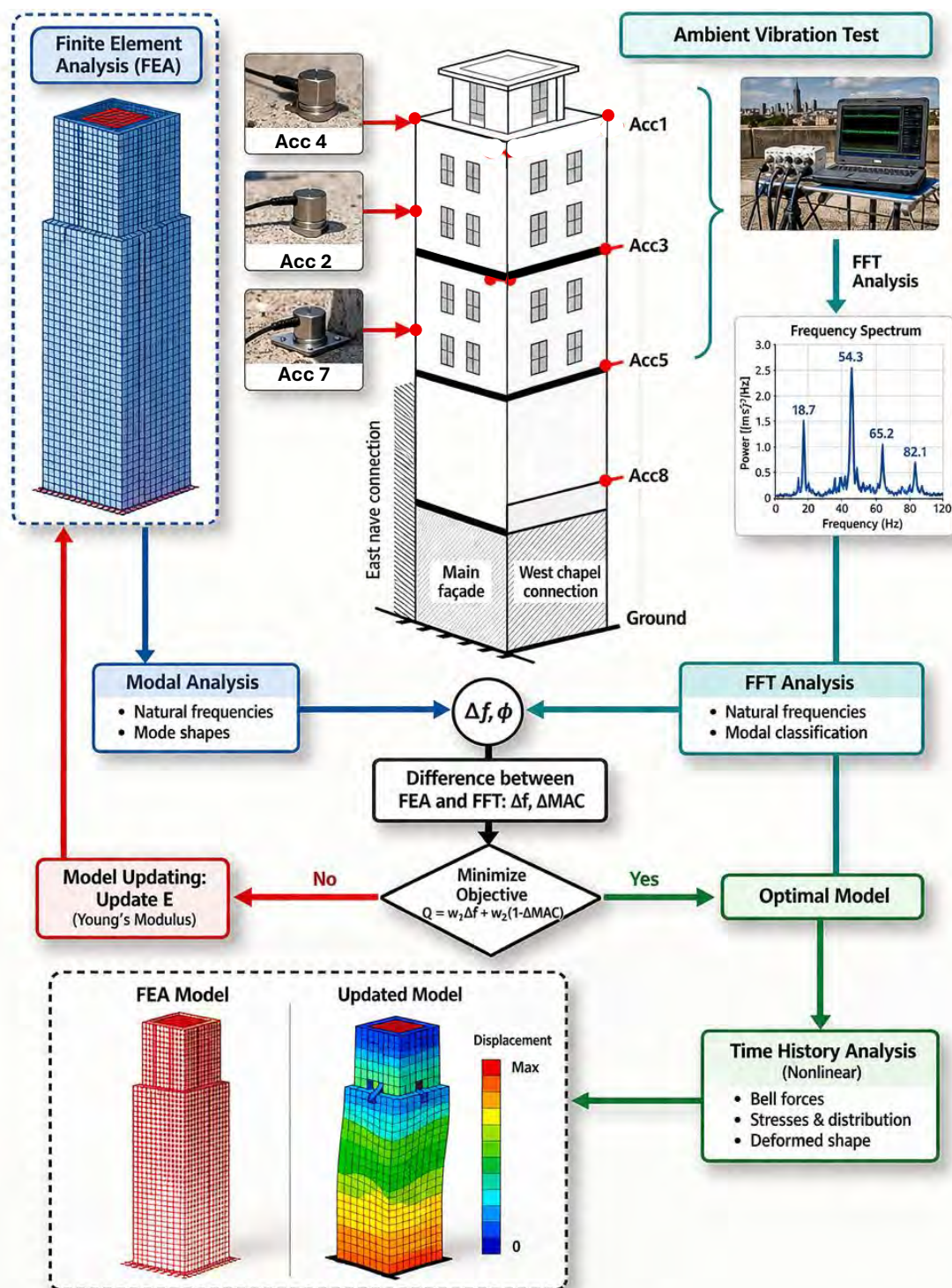
Entre los algoritmos de FFT populares se encuentran el algoritmo de Cooley-Tukey, el algoritmo de FFT de factores primos y el algoritmo de FFT de Rader. El algoritmo de FFT más utilizado es el algoritmo de Cooley-Tukey, que descompone una DFT grande en DFT más pequeñas para aumentar la velocidad de cálculo y reducir la complejidad.

15.3. Calibración del Modelo de Elementos Finitos

El paso final de la caracterización dinámica es la calibración del modelo numérico. Este procedimiento se ilustra en la **Figura 38** y consiste en examinar las diferencias en las formas y frecuencias de los modos principales entre los resultados numéricos (FE) y los experimentales (OMA). Si se comprueba que la diferencia es insignificante, el modelo puede considerarse preciso; en cambio, si existe una diferencia en los valores, los parámetros de actualización deben modificarse de forma iterativa hasta alcanzar la convergencia.

Figura 38.

Ejemplo de un procedimiento de evaluación basado en análisis dinámicos para campanarios



Nota. Fuente Readaptado de (Sarah, 2020).

Ajuste manual

Según Can Altunışık, Yesevi Okur, Fuat Genç, Günaydin, & Adanur (2018), la selección de los parámetros de actualización es uno de los pasos más importantes en la actualización del modelo. Las características dinámicas están relacionadas con la masa y la rigidez de los elementos estructurales. Por lo tanto, las propiedades de los materiales (módulo de Young, densidad del material y coeficiente de Poisson), las propiedades geométricas (secciones y masas adicionales) y las propiedades de modelización (condiciones de contorno) pueden seleccionarse como parámetros inciertos que deben actualizarse. Las condiciones de contorno y las propiedades de los materiales son parámetros inciertos que se utilizan con frecuencia para la actualización del modelo.

Para Pachón García (2016) este procedimiento se lleva a cabo variando un parámetro de actualización cada vez hasta que se alcanza una concordancia satisfactoria entre los resultados para las principales formas modales globales (error inferior al 5 %) (p. 36).

Criterio de exactitud Modal o Modal Assurance Criterion (MAC)

La bondad del proceso de calibración se verifica comparando los resultados experimentales y los del modelo de EF, en lo que respecta a las formas modales y las frecuencias naturales. Determinar el porcentaje de diferencia ($\leq 5\%$) entre las frecuencias naturales medidas experimental y numéricamente es la forma más fácil de comparar ambas. De este modo se establece el nivel de correlación entre las dos series de resultados.

En lo que se refiere a las formas modales, utilizamos el valor MAC (Criterio de garantía modal), que mide la desviación de la comparación gráfica lograda por medio de la **Ecuación 9**. Este método fue propuesto por (Allemang, 2003) y establece una relación entre las formas modales de ambas respuestas y su rango varía desde 0 a 1. Esto significa que la correlación entre las formas modales numéricas y experimentales es más exacta mientras el valor del MAC está más cerca de uno. Las formas modales experimentales se logran a partir de los resultados del ensayo de

identificación modal, mientras que las formas modales numéricas se generan en el análisis modal del modelo numérico.

Ecuación 9.

Modal Assurance Criterion (MAC)

$$MAC(\psi_a, \psi_e) = \frac{|(\{\psi_a\}^t \{\psi_e\})|^2}{(\{\psi_a\}^t \{\psi_a\})(\{\psi_e\}^t \{\psi_e\})} \quad (9)$$

Donde ψ_a, ψ_e son, respectivamente, los vectores de valores propios experimentales y analíticos; t indica la transpuesta.

Aparte del ajuste manual, que se basa en gran medida en el método de prueba y error, existen otras técnicas de identificación de sistemas que pueden ayudar a perfeccionar el modelo elástico lineal, tales como: el método de sensibilidad inversa de valores propio (IE), el método de Douglas-Reid (DR), la técnica de algoritmos genéticos (GA) y el análisis de sensibilidad (SA). Cabe señalar que estos métodos suelen ser largos y complejos y, por lo tanto, puede que no sean el enfoque más eficiente o eficaz para calibrar ciertos modelos de elementos finitos.

Método de sensibilidad inversa de valores propio (IE): Es un método que ajusta los parámetros de un modelo numérico (por ejemplo, un modelo de elementos finitos) usando la sensibilidad de los autovalores (frecuencias naturales) respecto a dichos parámetros, pero en forma inversa.

En un sistema dinámico, las propiedades físicas (masa, rigidez, amortiguamiento) determinan las propiedades modales (autovalores/frecuencias y autovectores/modos).

- **Problema Directo:** Si cambias la rigidez (k), los autovalores (λ) cambian.
- **Problema Inverso (IE):** Si observamos un cambio en los autovalores medidos, ¿qué cambios ocurrieron en los parámetros físicos?

Método de Douglas-Reid (DR): Para Sovero & Martel (2014, pág. A.11) el método de Douglas-Reid se basa en la formulación de ecuaciones que dependen de las variables desconocidas X. Las expresiones que describen los resultados analíticos para frecuencias y modos modales de vibración han sido formuladas siguiendo las expresiones presentadas en las ecuaciones **Ecuación 10** y **Ecuación 11**.

Ecuación 10.

Ecuación de segundo grado planteada por Douglas-Reid, para frecuencias (f)

$$f_{j, FE} = C_j^f + \sum_{N=1}^{2N+1} A_{j,N}^f X_N + B_{j,N}^f X_N^2 \quad (10)$$

Ecuación 11.

Ecuación de segundo grado planteada por Douglas-Reid, para formas modales (φ)

$$\phi_{j, FE} = C_j^\phi + \sum_{N=1}^{2N+1} A_{j,N}^\phi X_N + B_{j,N}^\phi X_N^2 \quad (11)$$

donde A, B y C son constantes de la ecuación cuadrática propuesta por Douglas-Reid para las frecuencias (f) y las formas modales (φ); j es el subíndice correspondiente a los modos de vibración que se quieren calibrar; N representa la cantidad de variables desconocidas (X) que se desean calcular.

Para determinar las constantes de las ecuaciones del método Douglas-Reid, a cada variable desconocida se le asigna un valor medio (base - X_b), uno inferior (lower - X_l) y uno superior (upper - X_u). Estos valores pueden establecerse en base a estudios semejantes y bajo criterio del evaluador. A continuación, se llevan a cabo varias combinaciones para definir ecuaciones que permitan determinar el valor de las constantes. Se deben llevar a cabo $2N + 1$ combinaciones si hay N variables desconocidas.

Técnica de algoritmos genéticos (GA): En el contexto de la calibración de modelos (también conocida como ajuste de modelos o *Model Updating*), los Algoritmos Genéticos (AG) son una técnica de optimización global inspirada en la teoría de la evolución de Charles Darwin. A diferencia del método de sensibilidad inversa (que usa derivadas y cálculo matricial), los AG no necesitan saber "hacia dónde" está la solución, sino que "prueban" muchas soluciones al mismo tiempo y se quedan con las mejores.

Análisis de sensibilidad (SA): El análisis de sensibilidad en la calibración de modelos es una herramienta que permite entender qué tanto influyen los parámetros del modelo en sus resultados (ver **Figura 39**), y se usa para saber qué parámetros ajustar y cómo hacerlo durante la calibración (ver **Tabla 2**). Tras un ajuste manual preliminar, el método SA puede utilizarse para refinar aún más los resultados, teniendo en cuenta únicamente los parámetros de actualización más sensibles mediante un análisis de sensibilidad que utilice el siguiente índice de sensibilidad:

Ecuación 12.

Índice de sensibilidad

$$S_{i,j} = \frac{\partial u_i}{\partial a_j} \approx \left[\frac{u_i x(a_j + h) - u_i x(a_j)}{h} \right] \quad (12)$$

u_i es la respuesta del modelo de EF utilizando un parámetro estructural a_j y h es un incremento de dicho parámetro. El subíndice $i = 1, 2, 3, \dots, N$ es por N es por N respuestas y $j = 1, 2, 3, \dots, M$ para M parámetros. La **Ecuación 12** estima la sensibilidad con las unidades de la respuesta y del valor del parámetro, situación que conllevaría a problemas de mal condicionamiento numérico (Friswell y Mottershead, 1995), por lo cual es necesario normalizar esta sensibilidad de acuerdo con los valores iniciales de los parámetros estructurales, tal que:

Ecuación 13.

Normalización con valores iniciales de los parámetros estructurales.

$$\psi_{i,j} = [S_{i,j}][\bar{a}_j] \quad (13)$$

Donde $[\bar{a}_j]$ es una matriz en la que los valores de los parámetros estructurales iniciales están dispuestos a lo largo de la diagonal principal. La sensibilidad puede normalizarse (**Ecuación 13**) según las respuestas de interés.

Ecuación 14.

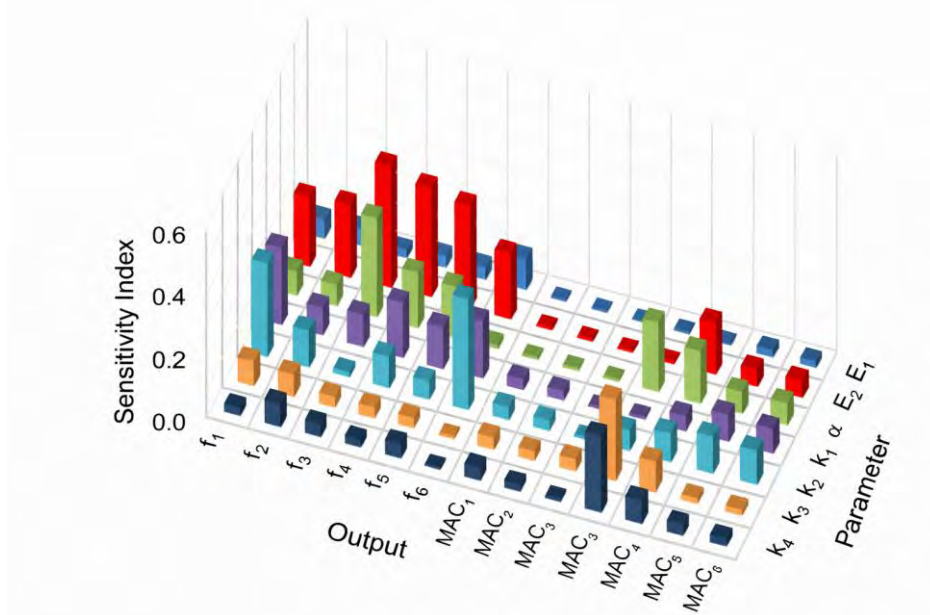
Normalización con valores iniciales del MEF

$$\Psi_{i,j} = [u_i^o]^{-1}[S_{i,j}][\bar{a}_j] \quad (14)$$

Donde $[u_i^o]$ es una matriz con las respuestas iniciales del MEF en la diagonal principal. Graficar la sensibilidad normalizada de la **Ecuación 14** puede ser una herramienta útil para determinar qué parámetro es estimable basándose en las respuestas experimentales accesibles.

Figura 39.

Índice de sensibilidad local



Nota. Fuente (Ferraioli, Miccoli, & Abruzzese, 2018).

Tabla 2.*Actualización de los parámetros para la identificación estructural*

No.	Parameter	Reference value	Lower value	Upper value	Updated model
1	E_1 (MPa)	1800	1800	1800	1800
2	E_2 (MPa)	2600	2100	3100	2400
3	$\alpha(-)$	0.17	0.11	0.23	0.14
4	k_1 (MPa)	0.15	0.10	0.35	0.20
5	k_2 (MPa)	236	50	525	300
6	k_3 (MN/m)	8.47	8.47	8.47	8.47
7	k_3 (MN/m ²)	8.47	8.47	8.47	8.47
7	k_4 (MN/m ²)	3.70	3.70	3.70	3.70
7	k_4 (MN/m ²)	3.70	3.70	3.70	3.70

*Nota. Fuente (Ferraioli, Miccoli, & Abruzzese, 2018).***15.4. Efecto de resonancia**

Condición en la que la frecuencia de excitación es igual a la frecuencia natural del sistema vibrante. Para que este efecto se origine (Peralta, Reyes López, & Godínez Muñoz , 2009) mencionan que se requiere:

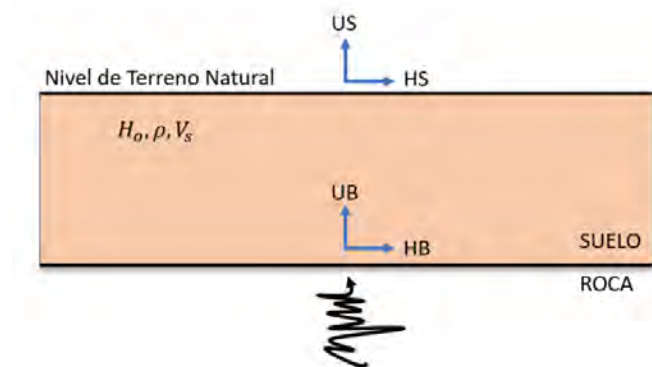
- a) De un sistema elástico que presente frecuencias naturales de vibración,
- b) De una fuerza externa de tipo periódico que actúe sobre el sistema elástico,
- c) De una coincidencia entre ambos tipos de frecuencia.

Para calcular la frecuencia de excitación o para nuestro caso la frecuencia de vibración del medio continuo que para esta investigación es el terreno o suelo de fundación, existen diversas metodologías entre ellas el ensayo de Nakamura, el cual permite estimar la función de transferencia de un depósito de suelo a partir de medición de vibraciones ambientales superficiales, en términos de frecuencia permite determinar la frecuencia fundamental del suelo.

Esta metodología está basada en el supuesto de que la razón entre los espectros de aceleración verticales y horizontales en el basamento rocoso es una constante. Por tanto, se puede estimar la forma en la que el depósito de suelo modifica el contenido de frecuencias de una señal incidente en la roca basal. (Nakamura, 1989, págs. 25-33)

Figura 40.

Esquema de Aceleraciones de Nakamura



Nota. Fuente (ENSAYO NAKAMURA Servicio de Ingeniería Civil Ingeniería Geotécnica, 2026).

Donde:

US: Señal Sísmica Vertical en Superficie. S_{US} es su Espectro de Fourier.

HS: Señal Sísmica Horizontal en Superficie. S_{HS} es su Espectro de Fourier.

UB: Señal Sísmica Vertical en el Basamento Rocosos. S_{UB} es su Espectro de Fourier.

HB: Señal Sísmica Horizontal en Basamento Rocosos. S_{HB} es su Espectro de Fourier.

La **Figura 40** muestra el esquema de análisis del método, para el cual existe un par de señales, vertical y horizontal que inciden sobre el depósito de suelo en su frontera inferior con el basamento rocoso. Esta señal es transmitida por el depósito de suelo hacia la superficie, viéndose modificada en el proceso (Nakamura, On the H/V Spectrum, 2008). La función de transferencia del depósito (ver **Ecuación 15**), en consideración del método, es la siguiente:

Ecuación 15.

Función de transferencia

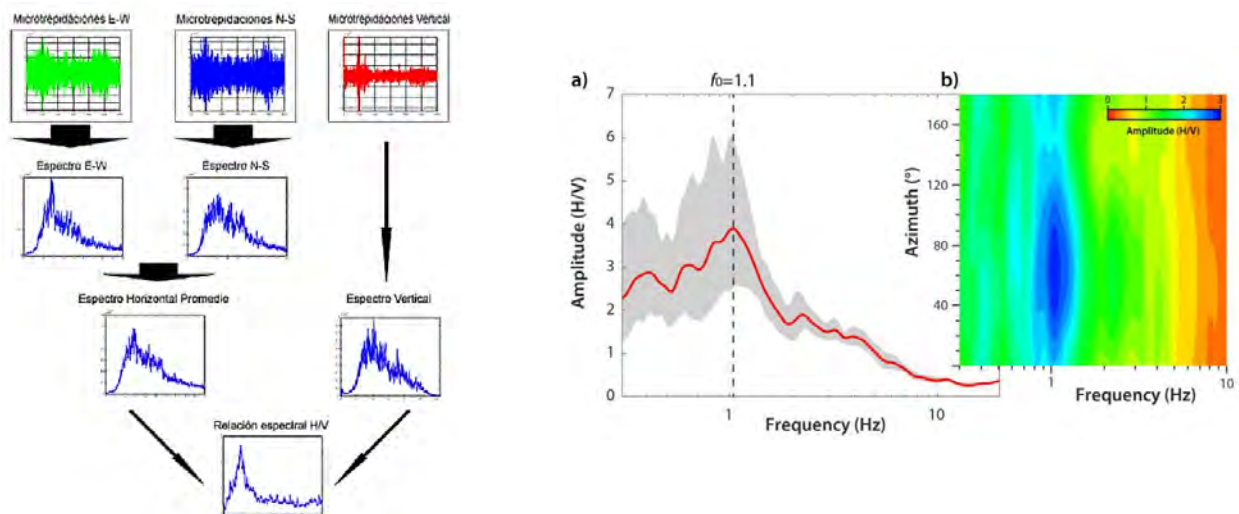
$$S_{\tau\tau} = \frac{S_{HS}}{S_{US}} \quad (15)$$

En su dimensión práctica, el ensayo consiste en el registro de aceleraciones superficiales a través de Sismógrafo Digital 24 bit Triaxial SR-04. Los registros son procesados generando un ventaneo en las tres componentes capturadas, dentro del cual se transforma la señal al dominio de las frecuencias a través de una Transformada de Fourier. Después de aplicar filtros de amplitud y frecuencia, se calcula la razón espectral H/V de cada una de las ventanas. El periodo fundamental del depósito se obtiene encontrando el periodo para el cual amplifica el promedio de las razones espectrales H/V de todas las ventanas analizadas (ver **Figura 41**).

Figura 41.

Izquierda: Diagrama de Flujo para obtención de la razón H/V a partir de vibración ambiental.

Derecha: Curva mHVSr y Gráfico direccional que muestra la amplitud H/V en función del azimut.



Nota. Fuente: Izquierda (Rosales Climent, 2001). Derecha (Montesinos, Mercerat, Rojas, Alferez, & Combey, 2025).

El número de registros y su duración depende del objetivo del estudio. En el caso de una microzonificación sísmica, se recomienda la ejecución de una cuadrícula con separación entre puntos de unos 100 a 300 metros dependiendo de la precisión que se quiera lograr en la caracterización.

En el caso de clasificación sísmica, se recomienda un mínimo de 5 registros de 30 minutos cada uno, en una geometría que se distribuya tan uniformemente como sea posible dentro del terreno en estudio.

En cualquier caso, estos registros deben ser capturados en momentos de baja actividad antrópica, de tal forma de capturar las vibraciones del suelo y no las inducidas por tráfico, personas, vehículos o industrias. Para esto, es ideal capturar los registros en el amanecer o anochecer.

Este método aplicado al efecto que tendría las vibraciones de la superficie en torres exentas se puede mencionar que; el método de Nakamura, o técnica de razones espectrales H/V (Horizontal-a-Vertical), se aplica a torres exentas de mampostería histórica como una herramienta no destructiva de alta eficacia para determinar sus períodos fundamentales de vibración y evaluar su vulnerabilidad estructural.

Al registrar el ruido sísmico ambiental en la cúspide y en la base de la torre, este método permite aislar las frecuencias de resonancia propias de la estructura de los efectos de sitio del suelo, superando las limitaciones de los modelos numéricos que suelen verse afectados por la incertidumbre en las propiedades mecánicas de la mampostería antigua.

La detección precisa de estos modos de vibración primarios mediante el análisis de Nakamura es crucial, ya que cualquier variación temporal en estas frecuencias proporciona una alerta temprana sobre daños estructurales internos, fisuras o degradación material acumulada tras eventos sísmicos.

CAPITULO III: TORRE EXENTA DE CHINCHERO

16. Resumen histórico

Según el historiador, antropólogo y arqueólogo español Manuel Ballesteros Gaibrois, la construcción de la iglesia de Chinchero comprende entre los años 1570 a 1607. Es así como en 1572, el virrey Toledo fundó la «Doctrina de nuestra señora de Monserrat de Chinchero», y solicitó que se construyera la actual iglesia católica, la misma que se culminó por los primeros años del siglo XVII; posiblemente en 1607, según reza la inscripción del gran arco de la iglesia que se abre sobre el presbítero. En la **Figura 44** podemos apreciar la evolución de la torre a través de los años.

Asimismo, es en ese período en que se terminará el «muro de las hornacinas» y se construirá la escalinata central, así como la «**torre**» y la cruz que dibujan definitivamente la imagen «clásica» del Chinchero turístico .

Figura 42.

Virgen de Monserrat (1963) por Francisco Chihuantito



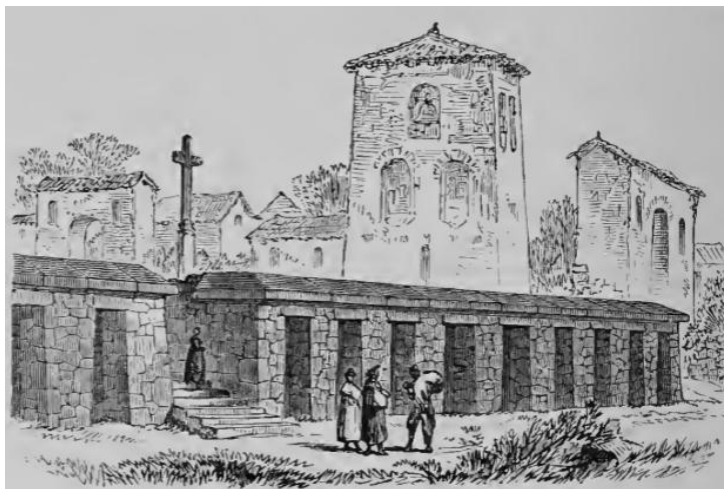
Nota. En la parte inferior izquierda se puede apreciar la plaza, atrio, iglesia, “torre” y cruz. Fuente: Mesa, José. (1982) “Historia de la pintura cuzqueña VOL. I”. Fundación A.N. Wiese. P. 174. Adaptado por Arca arte colonial.

Para esas fechas no tenemos ninguna imagen ni descripción que nos asegure plenamente de que la construcción de dichas estructuras fue así, pero para fines del siglo XVII sí tenemos un tal testimonio. En efecto, en la iglesia de Chinchero en la actualidad se conserva un excelente cuadro (ver **Figura 42**) del pintor indígena cuzqueño Francisco Chihuantito, fechado en 1693 y donde vemos una imagen fiel de la iglesia, la plaza, el atrio, la cruz y la torre Figura 8, que resulta ya idéntica a la que se conocía en el siglo XIX, según el testimonio de Squier.

Así mismo, Ephraim George Squier, en su viaje a Hispanoamérica y su posterior publicación de su libro «Perú incidents of travel and exploration in the land of the incas» realiza un bosquejo de la torre de Chinchero (ver **Figura 43**).

Figura 43.

Torre de Chinchero, hornacinas y arco de entrada

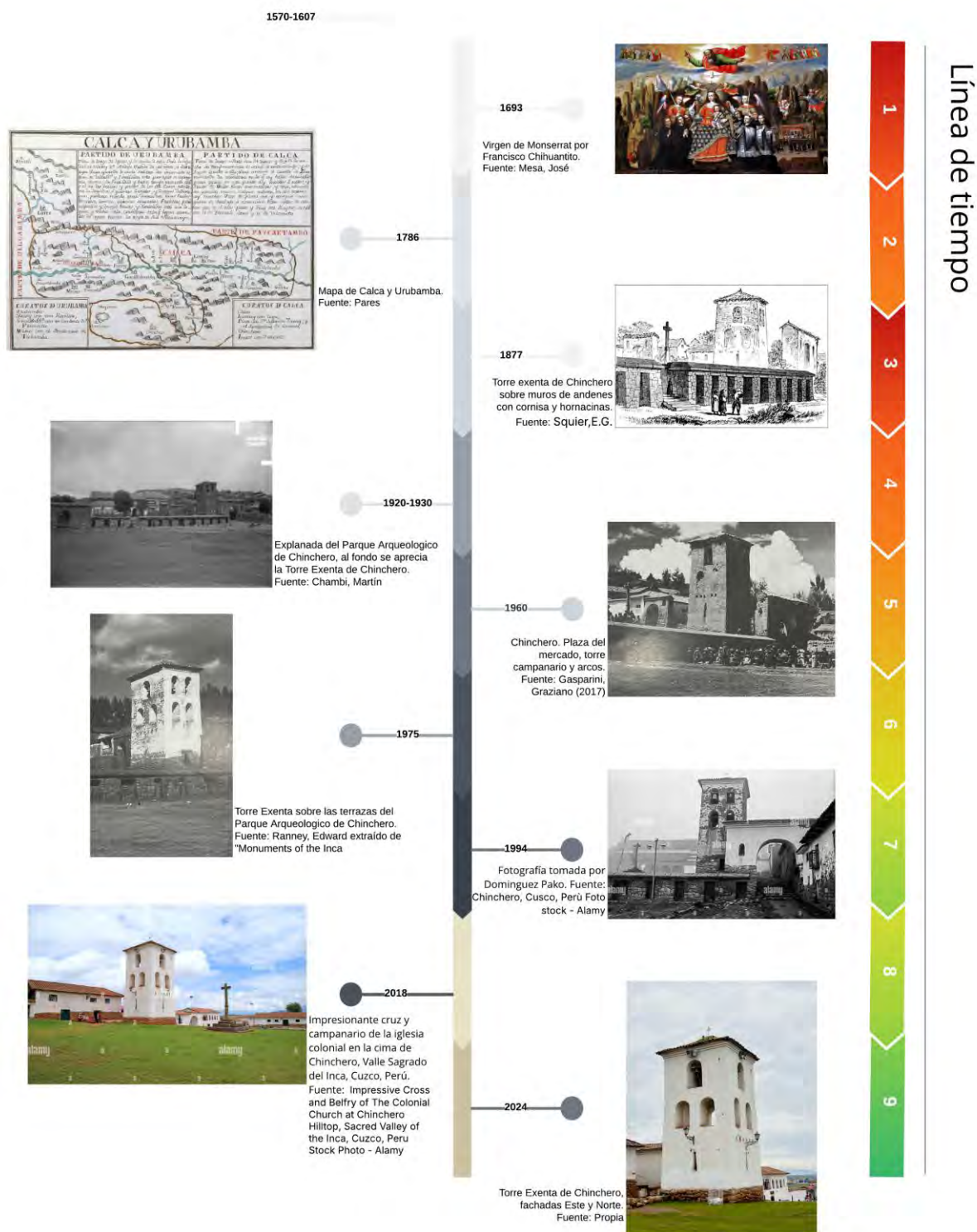


Nota. Fuente (George Squier, 1877).

En el bosquejo de la torre de Chinchero realizado por George Squier, podemos notar que la configuración de las aberturas de las ventanas es diferente a las que podemos ver hoy en día. Esto puede afectar a las propiedades dinámicas originales de la torre; esto no podemos saber ya que no existen pruebas de vibración realizadas anteriormente en la torre de Chinchero.

Figura 44.

Evolución de la Torre Exenta de Chinchero a través del tiempo



Nota. Elaboración propia.

17. Ubicación de la torre en estudio

La torre exenta se encuentra ubicada dentro del Parque Arqueológico de Chinchero juntamente con la iglesia de Nuestra Señora de Natividad (ver **Figura 46**). Se sitúa a 16 km de la plaza de armas de Cusco en dirección 28° N-W y a 720 m de la plaza de armas del distrito de Chinchero en dirección 40° N-E (ver **Figura 45**).

Figura 45.

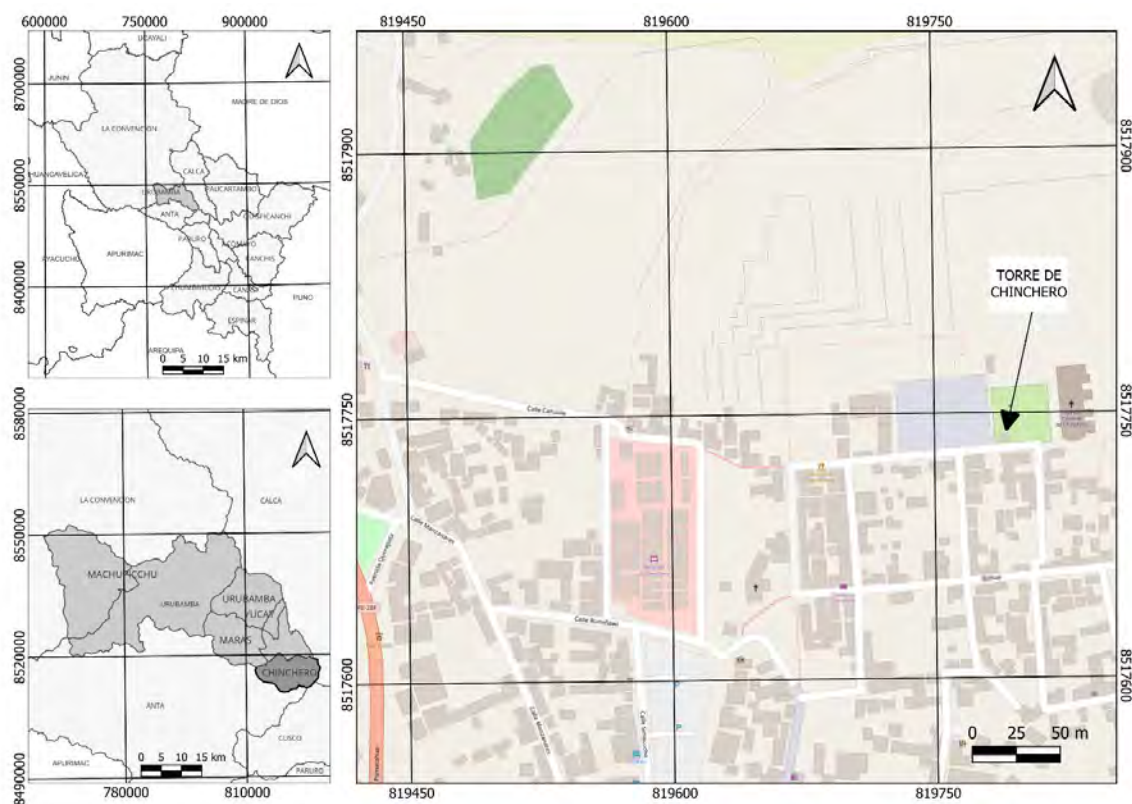
Localización del templo de Chinchero



Nota. Elaboración propia.

El parque arqueológico de Chinchero es uno de los principales atractivos del pueblo. Se trata de un importante recinto agrícola de hasta 43 hectáreas elaborado durante el periodo incaico y que fue habitado anteriormente por la cultura Killke.

Destaca por sus escaleras, muros incas y bellos andenes donde se pasteaban camélidos y se cultivaba la tierra con diversos productos. En él se encontraron piezas cerámicas, restos óseos y trabajos en piedra que actualmente se exhiben en el Museo de Sitio.

Figura 46.*Ubicación de la Torre de Chinchero*

Nota. Fuente Elaboración propia.

18. Composición de la torre

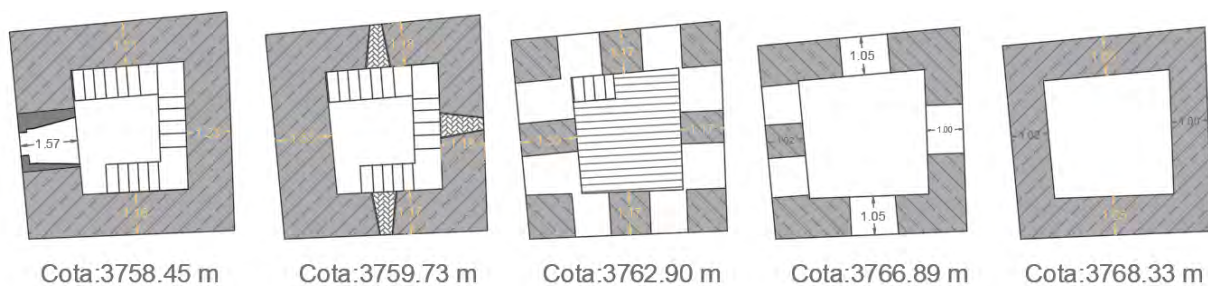
La torre exenta de chinchero está compuesta por tres estructuras bien definidas con variable influencia en el comportamiento global de la torre. El cuerpo construido por albañilería de adobe, la cual descansa sobre una base (cimentación) de albañilería de piedra; y el techo o cerramiento en el tope está compuesto por una armadura de madera, la cual soporta capas de coberturas (enchaclado de carrizo, torta de barro y tejas de arcilla).

18.1. Cuerpo de la Torre

La estructura del cuerpo está construida en base a muros de albañilería de adobe, tiene una forma tubular cuadrada de espesor variable a lo largo de su altura, siendo mayor al inicio de la albañilería de adobe y disminuyendo en el tope. Los muros presentan vanos o aberturas en dos niveles; estos sirven para sostener las campanas. Los detalles de espesores y cotas se detallan en la **Figura 47**.

Figura 47.

Espesores de muro a diferentes cotas (alturas) de la Torre de Chinchero



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Los espesores están comprendidos entre un intervalo de 1.16 m y 1.57 m al inicio, para luego terminar en otro intervalo comprendido entre 1.00 m y 1.05 m en el tope. Esto demuestra la irregularidad de espesores en altura.

Sobre los espesores útiles podemos mencionar que los muros de adobe correspondiente al cuerpo de la torre presentan un recubrimiento de aproximadamente 2 a 4 pulgadas, este recubrimiento no es constante. Sin embargo el desgaste producido por las condiciones medioambientales está reduciendo dicho espesor de recubrimiento. Para la generación se despreció esta afirmación considerándolo como parte del modelo 3D.

Figura 48.

Izquierda: Vista isométrica de nube de puntos de la torre. Derecha: Fachadas Norte y Este de la torre



Nota. La figura de la izquierda fue generada en el software Revit 2025 y la figura de la derecha es una toma fotográfica.

El cuerpo de la torre está conformado por dos muros paralelos a la dirección Este – Oeste y dos muros paralelos a la dirección Norte – Sur. El cuerpo de albañilería de adobe presenta aberturas correspondientes a las ventanas en dos niveles. En un primer nivel presenta ocho ventanas distribuidas dos por cada muro. En el segundo nivel presenta dos ventanas en el muro Oeste y uno por cada muro en dirección Norte, Sur y Este.

Sin embargo como se mencionó anteriormente esta configuración sufrió cambios a través de los años, esto podemos contrastarlo en la **Figura 44**.

18.2. Base de la Torre

Figura 49.

Tomas fotográficas de la cimentación de la Torre de Chinchero



Nota. Fotografía de elaboración propia.

La cimentación (ver **Figura 49**) de la torre es de albañilería de piedra. Con una configuración poligonal finamente trabajada y con una inclinación ligera.

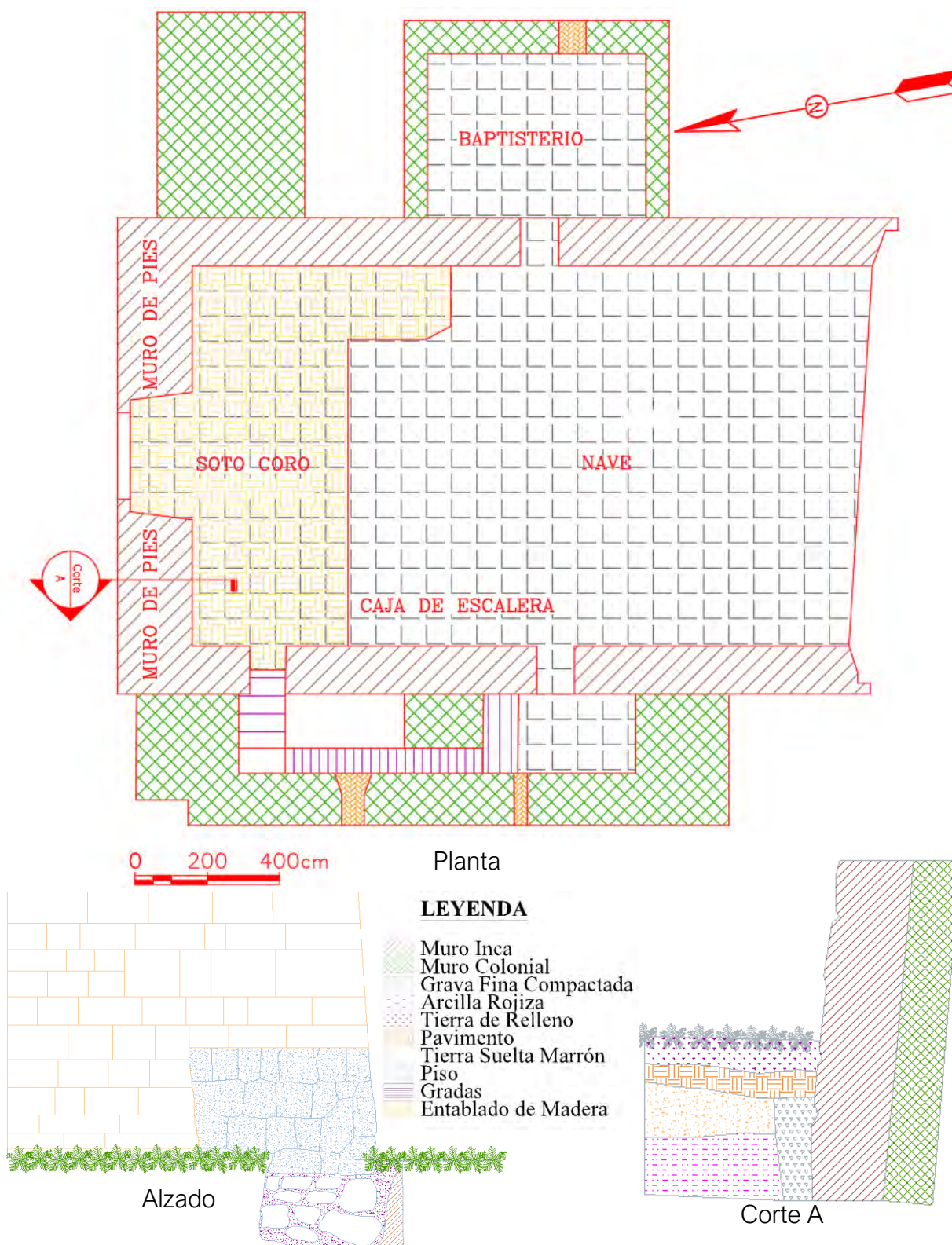
Según los muros de origen inca constituyeron la base para los muros coloniales de gran parte de las estructuras como la iglesia y la torre de Chinchero (pp. 81).

Durante los años 1968 y 1971 la Misión Científica Española en Hispanoamérica mediante el Proyecto de Investigación Interdisciplinaria realizó trabajos de excavación en varias zonas del complejo arqueológico de Chinchero; una muestra de ello se detalla en la **Figura 50**.

La profundidad de excavación realizada fue de 1.90 m, encontrándose diferentes estratos como se muestran en la **Figura 50**.

Figura 50.

Planta, alzado y corte de una excavación en el ángulo N - O de la Iglesia de Chinchero



Nota. Elaboración propia, readaptado de (Alcina Franch, 1976, pág. 84).

José Alcina Franch (1976), afirma que los cimientos y todo el complejo urbanístico de Chinchero descansan sobre una base compuesta por *arcilla roja*. Sobre el substrato de referencia, se ha identificado la presencia de una estratificación de tierra de relleno sobre la que se ha asentado el pavimento inca, el cual se caracteriza por una consistencia compuesta por una amalgama de tierra apisonada y guijarros.

Las excavaciones antes mencionadas se realizaron en distintas zonas del Complejo Arqueológico de Chinchero. En cuanto se refiere a la torre exenta se puede apreciar parte de la cimentación en los trabajos realizados próximos a esta (ver **Figura 51**).

Figura 51.

Excavaciones próximas a la Torre Exenta de Chinchero



Nota. Extraído de (Franch, 1976, Láminas. 51b y 52a).

Estas bases que sirven de cimentación de varias estructuras del PACH¹ son clasificadas como volcánicas o ígneas (andesitas) y sedimentarias (calizas), tal como lo describe (Nair, 2015).

En la **Figura 52**, podemos ver la configuración de la cimentación de las estructuras del PACH.

¹ PACH: Parque Arqueológico de Chinchero

Figura 52.

Registro fotográfico de la cimentación de la Iglesia Nuestra Señora de la Natividad de Chinchero



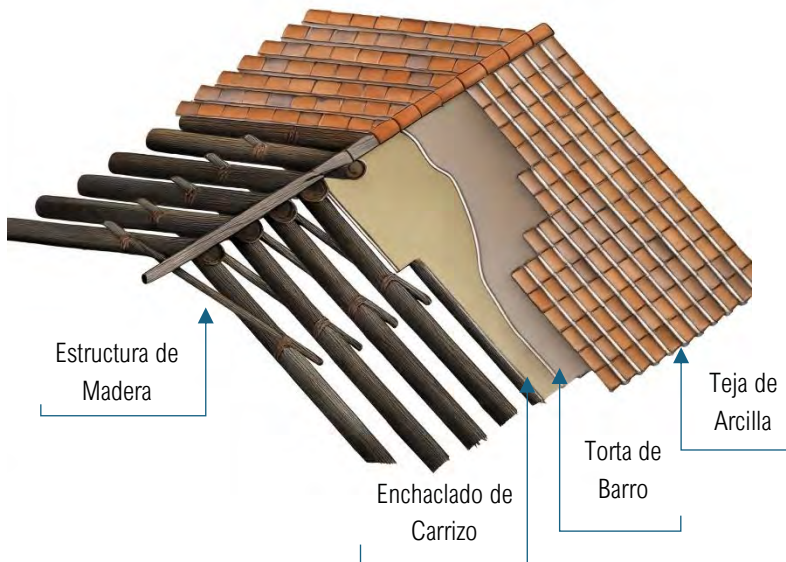
Nota. Imagen a color (Irene & Roger, n.d.). Imágenes blanco y negro (Alcina Franch, 1976).

18.3. Cobertura de la Torre

El sistema de techo o cobertura consiste en una armadura de madera de cuatro aguas la cual soporta varias capas de coberturas, estas capas son: la primera un enchaclado de carrizo, como capa intermedia; torta de barro y por último una capa de tejas de arcilla (ver **Figura 53** y **Figura 57**), cumpliendo así con la protección de la parte superior de la torre .

Figura 53.

Axonometría de sistema de cobertura de par y nudillo



Nota: Adaptado de (Cancino, y otros, 2012).

La estructura de madera **Figura 54**, **Figura 55** y **Figura 56**, están constituidos por troncos de 8"(200 mm) y 6"(150 mm); los durmientes tienen dimensiones de 6" x 8", se conectan mediante empalmes en sus puntos de intersección, y amarrándose entre sí con tientos de cuero o soguillas y clavos de hierro forjado. Los elementos de madera están tallados para apoyarse sobre una mayor superficie y así facilitar su construcción.

Figura 54.

Armadura de madera



Figura 55.

Vista frontal de la armadura de madera



Figura 56.

Vista en planta de la armadura de madera

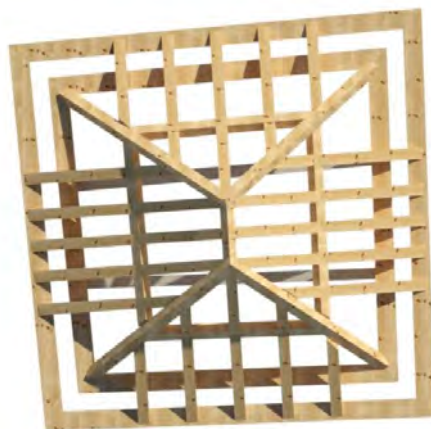
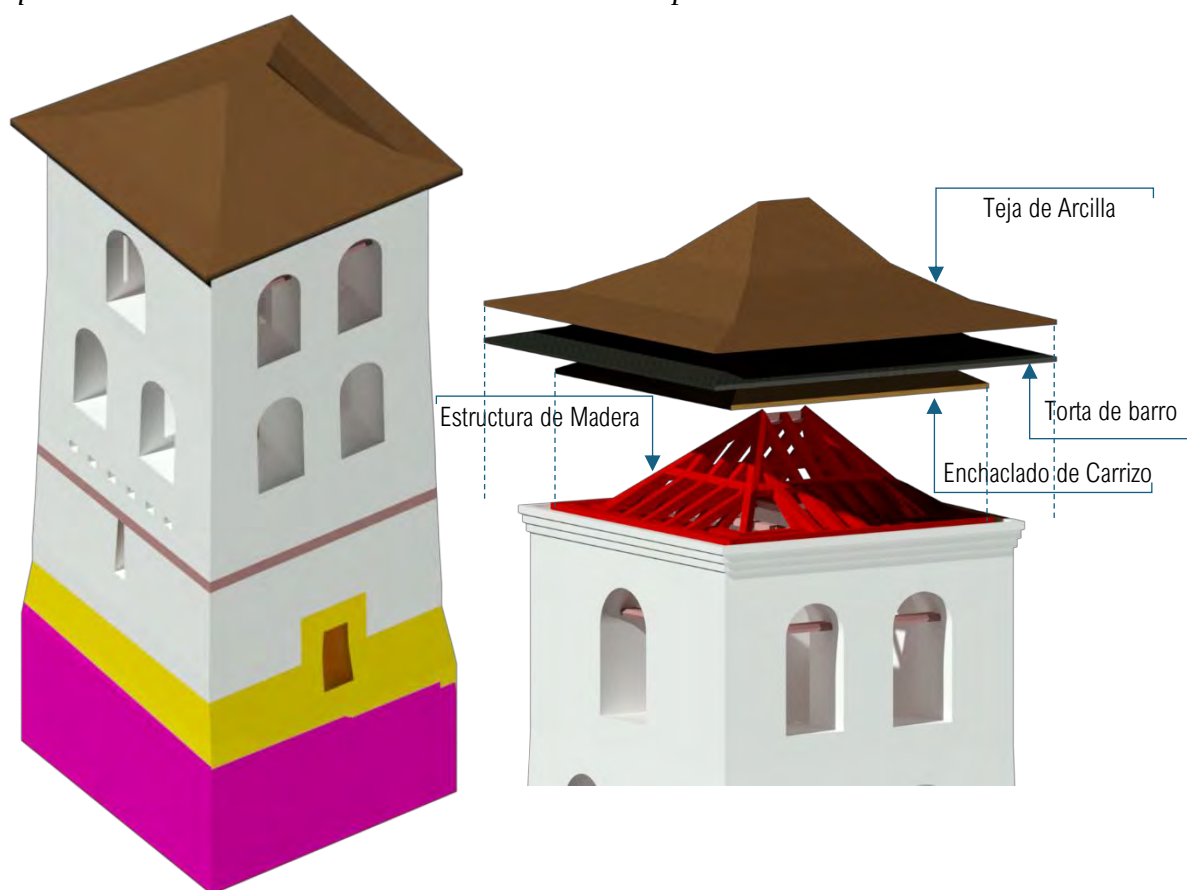


Figura 57.

Izquierda: Modelo 3D de la Torre. Derecha: Descomposición de la estructura de Techo



Nota. Elaboración Propia.

19. Propiedades de los materiales

La torre de Chinchero está compuesta por tres partes; la base, el cuerpo y la cobertura, cada uno de estos componentes está conformado por materiales característicos de este tipo de estructura.

En el presente trabajo de investigación no se realizó la caracterización mecánica de los materiales que conforman la estructura, sin embargo, se tomaron valores iniciales de fuentes bibliográficas y de trabajos de investigación relacionados a estructuras similares cuyos objetos de estudio fueron estructuras religiosas e históricas en diferentes puntos de la región del Cusco.

Para las propiedades mecánicas de la albañilería de adobe se toma referencia los valores obtenidos en el trabajo de investigación titulado: “ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD

SÍSMICA DEL TEMPLO COLONIAL DEL DISTRITO DE CHINCHERO-PROVINCIA DE URUBAMBA, 2017” (AVSU, 2017) en la cual se desarrolló pruebas mecánicas con dos grupos de especímenes: el primer grupo de ensayos se realizaron con elementos extraídos de la iglesia de Nuestra Señora de la Natividad de Chinchero y el segundo grupo con elementos elaborados de acuerdo a la distribución granulometría realizada para mantener la similitud de estos con los elementos originales.

La estructura está compuesta por muros contruidos con albañilería de adobe, que se asientan sobre una base de piedra irregular. La cimentación se construyó con albañilería de piedra. El armazón estructural del techo, las vigas collar, vigas de entrepiso y vigas en las ventanas que soportan las campanas están fabricados con madera.

19.1. Albañilería de adobe

19.1.1. Propiedades mecánicas de albañilería de adobe

Interpretar el comportamiento de estructuras de carácter histórico requiere entre muchos aspectos el de comprender las características mecánicas de los materiales de los que está compuesto, en este sentido la caracterización de los materiales mediante ensayos de laboratorio es de vital importancia; estos estudios serán validos siempre y cuando se realicen de acuerdo con las normas y procedimientos mínimos requeridos. Si bien el presente trabajo de investigación no contempla dicha caracterización mecánica, se considerará los resultados obtenidos por (Flores Cardenas & Paucar Choqqe, 2017), también se tomara como referencia otras fuentes bibliográficas para compararlos con estos valores y así poder validarlos. Los siguientes ensayos se realizaron con muestras originales extraídas del templo Nuestra Señora de la Natividad de Chinchero (ver **Figura 58**) y muestras elaboradas de acuerdo con el análisis granulométrico para mantener la similitud con los especímenes originales. Los ensayos realizados fueron: compresión

simple en bloques tallados, pruebas de compresión diagonal en muros de adobe y compresión simple en pilas de adobe.

19.1.1.1 Compresión simple en bloques de adobe (muestras originales extraídas y talladas)

Para caracterizar la resistencia a la compresión de las unidades de adobe $f_{c,b}$, se tallaron muestras cúbicas de aproximadamente 11.2 cm de lado y se sometieron a ensayo de compresión uniaxial en bloques de adobe. El valor medio de resistencia a la compresión obtenido es de 1.66 MPa. El peso unitario promedio de estas muestras es de 1452.21 kg/m³.

Figura 58.

Excavación, extracción y transporte de muestras de bloques de adobe



Nota. Se extrajeron dos muestras de adobe de uno de los muros de la sacristía con las siguientes dimensiones: el primer adobe tiene las siguientes dimensiones: 60 x 30 x 15 cm y el segundo 50 x 25 x 15 cm. Fuente (Flores Cardenas & Paucar Choque, 2017).

Es preciso mencionar que para la extracción de muestras in situ y su posterior transporte, se tiene que seguir ciertos lineamientos y cuidados para evitar alterar la composición intrínseca de dichas muestras.

Tabla 3.*Peso unitario de los adobes (bloques tallados)*

Determinación del peso unitario de las unidades de adobe – Iglesia de Chinchero					
Unidad	Dimensiones	Volumen	Peso	Peso unitario	Peso unitario promedio
	[cm]	[m ³]	[gr]	[gr/m ³]	[kg/m ³]
1	11.08 x 11.54 x 11.37	1453.80	2080.00	1.43	
2	10.84 x 11.41 x 11.25	1391.45	2050.00	1.47	
3	11.28 x 11.46 x 10.95	1415.49	2070.00	1.46	1452.21
4	11.57 x 11.31 x 11.15	1459.05	2055.00	1.41	
5	10.84 x 11.04 x 11.02	1318.80	1960.00	1.49	

Nota. Fuente (Flores Cardenas & Paucar Choque, 2017).

Según el Reglamento Nacional de Edificaciones (2020) en su Norma E.080 Diseño y construcción con tierra reforzada, en el artículo 8, ítems 8.1 inciso a, señala: “*La resistencia se mide mediante el ensayo de compresión del material en cubos de 0.1 m de arista*”. Las dimensiones de las unidades descritas en la **Tabla 3** cumplen la premisa antes mencionada.

Tabla 4.*Resultados de ensayos a compresión simple en bloques*

Resistencia a la compresión uniaxial de las unidades de adobe – Iglesia de Chinchero					
Unidad	Dimensiones	Área	Carga máxima	Resistencia a la compresión	Resistencia media a la compresión $f_{c,b}$
	[cm]	[cm ²]	[kg]	[kg/cm ²]	[kg/cm ²]
1	11.31 x 11.49 x 11.37	129.86	2055.00	15.82	
2	10.84 x 11.30 x 11.25	122.48	1715.00	14.00	
3	11.34 x 11.63 x 10.95	131.78	1882.00	14.28	16.97
4	11.41 x 11.13 x 11.15	126.97	2157.00	16.99	
5	10.95 x 11.04 x 11.02	120.88	2873.00	23.77	

Nota. Fuente (Flores Cardenas & Paucar Choque, 2017).

Otra premisa descrita en el R.N.E Norma E.080 en el artículo 8, ítems 8.1 inciso b; señala:
La resistencia última se determina conforme a la expresión siguiente:

Ecuación 16.

Resistencia ultima

$$f_o = 1.0 \text{ MPa} = 10.2 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \quad (16)$$

19.1.1.2 Compresión simple en muretes de adobe (muestras elaboradas)

Así mismo se elaboraron pilas con adobes donde valor medio de resistencia a la compresión obtenido es de 1.36 MPa. La resistencia ultima según la Norma E.080 del R.N.E (2020) para pilas de adobe es de 0.60 MPa.

Tabla 5.

Resultados de ensayos a compresión simple en pilas

Resistencia a la compresión en pilas conformada por unidades de adobe – Iglesia de Chinchero					
Espécimen	Dimensiones L x A x H	Área	Resistencia última Pu	Esfuerzo último	Promedio esfuerzo último f'm
	[cm]	[cm ²]	[kg]	[kg/cm ²]	[kg/cm ²]
Pila N°01	29.80 x 14.80 x 50.20	441.04	5800.00	13.15	13.85
Pila N°02	30.00 x 15.00 x 51.00	450.00	5400.00	12.00	
Pila N°03	29.70 x 15.00 x 50.80	445.50	6200.00	13.92	
Pila N°04	30.00 x 15.10 x 51.30	453.00	7400.00	16.34	

Nota. Fuente (Flores Cardenas & Paucar Choque, 2017).

19.1.1.3 Ensayos de compresión diagonal en muretes de adobe (muestras elaboradas)

Finalmente, la resistencia promedio a corte de los muretes de adobe fue de 0.12 MPa. Valor que supera los 0.025 MPa descritos en la Norma E.080 del R.N.E. (2020).

Tabla 6.

Peso unitario de los muretes

Determinación del peso unitario de los muretes de adobe – Iglesia de Chinchero					
Unidad	Dimensiones [cm]	Diagonal [cm]	Volumen [cm ³]	Peso [kg]	Peso unitario [kg/m ³]
1	65.30 x 64.80 x 15.00	92.00	63471.60	97.81	1541.00
2	64.90 x 64.50 x 15.00	91.50	62790.75	99.78	1589.09
3	65.20 x 65.10 x 15.00	92.14	63667.80	100.83	1583.69
4	65.50 x 65.40 x 15.00	92.56	64255.50	102.95	1602.20
5	65.10 x 65.30 x 15.10	92.21	64190.55	100.05	1558.64
6	65.00 x 64.80 x 15.20	91.78	64022.40	100.91	1576.17
Peso unitario promedio					1575.13

Nota. Fuente (Flores Cardenas & Paucar Choque, 2017).

Tabla 7.

Esfuerzo último de corte en muretes

Determinación del esfuerzo último de corte de los muretes de adobe – Iglesia de Chinchero					
Unidad	Dimensiones [cm]	Diagonal [cm]	Área diagonal [cm ²]	Carga [kg]	Corte [kg/cm ²]
1	65.30 x 64.80 x 15.00	91.995	1379.93	2000.00	1.45
2	64.90 x 64.50 x 15.00	91.500	1372.50	1800.00	1.31
3	65.20 x 65.10 x 15.00	92.136	1382.04	1600.00	1.16
4	65.50 x 65.40 x 15.00	92.560	1388.40	1600.00	1.15
Esfuerzo último de corte promedio					1.27

Nota. Fuente (Flores Cardenas & Paucar Choque, 2017).

19.1.2. Cálculo de módulo de elasticidad y módulo de Poisson

19.1.2.1 Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad no se evaluó mediante ensayos experimentales. Por lo tanto, se estimó basándose en correlaciones con la resistencia a la compresión $f_{c,b}$ de las unidades de adobe. Los valores se calculan tanto para los bloques y pilas de adobe.

Tabla 8.

Fórmulas empíricas para el cálculo del módulo de Elasticidad en Albañilería

AUTORES	E_b	E_b [kg/cm ²]	E_b [MPa]
San Bartolome, 1990	500 $f_{c,b}$	8485.00	832.10
Paulay and Priestley, 1992	750 $f_{c,b}$	12727.50	1248.15
Roberto Meli	450 $f_{c,b}$	7636.50	748.89
Tomazevic, 1999	200 $f_{c,b}$	3394.00	332.84
Caporale et al, 2015	160 $f_{c,b}$	2715.20	266.27
Sinha y Pedreschi, 1983	1180 $f_{c,b}^{0.83}$	12374.22	1213.50
Hendry, 1990	2116 $f_{c,b}^{0.5}$	8716.79	854.83
Delgado Salvador Ericka, 2006	6500.00	6500.00	637.44
Norma peruana	2040.00	2040.00	200.06

Nota. Los valores calculados de E_b corresponden a los bloques de adobe. Para ello el valor de $f_{c,b}$ fue de 16.97 kg/cm².

Tabla 9.

Fórmulas empíricas para el cálculo del módulo de Elasticidad en Albañilería

AUTOR	E_p	E_p [kg/cm ²]	E_p [MPa]
San Bartolome, 1990	500 $f_{c,b}$	6925.00	679.11
Paulay and Priestley, 1992	750 $f_{c,b}$	10387.50	1018.67
Roberto Meli	450 $f_{c,b}$	6232.50	611.20
Tomazevic, 1999	200 $f_{c,b}$	2770.00	271.65
Caporale et al, 2015	160 $f_{c,b}$	2216.00	217.32
Sinha y Pedreschi, 1983	1180 $f_{c,b}^{0.83}$	10454.07	1025.20

Hendry, 1990	2116 $f_{c,b}^{0.5}$	7874.82	772.26
Delgado Salvador Ericka, 2006	6500.00	6500.00	637.44
Norma peruana	2040.00	2040.00	200.06

Nota. Los valores calculados de E_p corresponden a las pilas de adobe. Para ello el valor de $f_{c,b}$ fue de 13.85 kg/cm².

La Norma E.080 del R.N.E. (2020) en el artículo 8, ítem 8.7 establece que: “Mientras no se cuente con resultados de ensayos experimentales para el módulo de elasticidad de los muros de tierra, se usa el valor de 200 MPa = 2040 kgf/cm²”.

Los valores obtenidos en (Flores Cardenas & Paucar Choque, 2017), (Mamani Quispe, 2016) y ensayos realizados en la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP); además de otros trabajos realizados en albañilería de adobe se muestran en la **Tabla 11**.

19.1.2.2 Módulo de Poisson

Los valores recomendados según la literatura consultada se muestran en la **Tabla 10**.

Tabla 10.

Módulo de Poisson

AUTORES	μ
Delgado, Erika 2006 (PUCP)	0.25
Blondet, Marcial 2006 (PUCP)	0.20
Illampas, Rojiro 2011 (Cyprus)	0.35
Varum, Humberto 2015 (Porto)	0.20

Nota. Fuente Varios.

Tabla 11.*Propiedades mecánicas de albañilería de adobe obtenidas de literatura*

Referencia	País	Resistencia a la compresión f_c (MPa)	Resistencia a corte f_v (MPa)	Módulo de elasticidad E (MPa)	Módulo de corte G (MPa)	δ Inicial [kg/m ³]
Resultados de ensayos PUCP (ensayos realizados en pilas)	Perú	Ica: 0.46 Lima: 0.44 Ica: 0.59	Ica: 0.014–0.050 Lima: 0.010–0.043	Ica: 64 Lima: 38.8–94.3	-	-
Resultados de ensayos PUCP (ensayos realizados en bloques)	Perú	Lima: 1.51 Kuñotambo: 0.71	-	-	-	-
NTE E. 080 (2020) - Código Peruano de Construcción (Pilas)	Perú	0.60 (mínimo requerido)	0.025 (resistencia ultima)	200	-	-
NTE E. 080 (2020) - Código Peruano de Construcción (Bloques)	Perú	1.00 (resistencia ultima)	-	-	-	-
Vargas et al. (1986)	Perú	-	0.047–0.098 (de diferentes fuentes)	-	-	-
Ottazzi et al. (1989)	Perú	1.64	0.07	181.00	-	-
Yamin et al. (2004)	Colombia	1.22	0.31	117.00	30.00	-
Quagliarini, Lenci, y Iorio (2010)	Italia	1.00	0.14 0.27	33.00	-	-
Tarque (2008)	Perú	0.84	0.07	174.00	78.00	-
Liberatore et al. (2006)	Italia	-	0.02	-	-	-
Varum et al. (2006)	Portugal	1.13	0.11	183.00	33.00	-
Resultados de ensayos UNSAAC (ensayos realizados en pilas)	Perú	Chincheró: 1.36 Miska: 0.86	*Chincheró: 0.12 *Miska: 0.06	Chincheró: 611.25 Miska: 518.62	-	*Chincheró: 1575.13
Resultados de ensayos UNSAAC (ensayos realizados en bloques)	Perú	Chincheró: 1.66 Miska: 1.25	-	Chincheró: 748.89 Miska: 712.50	-	Chincheró: 1452.21 Miska: 1742.02

19.2. Albañilería de piedra

Si bien no se realizaron pruebas experimentales del material que conforma la cimentación de la torre, podemos mencionar trabajos de investigación referidos a la albañilería de piedra.

Es así como (Condori Mar & Mendoza Chacón, 2015) en el trabajo de investigación “DETERMINACIÓN DE LA FUERZA CORTANTE EN MURETES DE PIEDRA CON MORTERO DE CAL Y ARENA” evalúan la resistencia a compresión diagonal en prismas de piedra con mortero de cal, dichos muretes fueron elaborados con piedra andesita y arenisca típicos de monumentos históricos y templos, los resultados obtenidos oscilan entre 4.70 kgf/cm^2 para los muretes elaborados con andesita y 5.88 kgf/cm^2 los elaborados con areniscas.

(Cuadros Rojas, 2020) en su tesis de maestría titulada “ANÁLISIS ESTRUCTURAL AVANZADO DEL TEMPLO DE HUAYTARÁ-HUANCAVELICA, PERÚ” realiza ensayos en muestras de rocas incas obtenidas de canteras y alrededores del sitio arqueológico de Huaytará. Las probetas fueron extraídas con ayuda de equipos propios del laboratorio de Mecánica de Rocas de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Los ensayos de compresión uniaxial se realizaron en la PUCP y los ensayos de compresión simple y módulo de elasticidad se realizaron en el laboratorio de tecnología de estructuras de la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC). Los resultados obtenidos se muestran en la **Tabla 12**.

Tabla 12.

Resistencia a compresión de roca tipo inca

Ítem	Laboratorio	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Resistencia (MPa)	E_s [GPa]	δ_s Final [kg/m^3]
1	PUCP-Perú	5.5	11	95.52	-	2290
2	UPC-España	5.5	5.5	121.55	25.65	-

Nota. Fuente (Cuadros Rojas, 2020).

En octubre del 2001 se firmó un convenio entre el Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres de la Universidad Nacional de Ingeniería y el Arzobispado del Cusco para la realización del estudio denominado “Evaluación de la Vulnerabilidad de la Catedral del Cusco”. Esta investigación contempló muchos estudios, entre ellos la caracterización de materiales propios de la estructura. Es así que se analizaron tres muestras de piedra extraídas de la catedral de Cuzco para evaluar la resistencia a la compresión $f_{c,s}$ y el módulo de elasticidad E_s (Olarte et al., 2001). Los resultados de este estudio son comparables con otros realizados en otros países como Portugal, donde se empleó una similar tipología para la caracterización mecánica de la albañilería. Los valores finales se detallan en la **Tabla 13**.

Tabla 13.

Datos experimentales disponibles en la bibliografía sobre la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad de las unidades de piedra

Propiedades Mecánicas de Albañilería de Piedra				
País	Referencia	Esfuerzo a compresión $f_{c,s}$ [MPa]		E_s [GPa]
		Valor medio	Rango	
Perú (Cuzco)	Olarte <i>et al.</i> (2011)	45.0		19.4
Portugal	Vasconcelos (2005)		35.2 - 148.5	11.0 – 63.8
	Sentivel and Lourenço (2009)	69.2		20.2
				Piedra granito - Catedral de Cuzco
				Albañilería de granito

Nota. Fuente (Zanotti, 2015).

En la literatura también podemos encontrar referencias sobre las propiedades mecánicas de albañilerías de piedras, ladrillos, etc., como el del Dr. Roberto Meli Piralla descrito en su libro “Ingeniería estructural de los edificios históricos” y que se muestra en la **Tabla 14**.

Tabla 14.

Propiedades mecánicas de algunos tipos de albañilería de edificios históricos

Material	Peso Volumétrico [ton/m ³]	Resistencia a compresión [kg/cm ²]	Resistencia a cortante [kg/cm ²]	Módulo de elasticidad [kg/cm ²]
Adobe	1.80	2 - 5	0.50	3000
Bloques de Tepetate con mortero de cal	1.80	5 - 10	0.50	5000
Ladrillo con mortero de barro	1.60	5 - 10	1.00	5000
Ladrillo con mortero de cal	1.60	15 - 20	2.00	10000
Mampostería de piedra irregular con mortero de cal	2.00	10 - 15	0.50	5000
Mampostería de piedra de buena calidad	2.00	30.00	2.00	20000

Nota. Fuente (Meli Piralla, 2000).

Reglamentos como la Norma Técnica Italiana de la construcción (NTC 2008) prescriben rangos de valores para las propiedades mecánicas de diversos tipos de albañilería, los cuales se muestran en la **Tabla 15**.

Tabla 15.

Valores de parámetros mecánicos (máximo y mínimo) para diferentes tipos de albañilería

Tipología de mampostería	f _c (MPa) mín-máx	τ (MPa) mín-máx	E (MPa) mín-máx	G (MPa) mín-máx	ρ kg/m ³
Mampostería de piedra irregular (gravilla, piedra de canto rodado e irregular)	1.0–1.8	0.020–0.032	690–1050	230–350	1900
Mampostería de piedra irregular con capas externas de poco espesor y relleno	2.0–3.0	0.035–0.051	1020–1440	340–480	2000
Mampostería de piedra regular con buen aparejo Mampostería	2.6–3.8	0.056–0.074	1500–1980	500–600	2100
Mampostería de piedra suave (tufo, calcarenita, etc.)	1.4–2.4	0.028–0.042	900–1260	300–420	1600
Mampostería de piedra rectangular de revestimiento	6.0–8.0	0.090–0.120	2400–3200	780–940	2200
Mampostería de ladrillo solido con mortero de cal	2.4–4.0	0.060–0.092	1200–1800	400–600	1800
Mampostería de ladrillo perforado (<40%) con mortero de cemento	5.0–8.0	0.240–0.320	3600–5400	875–1400	1500

Mampostería de ladrillo perforado (<45%)	4.0–6.0	0.300–0.400	3600–5400	1080–1620	1200
Mampostería de ladrillo perforado (<45%) con juntas perpendiculares no rellenas	3.0–4.0	0.100–0.130	2700–3600	810–1080	1100
Mampostería de bloques de cemento y cemento aligerado (vacíos: 45%-65%)	1.5–2.0	0.095–0.125	1200–1600	300–400	1200
Mampostería de bloques de cemento (<45%)	3.0–4.4	0.180–0.240	2400–3520	600–880	1400

f_c = Resistencia a la compresión media de la mampostería

τ = Resistencia a corte media de la mampostería

E = Valor medio del módulo de elasticidad

G = Valor medio del módulo de corte

ρ = Densidad media

Nota. Fuente (NTC, 2009).

19.3. Elementos de madera

La cobertura de la torre de Chinchero está conformada por tejas, torta de barro y enchaclado de carrizo; estos elementos se sostienen por un armazón estructural de madera, el cual está simplemente apoyado sobre la base de los muros que rodean la torre.

Debido a la falta de conexión entre las vigas y listones de descanso con las paredes de adobe, añadida a la deformabilidad del sistema del techo, este se consideró en el modelo numérico de la estructura solo como una carga vertical. Al observar la forma modal de la estructura basada en las pruebas de identificación dinámica realizadas y el modelo analítico (véase la sección 23), las vigas de unión al igual que los durmientes donde descansa todo el techo no tienen una gran influencia en el comportamiento dinámico de la estructura.

Debido a la falta de caracterización de los elementos de madera para la torre de la iglesia de Chinchero, se adoptaron las propiedades materiales de la madera basándose en las pruebas experimentales y la bibliografía consultada (ver **Tabla 16**).

Tabla 16.

Propiedades de los materiales de las diferentes especies de madera adoptadas

Propiedades	Huarango (Clase A)	Pino de Oregón (Clase B)	Eucalipto (Clase B)	Cedro (Clase C)	Sapele (Clase C)	Ciprés (Clase C)
Densidad [kg/cm ²]	1040	600	560	380	490	470
Módulo de Elasticidad [MPa]	16900	10680	9806	9380	8610	5470
Coeficiente de Poisson			0.3			

Nota. Fuente (NTC, 2009).

20. Resumen de las propiedades mecánicas

Las propiedades físicas y mecánicas tomadas en consideración durante el análisis de la estructura se presentan en la **Tabla 33**. Los valores propuestos se tomaron como valores de referencia, lo cual es importante porque permite establecer un punto de referencia o partida para comparar diferentes aspectos o situaciones. Sin embargo, debido al desconocimiento de algunas propiedades mecánicas y a la variabilidad de los valores experimentales disponibles en la bibliografía, se llevó a cabo un análisis paramétrico con el objetivo de evaluar la influencia de los parámetros en el comportamiento de la estructura (véase el ítem 24).

CAPÍTULO IV: MODELAMIENTO GEOMÉTRICO Y NUMÉRICO

21. Torre exenta

Para la reconstrucción geométrica de la Torre del Templo Nuestra Señora de la Natividad de Chinchero se realizó el levantamiento lásergramétrico, el cual nos generó un modelo 3D de carácter estático.

21.1. Levantamiento con Escáner Laser Terrestre (TLS)

Para la modelización de la torre, incluyendo la totalidad de su geometría, se implementó un escaneo con un escáner láser 3D terrestre. Este dispositivo de exploración óptica, comúnmente denominado «escáner», se emplea como instrumento de medición tridimensional, posibilitando la representación geométrica de un objeto a través de la generación de la nube de puntos.

La información de la lasergrametría dentro y fuera de la torre fue adquirida empleando el Escáner Laser Terrestre (TLS). La ubicación del Escáner Laser en puntos estratégicos para dichos levantamientos permitió abarcar la torre en su totalidad (planimetría y altimetría). Durante el proceso de escaneo se empleó el SCANNER LÁSER 3D, MARCA FARO, MODELO FOCUS 3D de precisión milimétrica (± 2 mm a 100 m).

21.1.1. Procedimiento y plan de levantamiento

La metodología de levantamiento lásergramétrico fue la siguiente:

- ☐ Determinación de Posicionamiento óptimo de las estaciones de toma de datos del equipo Escáner Laser 3D; para garantizar una máxima cobertura y precisión.
- ☐ Adquisición de Datos tridimensionales
- ☐ Adquisición de Datos GPS asociados al Escáner
- ☐ Orientación inicial de Coordenadas del Escáner, por puntos de control.
- ☐ Post Proceso de Datos y Registro de Escaneos con el software SCENEV.7.1.

Para el procesamiento de la nube de puntos (ver **Figura 59**) se empleó el software SCENEV.7.1, el cual permite procesar y registrar la información individual de cada escaneo para su posterior edición de estos. El procedimiento de digitalización por escaneo permite la importación y utilización de la nube de puntos para la creación del modelo 3D.

Una vez finalizado este proceso se procede a la exportación de nube de puntos en formato rcp, compatible con los softwares comerciales como AutoCAD; Recap Pro; Archicad, SketchUp, Civil 3D, donde finalmente se obtiene la información CAD y se puede generar modelos 3D.

Figura 59.

Procesamiento de nube de puntos y registro de escaneos en software Scene v.7.1



Nota. Visualización de la nube de puntos en el software scene v.7.1, se puede notar la torre juntamente con su entorno.

Las **Figura 60** y **Figura 61** nos muestran el entorno de Autodesk Recap Pro.

Figura 60.

Distribución de los puntos de estación del escáner Laser en Recap Pro



Figura 61.

Zona de estudio y limpieza de la Nube de Puntos en el software Autodesk Recap 2025

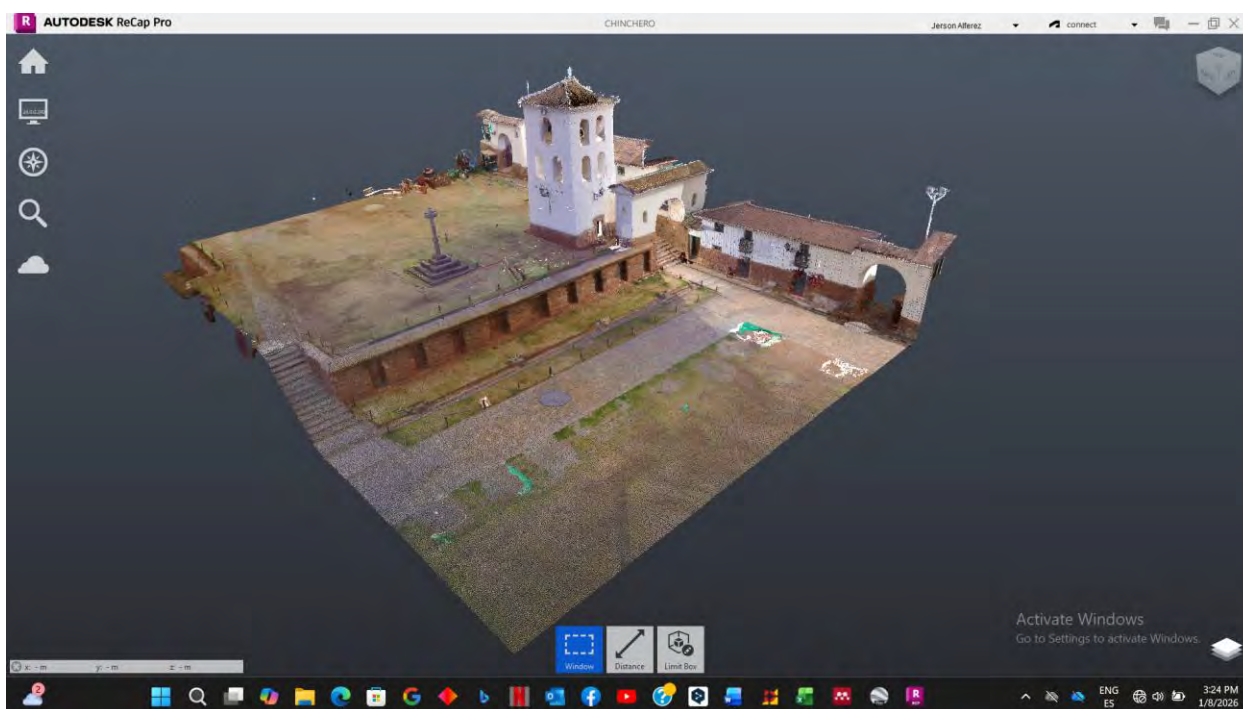
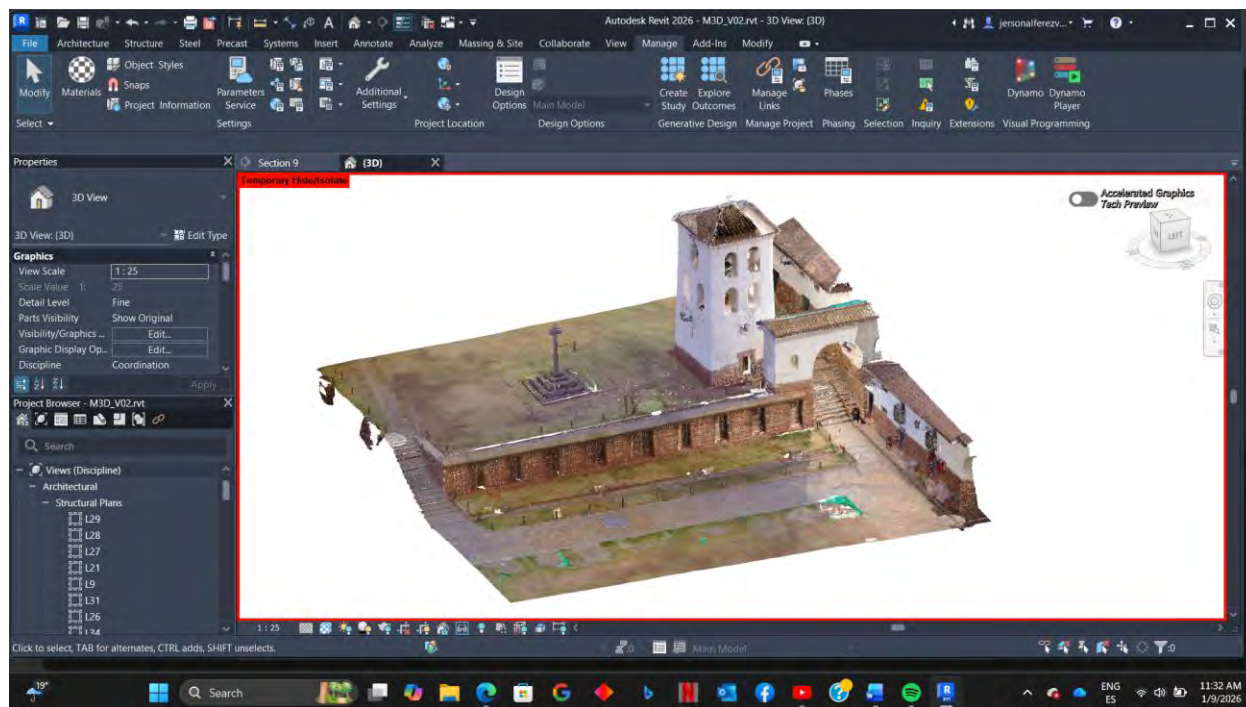


Figura 62.

Visualización de la nube de puntos en el software Autodesk Revit 2026



Nota. Elaboración Propia.

A partir de este apartado (nube de puntos dentro del entorno Autodesk Revit) se puede generar vistas isométricas, cortes, vistas en planta, vistas 3D, etc., lo cual es útil para generar el modelo sólido 3D (**Figura 62**).

Programas como Revit, permiten la importación de nube de puntos las cuales facilitan el proceso de generación de modelos 3D, las secciones transversales pueden ser visualizadas, esta función es útil para ver el espesor de los muros y cualquier componente contenido en el levantamiento con láser (ver **Figura 66**).

A pesar de que los cortes ya sean horizontales o verticales ayudan a verificar los espesores, es recomendable indicar que se debe evitar realizar muchos cortes ya que seccionar demasiado un cuerpo que se está modelando resulta innecesario.

Figura 63.

Vistas isométricas de la Nube de Puntos densa de la torre campanario obtenida mediante lasergrametría

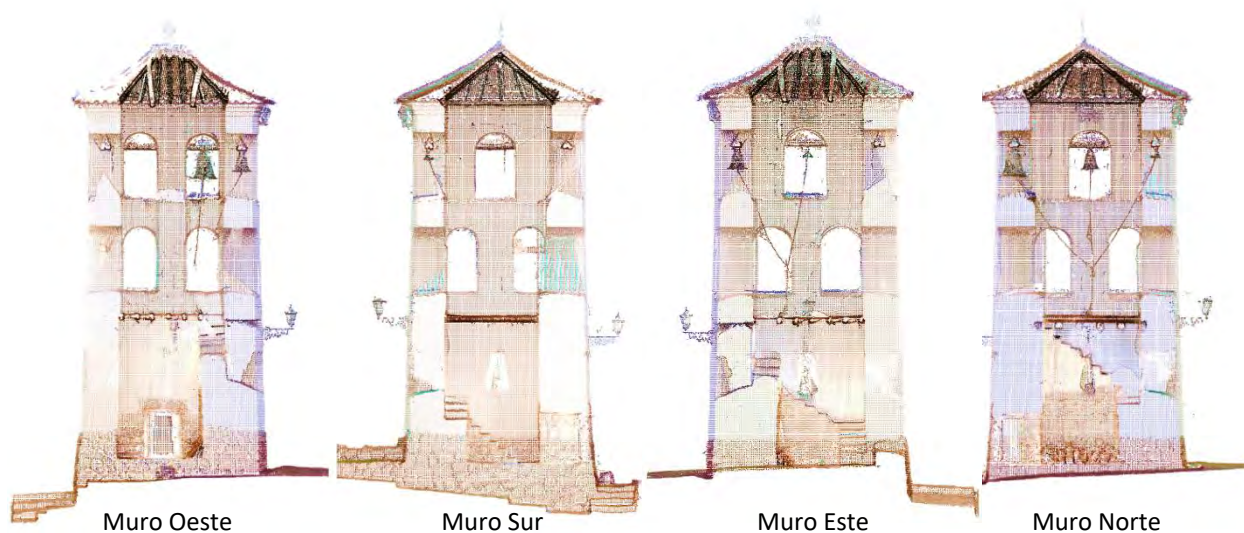


Nota. Elaboración Propia.

En la **Figura 63** se puede apreciar lo mencionado anteriormente sobre la configuración de los vanos en los muros correspondientes a cada dirección Norte, Sur, Este y Oeste.

Figura 64.

Visualización de la configuración interna de la torre mediante segmentación del modelo



Nota. Elaboración Propia

Las secciones mostradas en la **Figura 64**, nos muestran el espesor variable en altura que presenta la torre tanto en la albañilería de adobe y la albañilería de piedra. Una aplicación de este tipo de presentación es la comparación de espesores contrastando los mismo con escaneos futuros; así podemos verificar si dichos espesores disminuyen o se mantienen.

Si bien obtener este tipo de información a través de secciones de corte se muestran una estructura interna a través del espesor, se espera que con el desarrollo de nuevas tecnologías se logre un nivel de detalle similar a las radiografías que se emiten a un paciente del sector salud, mostrando no solo el espesor sino las irregularidades expresadas en grietas o fisuras internas; para nuestro caso de los muros de albañilería de adobe y piedra.

Con esto se lograría una mejor caracterización de la estructura considerando no solo la masa y rigidez externa; sino conociendo su rigidez interna principalmente.

22. Modelamiento geométrico

El modelo de nube de puntos generados en Recap Pro fue importado a Revit, el cual fue empleado para modelar la geometría de la torre. El modelado se llevó a cabo en el entorno Autodesk y se utilizó el programa Revit 2026, empleando las herramientas de dibujo y operaciones booleanas, funcionalidades que se encuentran dentro de los «modelos genéricos» y «modelos de masas» propios de Revit; estas dos alternativas de modelado permiten la creación y edición de sólidos tridimensionales, respectivamente.

La **Figura 65** ilustra la implementación de las nubes de puntos importadas para la modelización de la geometría circundante a la estructura «real», donde los puntos con textura representan las nubes de puntos y el sólido gris muestra la geometría modelada.

Figura 65.

Modelo 3D sólido y nube de puntos



Nota. Elaboración Propia.

Gracias al riguroso trabajo realizado en la etapa de escaneo, se pudo crear un modelo casi idéntico al real, cabe mencionar que antes se realizó el proceso de limpieza de la nube de puntos en el software Recap Pro. Para la generación de sólidos se procedió de la siguiente manera:

Se realizaron cortes a nivel de planta en diferentes cotas, para luego definir la sección tanto exterior como interior. Una vez realizado el corte en dos cotas diferentes y definidas las secciones, se procedió a crear los sólidos con operaciones booleanas propias de las herramientas de Revit.

Durante la etapa de modelado se tuvieron que realizar simplificaciones en ciertas partes de la estructura, como:

- ☐ Se asumió la simetría en las aberturas de paredes (ventanas).
- ☐ Los rollizos de madera tienen una sección constante y simétrica (rollizos de entrepiso y de ventanas).
- ☐ El modelado del techo solo se realizó para las representaciones visuales mas no para el análisis modal. Se realizó el metrado correspondiente y se colocó la carga en la parte superior de la torre.

En esta etapa del modelado, el único factor importante era modelar la geometría con precisión, ya que esta geometría en el siguiente paso será importante en el software Diana FEA. También es importante señalar que los sólidos en este punto no tienen una malla y no tienen propiedades, todos estos parámetros se definen directamente en el software de elementos finitos.

Para el correcto modelado, también es necesario indicar que al momento de decidir que sólido o elemento de una estructura debemos modelar, se debe hacer un análisis previo para identificar aquellos que influyen directamente en el comportamiento de la estructura o aquellos que tienen mayor participación; no es necesario modelar tal cual como es una estructura, ya que esto conllevaría a problemas de mallado y análisis futuro.

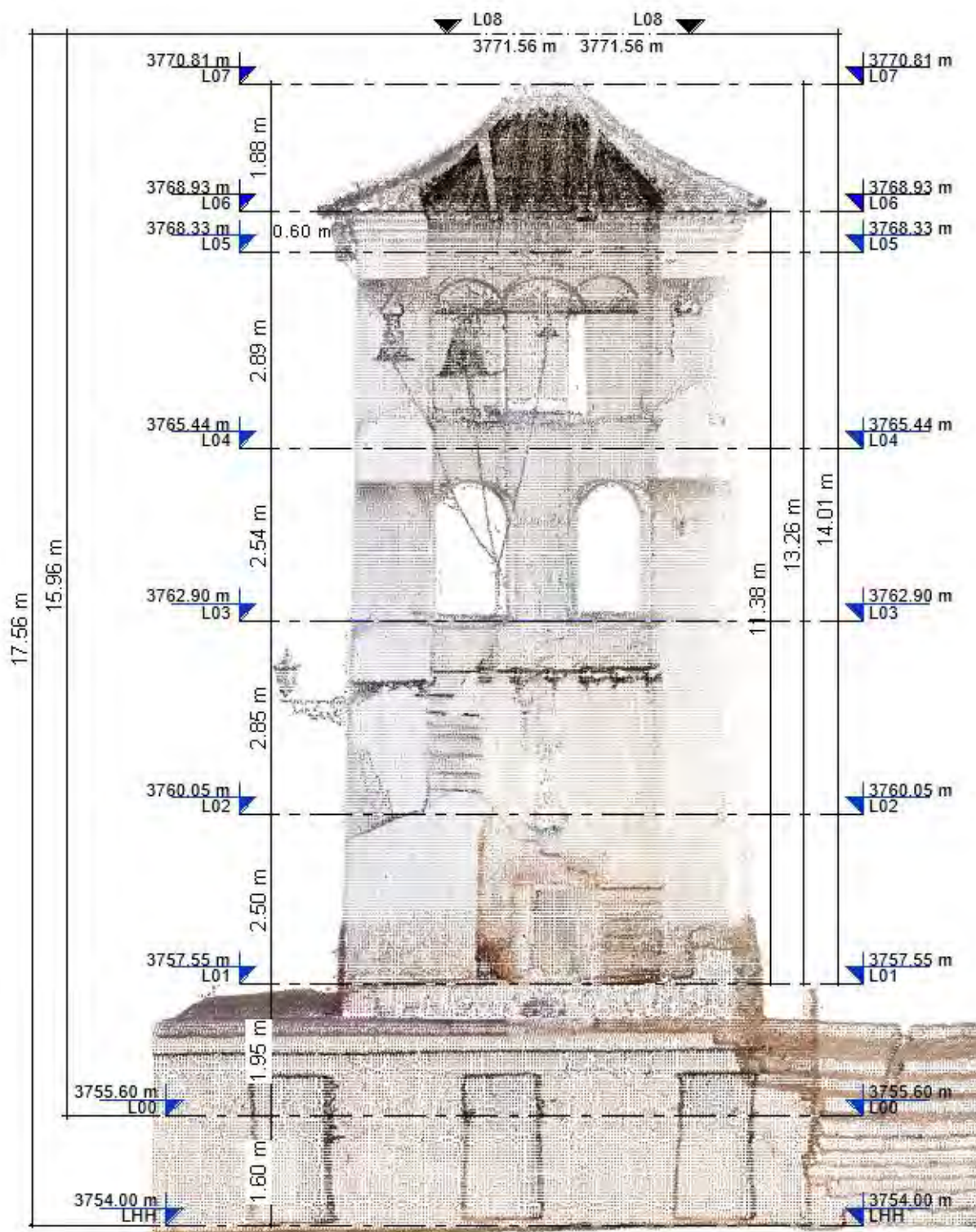
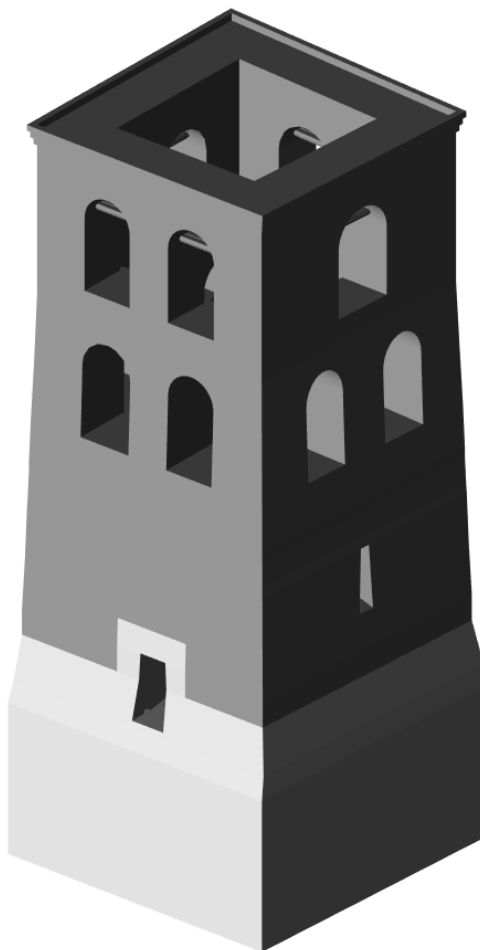
Figura 66.*Nube de Puntos, sección de corte en elevación*

Figura 67.*Modelo 3D final en Revit*

Nota. Elaboración Propia

La base de la torre es un polígono irregular y esta forma varía a medida que la torre se eleva, como se muestra en la **Tabla 17**, donde se presentan las dimensiones clave. Además, estas dimensiones también están disponibles en una de las vistas en alzado para una mejor visualización.

En esta etapa de modelamiento (**Figura 67**, **Figura 68** y **Figura 69**) no se consideró el techo ya que este no influye en el comportamiento directo; además el comportamiento global visto en el modelo numérico realizado en el software Artemis Modal Pro, no evidencia la dependencia del comportamiento experimental sujeto al techo o dependiente del techo.

Tabla 17.

Dimensiones claves de la torre

Nivel	Dimensión (m)
Total	17.56
Nivel L07	0.75
Nivel L06	1.88
Nivel L05	0.6
Nivel L04	2.89
Nivel L03	2.54
Nivel L02	2.85
Nivel L01	2.5
Nivel L00	1.95
Nivel HH	1.6

Nivel	Sección (m)
Nivel L05	5.55x5.55x5.23x5.28
Nivel L04	5.55x5.55x5.23x5.28
Nivel L03	5.74x5.72x5.40x5.43
Nivel L02	5.90x5.86x5.57x5.58
Nivel L01	6.10x6.10x5.90x5.83

Figura 68.

Modelo Revit 3D de los alzados oeste y este

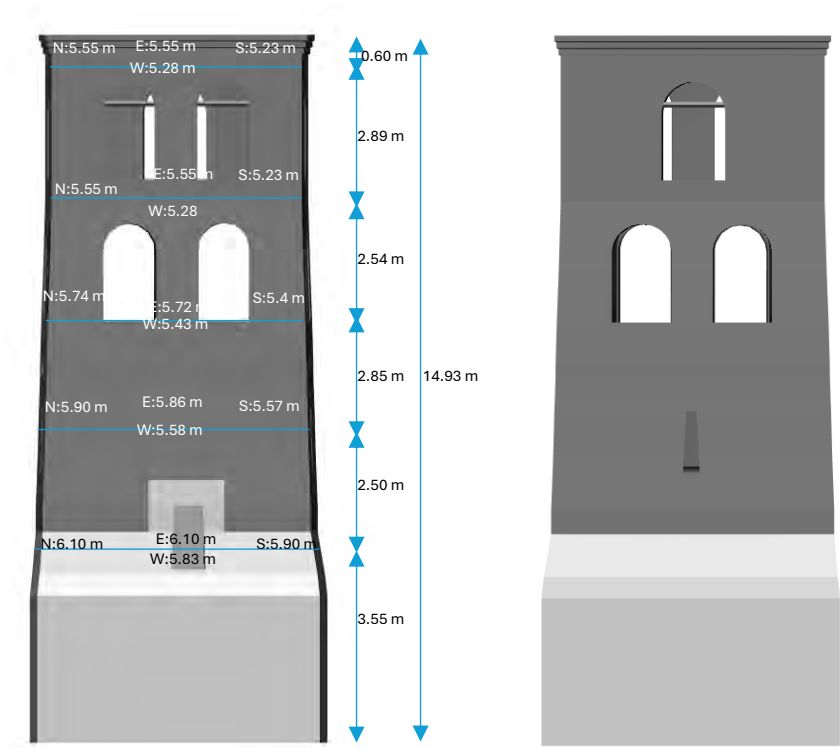
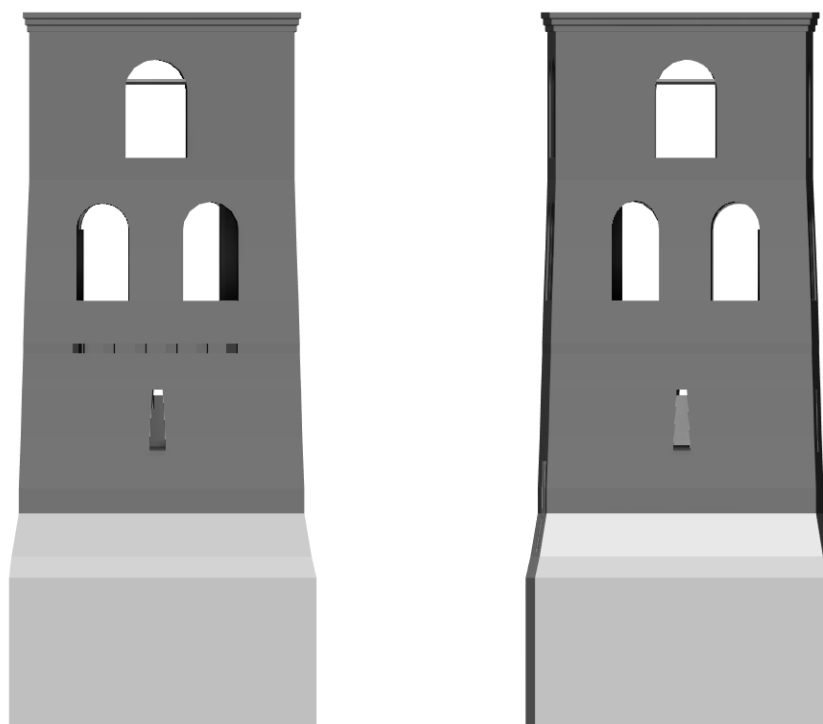


Figura 69.*Modelo Revit 3D alzado norte y sur*

Sobre el modelamiento de la cimentación compuesto por albañilería de piedra se consideró una profundidad de cimentación de aproximadamente 3.10 m, como no se tiene evidencias del nivel de cimentación se tomó de referencia lo descrito por Alcina Franch (1976, pág. 85), donde menciona que: *“En esa cata, que alcanzó 1,90 m. de profundidad, pudo determinarse, en primer lugar, que el pavimento exterior del edificio se hallaba a 0,40 m. de profundidad y que por debajo de él los cimientos se prolongaban aún 1,50 m. más”*. Esta afirmación corresponde a una excavación realizada en uno de los muros de la iglesia de Chinchero.

23. Modelamiento numérico

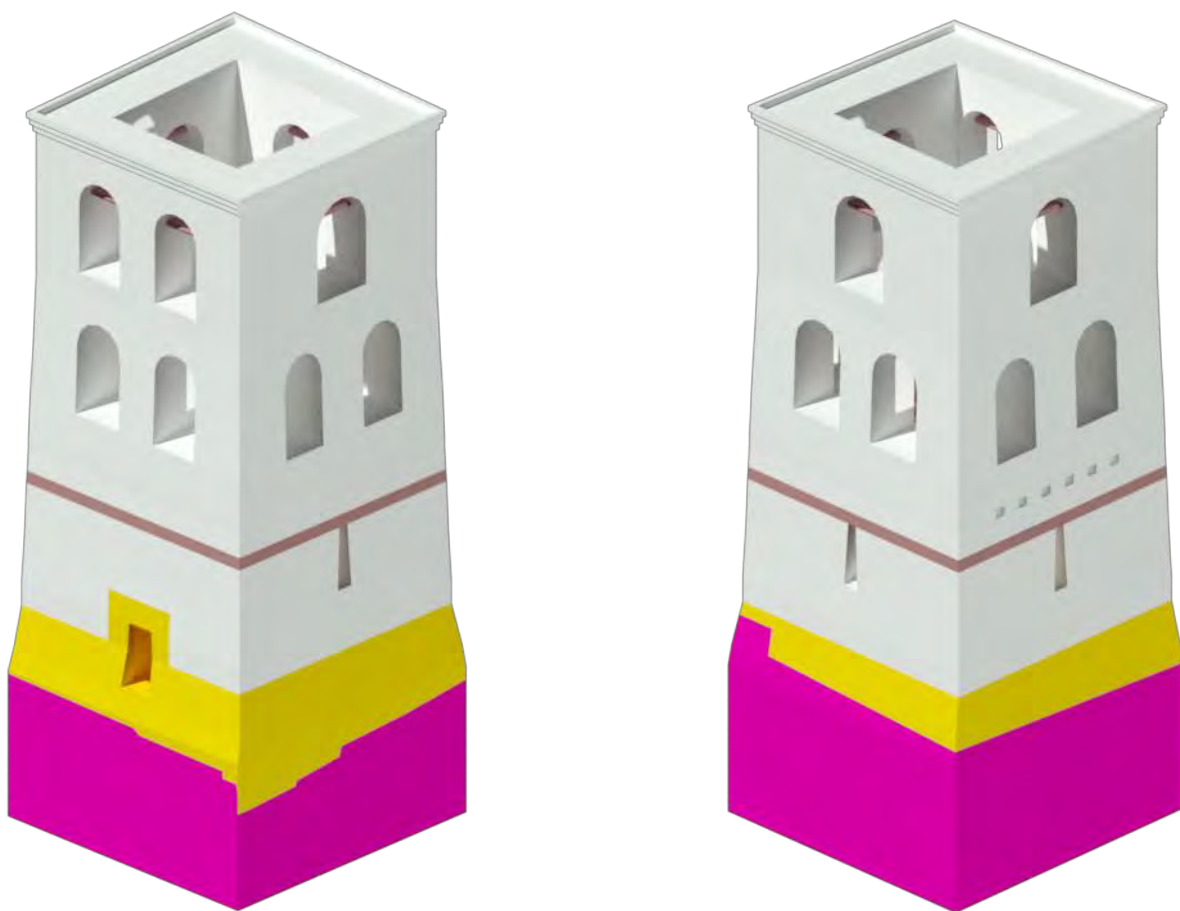
La modelación numérica de la torre exenta de la iglesia de Nuestra Señora de la Natividad de Chinchero fue desarrollada mediante el uso del software DIANA (DIANA FEA BV, 2021). Para la elaboración del modelo, se recurrió a la utilización de la información proporcionada por la nube de puntos, proveniente del escaneo láser terrestre. Una vez obtenida la información, se procedió a la construcción del modelo mediante la adquisición de las dimensiones de los muros perimetrales en dos niveles o secciones de corte. Posteriormente, se generaron volúmenes de los elementos sólidos mediante operaciones booleanas (modelos genéricos y masas conceptuales, herramientas propias de Revit). Este procedimiento se realizó en el software Revit 2024 (**Figura 70**). Elementos de carácter no estructural o que no aporten al comportamiento de la estructura no fueron considerados, a excepción del techo, el cual si bien no fue modelado como un sólido por la complejidad de su composición (tejas, capas de barro, capas de enchaclado de carrizo) fue considerado como una carga distribuida en el tope de los muros de la torre (parte superior). La estructura de madera sobre la cual descansan los materiales que conforman el techo tampoco fue considerada para el modelado, sin embargo, al igual que los demás materiales el aporte de este fue por peso distribuido en la superficie superior de la torre. Por otro lado, se evitó modelar elementos sólidos muy irregulares (por ejemplo: el techo), ya que esto ocasiona conflictos en el propio software al realizar el análisis numérico. Las simplificaciones señaladas en la sección de modelado geométrico fueron las que se consideraron en esta etapa.

La identificación de los materiales que componen la torre se logró gracias a la consulta de bibliografía especializada (José Alcina Franch, 1976), trabajos de investigación (Flores Cardenas & Paucar Choque, 2017) e inspección visual. La torre está compuesta por una cimentación de albañilería de piedra, sobre esta descansa el cuerpo de la torre fabricada de albañilería de adobe;

interiormente se encuentran gradas de albañilería de piedra y adobe que sirven de acceso hacia el entrepiso; este descanso está construido por rollizos de madera sobre los cuales descansa el entablado de madera. Adicionalmente se puede notar la existencia de una viga collar de madera por debajo del nivel de entrepiso. En las aberturas (ventanas) superiores se pudo notar la existencia de rollizos de madera que rodean los muros, estos sirven de soporte para las campanas.

Figura 70.

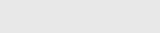
Materiales y condiciones de contorno de la Torre de Chinchero



La **Figura 71**, detalla los materiales y las condiciones de frontera considerados.

Figura 71.

Leyenda de materiales y condiciones de frontera de la Torre Exenta de Chinchero

Albañilería	
Adobe	
Piedra	
Elemento	
Madera	
Condición	
Enterrada	

Nota. Elaboración Propia.

Las albañilerías (adobe y piedra) se consideraron como medios continuos, homogéneos (macro modelo) y de naturaleza isótropa. Los elementos de madera de igual manera. Las propiedades mecánicas de los materiales (albañilería de adobe/piedra y elementos de madera) empleados en el presente estudio fueron tomados del trabajo de investigación de (Flores Cardenas & Paucar Choque, 2017). La **Tabla 18** muestra los valores iniciales de las propiedades mecánicas lineales.

Tabla 18.

Propiedades mecánicas lineales de los materiales del modelo numérico

Referencia	Tipo de material	E_b [MPa]	μ	δ_b Inicial [kg/m ³]
Marissela & Angel (2017)	Albañilería de adobe	611.235	0.250	1575.131
NTC (2008)	Albañilería de piedra	690.000	0.200	1900.000
UNALM (2012)	Madera	9806.000	0.300	560.000

23.1. Condiciones iniciales, de contorno y de carga

El modelo numérico fue considerado como una viga en voladizo restringido en la base y caras laterales enterradas bajo el terreno.

No se consideraron cargas externas. La estructura del techo no se modeló como sólidos, debido a la compleja forma de su geometría y la composición de esta, sin embargo, se realizó el modelado respectivo de cada uno de sus componentes y el resultado fue aplicado en la parte superior de la torre, sobre los muros. La única carga aplicada que actúa en la estructura es el peso propio definida a través de la densidad de cada material que la componen. El peso propio se define en el modelo mediante una carga global que actúa sobre toda la estructura.

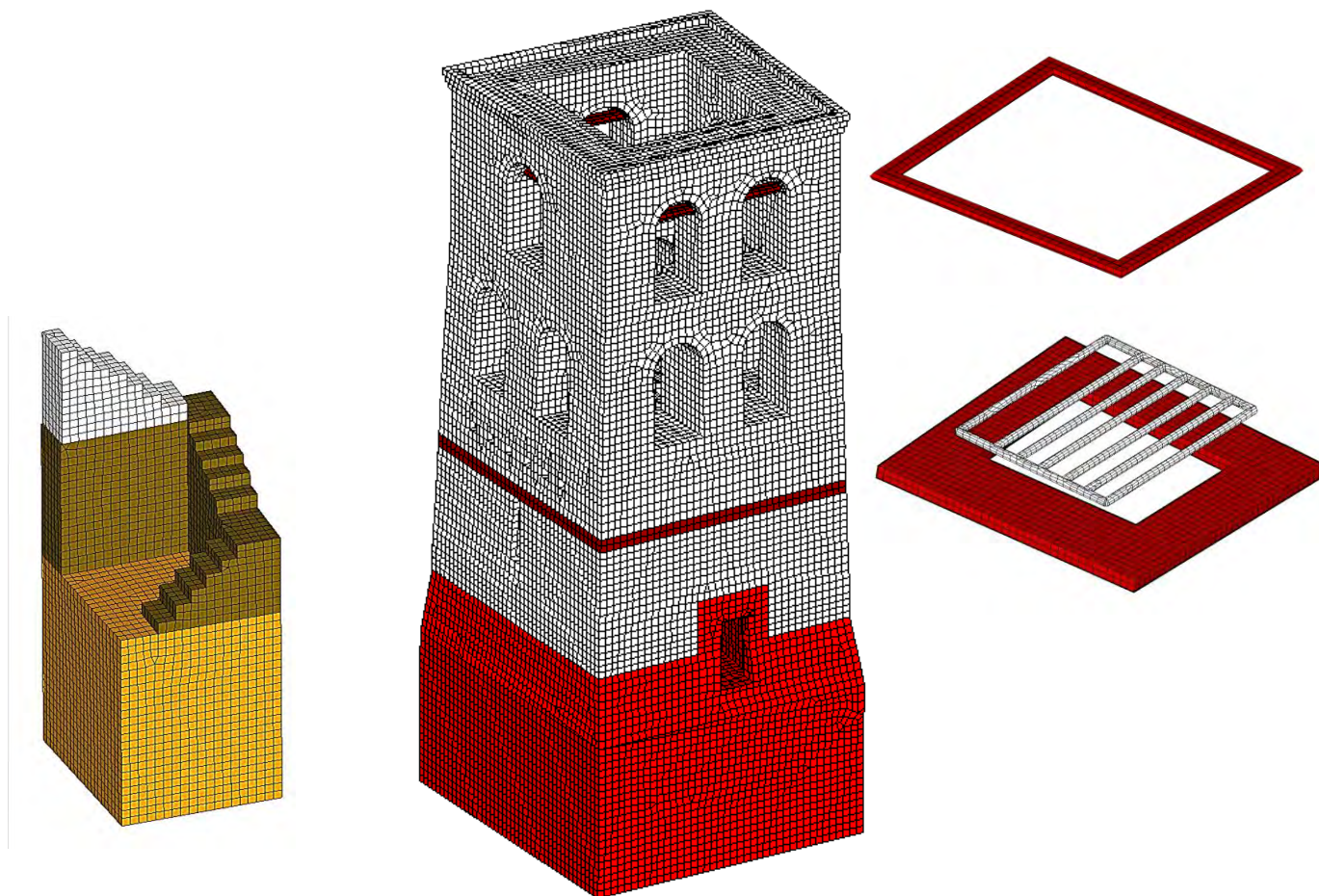
23.2. Modelo de elementos finitos (FEM)

Para el modelo numérico de la torre de Chinchero se emplearon elementos sólidos de tipo hexaédricos (HEXQUAD). La discretización del modelo numérico se realizó con una malla de 0.15m para todos sus elementos. El modelo de elementos finitos posee 151380 elementos. Este proceso de discretización se realizó mediante el empleo del software Diana FEA BV 2021 en su versión 10.5.

Durante el proceso de configuración para la generación del modelo mallado, se tiene que considerar un tamaño lógico para la división de los elementos, ya que tener elementos seccionados de gran tamaño no muestran el comportamiento real de la estructura; por el contrario, tener un tamaño de división demasiado pequeño ocasionan problemas durante el análisis estructural.

Durante el análisis dinámico modal de la torre de Chinchero se observó que dividir los elementos menos a 0.10 m, generan elementos con volúmenes cercanos a cero, lo cual no permite continuar con el análisis, por el reporte de error que se genera en el reporte del análisis.

Para nuestro caso como los adobes extraídos de la iglesia de Chinchero tienen un espesor de 0.30 m, y que cada muro está compuesto por de hasta tres unidades de adobe, y nuestro tamaño de división de todos los elementos fue de 0.15 m (ver **Figura 72**).

Figura 72.*Mallado de modelo y detalles interiores**Nota. Elaboración Propia.*

Teniendo el modelo 3D bien representado y tomando en cuenta los valores iniciales para las propiedades mecánicas de los materiales, se procedió con la etapa de análisis, realizó un primer análisis modal para la identificación de las características modales (frecuencias naturales y formas modales). Los resultados iniciales del modelo se muestran en la **Figura 78** y **Figura 79**. Estos primeros resultados consideran los valores iniciales para las propiedades y las condiciones de empotramiento en la base; además de las condiciones de carga descritos en la sección 23.1.

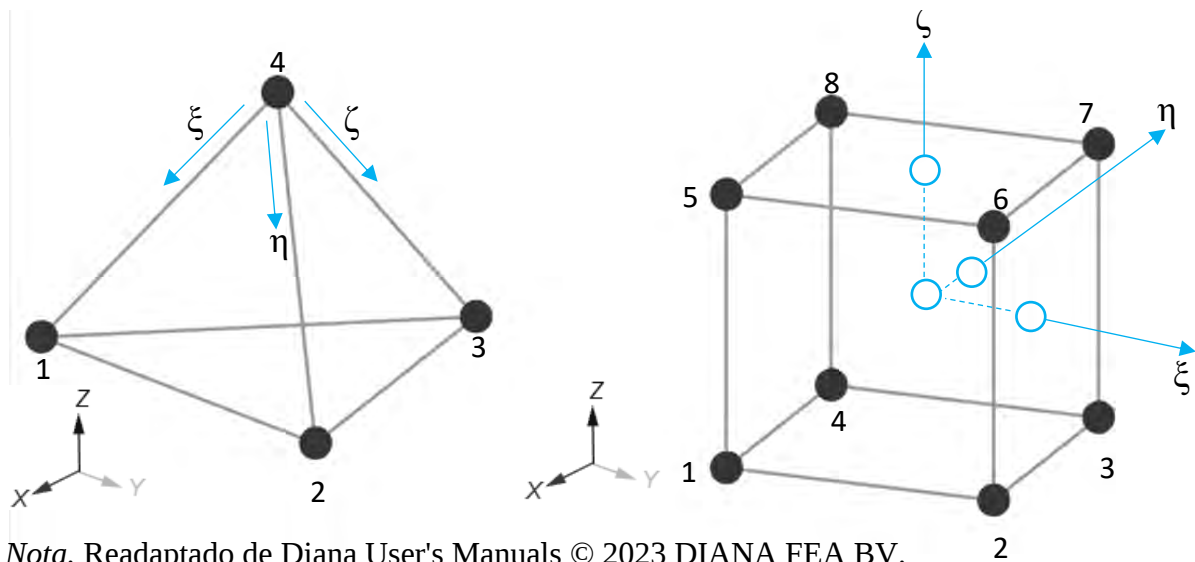
24. Evaluación estructural numérica

La representación numérica se puede apreciar en la **Figura 72.** y se realizó empleando el software DIANA en su versión 10.5 empleando 151380 de tipo sólido, entre tetraedros (**TE12L**) y hexaedros (**HX24L**), con tres y cuatro nodos respectivamente, otorgando 3 grados de libertad (DOFs) por nodo, estos son:

- u_X (**DTX**): Traslación en el eje X.
- u_Y (**DTY**): Traslación en el eje Y.
- u_Z (**DTZ**): Traslación en el eje Z.

Figura 73.

Ejes locales y coordenadas globales para los elementos solidos tetraédricos (izquierda) y hexaédricos (derecha)

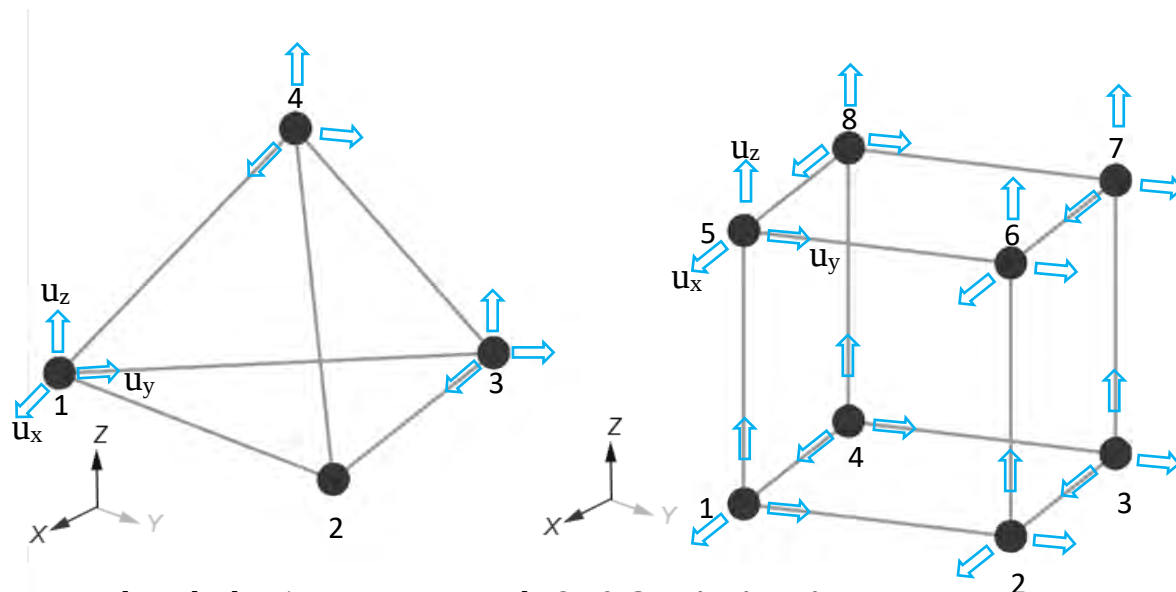


Nota. Readaptado de Diana User's Manuals © 2023 DIANA FEA BV.

Los elementos sólidos son entidades tridimensionales que poseen una función general, en los cuales la deformación puede manifestarse a través de la traslación en las tres direcciones principales u_x , u_y y u_z (ver **Figura 74**). Los ejes locales y coordenadas globales se muestran en la **Figura 73.**

Figura 74.

Grados de libertad de elementos tipo Sólido

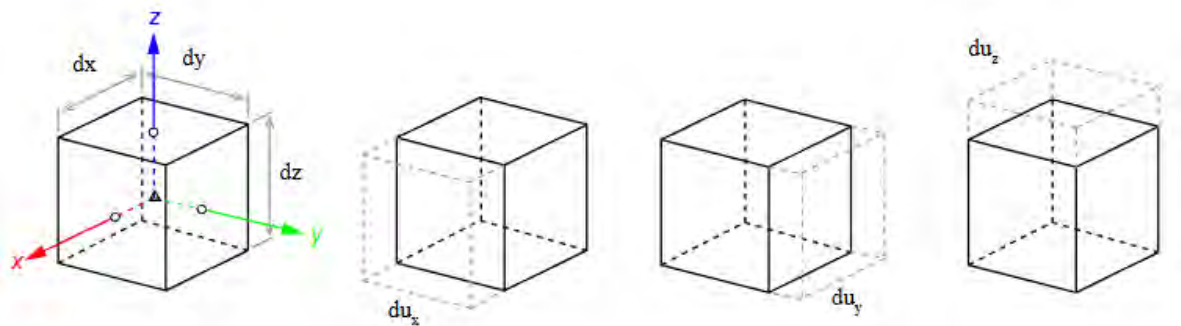


Nota. Readaptado de Diana User's Manuals © 2023 DIANA FEA BV.

Los desplazamientos en los nodos producen las deformaciones (ver **Figura 75**) du_x , du_y y du_z de una parte infinitesimal dx dy dz del elemento.

Figura 75.

Deformación de un elemento infinitesimal

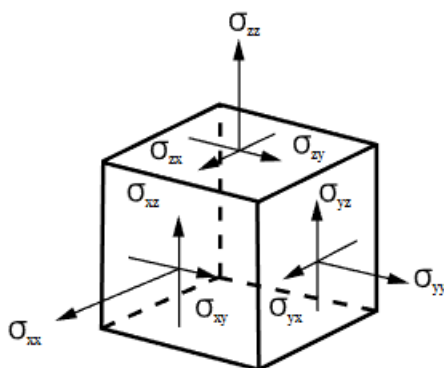


Nota. Readaptado de Diana User's Manuals © 2023 DIANA FEA BV.

Como podemos ver en la **Figura 76** la situación de tensión es tridimensional, la carga puede ser arbitraria, las dimensiones en las tres direcciones axiales X, Y e Z son del mismo orden de magnitud. El software puede calcular y obtener tensiones de Cauchy para todo tipo de elemento sólido.

Figura 76.

«Tensiones de Cauchy» en un elemento finito unitario en su dirección positiva



Nota. Fuente: Diana User's Manuals © 2023 DIANA FEA BV.

Nuestro modelo numérico será representado por los elementos sólidos mencionados anteriormente, tanto para la albañilería de adobe como para la albañilería de piedra. Las propiedades mecánicas (ver **Tabla 19**) asignadas a cada elemento estructural son las siguientes:

Tabla 19.

Propiedades mecánicas iniciales

Material	Módulo de elasticidad [MPa]	Peso Volumétrico [kg/m ³]	Módulo de poisson
Albañilería de Adobe ²	611.2	1575.13	0.25
Albañilería de Piedra ³	690	1900.00	0.20
Madera ⁴	9806	560	0.30

² (Flores Cardenas & Paucar Choque, 2017). “Análisis de vulnerabilidad sísmica del templo colonial del distrito de Chinchero, provincia de Urubamba, 2017”

³ (MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI, 2009). “Nuove norme tecniche per le costruzioni”

⁴ (RNE-NORMA E.010, 2020).

En la torre Exenta del Templo Nuestra Señora de la Natividad de Chinchero, se identificó la presencia de elementos de madera: vigas collares, entrepiso/entablado, rollizos y en el techo.

24.1. Peso de la estructura

El peso de la torre (ver **Tabla 20** y **Tabla 21**) se calculó por la multiplicación de la densidad de cada componente/material por el volumen de estos. Esta operación se llevó a cabo gracias al software Autodesk AutoCAD 2026 usando el comando MASSPROP.

Tabla 20.

Carga muerta (DW)

MATERIAL	Volumen (m3)	Peso Específico (kg/m3)	Masa (kg)
Albañilería de Adobe	170.228	1575	268109.258
Albañilería de piedra	168.559	2000	337118.200
Madera	9.979	560	5588.128
Total			610815.586

Nota. Fuente Elaboración propia.

A esto se tuvo que adicionar la masa de los materiales de recubrimiento del techo:

Tabla 21.

Carga muerta de techo (DWt)

Material de Recubrimiento	Peso Unitario (kg/m3)	Espesor (m)	Área Tributaria (m2)	Carga Distribuida (kg)
Peso unitario Teja Artesanal	1600.000	0.020	45.812	1465.978
Peso de Torta de Barro	1600.000	0.025	45.812	1832.472
Peso enchaclado de Carrizo	500.000	0.020	45.812	458.118
Total				3756.568

Finamente se consideró la carga viva para techo según la (RNE-NORMA E.020, 2022) artículo 7, ítem 7.1 inciso b:

“Para techos con inclinación mayor de 3°, con respecto a la horizontal 1,0 kPa (100 kgf/m²) reducida en 0,05 kPa (5 kgf/m²), por cada grado de pendiente por encima de 3°, hasta un mínimo de 0,50 kPa (50 kgf/m²)”.

El techo de la estructura presenta inclinaciones variables debido al reacomodo de los materiales de recubrimiento a causa de diversos factores (meteorológicos y geofísicos).

Tabla 22.

Carga viva de techo (LWt)

Nivel	P (%)	P (%) - 3°	P (%) x 5 (kgf/cm ²)	Carga Viva Considerada (kgf)
Techo N	60.319	57.319	286.596	50.000
Techo S	64.810	61.810	309.051	
Techo E	53.643	50.643	253.214	
Techo O	53.685	50.685	253.423	
			Total	50.000

Tabla 23.

Carga viva total en techo

Carga Viva Considerada	Área Tributaria	Carga (kgf)
50.000	45.812	2290.590

Resumen:

Tabla 24.

Cargas verticales gravitacionales

Tipo de Carga	Valor (kgf)
Carga muerta	610815.586
Carga muerta (recubrimiento en techo)	3756.568
Carga viva	2290.590
Total	616862.743

24.2. Análisis estructural lineal

24.2.1. Análisis Estructural Lineal; Torre de Campanario.

24.2.1.1 Análisis ante Cargas Verticales Gravitacionales

Para el presente análisis (ver **Figura 77**) se consideraron cargas muertas provenientes del peso propio de los materiales de albañilería de adobe, albañilería de piedra y los elementos de madera (DW); a esto se suman las cargas vivas de techo (LW) o sobrecargas de techo, además de las sobrecargas permanentes (SDL); todas estas cargas se pueden expresar con la siguiente ecuación:

Ecuación 17.

Cargas verticales gravitacionales

$$U = 100\% \times DW + 100\% \times LW + 100\% \times SDL \quad (17)$$

Las deformaciones ante estas condiciones de análisis y carga alcanzan un valor máximo en el tope de 2.799 mm. Sobre los esfuerzos de compresión y tensión en la albañilería de adobe alcanzan valores máximos de -5.562 kgf/cm² para compresión (-SZZ) y +3.725 kgf/cm² para tensión (+SZZ). La albañilería de piedra registra los siguientes valores máximos: -7.565 kgf/cm² para compresión (-SZZ) y +4.885 kgf/cm² para tensión (+SZZ). Finalmente los elementos de madera presentan los siguientes valores: -57.168 kgf/cm² para compresión (-SZZ) y +65.070 kgf/cm² para tensión (+SZZ).

24.2.1.2 Análisis de equilibrio

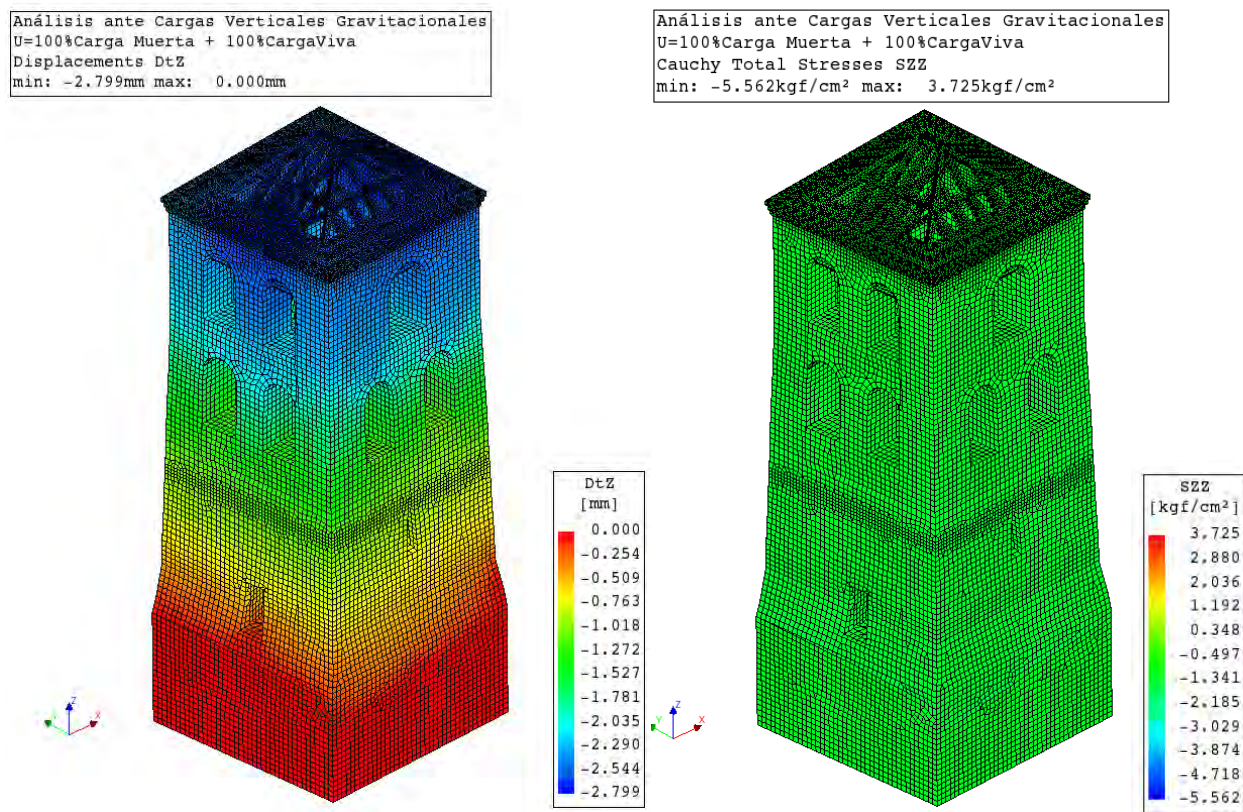
Otro de los propósitos del análisis ante cargas verticales gravitacionales es mantener el equilibrio entre las reacciones (en la base y las condiciones de contorno) contra las cargas verticales gravitacionales, según la **Ecuación 18**.

Ecuación 18.*Ecuación de equilibrio*

$$\sum \text{Carga aplicada total} = \sum \text{Reacciones en la base} \quad (18)$$

Tabla 25.*Sumatoria de reacciones en la base (Dir +Z)*

Carga Aplicada (tn)	Suma de Reacciones en la Base (tn)	Diferencia (%)
616.863	618.512	0.267

Figura 77.*Desplazamiento vertical en el tope (Izquierda) y esfuerzo vertical en la albañilería de adobe**(Derecha) debido a cargas verticales gravitacionales**Nota.* Análisis realizado en el software DIANA FEA versión 10.5.

24.2.1.3 Análisis modal

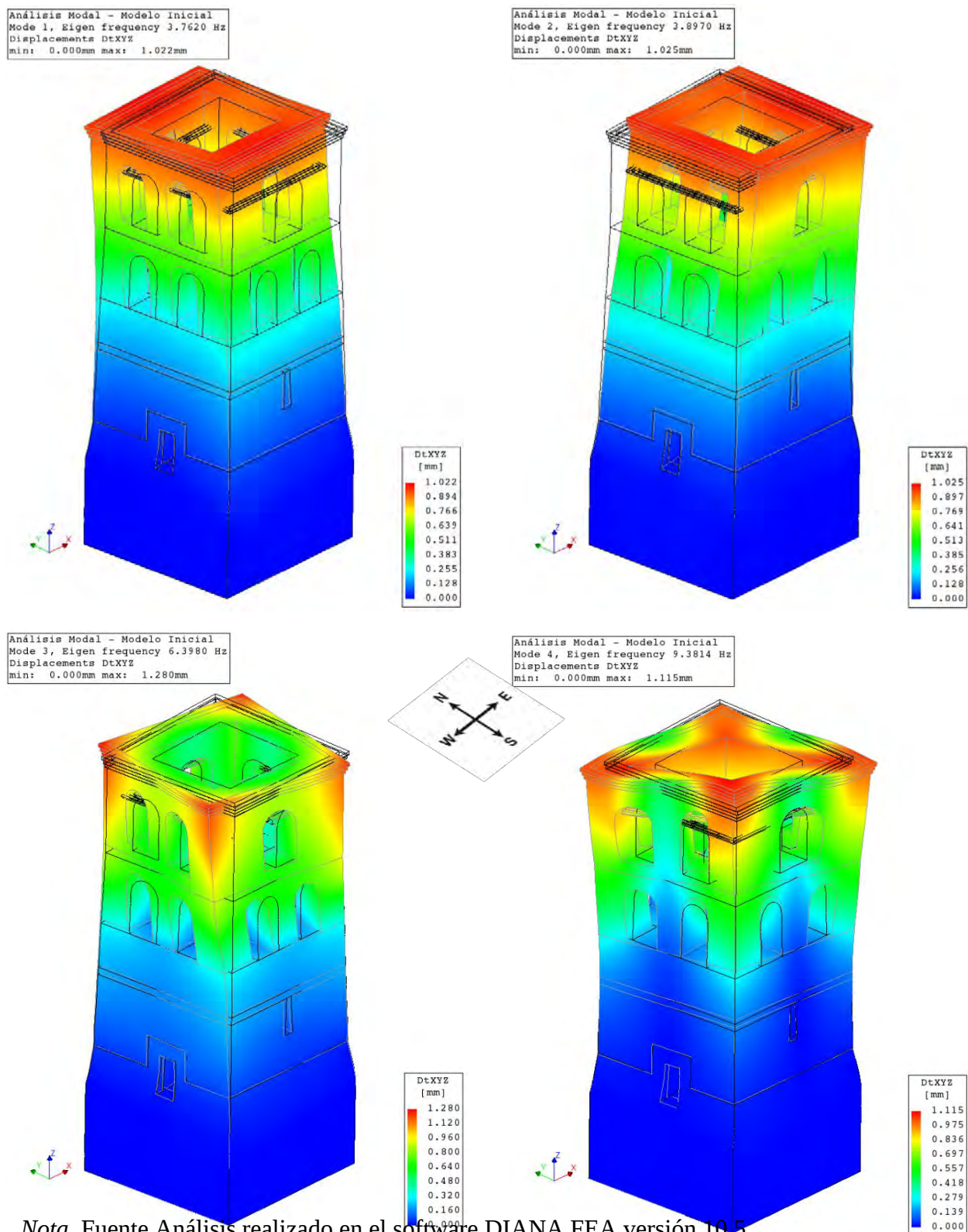
El software Diana FEA permite realizar múltiples análisis; en este caso nos enfocaremos en el análisis modal, que en Diana FEA se define como Structural Eigenvalue Analysis o Análisis de valores propios estructurales.

Conceptualmente el análisis de valores propios determina las frecuencias naturales o propias y las formas modales correspondientes de una estructura, además de factores de participación global y porcentajes de participación de masa. Este análisis está basado solamente en las propiedades inherentes de la estructura, tales como masa, rigidez y amortiguamiento.

Las formas modales como resultado del primer análisis base (ver **Figura 78** y **Figura 79**), son los siguientes: el primer y segundo modo de vibración representan los movimientos de traslación en direcciones perpendiculares en las direcciones $X - X$ e $Y - Y$, respectivamente. El modo de torsión corresponde al tercer modo de vibración. El cuarto modo representa una abertura apertura diagonal. El quinto modo muestra la flexión de primer orden en la dirección $X - X$. el sexto modo corresponde a un modo de acoplamiento de muros en la parte superior de la torre. Finalmente el séptimo modo a analizar muestra la flexión de primer orden en la dirección $Y - Y$.

Figura 78.

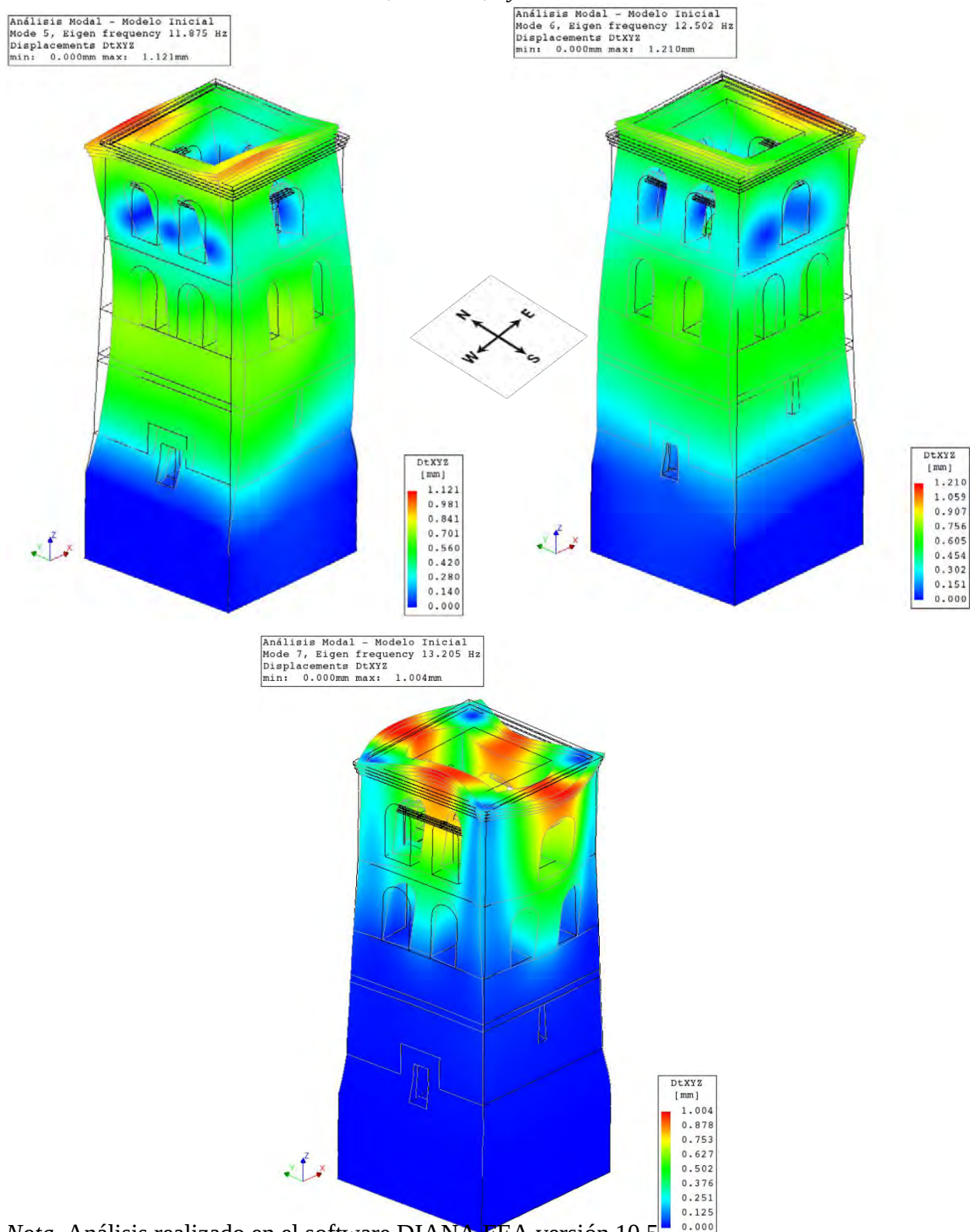
Formas modales del modelo numérico modos 1,2,3 y 4



Nota. Fuente Análisis realizado en el software DIANA FEA versión 10.5.

Figura 79.

Formas modales del modelo numérico, modos 5,6 y 7



Nota. Análisis realizado en el software DIANA FEA versión 10.5.

CAPITULO V

25. Pruebas de vibración ambiental

25.1. *Vista general*

El OMA depende de que los datos de medición obtenidos sean de buena calidad; es muy importante que la prueba AVT se realice de tal manera que permita obtener datos de calidad suficiente. Por lo tanto, las mediciones deben: a) planificarse y ejecutarse con cuidado y b) garantizar que se capturen señales de buena calidad en cada configuración de prueba

25.2. *Acelerómetros*

25.2.1. **Colocación y número de sensores**

La tarea inicial en la planificación de mediciones dinámicas es la selección de las ubicaciones (nodos) y direcciones de los sensores, los que determinan el número total de mediciones, que son fundamentales para obtener información sobre el sistema en cuestión. Esta elección puede basarse en la experiencia, en simulaciones por ordenador con modelos de elementos finitos de la estructura que se va a someter a ensayo o en predicciones de la respuesta dinámica de la estructura basadas en teorías simples de vigas, placas o capas. En todos los casos, los acelerómetros deben ser lo más pequeños y ligeros posibles para minimizar la influencia de la masa añadida por los sensores. Además, deben ser lo suficientemente sensibles como para captar las señales de funcionamiento esperadas. (Brincker & Ventura, 2015, p. 152)

Es necesario remarcar que la colocación y numeración de los acelerómetros utilizados está relacionada con la experiencia y simulaciones realizadas por ordenador ya que existe el riesgo de colocar en nodos que no podrán proporcionar las propiedades modales y como consecuencia tendremos que rehacer mediciones. (Ademi, 2020, p. 50)

25.2.2. Número mínimo de sensores

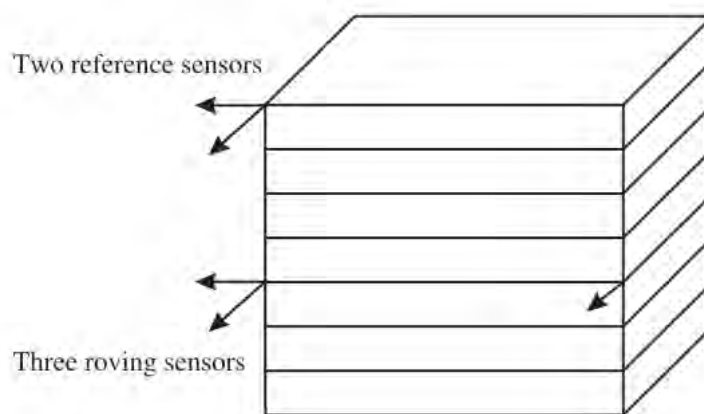
De acuerdo con la literatura consultada, trabajos similares y experiencias propias, podemos inferir que el número mínimo de sensores a ser utilizados para un análisis OMA ha de ser:

(Brincker & Ventura, 2015) afirman:

Cuatro sensores son el número mínimo necesario para realizar con éxito las pruebas y el análisis OMA. Sin embargo, siempre existe incertidumbre sobre la selección correcta de las ubicaciones de los sensores lejos de cualquier punto nodal, por lo que diríamos que, en la práctica, una buena regla general es utilizar siempre al menos cinco o seis sensores. (p. 155)

Figura 80.

Ejemplo de un estudio en 2D: plan de medición para un edificio rectangular sencillo «tipo caja» en el que se desprecian los desplazamientos verticales



Nota. Fuente (Brincker & Ventura, 2015, pág. 161).

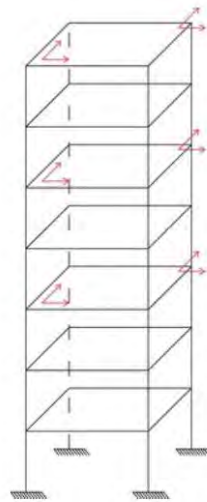
(Rainieri & Fabbrocino, 2014) afirman:

No obstante, es posible definir el número mínimo de sensores que deben instalarse para identificar, al menos, los modos fundamentales de una estructura. De hecho, suponiendo que existan al menos dos modos muy próximos entre sí y que el ruido de medición dificulte la identificación de algunos modos, en particular en el caso de estructuras débilmente excitadas, los

modos fundamentales pueden identificarse con la instalación adecuada de entre 6 y 8 sensores. (p. 123)

Figura 81.

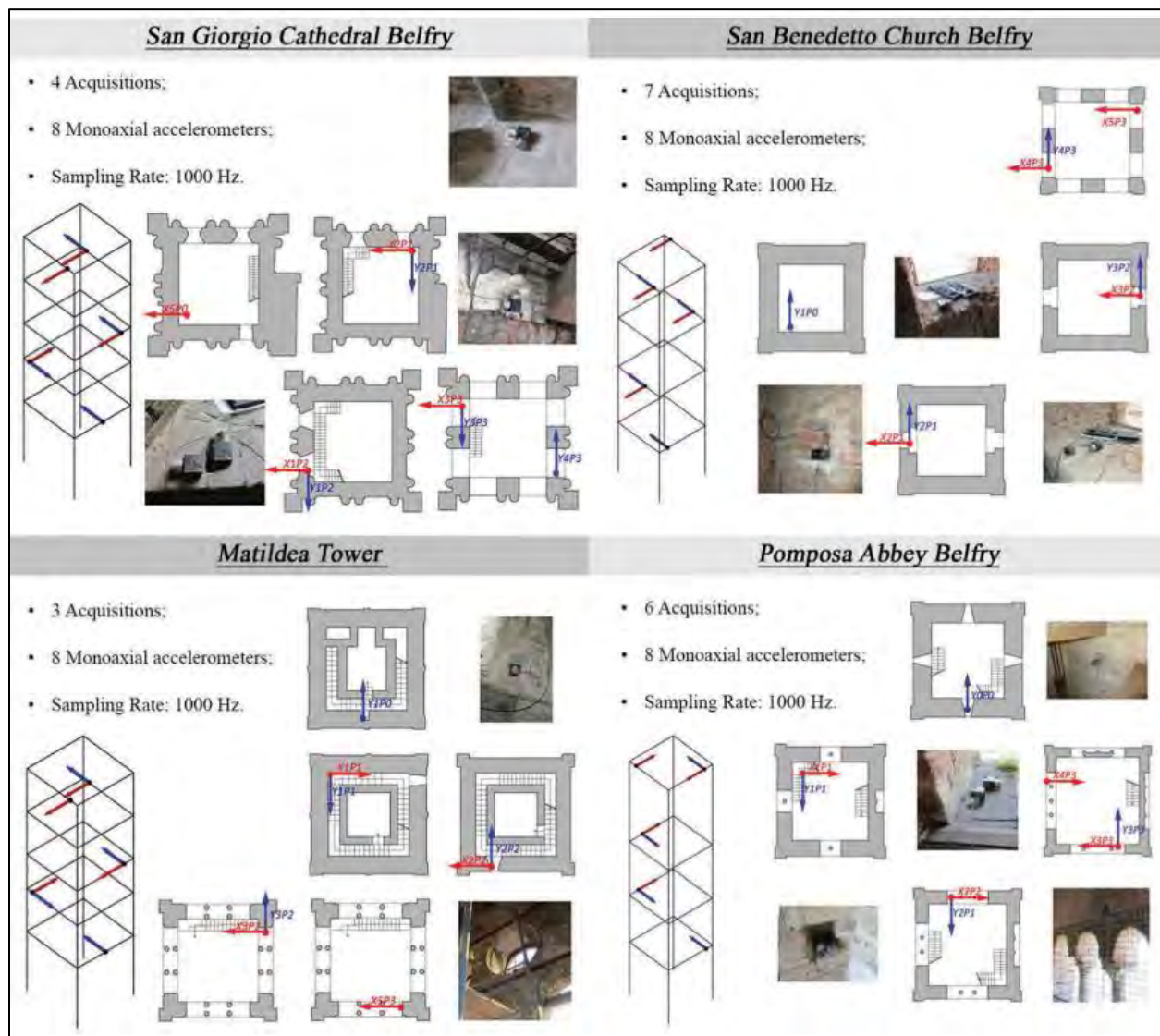
Disposición de sensores recurrentes para edificios y estructuras en forma de torre



Nota. Fuente (Rainieri & Fabbrocino, 2014), figura 3.8.

Las recomendaciones para la identificación de modos fundamentales en estructuras tipo torre o edificios son: ubicar los sensores en nodos opuestos y perpendiculares entre sí (ver **Figura 80** y **Figura 81**), para modos superiores se recomienda colocar en al menos tres niveles diferentes de la estructura y para modos locales es necesaria la simulación en computador para ver zonas donde probablemente se coloquen dichos sensores.

(Standoli, Giordano, Milani, & Clementi, 2021) en su trabajo titulado: “Model Updating of Historical Belfries Based on Oms Identification Techniques” realizaron las campañas con 8 sensores uniaxiales distribuidos como se muestra en la imagen **Figura 82**.

Figura 82.*Esquemas de sensores de aceleración cableados*

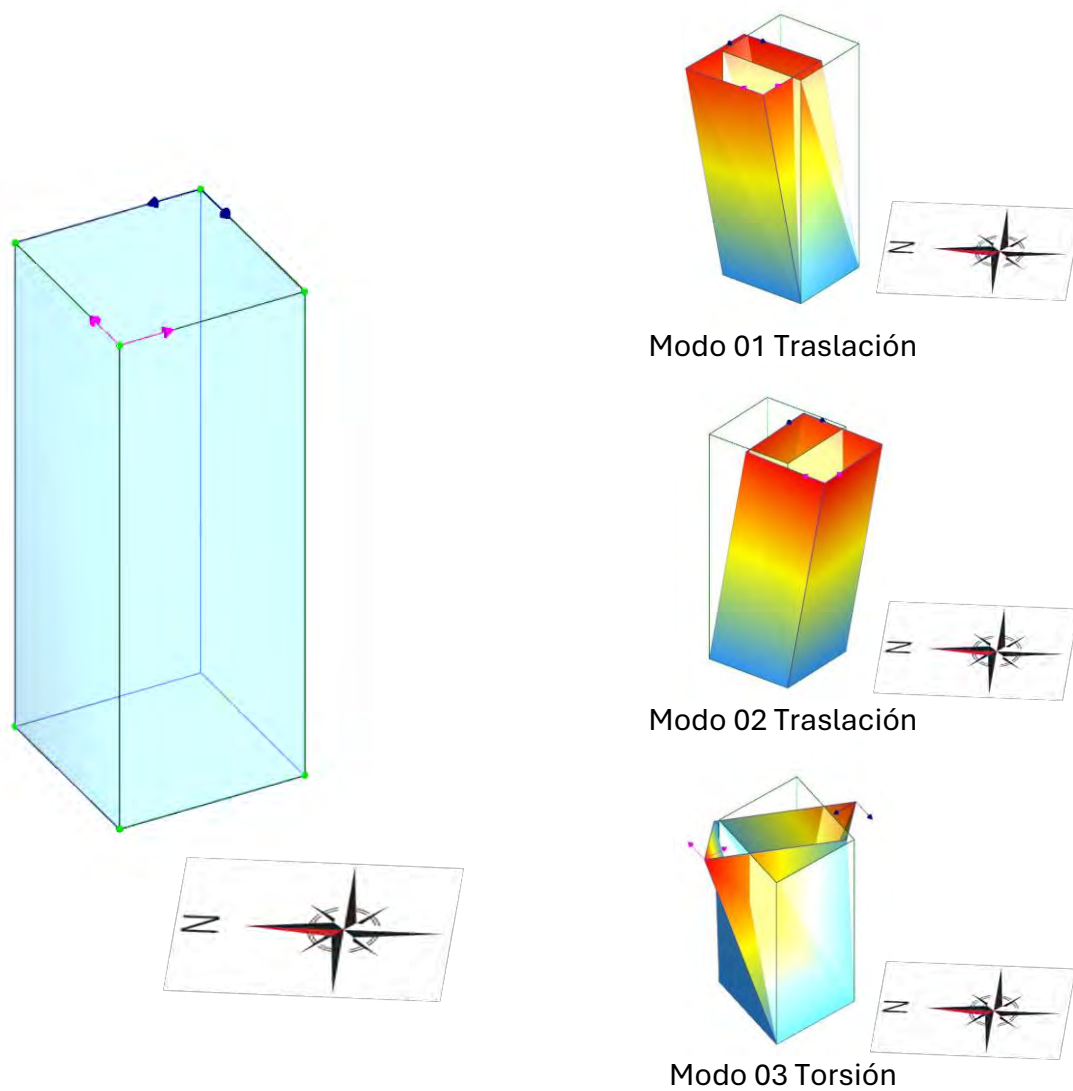
Nota. Fuente (Standoli, Giordano, Milani, & Clementi, 2021).

Experiencias propias: en el trabajo de investigación titulado “Seismic Analysis of an Earthen Free-standing Bell Tower in the Historical Center of Cusco (Peru): ambient vibration testing, model calibration and seismic capacity assessment “de se mencionan ensayos realizados entre los años 2019 y 2025, en los cuales se demostró que con 3 sensores y solo dos

configuraciones se pueden obtener respuestas modales de traslación y rotación como se muestra en la **Figura 83**.

Figura 83.

Modos de vibración de la torre de Santa Ana (Cusco)



Nota. Fuente Elaboración propia.

25.2.3. Duración de las campañas de medición

Para la determinación de la duración de cada medición, diversos autores y normas proponen sus propias reglas empíricas que a continuación se detallarán:

- ❖ Según (Rainieri & Fabbrocino, 2014) “la duración total de la medición de las vibraciones ambientales no debe superar las 3 horas, si no es especialmente necesario” (p. 154).
- ❖ Según el documento mencionado, la ASCE 07-16 (2017) proporciona la siguiente fórmula de estimación de la frecuencia natural:

Ecuación 19.

Frecuencia natural según la ASCE 07-16 (2017)

$$f(H) = \frac{1}{0.0488H^{0.75}} \quad (19)$$

Mientras que la norma italiana NTC-2008 (2008) proporciona la siguiente fórmula para la estimación de la frecuencia natural:

Ecuación 20.

Frecuencia natural según la norma italiana NTC-2008 (2008)

$$f(H) = \frac{1}{0.05H^{0.75}} \quad (20)$$

Considerando las ecuaciones dadas en ASCE 07-16 (2017) y NTC-2008 (2008) antes mencionados, además del intervalo de medición discutido anteriormente, obtenemos el siguiente resultado:

Tabla 26.*Intervalo de tiempo estimado para los ensayos de vibración*

H (m)=11,35	Frecuencia natural estimada	Período estimado	Intervalo de tiempo (s)	
		1/f	x1000	x2000
ASCE 07-16 (2017)	f(H) = 3,314	0,302	302	604
NTC-2008 (2008)	f(H) = 3,234	0,309	309	618

Como se observa en la **Tabla 26**, el intervalo de tiempo debe situarse entre 309 y 618 segundos para obtener estimaciones precisas de los parámetros modales. El intervalo en minutos será de 5,15 minutos a 10,3 minutos respectivamente. Para nuestro caso, cada arreglo o configuración duró 15 minutos, siendo este un tiempo prudente ya que los resultados obtenidos respaldan el tiempo de duración elegido.

25.3. Especificaciones

Las siguientes tablas (ver **Tabla 27** y **Tabla 28**) detallan las especificaciones de los equipos empleados durante las pruebas del análisis modal operacional.

Tabla 27.*Especificaciones técnicas del equipo de adquisición de datos*

Modelo / Nombre	USB-6210
Cantidad	1
Máximo número de canales	8 diferenciales o 16 unidireccionales
Máxima Frecuencia de Muestreo [kHz]	250 kS/s
Rango de Entrada	± 0.2 V, ± 1 V, ± 5 V, ± 10 V
Descripción	El dispositivo es ideal para aplicaciones de prueba, control y diseño, entre ellas, registro de datos portátil, monitoreo de campo, OEM embebidas, adquisición de datos del vehículo y aplicación académica.

25.4. Software

El software utilizado para el pre/post-proceso, además de la captación en tiempo real de las mediciones realizadas, fue Artemis Modal Pro.

Según la página web de [Structural Vibration Solutions | Vibration analysis](#) “ARTeMIS Modal” es una plataforma abierta y fácil de usar para pruebas modales, análisis modal y resolución de problemas modales. Si puede medir las vibraciones, ARTeMIS Modal puede proporcionarle los modos en términos de forma modal, frecuencia natural y relación de amortiguamiento. Durante dos décadas ARTeMIS Modal ha sido el software preferido para el Análisis Modal Operacional (OMA). La tecnología de análisis modal para el gran número de casos en los que se prefiere no controlar o medir la carga”. Cabe mencionar que Artemis Modal Pro tiene una extensión o plugin que permite conectar sistemas de adquisición de datos de la compañía de [Sistemas de pruebas y medidas, una división de Emerson - NI](#), lo cual ayudó a llevar un sistema de adquisición de datos más fluido y dejando atrás sistemas de datos tradicionales, ahorrando así tiempos de reprocesos.

25.5. Ensayos de Vibración Ambiental

Las mediciones constituyen uno de los componentes fundamentales del análisis modal operacional (OMA). El éxito del análisis modal operacional dependerá en gran medida de la calidad de los datos obtenidos, los cuales constituyen un factor determinante en el éxito del análisis modal. Una ejecución óptima de esta fase del proceso resulta fundamental para garantizar la integridad y validez de los resultados subsiguientes. Por consiguiente, si esta parte del proceso se realiza adecuadamente, entonces todo lo demás que sigue es relativamente «fácil y sencillo». Para garantizar la obtención de datos de alta calidad, es imprescindible seguir una serie de pasos esenciales.

25.5.1. Pruebas de campo y configuraciones

Descripción

Las pruebas de identificación dinámica se implementaron en la Torre Exenta de Chinchero entre los meses de octubre y diciembre de 2024 con el propósito de estimar frecuencias naturales, formas modales y relaciones de amortiguamiento de la estructura. Se realizaron tres campañas de medición que se detallan a continuación:

Campaña 01: 11 y 12 de octubre de 2024 (Acelerómetros).

Campaña 02: 22 de noviembre (parte superior) y 05 de diciembre (parte inferior) de 2024 (Acelerómetros).

Campaña 03: 05 de diciembre de 2024 (Velocímetros/Geófonos).

La **Figura 84** muestra la configuración de la campaña 01 (acelerómetros), la **Figura 85** la campaña 02 (acelerómetros) y la **Figura 86** la configuración de la campaña 03 (velocímetros).

Figura 85.

Campaña 02: Configuración en planta y elevación de la ubicación de sensores (acelerómetros)

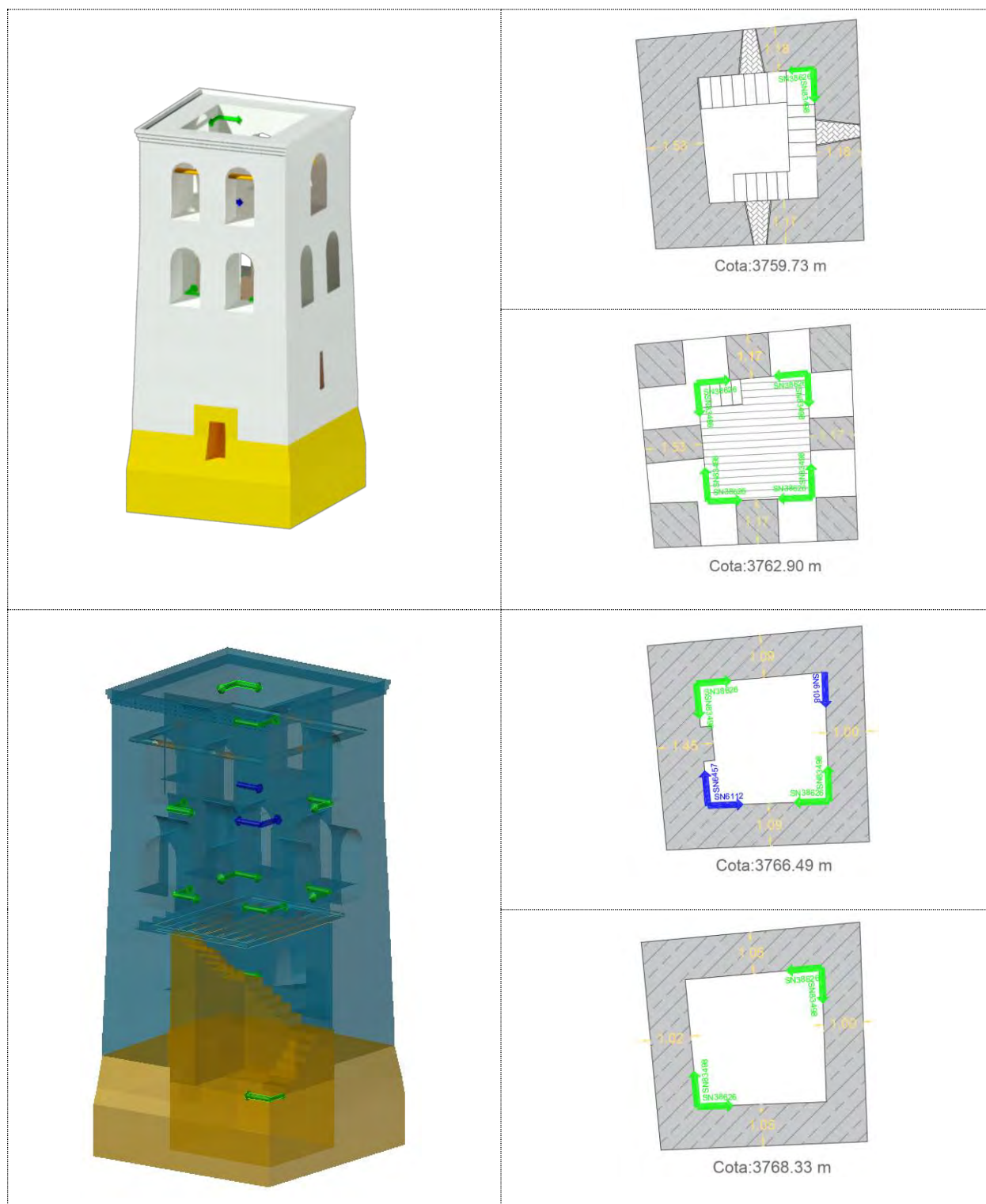
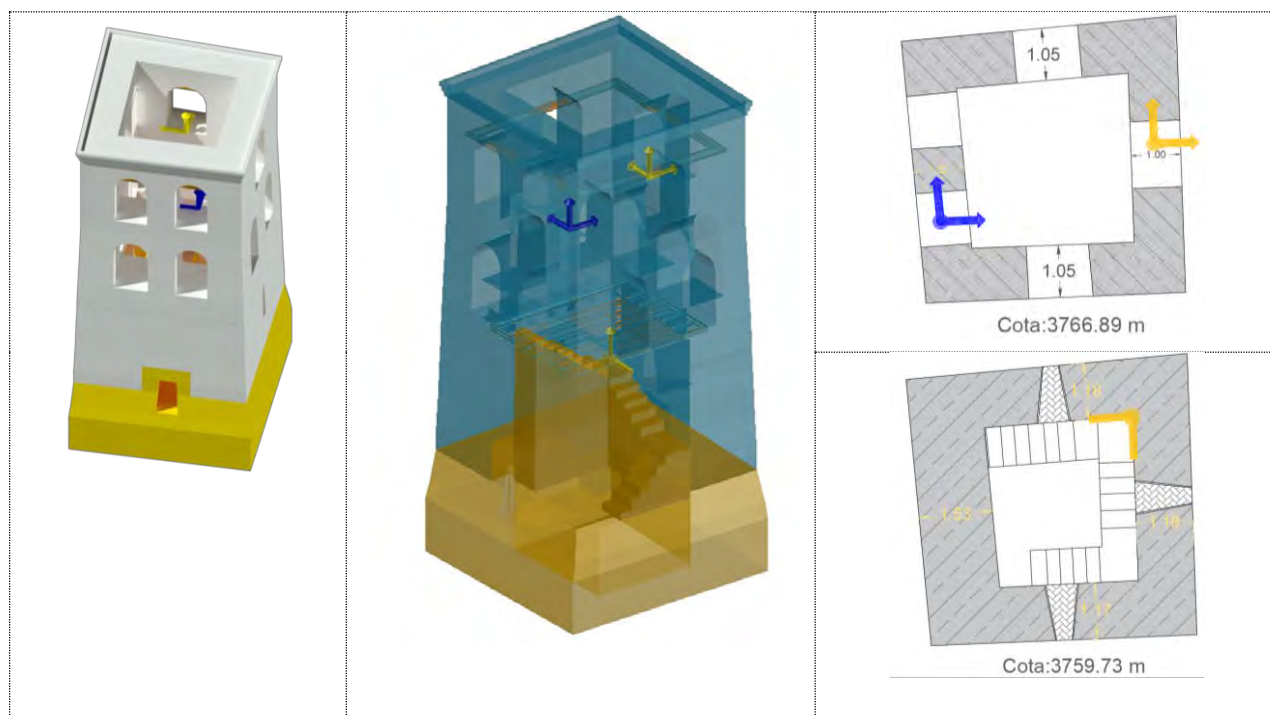


Figura 86.

Campaña 03: Configuración en planta y elevación de la ubicación de sensores (velocímetros)



La configuración de los acelerómetros se determina en función a cierta información a priori (resultados de un estudio preliminar de daños y un análisis numérico) sobre las formas de los modos, para obtener una disposición eficaz de los sensores instalándolos en un conjunto de puntos en los que todos los modos de interés estén bien representados (es decir, que esos modos muestren desplazamientos modales bastante grandes en las ubicaciones seleccionadas), lo que permite obtener una disposición más óptima de los sensores. (Rainieri & Fabbrocino, 2014)

Durante las pruebas, se utilizaron acelerómetros piezoeléctricos como transductores, con una sensibilidad y un rango de frecuencia variable (con un rango de medición de $\pm 0,5$ g) (Ver **Tabla 28**). Los sensores estaban conectados por una tarjeta de adquisición de datos de 16 bits de resolución (Ver **Tabla 27**), que tiene la función de registrar las señales emitidas por los acelerómetros, y que, al hacerlo, permite obtener información necesaria para el análisis de los datos.

25.5.2. Datos obtenidos

Figura 87.

Setup 01. Registros de acelerómetros empleados en la medición

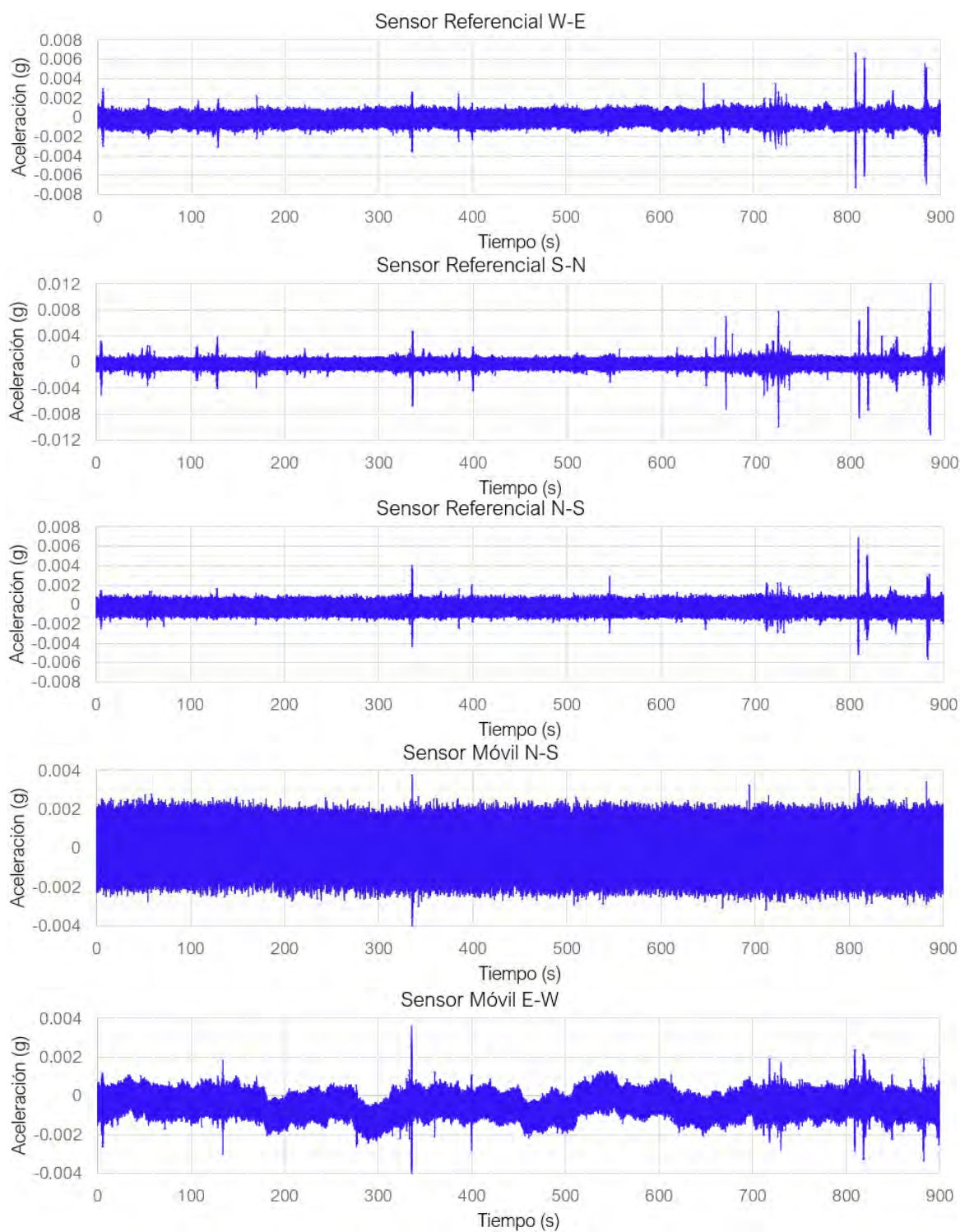


Figura 88.

Setup 02. Registros de acelerómetros empleados en la medición

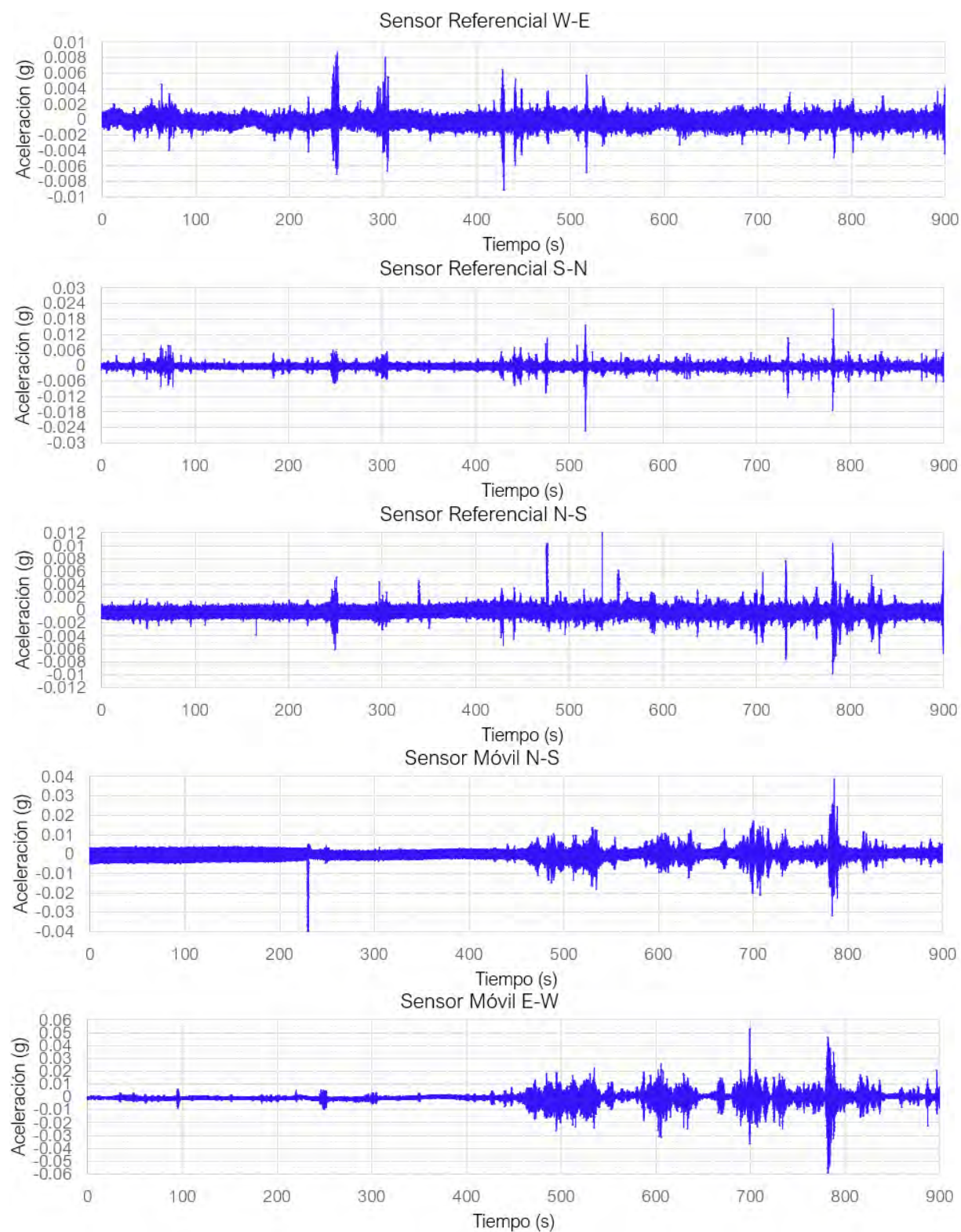


Figura 89.

Setup 03. Registros de acelerómetros empleados en la medición

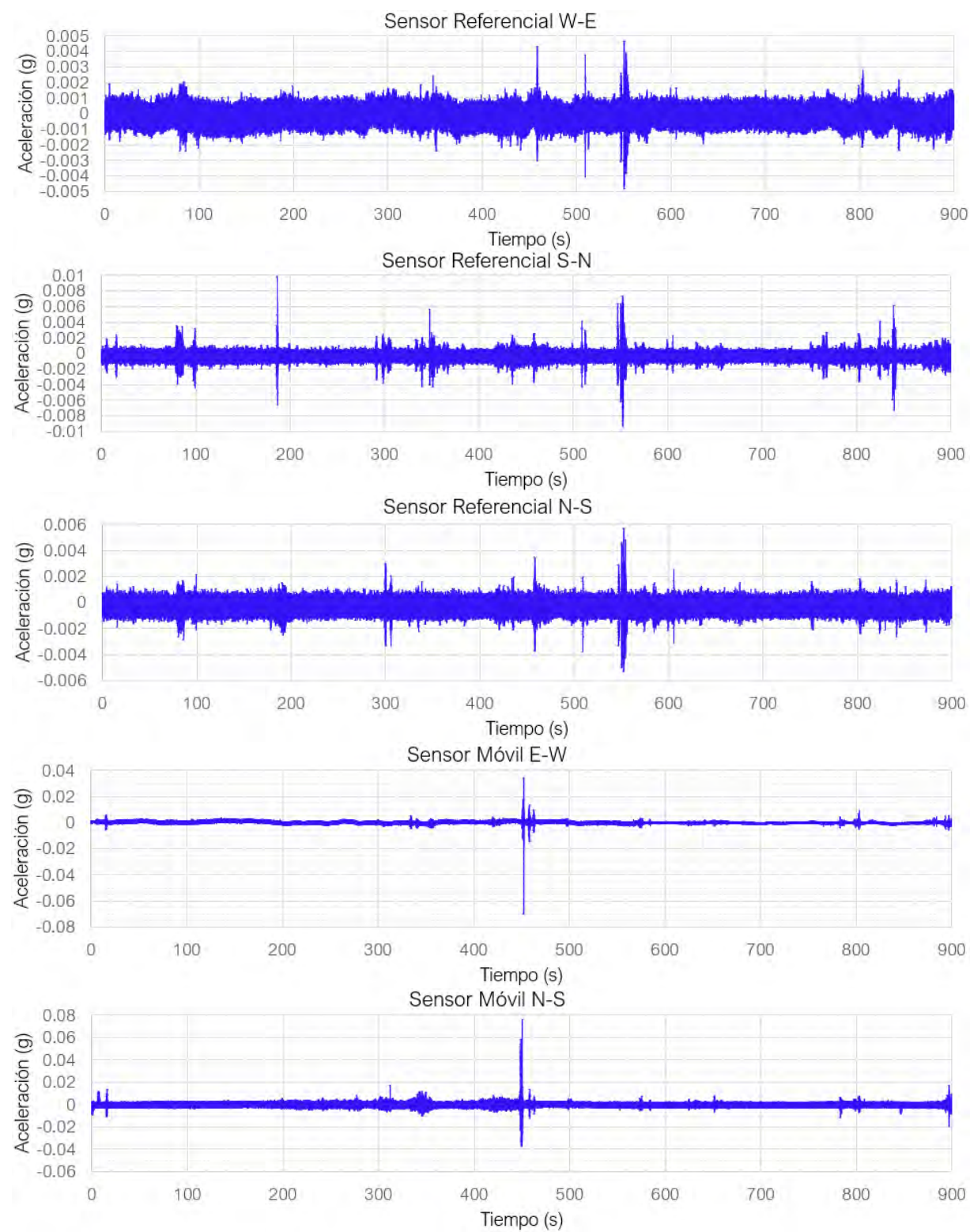


Figura 90.

Setup 04. Registros de acelerómetros empleados en la medición

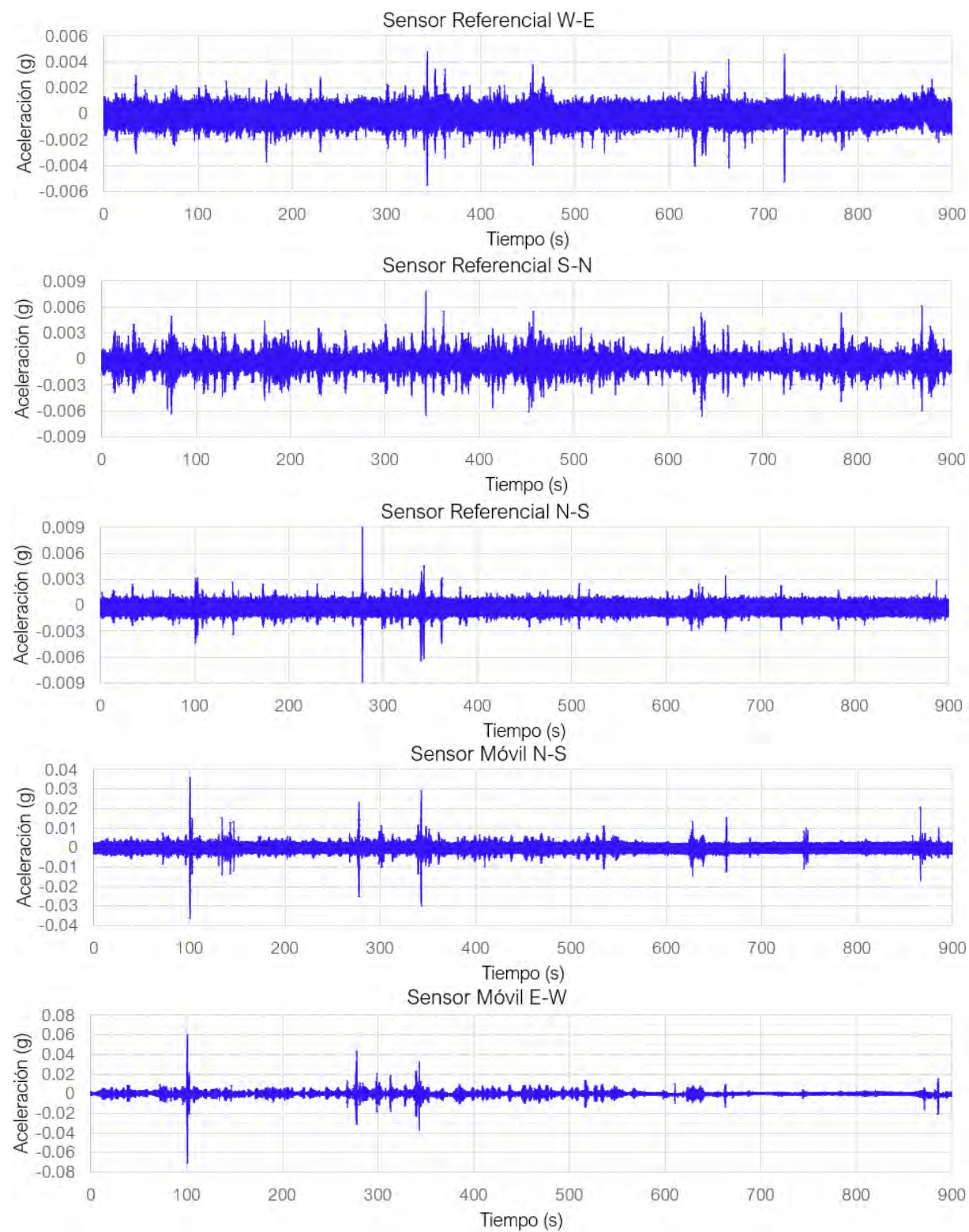
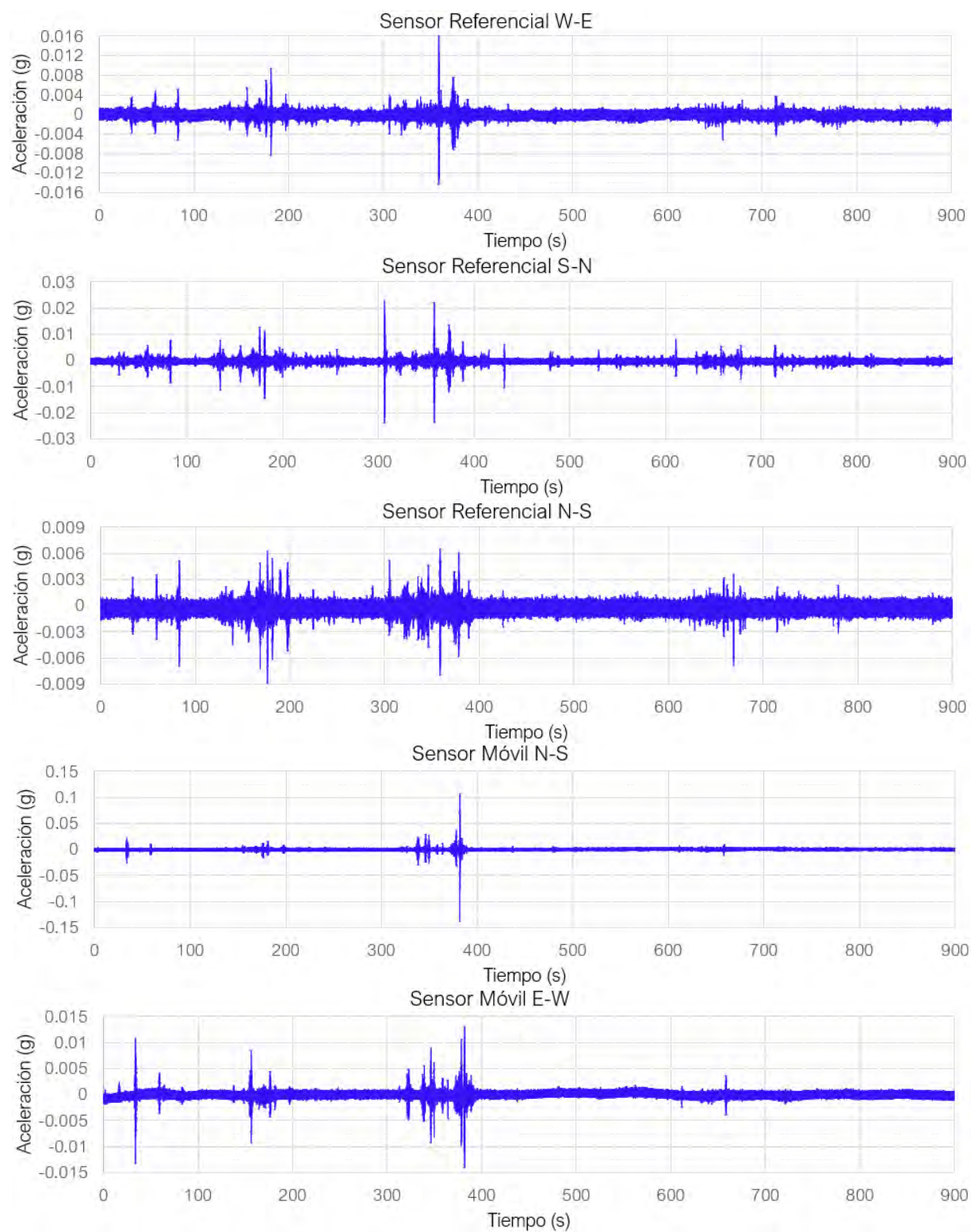


Figura 91.

Setup 05. Registros de acelerómetros empleados en la medición



25.5.2.1 Procesamiento de datos (Campaña 02)

El procesamiento de las señales derivadas de las vibraciones registradas en esta campaña se realizó mediante el software ARTeMIS Modal (2024). Los parámetros modales identificados por los métodos EFDD y SSI-UPCX se muestran a continuación:

Tabla 29.

Parámetros modales por el método EFDD en el dominio de la frecuencia

Modo	Frecuencia [Hz]	Amortiguamiento [%]	Complejidad [%]
1	3.070	1.562	15.910
2	3.603	1.288	51.180
3	5.039	0.479	29.837
4	7.300	0.497	35.597
5	9.701	0.632	5.799
6	10.196	†	86.143
7	10.574	†	32.128

Nota.

(†) No se logró la identificación de los valores de amortiguamiento para los modos 6 y 7.

Tabla 30.

Parámetros modales por el método SSI – UPCX en el dominio del tiempo

Modo	Frecuencia [Hz]	Std. Frecuencia [Hz]	Amortiguamiento [%]	Std. Amortiguamiento [%]	Complejidad [%]
1	3.079	0.003	1.701	0.089	3.203
2	3.603	0.003	1.585	0.066	0.682
3	5.086	0.022	1.194	0.243	8.929
4	7.313	0.006	1.198	0.09	21.102
5	9.571	0.026	3.739	0.204	7.647
6	10.171	0.009	1.253	0.11	21.904
7	10.572	0.033	4.81	0.395	4.495

Figura 92.

Setup 01. Campaña 03: Registros de velocímetros empleados en la medición

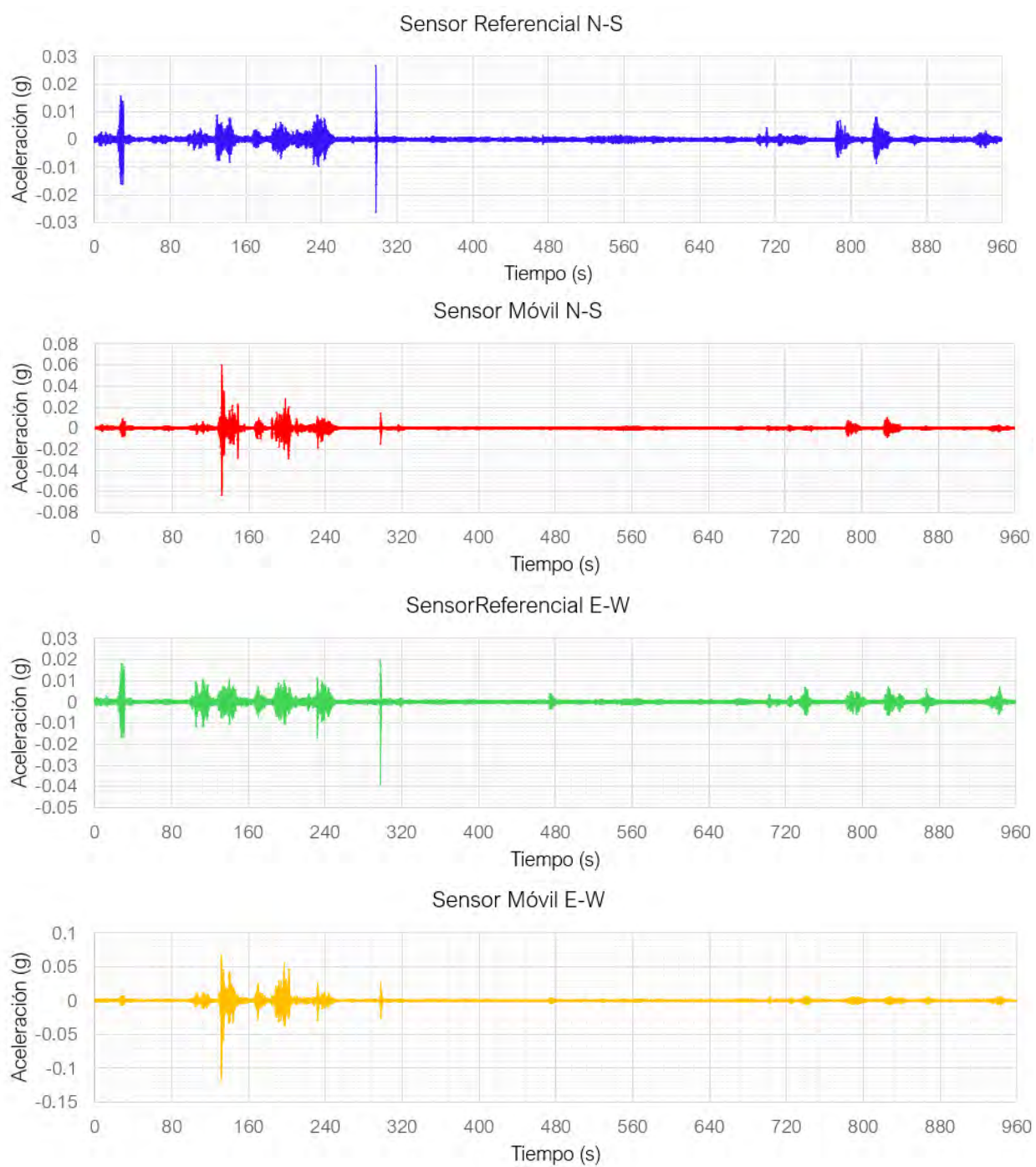
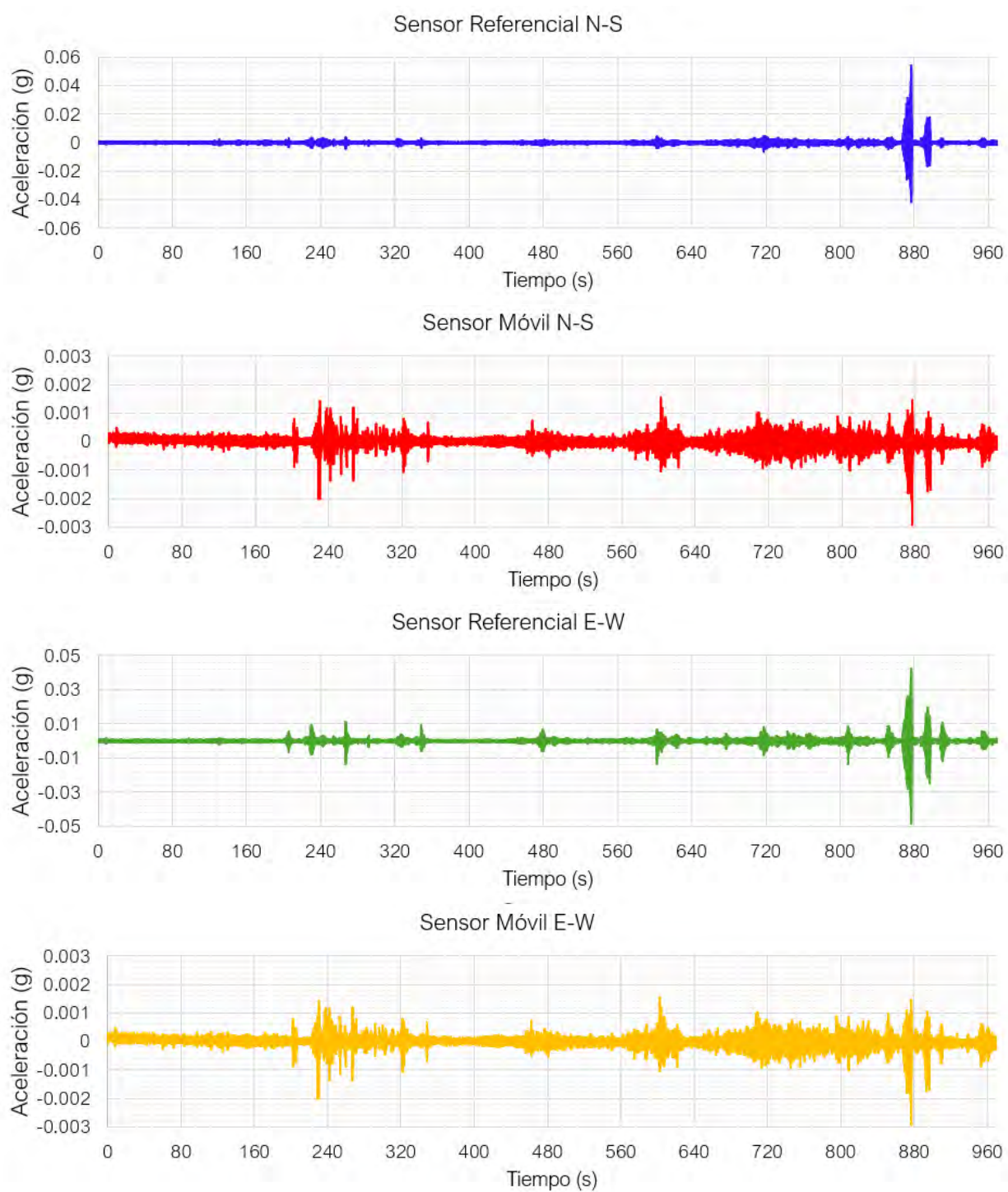


Figura 93.

Setup 02. Campaña 03: Registros de sensores empleados en la medición



25.5.2.2 Procesamiento de datos (Campaña 03)

El procesamiento de las señales producto de las vibraciones registradas en esta campaña se realizó utilizando el software ARTeMIS Modal (2024). Los parámetros modales identificados por los métodos EFDD y SSI-UPCX se muestran a continuación:

Tabla 31.

Parámetros modales por el método EFDD en el dominio de la frecuencia

Modo	Frecuencia [Hz]	Amortiguamiento [%]	Complejidad [%]
1	3.09	1.729	2.33
2	3.6	1.757	0.123
3	5.032	1.039	1.51
4	7.378	0.973	6.556
5	9.666	0.7	1.266
6	10.089	0.837	9.202
7	10.669	0.525	13.336

Tabla 32.

Parámetros modales por el método SSI – UPCX en el dominio del tiempo

Modo	Frecuencia [Hz]	Std. Frecuencia [Hz]	Amortiguamiento [%]	Std. Amortiguamiento [%]	Complejidad [%]
1	3.092	0.004	1.628	0.096	1.137
2	3.594	0.005	1.661	0.1	0.023
3	5.033	0.011	1.377	0.146	0.536
4	7.331	0.007	1.577	0.134	0.15
5	9.596	0.015	3.51	0.136	6.147
6	10.115	0.018	1.076	0.165	2.674
7	10.477	0.016	3.321	0.152	57.596

Los datos obtenidos en cada campaña requieren ser verificadas in situ, es decir después de cada setup o configuración se debe verificar las frecuencias y modos de vibración obtenidas preliminarmente, esto ayudara a continuar con el plan o la bitácora establecida. De no ser así se

deberá realizar los ajustes necesarios para poder continuar con las lecturas y/o mediciones establecidas.

25.5.3. Trabajo en gabinete

Una vez culminada la campaña realizada en campo se realizó el procesamiento de los datos (los resultados de valores singulares de las densidades espectrales se muestran en la **Figura 94**, **Figura 95**, **Figura 96**, **Figura 97** y **Figura 98**) tomando en cuenta lo siguientes aspectos y/o consideraciones propias de las herramientas de Artemis Modal Pro:

Limpieza de datos: se realizó la limpieza de datos aplicando un filtro de paso bajo.

Decimación: A continuación, para disminuir el tiempo computacional, los datos brutos fueron muestreados mediante un decimado, antes del procesado real de la señal, obteniendo el rango final de 0 - 25 Hz, consistente con el rango de frecuencias de las estructuras analizadas.

Figura 94.

Gráfico SVD por el método EFDD (Velocímetros/Geófonos)

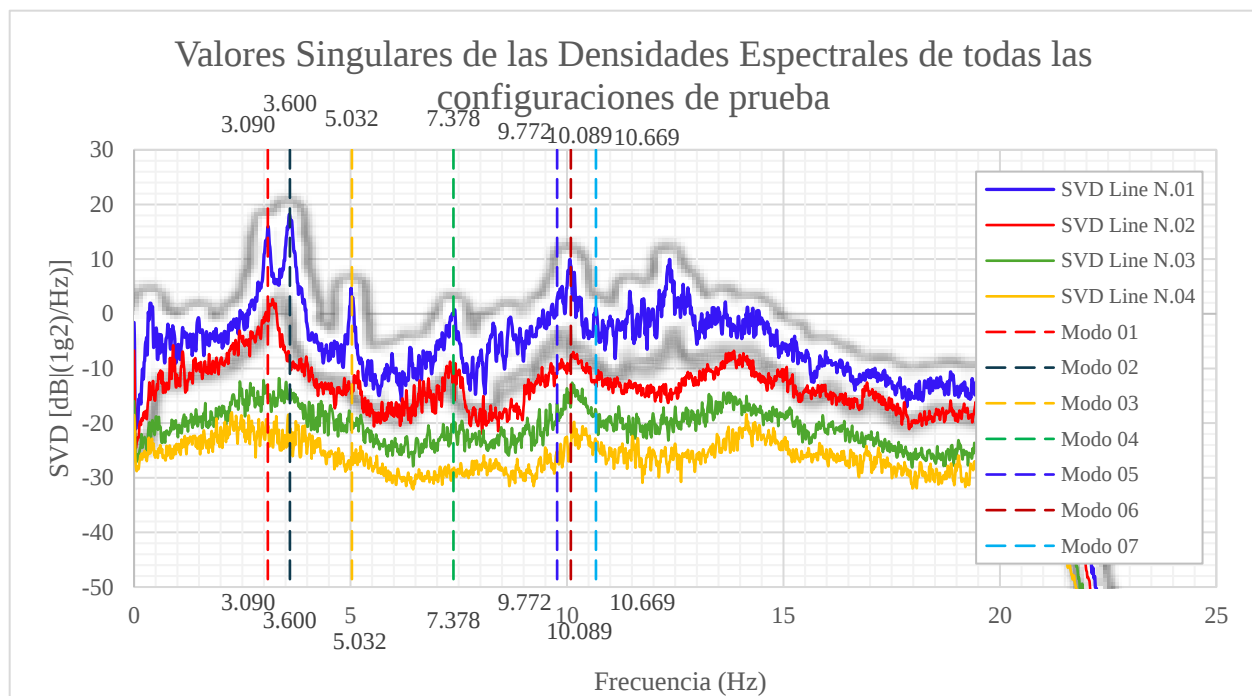
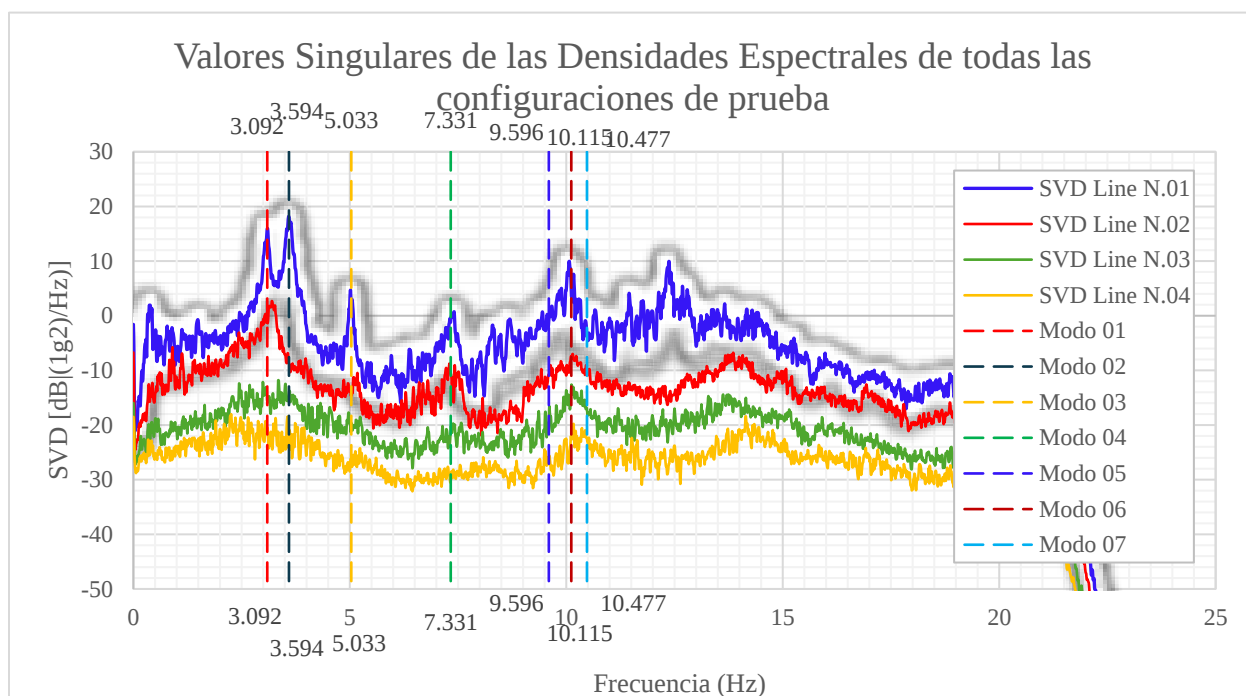
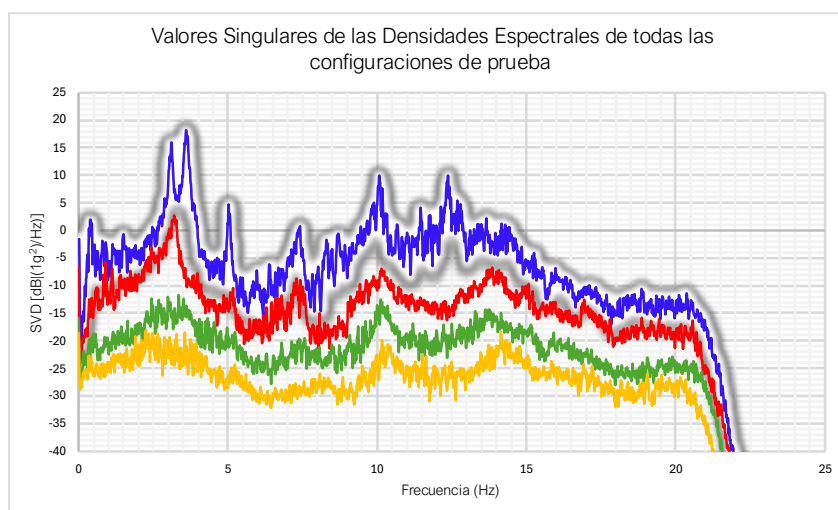


Figura 95.

Gráfico SVD por el método SSI – UPCX (Velocímetros/Geófonos)

**Figura 96.**

SVDs global (Velocímetros/Geófonos)



Nota. Elaboración propia. Readaptado de Artemis Modal Pro.

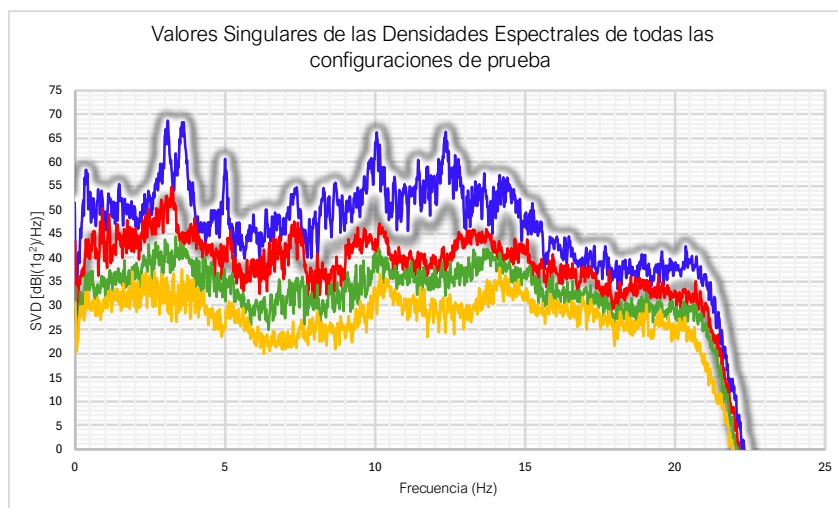
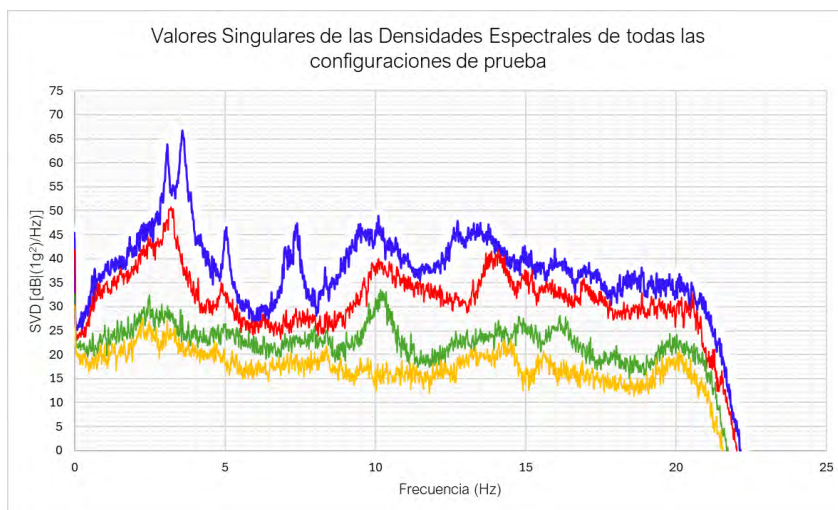
Figura 97.*SVDs Setup 01 (Velocímetros/Geófonos)**Nota.* Elaboración propia. Readaptado de Artemis Modal Pro.**Figura 98.***SVDs Setup 02 (Velocímetros/Geófonos)**Nota.* Elaboración propia. Readaptado de Artemis Modal Pro.

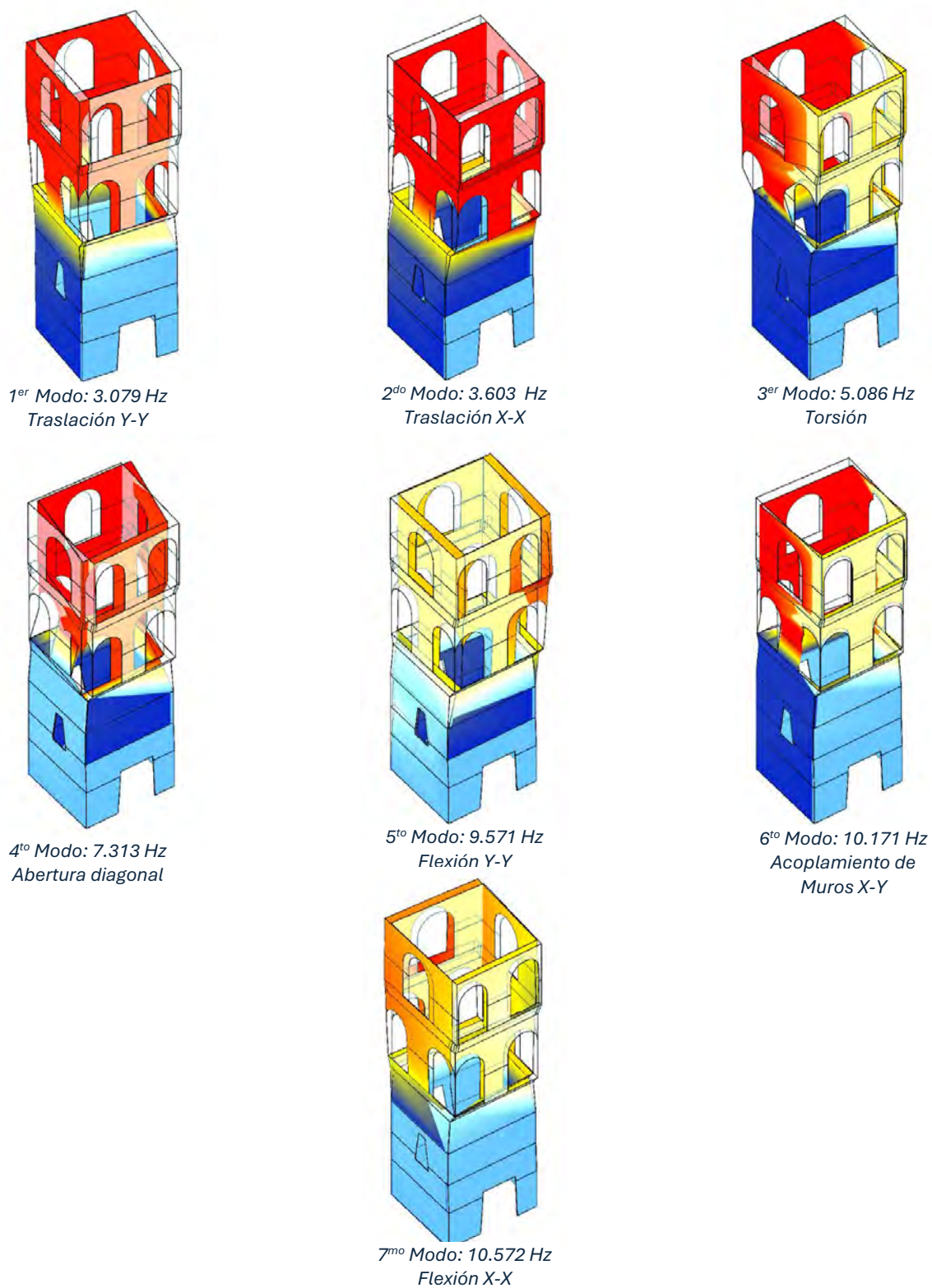
Figura 99.*Frecuencias y modos de vibración experimentales*

Figura 100.*Instrumentación de la torre de Chinchero con geófonos*

a)



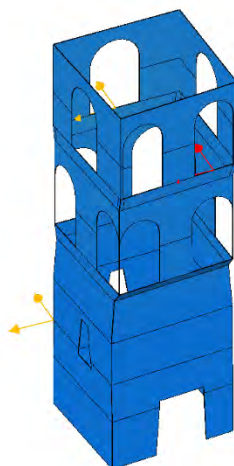
b)



c)



d)



e)



f)

Nota. a) Equipo de adquisición de datos, b) Geófono Lunitek, c) Colocación de los sensores, d) Sensor Lunitek en descanso de la grada, e) Esquema de ubicación de los sensores y f) Sensor Lunitek en ventana de la torre de Chinchero.

La **Figura 99** nos muestra los modos de vibración de la torre, por otro lado la **Figura 100** la configuración de la instrumentación con geófonos.

CAPITULO VI

26. Calibración del modelo numérico

En el presente caso de estudio, la estructura de la torre se asumió como un medio continuo y homogéneo (macro modelo), y también se consideró que los tipos de materiales que lo conforman presentan naturaleza isótropa. Las propiedades mecánicas de los materiales (albañilería de adobe, albañilería de piedra y madera) se muestran en la **Tabla 33**, estos valores son recomendadas por referencias descritas en dicha tabla. A diferencia del análisis modal en el Capítulo IV, las propiedades mecánicas de los materiales se asignarán para cada elemento estructural (muros, cimientos, gradas, rellenos, madera, etc.).

Tabla 33.

Propiedades mecánicas iniciales consideradas en el Modelo numérico

Referencia	Tipo de material	E [MPa]	μ	δ [kg/m ³]
Marissela & Angel (2017)	Albañilería de adobe XX	611.235	0.250	1575.131
	Albañilería de adobe YY	611.235	0.250	1575.131
Zanotti Sara (2015)	Mortero	80.000	0.250	1575.131
Ramírez Oyanguren & Alejano Monge (2004)	Albañilería de piedra (Cimentación)	1200.000	0.200	2000.000
	Albañilería de piedra (Gradas)	1200.000	0.200	2000.000
	Albañilería de piedra (Relleno)	1200.000	0.200	2000.000
UNALM (2012)	Madera viga collar	9806.000	0.300	560.000
	Madera entrepiso	9806.000	0.300	560.000
	Madera rollizos	9806.000	0.300	560.000

El presente modelo numérico se configuro albañilería y el modelo del material como elástico isotrópico lineal. El modelo numérico considera lo siguiente: cuerpo construido con

albañilería de adobe, base que incluye la cimentación, el relleno y las gradas construidas con albañilería de piedra y elementos de madera en viga collar, entrepiso y rollizos de madera en las ventanas superiores. Sobre la estructura de techo este se modelo como carga distribuida en la parte superior de los muros (ver **Tabla 21**).

Tabla 34.

Comparación entre las frecuencias experimentales/numéricas, MAC y FMAC, antes del proceso de optimización

Modo	Frecuencia Numérica (Hz)	Frecuencia Experimental (Hz)	Error (%)	MAC	FMAC
1	3.94	3.08	-27.95	0.98	0.60
2	4.08	3.61	-13.27	0.97	0.75
3	6.51	5.09	-27.94	0.90	0.55
4	9.18	7.31	-25.59	0.95	0.60
5	12.89	9.57	-34.67	0.84	0.47
6	12.79	10.17	-25.73	0.28	0.17
7	13.41	10.57	-26.80	0.72	0.45

Figura 101.

MAC antes de la calibración

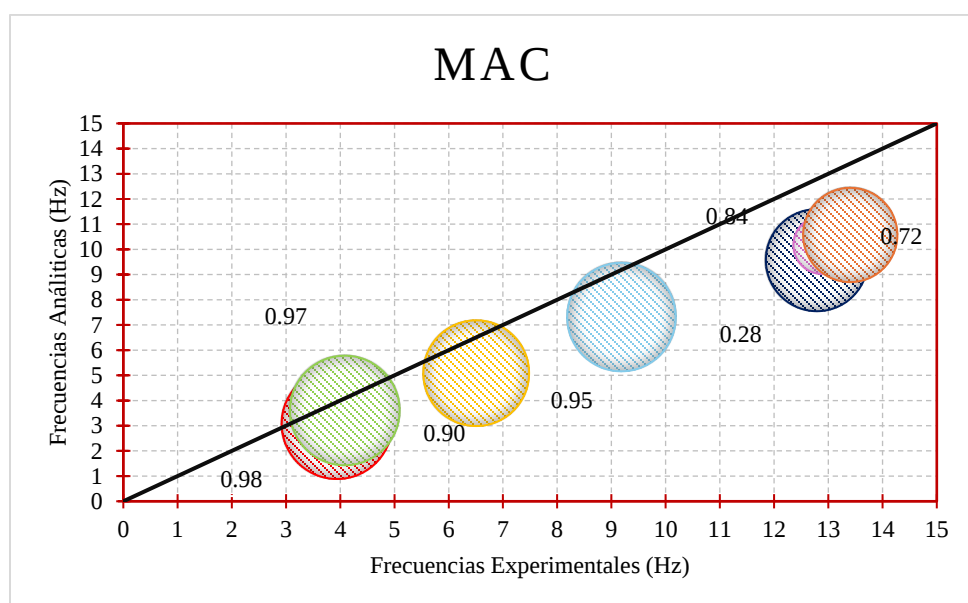
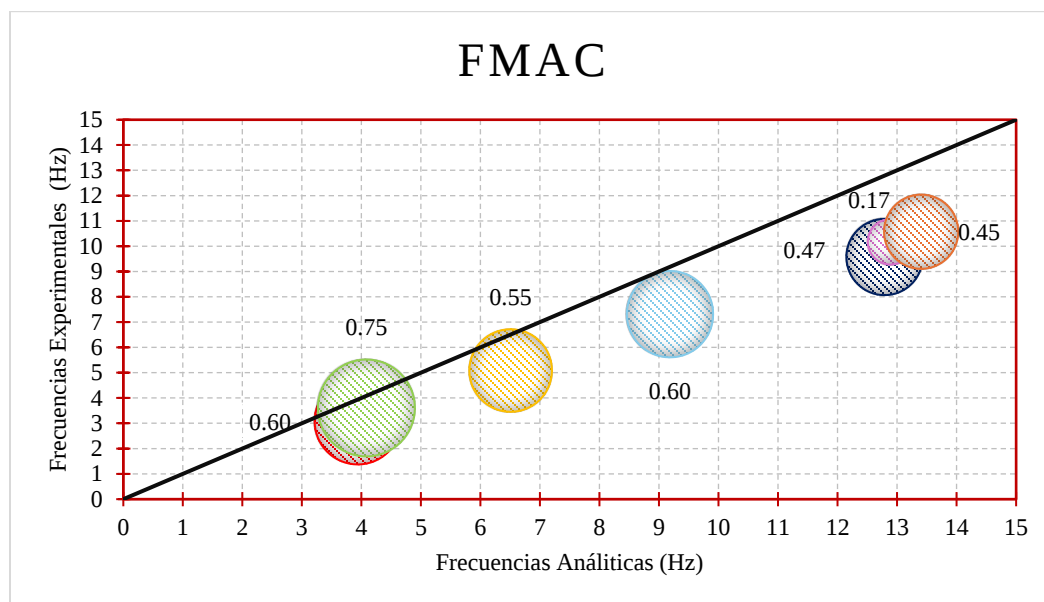


Figura 102.*FMAC antes de la calibración*

27. Análisis de sensibilidad

En contraste con el estudio de estructuras recientes, el enfoque de la evaluación estructural de edificaciones históricas implica la formulación de hipótesis acerca de diversos parámetros relacionados con el conocimiento de las construcciones, tales como alteraciones, interacciones estructurales (condiciones de frontera/borde), materiales empleados y tecnología constructiva (Lourenço et al., 2020).

El estudio de cómo el resultado de un sistema matemático responde a diferentes parámetros de entrada se denomina análisis de sensibilidad. Un enfoque de este tipo es altamente recomendable a fin de verificar la confiabilidad de los resultados y la importancia de los parámetros para la respuesta estructural (Lourenço et al., 2020).

Para seleccionar los parámetros de mayor influencia se realizó el análisis de sensibilidad correspondiente; este análisis se centró básicamente en las propiedades mecánicas de los materiales que componen la estructura y estos son: la albañilería o albañilería de adobe-piedra,

elementos de madera, cargas y condiciones de contorno. En esta etapa se evaluó la influencia del módulo de elasticidad (E) y la densidad (δ) correspondientes a los materiales.

Se realizó un incremento h del 5% a cada parámetro estructural (uno a la vez), se estimó la sensibilidad de las frecuencias naturales a partir de la **Ecuación 21**. Este análisis se realizó para modelo descritos anteriormente.

Ecuación 21.

Ecuación de sensibilidad de parámetros

$$S_{i,j} = \frac{\partial u_i}{\partial a_j} \approx \left[\frac{u_i x(a_j + h) - u_i x(a_j)}{h} \right] \quad (21)$$

Este modelo consideró los materiales como isotrópicos, esto para la albañilería de adobe, albañilería de piedra y la madera. Los parámetros que se consideró en este modelo se muestran en la **Tabla 35**.

Tabla 35.

Parámetros considerados para el análisis de sensibilidad

Ítem	Parámetro	Valor Inicial	Unidad
1	Módulo de elasticidad de la mampostería de adobe (XX)	611.235	MPa
2	Densidad de la mampostería de adobe (XX)	1575.131	kg/m ³
3	Módulo de poisson de la mampostería de adobe (v_{xx})	0.250	
4	Módulo de elasticidad de la mampostería de adobe (YY)	611.235	MPa
5	Densidad de la mampostería de adobe (YY)	1575.131	kg/m ³
6	Módulo de poisson de la mampostería de adobe (v_{yy})	0.250	
7	Módulo de elasticidad de la mampostería de adobe (Cornisa)	80.000	MPa
8	Densidad de la mampostería de adobe (Cornisa)	1575.131	kg/m ³
9	Módulo de poisson de la mampostería de adobe (v_{xy}) (Cornisa)	0.250	
10	Módulo de elasticidad de la mampostería de piedra (Cimentación)	1200.000	MPa
11	Densidad de la mampostería de piedra (Cimentación)	2000.000	kg/m ³
12	Módulo de poisson de la mampostería de piedra (v_{xy}) - (Cimentación)	0.200	
13	Módulo de elasticidad de la mampostería de piedra (Relleno)	1200.000	MPa

14	Densidad de la mampostería de piedra (Relleno)	2000.000	kg/m ³
15	Módulo de poisson de la mampostería de piedra (v_{xy}) - Relleno	0.200	
16	Módulo de elasticidad de la mampostería de piedra (Gradas)	1200.000	MPa
17	Densidad de la mampostería de piedra (Gradas)	2000.000	kg/m ³
18	Módulo de poisson de la mampostería de piedra (v_{xy}) - Gradas	0.200	
19	Módulo de elasticidad de la madera (Rollizos)	9806.000	MPa
20	Densidad de la madera (Rollizos)	560.000	kg/m ³
21	Módulo de Poisson de la madera (Rollizo)	0.300	
22	Módulo de elasticidad de la madera (Entrepiso)	9806.000	MPa
23	Densidad de la madera (Entrepiso)	560.000	kg/m ³
24	Módulo de Poisson de la madera (Entrepiso)	0.300	
25	Módulo de elasticidad de la madera (Viga collar)	9806.000	MPa
26	Densidad de la madera (Viga collar)	560.000	kg/m ³
27	Módulo de Poisson de la madera (Viga collar)	0.300	
28	Carga en el tope de muros	3786.230	Pa

Como se puede ver en la tabla anterior, se tomaron 28 parámetros para ver la influencia en el comportamiento dinámico de la torre. Cabe aclarar que estos gráficos muestran barras con valores positivos y negativos. Los valores positivos significan que el parámetro es directamente proporcional a la respuesta modal de la torre. Los valores negativos por su parte indican que el parámetro estructural es inversamente proporcional a la respuesta modal de la estructura. Podemos ejemplificar estos enunciados de la siguiente manera: para un parámetro con valor positivo; su incremento aumentará el valor de la frecuencia y su disminución disminuirá el valor de dicha frecuencia. Para el caso de valores negativos podemos afirmar que: si aumentamos el valor del parámetro, la frecuencia disminuye; si la disminuimos, la frecuencia incrementa.

La **Figura 103**, **Figura 104**, **Figura 105**, **Figura 106**, **Figura 107**, **Figura 108** y **Figura 109**, nos muestran la influencia de cada parámetro en la frecuencia y modo de vibración de la estructura (Torre de Chinchero).

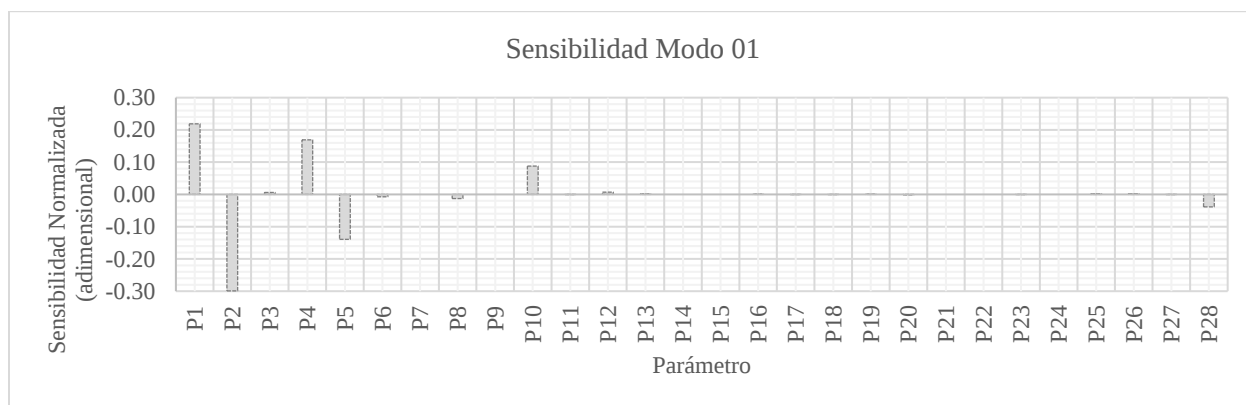
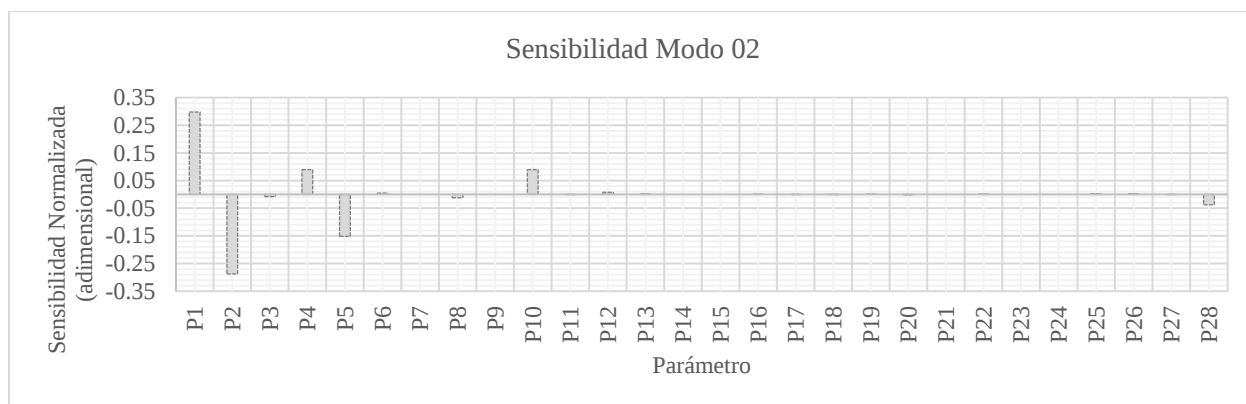
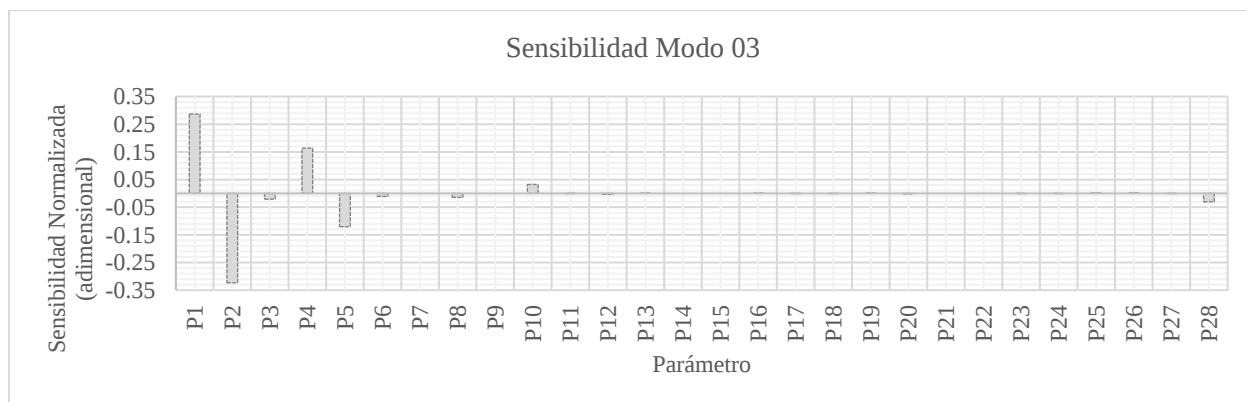
Figura 103.*Sensibilidad de la primera frecuencia natural para el modelo***Figura 104.***Sensibilidad de la segunda frecuencia natural para el modelo***Figura 105.***Sensibilidad de la tercera frecuencia natural para el modelo*

Figura 106.

Sensibilidad de la cuarta frecuencia natural para el modelo

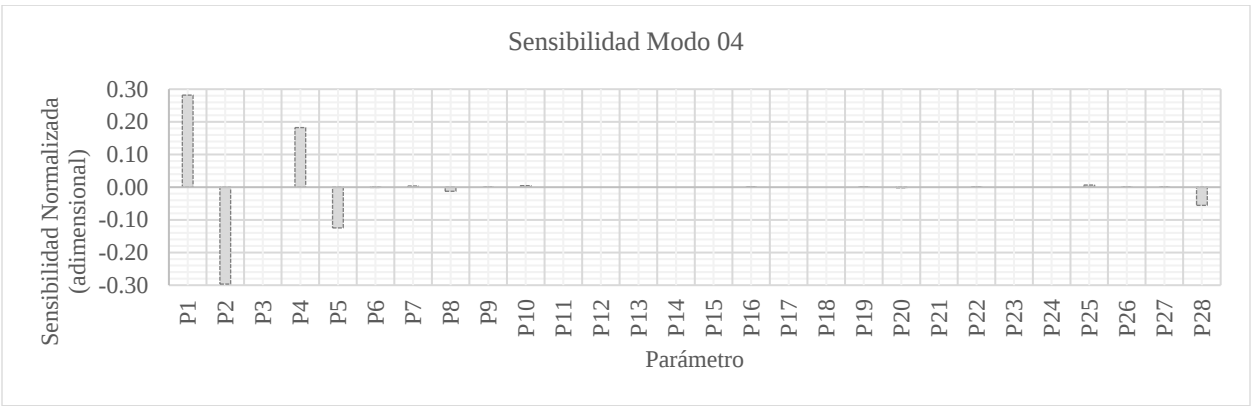


Figura 107.

Sensibilidad de la quinta frecuencia natural para el modelo

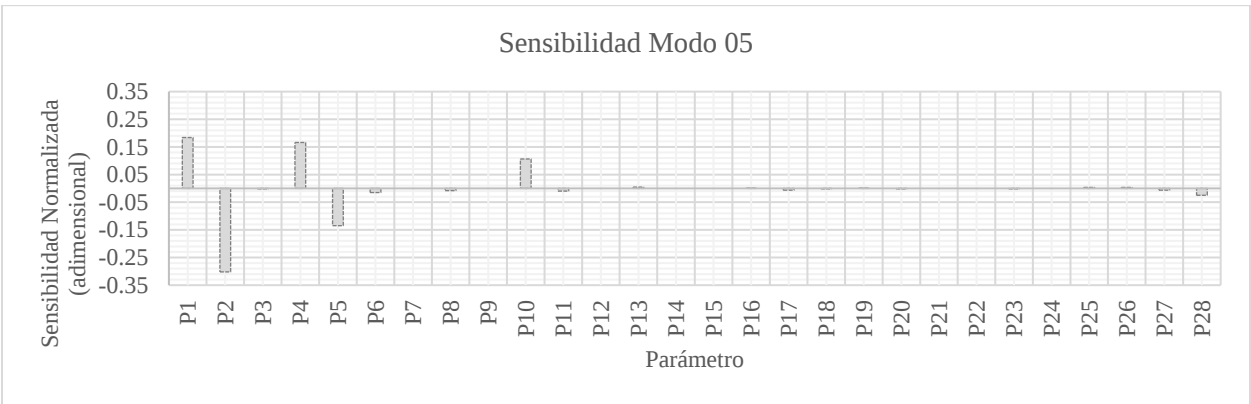


Figura 108.

Sensibilidad de la sexta frecuencia natural para el modelo

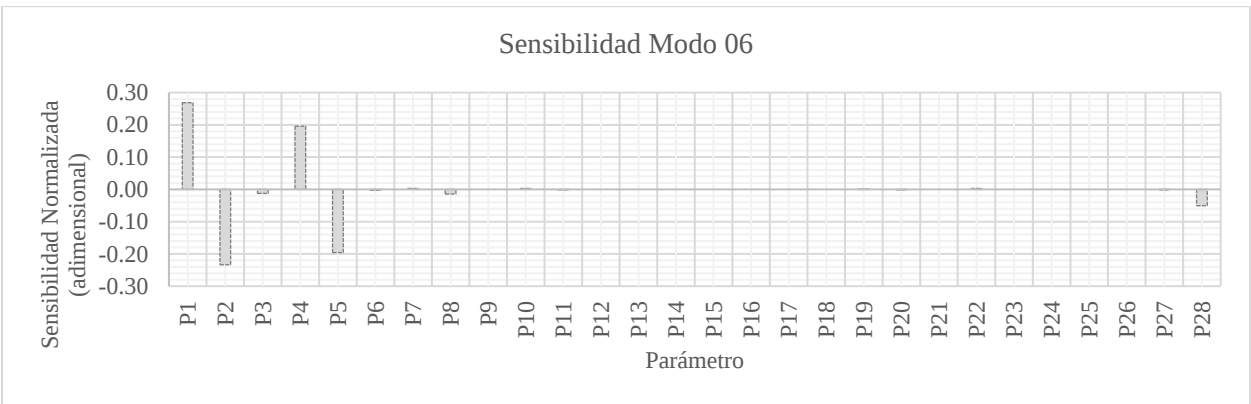
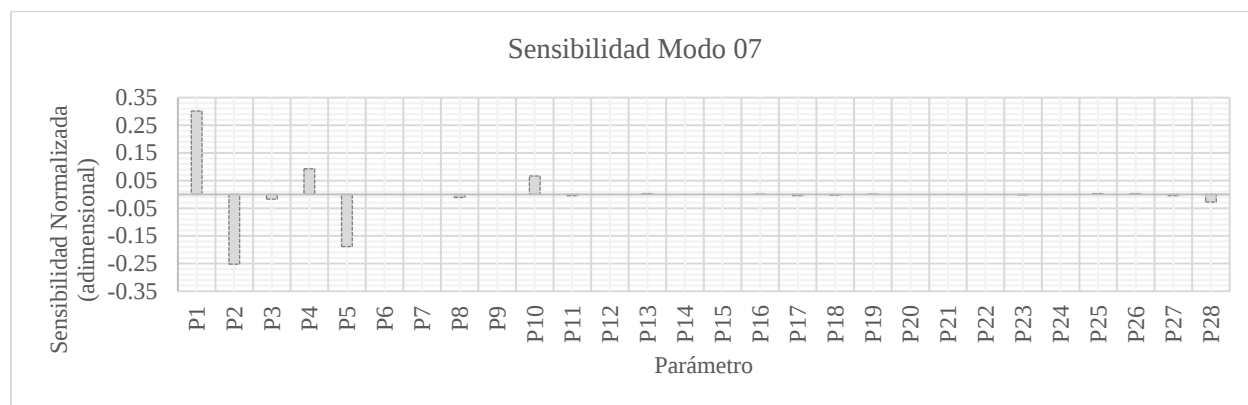


Figura 109.

Sensibilidad de la séptima frecuencia natural para el modelo



Según los resultados de sensibilidad se puede observar que los parámetros que más influyen en el comportamiento estructural son los siguientes: P1, P2, P4, P5 y P10. Los parámetros (P1, P2, P4 y P5) corresponden al módulo de elasticidad y a la densidad de la albañilería de adobe. Por otro lado el parámetro P10 corresponde al módulo de elasticidad de la albañilería de piedra.

Con las propiedades más influyentes en el comportamiento dinámico de la torre, se procedió a realizar la calibración del modelo mediante el método de iteración, que se basa en la minimización de la diferencia que existe entre la respuesta numérica y la experimental mediante la identificación de valores óptimos para cada una de las propiedades escogidas en el análisis de sensibilidad.

A continuación se procederá optimizar el modelo numérico ajustando manualmente los parámetros de los módulos de elasticidad de la albañilería de adobe y de la albañilería de piedra. Esta elección se debe a la amplia variabilidad del módulo de elasticidad para ambos tipos de albañilería. El parámetro de densidad no será ajustado por la razón de que este valor no tiene variabilidad como el módulo de elasticidad, además este valor se calculó por ensayos en laboratorio de adobes extraídos de la iglesia de Nuestra Señora de la natividad de Chinchero, tal como se especifica en el ítem 19.1

Tabla 36.*Métricas del proceso de calibración (MAC/FMAC) y frecuencias numéricas*

MODO	f _{exp} (Hz)	Módulo de Elasticidad de la Albañilería de Adobe (MPa)											
		610				550				500			
		f _{num} (Hz)	Error (%)	MAC	FMAC	f _{num} (Hz)	Error (%)	MAC	FMAC	f _{num} (Hz)	Error (%)	MAC	FMAC
1	3.08	3.94	-27.95	0.98	0.60	3.77	-22.45	0.98	0.66	3.62	-17.53	0.98	0.71
2	3.61	4.08	-13.27	0.97	0.75	3.91	-8.48	0.96	0.82	3.76	-4.20	0.96	0.89
3	5.09	6.51	-27.94	0.90	0.55	6.20	-21.86	0.90	0.61	5.92	-16.49	0.90	0.66
4	7.31	9.18	-25.59	0.95	0.60	8.74	-19.56	0.95	0.66	8.36	-14.28	0.95	0.72
5	9.57	12.89	-34.67	0.84	0.47	12.32	-28.76	0.70	0.42	11.86	-23.87	0.88	0.57
6	10.17	12.79	-25.73	0.28	0.17	12.23	-20.21	0.56	0.39	11.70	-14.97	0.57	0.43
7	10.57	13.41	-26.80	0.72	0.45	12.84	-21.41	0.72	0.49	12.33	-16.59	0.72	0.53

Continuación...

MODO	f _{exp} (Hz)	Módulo de Elasticidad de la Albañilería de Adobe (MPa)															
		450				400				375				350			
		f _{num} (Hz)	Error (%)	MAC	FMAC	f _{num} (Hz)	Error (%)	MAC	FMAC	f _{num} (Hz)	Error (%)	MAC	FMAC	f _{num} (Hz)	Error (%)	MAC	FMAC
1	3.08	3.46	-12.26	0.98	0.78	3.28	-6.58	0.98	0.87	3.19	-3.57	0.98	0.92	3.09	-0.42	0.98	0.97
2	3.61	3.59	0.40	0.96	0.95	3.41	5.35	0.96	0.86	3.32	7.98	0.96	0.81	3.22	10.73	0.96	0.76
3	5.09	5.64	-10.81	0.90	0.73	5.33	-4.77	0.90	0.82	5.17	-1.59	0.90	0.87	5.00	1.71	0.90	0.87
4	7.31	7.95	-8.71	0.95	0.80	7.52	-2.81	0.94	0.89	7.29	0.28	0.94	0.94	7.06	3.47	0.94	0.88
5	9.57	11.36	-18.68	0.91	0.64	10.82	-13.05	0.91	0.71	10.53	-10.04	0.91	0.75	10.23	-6.89	0.90	0.79
6	10.17	11.13	-9.39	0.56	0.47	10.52	-3.46	0.56	0.52	10.21	-0.36	0.56	0.55	9.88	2.85	0.55	0.52
7	10.57	11.78	-11.43	0.73	0.58	11.19	-5.86	0.72	0.65	10.88	-2.91	0.72	0.68	10.55	0.18	0.72	0.72

Nota. La presente tabla muestra las métricas (MAC y FMAC) para los valores de módulos de elasticidad de la albañilería de adobe.

Tabla 37.

Métricas de calibración (MAC/FMAC) y frecuencias numéricas

MODO	fexp (Hz)	Módulo de Elasticidad de la Albañilería de Piedra (MPa)																			
		1200				1000				800				700				650			
		fnum (Hz)	Error (%)	MAC	FMAC	fnum (Hz)	Error (%)	MAC	FMAC	fnum (Hz)	Error (%)	MAC	FMAC	fnum (Hz)	Error (%)	MAC	FMAC	fnum (Hz)	Error (%)	MAC	FMAC
1	3.08	3.19	-3.57	0.98	0.92	3.16	-2.55	0.98	0.93	3.11	-1.09	0.98	0.96	3.08	-0.09	0.98	0.98	3.06	0.51	0.98	0.97
2	3.61	3.32	7.98	0.96	0.81	3.28	9.01	0.96	0.80	3.23	10.45	0.97	0.77	3.19	11.41	0.97	0.76	3.17	11.99	0.97	0.75
3	5.09	5.17	-1.59	0.90	0.87	5.15	-1.21	0.90	0.88	5.12	-0.67	0.90	0.89	5.10	-0.29	0.90	0.90	5.09	-0.07	0.90	0.90
4	7.31	7.29	0.28	0.94	0.94	7.29	0.35	0.94	0.94	7.28	0.45	0.94	0.94	7.28	0.51	0.94	0.93	7.27	0.55	0.94	0.93
5	9.57	10.53	-10.04	0.91	0.75	10.38	-8.48	0.90	0.76	10.15	0.24	0.84	0.75	10.01	1.58	0.93	0.85	9.93	2.41	0.94	0.87
6	10.17	10.21	-0.36	0.56	0.55	10.21	-0.33	0.56	0.56	10.22	-6.81	0.29	0.29	10.21	-6.68	0.45	0.45	10.21	-6.65	0.45	0.45
7	10.57	10.88	-2.91	0.72	0.68	10.77	-1.86	0.72	0.70	10.61	-0.36	0.72	0.71	10.50	0.66	0.70	0.69	10.44	1.27	0.68	0.67

Nota. La presente tabla muestra las métricas (MAC y FMAC) para los valores de módulos de elasticidad de la albañilería de piedra.

Como se puede ver en la **Tabla 36**, el valor óptimo para la albañilería de adobe es de 375 MPa. Continuando con la optimización de los parámetros más influyente se procede a ajustar el valor del módulo de elasticidad de la albañilería de piedra. El valor optimo según la **Tabla 37** es de 700 MPa.

Tabla 38.

Métricas de calibración (MAC/FMAC) y frecuencias numéricas

MODO	fexp (Hz)	Profundidad de Cimentación (m)															
		0				1.5				3.6				4.6			
		fnum (Hz)	Error (%)	MAC	FMA C	fnum (Hz)	Error (%)	MAC	FMAC	fnum (Hz)	Error (%)	MAC	FMAC	fnum (Hz)	Error (%)	MAC	FMAC
1	3.08	3.16	-2.78	0.98	0.93	3.09	-0.35	0.98	0.98	3.08	-0.09	0.98	0.98	3.08	-0.07	0.98	0.98
2	3.61	3.27	9.29	0.95	0.78	3.20	11.20	0.97	0.76	3.19	11.41	0.97	0.76	3.19	11.43	0.97	0.76
3	5.09	5.14	-0.98	0.90	0.88	5.10	-0.31	0.90	0.90	5.10	-0.29	0.90	0.90	5.10	-0.29	0.90	0.90
4	7.31	7.29	0.38	0.94	0.94	7.28	0.50	0.94	0.93	7.28	0.51	0.94	0.93	7.28	0.51	0.94	0.93
5	9.57	10.34	-1.69	0.86	0.74	10.03	1.41	0.93	0.84	10.01	1.58	0.93	0.85	10.01	1.59	0.93	0.85
6	10.17	10.20	-6.60	0.56	0.55	10.21	-6.69	0.45	0.45	10.21	-6.68	0.45	0.45	10.21	-6.69	0.45	0.45
7	10.57	10.71	-1.35	0.70	0.68	10.52	0.52	0.70	0.70	10.50	0.66	0.70	0.69	10.50	0.68	0.70	0.69

Nota. La presente tabla muestra las métricas (MAC y FMAC) para los valores de profundidad de la cimentación.

Continuando con el proceso de optimización del modelo, se tomó en consideración las condiciones de contorno referidas a la profundidad de cimentación. Como se puede ver en la **Tabla 38**, la profundidad optima y esto contrastado con el levantamiento de nube de puntos, ya que se tomó como nivel de cimentación la cota donde se ubica la plaza del parque arqueológico de Chinchero.

Se observa que el segundo modo de vibración supera el error de 5%. Este resultado puede ocurrir por los escasos puntos de medición en la torre. Mientras mayores puntos de medición se utilicen, la calibración será más adecuada y brindará una mayor validación al modelo numérico. Las propiedades mecánicas finales después del proceso de calibración se muestran en la **Tabla 39**.

Tabla 39.*Propiedades mecánicas de los materiales después de la calibración*

Tipo de material	E [MPa]	μ	δ [kg/m ³]
Albañilería de adobe XX	375	0.250	1575.131
Albañilería de adobe YY	375	0.250	1575.131
Mortero	80.000	0.250	1575.131
Albañilería de piedra (Cimentación)	700.000	0.200	2000.000
Albañilería de piedra (Gradas)	700.000	0.200	2000.000
Albañilería de piedra (Relleno)	700.000	0.200	2000.000
Madera viga collar	9806.000	0.300	560.000
Madera entepiso	9806.000	0.300	560.000
Madera rollizos	9806.000	0.300	560.000

Tabla 40.*Valores finales de MAC y FMAC después de la calibración*

Modo	Frecuencia Numérica (Hz)	Frecuencia Experimental (Hz)	Error (%)	MAC	FMAC
1	3.082	3.079	0.100	0.98	0.98
2	3.193	3.605	11.415	0.97	0.76
3	5.100	5.086	0.294	0.90	0.90
4	7.276	7.313	0.514	0.94	0.93
5	10.012	9.571	4.599	0.93	0.85
6	10.211	10.172	0.379	0.45	0.45
7	10.502	10.572	0.663	0.70	0.69

Los resultados finales se muestran en las gráficas MAC (ver **Figura 110**), FMAC (ver **Figura 111**) y en la **Tabla 40**. En estos criterios, el MAC y FMAC están representados en forma de círculo. Además, si el círculo, se aproxima más a la línea inclinada de 45° quiere decir que

existe una adecuada relación entre las frecuencias experimentales y numéricas. Las formas modales se muestran en la **Figura 112**.

Figura 110.

Valores MAC después del proceso de optimización

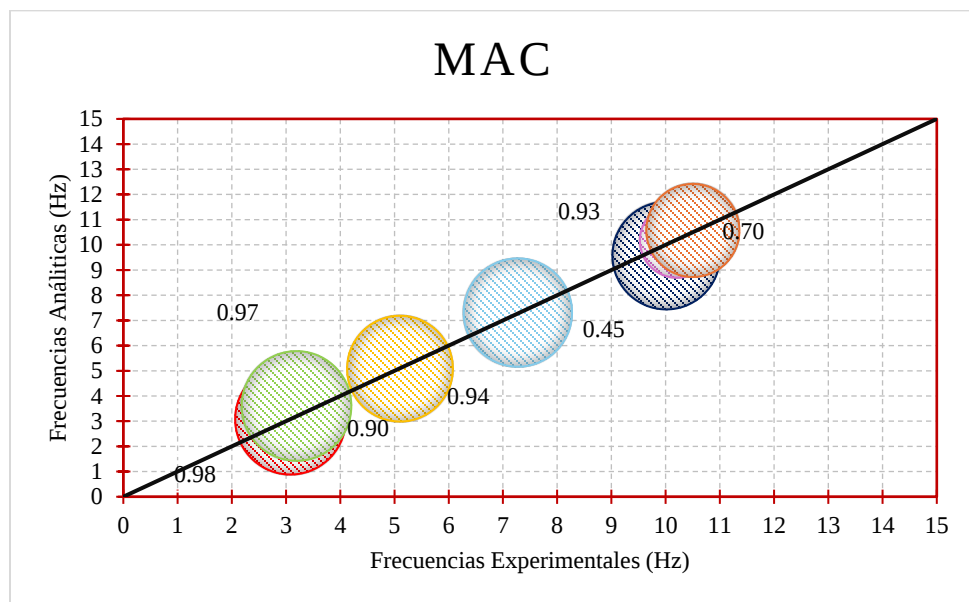


Figura 111.

Valores MAC después del proceso de optimización

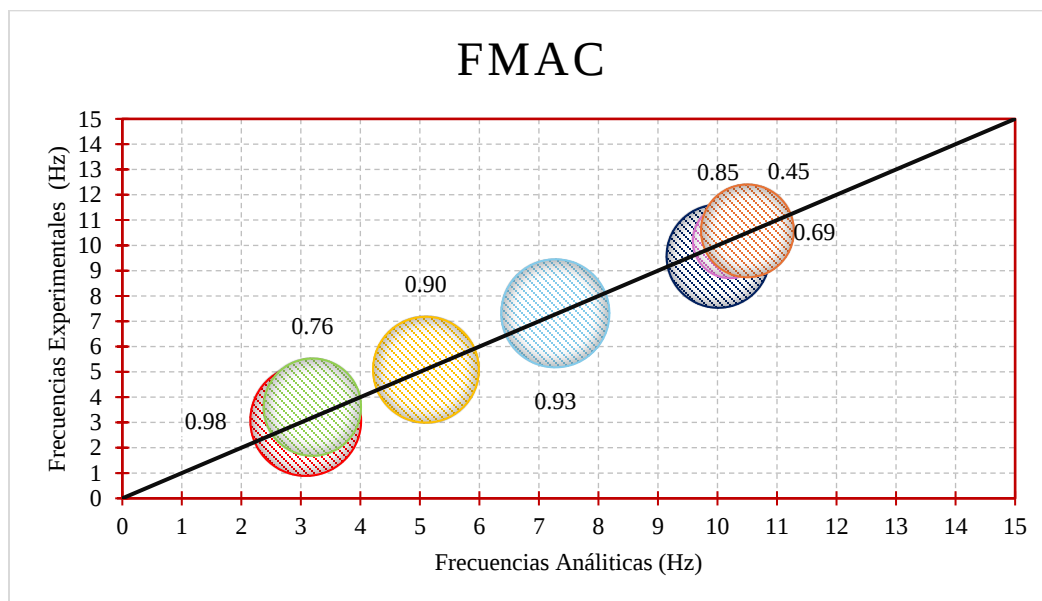
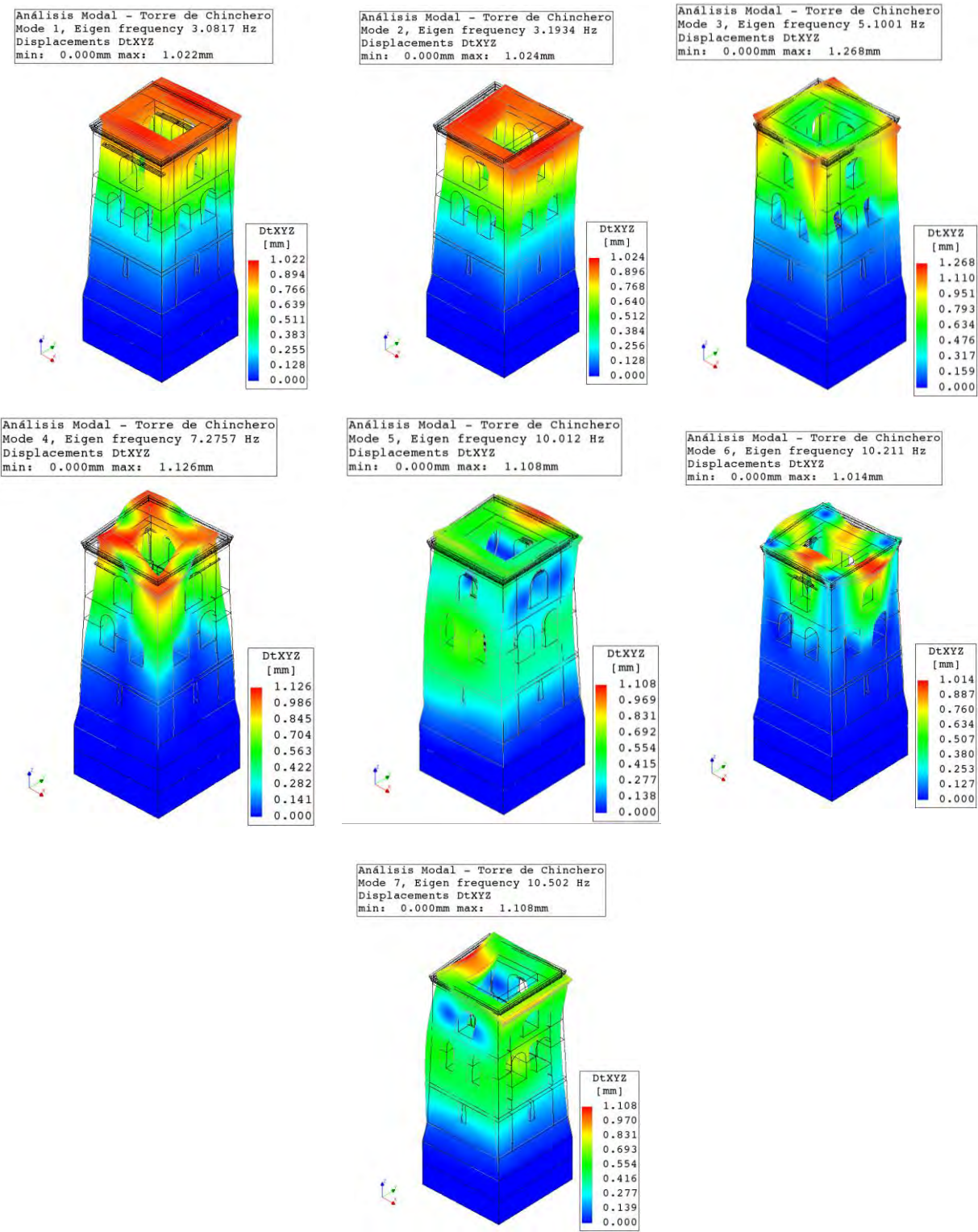


Figura 112.

Modos de vibración finales después de la calibración



28. Ensayos de vibración en superficie adyacente a la torre

Figura 113.

Puntos de monitoreo



Durante las campañas de vibración ambiental de la torre se llevaron a cabo campañas de medición del terreno en puntos señalados en la **Figura 113**. Los detalles de cada punto medido se detallan en la **Tabla 41**:

Tabla 41.

Datos geográficos de los puntos de medición

Descripción	Coordenada E	Coordenada S	Cota Z	Duración (min.s)
A	819799.00 m	8517735.00 m	3762 msnm	25m8s
B	819750.00 m	8517766.00 m	3752 msnm	28m26.095s
C	819818.00 m	8517826.00 m	3751 msnm	45m44.9050s

Estas mediciones se ejecutaron con el propósito de hallar la frecuencia natural del terreno mediante el método de Nakamura. Los registros de cada medición, el procesamiento de estos y los resultados se muestran en la **Tabla 42**:

Tabla 42.

Frecuencia fundamental del terreno

Descripción	Fo (Hz)	T (s)
A	2.71	0.369
B	2.60	0.385
C	2.63	0.380

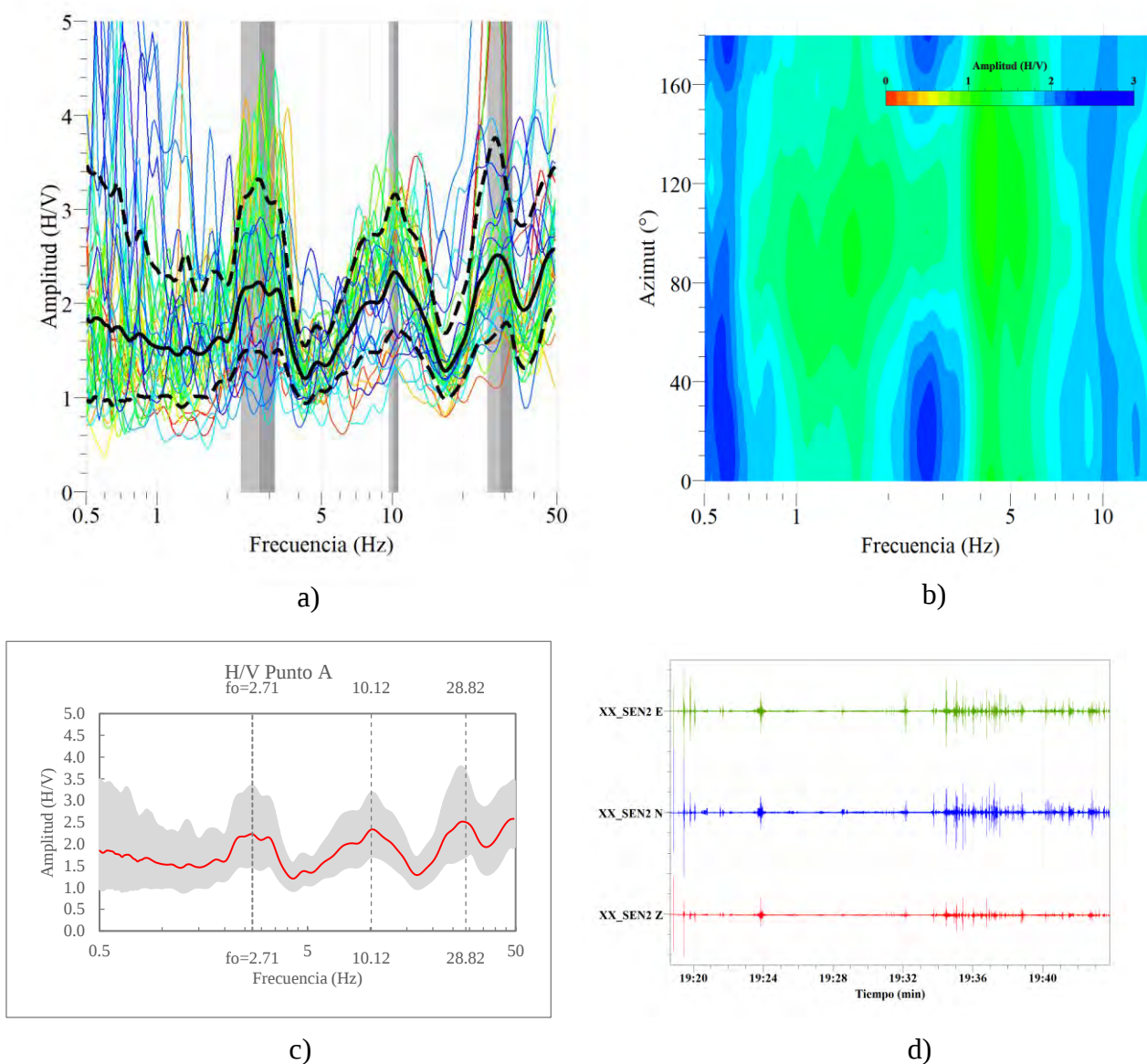
La frecuencia fundamental de la torre es de 3.07 Hz, mientras la frecuencia del terreno en el punto A (punto más cercano a la torre) es de 2.71 Hz, en tal sentido, se puede afirmar que el efecto de resonancia no afectaría a la torre.

Para una mejor interpretación y visualización de datos, se empleó el software denominado geopsy, el cual es una herramienta que nos permite entre todas sus capacidades calcular el valor de frecuencia fundamental del terreno por el método de Nakamura.

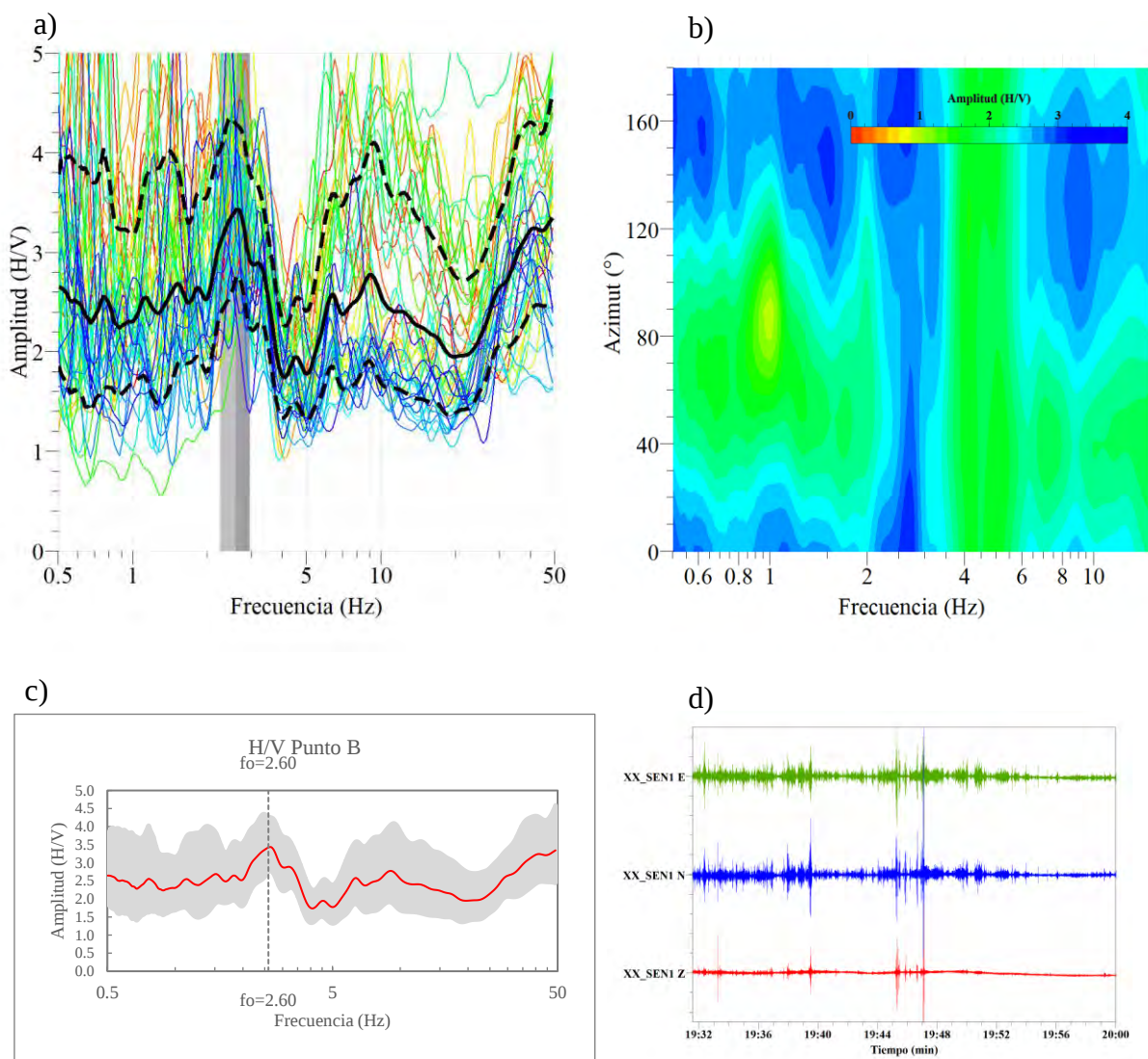
La **Figura 114**, **Figura 115** y **Figura 116**, muestran las frecuencias predominantes del terreno en los puntos medidos.

Figura 114.

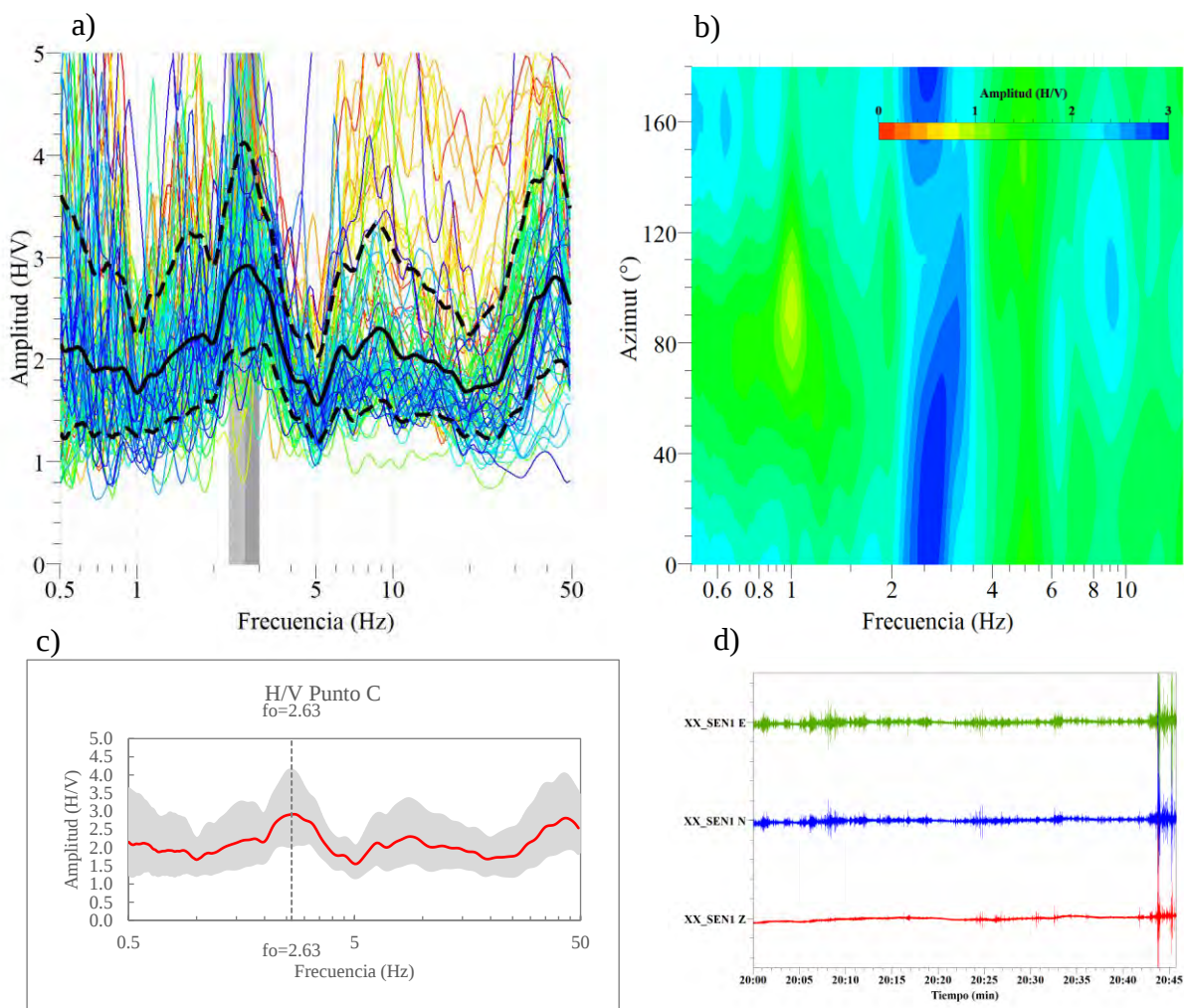
Punto A: Frecuencias pico 2.71 Hz, 10.12 Hz y 28.82 Hz



Nota. a) Todas las curvas H/V calculadas en el software Geopsy; b) Gráfico direccional que muestra la amplitud H/V en función del azimut; c) Curva mHVS (con la desviación estándar sombreada) calculada en Torre de Chinchero, las líneas punteadas indican las frecuencias máximas; d) registro de señales en dirección x, y e z. Todas estas características mencionadas corresponden al procesamiento de datos del punto A.

Figura 115.*Punto B: Frecuencia pico 2.60 Hz*

Nota. a) Todas las curvas H/V calculadas en el software Geopsy; b) Gráfico direccional que muestra la amplitud H/V en función del azimut; c) Curva mHVS (con la desviación estándar sombreada) calculada en Torre de Chinchero, las líneas punteadas indican las frecuencias máximas; d) registro de señales en dirección x, y e z. Todas estas características mencionadas corresponden al procesamiento de datos del punto B.

Figura 116.*Punto C: Frecuencia pico 2.63 Hz*

Nota. a) Todas las curvas H/V calculadas en el software Geopsy; b) Gráfico direccional que muestra la amplitud H/V en función del azimut; c) Curva mHVS (con la desviación estándar sombreada) calculada en Torre de Chinchero, las líneas punteadas indican las frecuencias máximas; d) registro de señales en dirección x, y e z. Todas estas características mencionadas corresponden al procesamiento de datos del punto C.

Figura 117.

Toma de medidas en los puntos descritos



Nota. Izquierda: toma de datos correspondiente a la vibración de suelo en la plaza del complejo arqueológico de Chinchero; Derecha: toma de datos correspondiente al punto A, próxima a la fachada Este de la Torre de Chinchero.

CAPITULO VII

29. Análisis y Discusión de Resultados

29.1. Caracterización dinámica

Para lograr la caracterización dinámica de la Torre de Chinchero, se empleó acelerómetros y geófonos, los cuales permitieron medir el efecto de las vibraciones ambientales en la estructura a través del análisis modal operacional. Ambos equipos identificaron 7 modos de vibración definidos.

Tabla 43.

Resultados de la caracterización dinámica empleando acelerómetros uniaxiales

Modo	Método EFDD		Método SSI – UPCX		Forma Modal
	Frecuencia (Hz)	Amortiguamiento (%)	Frecuencia (Hz)	Amortiguamiento (%)	
1	3.070	1.562	3.079	1.701	Traslación YY
2	3.603	1.288	3.603	1.585	Traslación XX
3	5.039	0.479	5.086	1.194	Rotación 1er Orden
4	7.300	0.497	7.313	1.198	Abertura diagonal
5	9.701	0.632	9.571	3.739	Traslación de 2do orden YY
6	10.196	†	10.171	1.253	Abertura en el tope
7	10.574	†	10.572	4.81	Traslación de 2do orden XX

Tabla 44.

Resultados de la caracterización dinámica empleando geófono triaxial

Modo	Método EFDD		Método SSI – UPCX		Forma Modal
	Frecuencia (Hz)	Amortiguamiento (%)	Frecuencia (Hz)	Amortiguamiento (%)	
1	3.09	1.729	3.092	1.628	Traslación YY
2	3.6	1.757	3.594	1.661	Traslación XX
3	5.032	1.039	5.033	1.377	Rotación 1er Orden
4	7.378	0.973	7.331	1.577	Abertura diagonal
5	9.666	0.700	9.596	3.510	Traslación de 2do orden YY
6	10.089	0.837	10.115	1.076	Acoplamiento en el tope
7	10.669	0.525	10.477	3.321	Traslación de 2do orden XX

Tabla 45.*Variación de frecuencias medidas con acelerómetros y geófonos*

Modo	Método EFDD			Método SSI – UPCX		
	Frecuencia (Hz) Acelerómetros	Frecuencia (Hz) Geófonos	Variación (%)	Frecuencia (Hz) Acelerómetros	Frecuencia (Hz) Geófonos	Variación (%)
1	3.070	3.090	-0.651	3.079	3.092	-0.422
2	3.603	3.600	0.083	3.603	3.594	0.250
3	5.039	5.032	0.139	5.086	5.033	1.042
4	7.300	7.378	-1.068	7.313	7.331	-0.246
5	9.701	9.666	0.361	9.571	9.596	-0.261
6	10.196	10.089	1.049	10.171	10.115	0.551
7	10.574	10.669	-0.898	10.572	10.477	0.899

La **Tabla 43** y **Tabla 44**, nos muestran una alta correspondencia de las frecuencias experimentales obtenidas por los acelerómetros y los geófonos. Las frecuencias obtenidas por el método de identificación modal EFDD empleando acelerómetros y geófonos dan una variabilidad máxima de 1.068 %; por otro lado los resultados obtenidos por el método de identificación modal SSI - UPCX empleando acelerómetros y geófonos dan una variabilidad máxima de 1.042%.

El análisis modal operacional empleando acelerómetros y geófonos durante las campañas permitió la identificación de 7 formas modales: el modo uno corresponde a una traslación de primer orden en dirección Norte – Sur, el modo dos corresponde a una traslación de primer orden en dirección Este – Oeste, el modo tres corresponde a una torsión de 1er orden, el modo 4 a una abertura diagonal en el tope, el modo cinco corresponde a una traslación de segundo orden en dirección Norte – Sur, el modo seis corresponde a un acoplamiento de muros Norte – Sur; Este – Oeste con una flexión en cada dirección, y por último el modo siete corresponde a una traslación de segundo orden en la dirección Este – Oeste. Para contrastar las formas modales obtenidas se puede observar que guardan estrecha relación con las obtenidas en la torre de Santa Ana, Cuzco -

Perú (Montesinos et al., (2025)) y la Torre del reloj de Mogadouro. Portugal (L.F. Ramos et al., (2010)), ambos antecedentes descritos en el capítulo II, ítem 10; muestran gráficamente las formas modales similares a las obtenidas en este trabajo correspondiente a la torre de Chinchero.

29.2. Optimización del modelo numérico

Para el proceso de calibración del modelo numérico tomamos los valores de frecuencia y formas modales obtenidas por los acelerómetros esto porque los puntos tomados (7 puntos) fueron mayores a los tomados con los geófonos (3 puntos).

Tabla 46.

Correspondencia entre frecuencias y las formas modales antes del proceso de calibración

Modo	Frecuencia Numérica (Hz)	Frecuencia Experimental (Hz)	Error (%)	MAC	FMAC
1	3.940	3.079	27.964	0.98	0.60
2	4.083	3.605	13.271	0.97	0.75
3	6.507	5.086	27.943	0.90	0.55
4	9.184	7.313	25.588	0.95	0.60
5	12.889	9.571	34.668	0.84	0.46
6	12.789	10.172	25.730	0.28	0.17
7	13.405	10.572	26.794	0.72	0.45

Tabla 47.

Correspondencia entre frecuencias y las formas modales despues del proceso de calibración

Modo	Frecuencia Numérica (Hz)	Frecuencia Experimental (Hz)	Error (%)	MAC	FMAC
1	3.082	3.079	0.100	0.98	0.98
2	3.193	3.605	11.415	0.97	0.76
3	5.101	5.086	0.294	0.90	0.90
4	7.275	7.313	0.514	0.94	0.93
5	10.011	9.571	4.599	0.93	0.85
6	10.211	10.172	0.379	0.45	0.45
7	10.502	10.572	0.663	0.70	0.69

Se puede notar que la variabilidad entre las frecuencias experimentales con las numéricas no excede el 5% a excepción del segundo modo el cual tiene una variabilidad superior al 5% (11.415%), este valor podría optimizarse con estudios sobre la interacción suelo estructura y estudios de propiedades de interfaz entre elementos tal es el caso de las interfaces adobe – piedra, piedra – piedra y adobe – adobe. Adicionalmente estudios de daños podrían ayudar a identificar zonas discontinuas que estén vibrando a una frecuencia diferente. Con el análisis de sensibilidad se optimizaron el módulo de elasticidad de la albañilería de adobe y el módulo de la albañilería de piedra por ser los parámetros que más influyen en el comportamiento de la torre de Chinchero. La **Tabla 46** nos muestra las métricas iniciales de MAC y FMAC antes del proceso de calibración, mientras que la **Tabla 47** muestra las métricas finales de MAC y FMAC después del proceso de calibración.

Es necesario considerar la importancia de los parámetros dinámicos obtenidos de la torre, tomando en cuenta que los primeros modos y frecuencias nos orientan como deberíamos plantear un sistema de refuerzo; por ejemplo: los dos primeros modos son perpendiculares entre sí, en este sentido sería conveniente analizar con estos datos obtenidos como estabilizar la torre en esas direcciones para que en eventos futuros sufran daños mínimos aceptables.

30. Conclusiones

El análisis modal operacional permitió determinar las propiedades dinámicas de la torre exenta de la iglesia Nuestra Señora de la Natividad de Chinchero. Los modos de vibración obtenidos mediante las campañas de medición muestran el comportamiento típico de este tipo de torres y se puede contrastar con los estudios similares descritas en el capítulo II, ítem 10 (antecedente de la investigación). La frecuencia fundamental obtenida fue de 3.082 Hz, la segunda 3.193 Hz, la tercera 5.101 Hz, la cuarta 7.275 Hz, la quinta 10.011 Hz, la sexta 10.211 Hz y la

séptima frecuencia identificada 10.502 Hz. Los valores de amortiguamiento y formas modales se muestran en la **Tabla 43** y **Tabla 44**, obtenidos por distintos sensores (velocímetros y acelerómetros).

La técnica de levantamiento denominado lasergrametría aplicada en este trabajo logro la generación del modelo digital de carácter estático y permitió un levantamiento geométrico preciso ya que se adquirieron datos de la zona interna y las zonas elevadas de la construcción histórica.

A pesar de la limitada cantidad de sensores empleados se pudo identificar hasta 7 modos bien definidos. Se evidenciaron movimientos de traslación (2), rotación (1), aberturas (2) y traslación de segundo orden (2).

Finalmente, en el análisis de sensibilidad se identificaron las propiedades con mayor influencia en el comportamiento de la estructura. Con estas, se realizó un proceso de calibración y se obtuvo que los resultados analíticos presentaron una buena correlación con los resultados experimentales ya que la diferencia de frecuencias no supera 5% (excepto para el modo 2) y los valores FMAC van de 0.98 para los primeros modos hasta 0.45 para los modos superiores (modo 6). Se observó que disminuyó el valor del FMAC en el segundo modo de vibración; sin embargo, este resultado puede ser más preciso con una inspección más invasiva para ver zonas con daño y en consecuencia optimizar más el ajuste de calibración.

31. Recomendaciones

Levantamiento geométrico

Para el levantamiento geométrico por cualquier método se recomienda realizarlo en horarios de baja o nula concurrencia en estructuras patrimoniales y más aún en zonas donde la concurrencia debido al turismo es elevada, esto para un levantamiento y obtención de nube de puntos limpia.

Si existiese zonas con poca iluminación natural o artificial, se recomienda el uso de reflectores, en nuestro caso no fue necesario, sin embargo se pudo ver que esto puede dilatar el tiempo de levantamiento geométrico con scanner láser.

Cuando se coloquen los sensores adosados en los muros estos deberán direccionarse perpendicularmente a la superficie, esto permitirá la correcta obtención de los modos de vibración a través del software Artemis Modal Pro.

Tomar en cuenta los puntos de control geodésicos, esto a fin de dar la correcta orientación y ubicación a los escaneos a realizar.

Antes de realizar el levantamiento por scanner laser, es necesario realizar una limpieza de toda la estructura (mobiliario o desechos), como ejemplo: el entrepiso, entrada y parte de las gradas de la torre de Chinchero estaba repleto de desechos de palomas, por ello antes de todo se realizó la limpieza total de la torre.

Ensayos de vibración ambiental

Se debe considerar el empleo de más sensores con alta sensibilidad para poder identificar modos más complejos como las de torsión. Además el empleo de más sensores permitiría identificar zonas desacopladas o fisuradas.

Se recomienda una instalación limpia de los cables, es decir no mezclar uno sobre otro durante el tendido de estos. Esto para evitar las interferencias eléctricas.

Si se quiere instalar dos sensores cercanos a un mismo nivel (por ejemplo en una esquina) evitar demasiada cercanía entre estos, se recomienda y así se hizo en este trabajo, una distancia de 0.15m desde el muro paralelo al sentido de medición.

Tomar en cuenta que al momento de iniciar con las lecturas de vibraciones a través del software Artemis Modal Pro y el sistema DAQ, desconectar la fuente de alimentación, esto a fin de evitar variaciones de voltaje que alteren las lecturas.

Revisar el estado de las baterías del equipo, los ajustes de los cables de entrada y salida para el DAQ y para los sensores, deberán estar conectados correctamente.

En puntos de altura usar anclajes para los cables, así evitar que el sensor caiga debido al viento o fenómeno no controlable (presencia de palomas en techo) que ocasionarían el desprendimiento del sensor y su posible daño.

Calibración del modelo numérico

Se recomienda la aplicación de ensayos no destructivos para caracterizar los materiales estructurales de la torre.

También, se recomienda incluir en el modelo numérico la interacción suelo-estructura para brindar un comportamiento más representativo. Se pueden realizar ensayos geofísicos no destructivos como el Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW, por sus siglas en inglés Multichannel Analysis of Surface Waves), para realizar una caracterización geológica, geotécnica y geomecánica alrededor de la torre. Con ello, se pueden definir las propiedades de rigidez cortante y normal en la interacción del suelo con la base de la torre.

Con respecto al análisis numérico, se recomienda realizar un análisis límite y un análisis estático no lineal (pushover) para identificar los posibles mecanismos de falla y determinar la capacidad máxima de la estructura.

Se recomienda implementar un proceso de calibración automático, cuando se piense realizar este tipo de trabajos considerando más estructuras similares, clasificadas por tipología o material, donde los parámetros a considerar sean demasiados.

Bibliografía

- Ademi, A. (2020). *Finite element model updating of a stone masonry tower using 3D laser scanner and accelerometers*. Oslo: Oslo Metropolitan University.
- Alcina Franch, J. (1976). *Arqueología de Chinchero. 1: La Arquitectura*. Madrid.
- Alferez Vargas, V. J., & Bravo Fuentes, J. C. (2024). *Ensayos de vibración ambiental en la torre exenta de la iglesia Santiago Apostol de Kuñotambo*. Cusco: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
- Allemang, R. (2003). The Modal Assurance Criterion (MAC): Twenty Years of Use and Abuse. *Sound and Vibration*, 37(8), 14-21.
- A-MAQ S.A. (2005). *Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico*. Medellín, Colombia.
- Arca arte colonial*. (n.d.). Retrieved from Arca arte colonial: <https://arcav1.uniandes.edu.co/>
- Arca colonial*. (2025). Retrieved from <https://arcav1.uniandes.edu.co/artworks/1575>
- Ballesteros Gaibrois, M. (1971). *Sencilla historia de Chinchero*. 16.
- Banda Roque, E. H., & Conya Ascue, W. (2024). *DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE VIBRACIÓN Y CALIBRACIÓN DE MODELO NUMÉRICO DEL*. Cusco: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
- Brincker, R., & Ventura, C. (2015). *Introduction to OPERATIONAL MODAL ANALYSIS*. United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd.
- Buildings, M. (n.d.). *My Digital Buildings*. Retrieved from My Digital Buildings: <https://www.mydigitalbuildings.com/es>
- Caetano, E. (2000). *Dynamics of Cable - stayed Bridges: Experimental Assessment of Cable - Structure Interaction*. Portugal: PhD Thesis, Engineering Faculty of University of Porto.
- Can Altunışık, A., Yesevi Okur, F., Fuat Genç, A., Günaydin, M., & Adanur, S. (2018). Automated Model Updating of Historical Masonry Structures Based on Ambient Vibration Measurements. *Journal of Performance of Constructed Facilities*.
- Cancino, C., Lardinois, S., D'ayala, D., Ferreira, C., Dávila Torrealva, D., Meléndez, E., & Santamato, L. (2012). *Proyecto de Estabilización Sismorresistente: Estudio de edificaciones tipológicas*. Los Angeles 2012: THE GETTY CONSERVATION INSTITUTE.

- Chavesta Custodio, J. C., Acevedo Mallque, M., & Cano Delgado, M. (2012). *Estudio anatómico e identificación de especies forestales. Evaluación estructural y especificaciones técnicas de las maderas de la catedral de Ica*. Lima.
- Chopra, A. K. (2012). *DYNAMICS OF STRUCTURES Theory and Applications to Earthquake Engineering*. California: PRENTICE HALL.
- Clough, R. W. (1960, Septiembre 8-9). The Finite Element Method in Plane Stress Analysis. *the 2nd ASCE Conference on Electronic Computation*, 345–378.
- Clough, R. W., & Penzien, J. (1995). *Dynamics of structures*. Berkeley: Computers & Structures, Inc.
- Clough, R., & Penzien, J. (2003). *DYNAMICS OF STRUCTURES*. Berkeley, CA 94704: Computers & Structures, Inc.
- Combey, A., & Mercerat, D. (2024). Continuous seismic monitoring of a colonial church in Cusco, Peru: unveiling remarkable soil-structure interaction and nonlinear dynamics. *International Journal of Architectural Heritage* (10.1080/15583058.2025.2518431).
- Croce, P., Beconcini, M. L., Formichi, P., Cioni, P., Landi, F., Mochi, C., . . . Serra, I. (2018). Shear modulus of masonry walls: a critical review. *XIV International Conference on Building Pathology and Constructions Repair – CINPAR*, 339–346.
- Da Silva Ramos, J. F. (2007). *Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures*. Minho, Portugal.
- DIANA. (n.d.). Retrieved from DIANA FEA Web site: <https://dianafea.com/>
- ENSAYO NAKAMURA Servicio de Ingeniería Civil Ingeniería Geotécnica. (2026). Retrieved from <https://ensayonakamura.cl/metodologia.html>
- Ferraioli, M., Miccoli, L., & Abruzzese, D. (2018). Dynamic characterisation of a historic bell-tower using a sensitivity-based technique for model tuning . *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 253-269.
- Flores Cardenas, F. M., & Puccar Choque, L. A. (2017). *Analisis de vulnerabilidad sísmica del templo colonial del templo colonial del distrito de Chinchero, provincia de Urubamba*.
- Geocatmin. (n.d.). Retrieved from Geocatmin: <https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/main>
- George Squier, E. (1877). *Perú incidents of travel and exploration in the land of the incas*.
- Gobierno de España, M. d. (n.d.). *PARES PORTAL DE Archivos Españoles*. Retrieved from PARES PORTAL DE Archivos Españoles: <https://pares.cultura.gob.es/inicio.html>

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. (2014). *Metodología de la Investigación*. México: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.

<https://conceptosclaros.com/>. (n.d.). Retrieved from Conceptos Claros Web site:
<https://conceptosclaros.com/>

<https://www.ni.com/es.html>. (2024). *Acerca de nosotros: National Instrument*. Retrieved from National Instrument Web site: <https://www.ni.com/es.html>

<https://www.svibs.com/>. (n.d.). Retrieved from Structural Vibration Solutions A/S Web site:
<https://www.svibs.com/>

Instituto Geofísico del Perú. (2024). Retrieved from <https://ultimosismo.igp.gob.pe/mapas-sismicos>

Irene , & Roger. (n.d.). *De mayor quiero ser MOCHILERA*. Retrieved from
<https://demayorquierosermochilera.com/>

Jimin, H., & Zhi-Fang, F. (2001). *Modal Analysis*. Great Britain: Butterworth Heinemann.

Kassimali, A. (2015). *Análisis estructural*.

Krishnavedala. (2011, May 26). *Wikimedia Commons*. Retrieved from Wikimedia Commons:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Second_order_transfer_function.svg

L.F. Ramos, L. Marques, P.B. Lourenco, G. De Roeck, A. Campos-Costa, & J. Roque. (2010). Monitoring historical masonry structures with operational modal analysis: Two case studies. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1291-1305.

Lourenço, P., Trujillo, A., Mendes, N., & Ramos, L. (2012). Seismic performance of the St. George of the Latins church:. *Engineering Structures*, 501-518.

LUNITEK. (2026). *LUNITEK*. Retrieved from LUNITEK Web site: <https://lunitek.com/seismic-and-structural-monitoring/digital-seismic-sensors/sentinel-geo-mkii/>

Lynch, J. P., Law, K. H., Kiremidjian, A. S., Kenny, T., & Carryer, E. (2002). A Wireless Modular Monitoring System For Civil Structures. *Proceedings of IMAC XX, the 20th International Modal Analysis Conference*. Los Angeles.

Lzyvzl, & Jahobr. (2011, Julio 16). *Wikipedia*. Retrieved from Wikipedia:
https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Beam_mode_6_cropped.gif

MathWorks. (2026). *MathWorks*. Retrieved from MathWorks Web site:
<https://la.mathworks.com/discovery/fft.html>

Meli, R. (1998). *Ingeniería estructural de los edificios históricos*.

- Mendes Maia, N. M., & Montalvão e Silva, J. M. (1997). *Theoretical and Experimental Modal Analysis*. Taunton, Somerset, England: RESEARCH STUDIES PRESS LTD.
- MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI, M. (2009, Febbraio 2). Nuove norme tecniche per le costruzioni. Roma, Italia.
- Montesinos, M., Mercerat, D., Rojas, J., Alferez, V., & Combey, A. (2025). *Seismic Analysis of an Earthen Free-standing Bell Tower in the Historical Center of Cusco (Peru): ambient vibration testing , model calibration and seismic capacity assessment*. Cusco.
- My Digital Buildings. (n.d.). Retrieved from My Digital Buildings:
<https://www.mydigitalbuildings.com/es/glosario/lasergrametria>
- Nair, S. (2015). *At home with the Sapa Inca : architecture, space, and legacy at Chinchero* (Primera ed.). United States of America.
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremors on the ground surface. *Quarterly Report of Railway Technical Research* , 25-33.
- National Instruments. (2026). Retrieved Marzo 6, 2026, from Adquisición de datos (DAQ):
<https://www.ni.com/es.html>
- Norabuena, E., Leffler-Griffin, L., Mao, A., Dixon, T., Stein, S., Sacks, I., . . . Ellis, M. (1998). *Space Geodetic Observations of Nazca-South America Convergence Across the Central Andes* (Vol. 279). Science. doi:10.1126/science.279.5349.358
- Pachón García, P. (2016). *EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE EDIFICACIONES HISTÓRICAS MEDIANTE ANÁLISIS MODAL OPERACIONAL (OMA)*. *Structural assessment of historical buildings by using the Operational Modal Analysis (OMA) technique*. España.
- Paz, M., & Hoon Kim, Y. (2018). *Structural Dynamics Structural Dynamics*. Louisville: Springer.
- PCB Piezotronics, Inc. (n.d.). Retrieved from PCB Piezotronics, Inc Web Site:
<https://www.pcb.com/>
- Peralta, J. A., Reyes López, P., & Godínez Muñoz , A. (2009). *El fenómeno de la resonancia*. México D.F.: Departamento de Física, Escuela Superior de Física y Matemáticas Instituto Politécnico .
- Rainieri, C., & Fabbrocino, G. (2014). *Operational Modal Analysis of Civil Engineering Structures*. Termoli, Italy: Springer Science+Business Media.
- Ramírez Oyanguren, P., & Alejano Monge, L. (2004). *Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes*. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de la Universidad Politécnica de Madrid .

- RESHETYUK, Y. (2009). *Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning*. Royal Institute of Technology (KTH).
- RNE-NORMA E.010, M. d. (2020). *Norma E.010 - Madera*. Lima: Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción – SENCICO.
- RNE-NORMA E.020, M. d. (2022). *Norma E.020 - Cargas*. Lima: Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción – SENCICO.
- Rosales Climent, C. I. (2001). *SOBRE EL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE LOS DEPÓSITOS DE SUELOS DEL ÁREA DE CAÑAVERALEJO, CALI, COLOMBIA*. Cali: UNIVERSIDAD DEL VALLE FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA.
- Sarah, F. (2020). *Dynamic characterisation of the bell tower of Sant Cugat Monastery*. España: Universitat Politècnica de Catalunya and University of Minho.
- SENSING. (2019). *SENSING, S.L.* Retrieved from SENSING Sensores de medida: <https://sensores-de-medida.es/>
- Shabani, A., Feyzabadi, M., & Mahdi, K. (2022). Model updating of a masonry tower based on operational modal analysis: The role of soil-structure interaction. *Case Studies in Construction Materials*.
- Sovero, K., & Martel, C. (2014). *ANEXO Herramienta para el proceso de calibración de modelos numéricos*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Standoli, G., Giordano, E., Milani, G., & Clementi, F. (2021). *Model Updating of Historical Belfries Based on OMA Identification Techniques*. Milan: International Journal of Architectural Heritage Conservation, Analysis, and Restoration.
- Wilson, E. L. (2000). *Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures A Physical Approach With Emphasis on Earthquake Engineering*. California: Computers and Structures, Inc.
- Zanotti, S. (2015). *Seismic Analysis of the Church of Kuño Tambo (Peru)*. Minho, Portugal: Advanced Masters in Structural Analysis of Monuments and Historical Constructions.

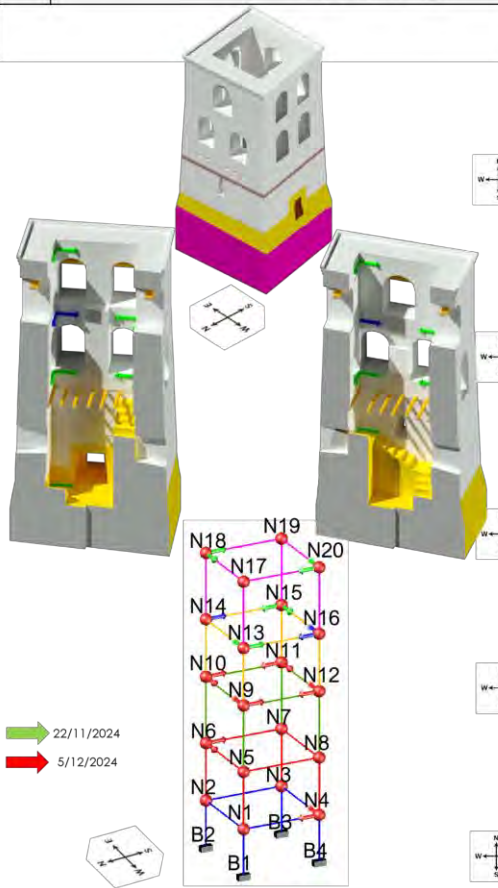
ANEXOS

A). Matriz de consistencia

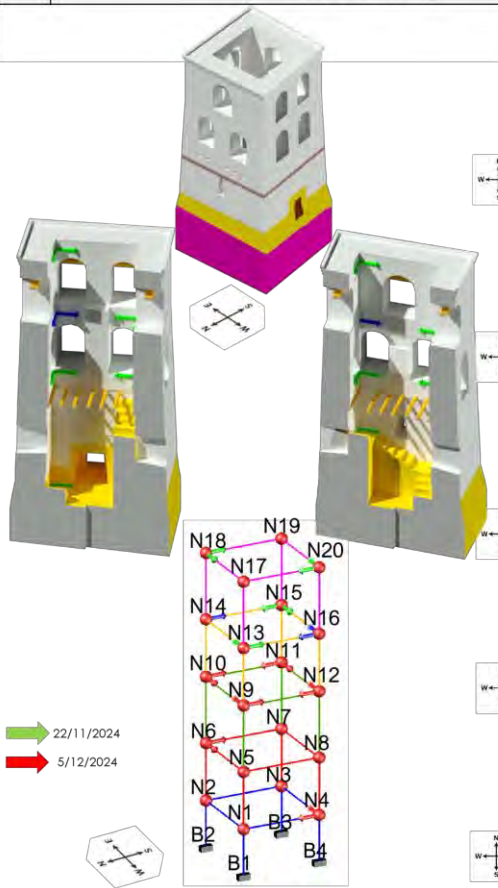
NIVEL	PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA/UNIDAD	INSTRUMENTOS
GENERAL	PG: ¿Cuáles son las propiedades dinámicas de la Torre Exenta de la Iglesia Nuestra Señora de la Natividad de Chinchero, obtenidas mediante la caracterización dinámica empleando análisis modal operacional (OMA)?	OG: Determinar las propiedades dinámicas (frecuencia, modo de vibración y amortiguamiento) de la torre histórica de albañilería mixta (adobe y piedra) de la iglesia Nuestra Señora de la Natividad de Chinchero, mediante el empleo del Análisis Modal Operacional (OMA) y los Ensayos de Vibración Ambiental (AVT).	HG: Los parámetros modales (propiedades dinámicas) obtenidos mediante la caracterización dinámica de estructuras empleando análisis modal operacional (OMA), serán confiables y estarán dentro de los parámetros lógicos para este tipo de estructura.	INDEPENDIENTE X: Excitación Dinámica Ambiental.	Respuesta en Aceleración Ambiental	Nivel de aceleración ambiental	m/s ² o g	Acelerómetros de alta sensibilidad
						Espectro de amplitud de vibración	Razón	Sistema de adquisición de datos
					Procesamiento de Señales Dinámicas	Densidad Espectral de Potencia (PSD)	Razón	ARTEMIS Modal PRO
						Métodos de identificación modal (FDD/SSI)	m/s ² /√(Hz) (Adimensional)	
ESPECÍFICOS	PE1: ¿Cuál es el procedimiento a seguir para la generación del modelo 3D que replique el comportamiento real de la torre de Chinchero?	OE1: a.Crear el modelo geométrico de la torre con ayuda de la nube de puntos generados por la aplicación de escáneres láser 3D y fotogrametría aérea.	HE1: a.Los modelos numéricos de las estructuras a estudiar serán determinantes para conocer el comportamiento estructural teórico y mostrarán los puntos de mayor incidencia dinámica, los cuales servirán para ser seleccionados como zonas de monitoreo prioritarias.	DEPENDIENTE Y: Propiedades Dinámicas de Vibración.	Frecuencias naturales	Frecuencias de f_r resonancia	Hz	ARTEMIS Modal PRO
	PE2: ¿Cómo se desarrollará la campaña experimental en campo para obtener las propiedades dinámicas de la torre de Chinchero?	OE2: b.Ejecutar los ensayos de vibración ambiental, procesamiento de datos y obtención de resultados.	HE2: La ejecución de los ensayos de vibraciones ambientales, procesamiento de datos y obtención de los resultados cumplirá los requerimientos necesarios para el Análisis Modal Operacional aplicado al caso de investigación propuesto.		Factores de amortiguación	Ratio de amortiguamiento crítico	Porcentaje (%)	ARTEMIS Modal PRO
	PE3: ¿Cuáles son los criterios de optimización y métricas de correlación necesarios para la calibración del modelo numérico de la torre de Chinchero?	OE3: Calibrar los modelos numéricos utilizando el criterio MAC (Criterio de Exactitud Modal).	HE3: Los resultados logrados mediante la actualización de los modelos numéricos cumplirán con el Criterio de Exactitud Modal (MAC).		Formas modales	Modos de vibración (flexionales, torsionales y axiales)	Vectores modales	ARTEMIS Modal PRO Excel

Nota: Elaboración propia.

B). Protocolo de ensayo

 UNIVERSIDAD DE CUSCO INGENIERÍA CIVIL		PROTOCOLO DE ENSAYO Ensayos de Modales Operacionales		CÓDIGO VAT-02							
DATOS GENERALES											
Proyecto:	Torre de Chincheros					N° Registro:					
Cliente o Testista:	Vladimir Jerson Alferez Vargas					1					
Supervisión:	Ing. Mijail Montesinos Escobar					Fecha: 22/11/2024					
Ejecutor:	Jose Carlos Bravo Fuentes					5/12/2024					
Elementos:	Mediciones realizadas en la torre exenta.										
Ubicación:	Distrito: Chinchero Provincia: Urubamba Departamento: Cusco UTM WGS84 18L-S E: 819792.79 N: 8517731.34 Z: 3756.79001										
INSPECCIÓN EN CAMPO							Sensores				
Leyenda: ☒ Observado ☒ Conforme ☐ No aplica							PCB 393B05				
Item 01	Inspección Visual Antes del Ensayo			Item 02	Selección de los Parametros a Evaluar						
01	Se puede acceder a todos los grados de libertad que se desea medir	SI	☒	No	01	Determinación de Propiedades Dinámicas	SI	☒	No	SN 38626	☒
02	Existe Conexión de Energía	SI	☒	No	02	Control de Vibraciones	SI	☒	No	SN 83498	☒
03	Existe Puntos Seguridad para Sensores	SI	☒	No	03	Resonancia	SI	☒	No		
Item 03	Configuración de Ensayo			Item 04	Ejecución de Ensayo			Wilcoxon 731-207			
01	Frecuencia de Muestreo	1024	Hz	01	Cantidad de Sensores Disponibles	N°	6	SN 6108	☒		
02	Duración de Ensayo	900/Setup	Seg	02	Cantidad de Sensores Referencia	N°	3	SN 6112	☒		
03	Numero de grados de Libertad	23		03	Cantidad de Sensores Utilizados	N°	5	SN 6457	☒		
04	Numero de Setups	10		04	Verificar conexiones entre Cables	SI	☒	No			
Item 05	Descripción de Ensayo Analisis Modal Operacional			Nodo		N° Sensor		Dirección			
				N°							
				+X		-X		+Y		-Y	
				+Z		-Z					
				N14		SN 6108					
				N16		SN 6112		☒			
				N16		SN 6457				☒	
				N4		SN 38626		☒			
				N4		SN 83498				☒	
				N6		SN 38626		☒			
				N6		SN 83498				☒	
				N9		SN 38626		☒			
				N9		SN 83498				☒	
				N10		SN 38626		☒			
				N10		SN 83498				☒	
				N11		SN 38626		☒			
				N11		SN 83498				☒	
				N12		SN 38626		☒			
				N12		SN 83498				☒	
				N13		SN 38626		☒			
				N13		SN 83498				☒	
				N15		SN 38626		☒			
				N15		SN 83498				☒	
				N18		SN 38626		☒			
				N18		SN 83498				☒	
				N20		SN 38626		☒			
				N20		SN 83498				☒	

 22/11/2024
 5/12/2024

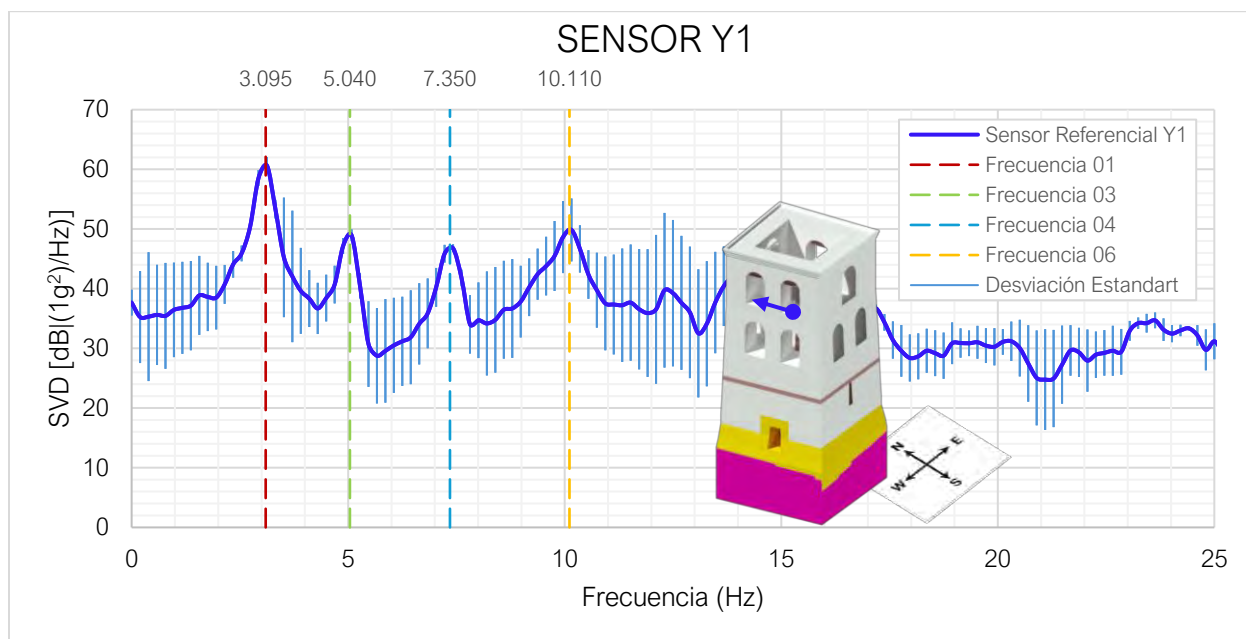


Observaciones: La presente campaña se ejecuto en dos fechas distintas las cuales se especificaron anteriormente y se pueden diferenciar por el color de las flechas. El primer día se realizaron 4 setups y en la segunda fecha se completaron los 6 setups restantes, en total se tomaron 10 setups. Las condiciones climáticas durante el día fueron óptimas, sin embargo por la tarde el viento tiene una intensidad muy elevada, otro aspecto a tomar en cuenta es la presencia de palomas que anidan en el techo de la torre (parte interior, muros superiores).

C). Diagramas SVD de acelerómetros para cada configuración

Figura B. 1

SVD de sensor de referencia en dirección NORTE – Setup 01. Campaña 03

**Figura B. 2**

Sensor de referencia en dirección ESTE – Setup 01. Campaña 03

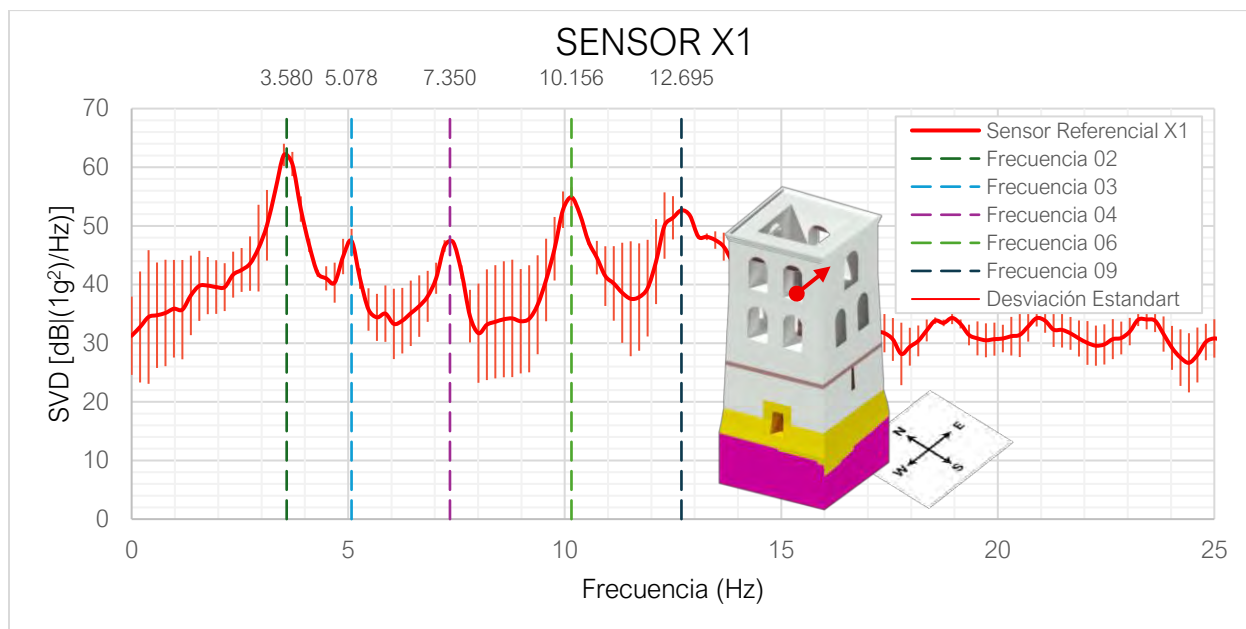


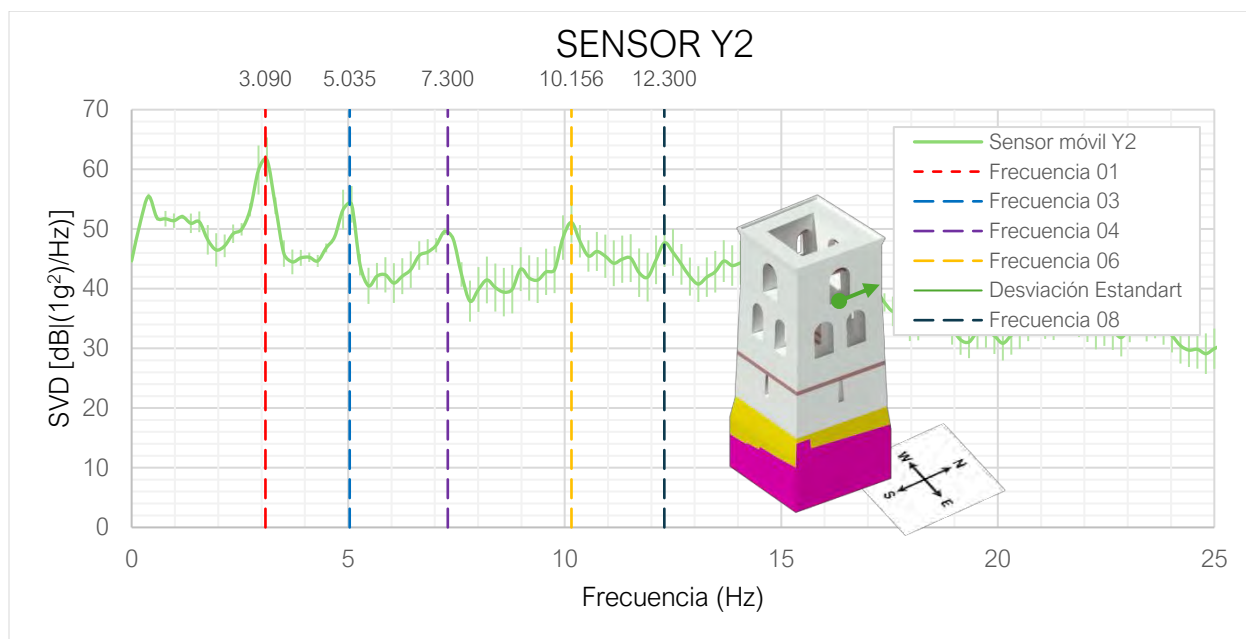
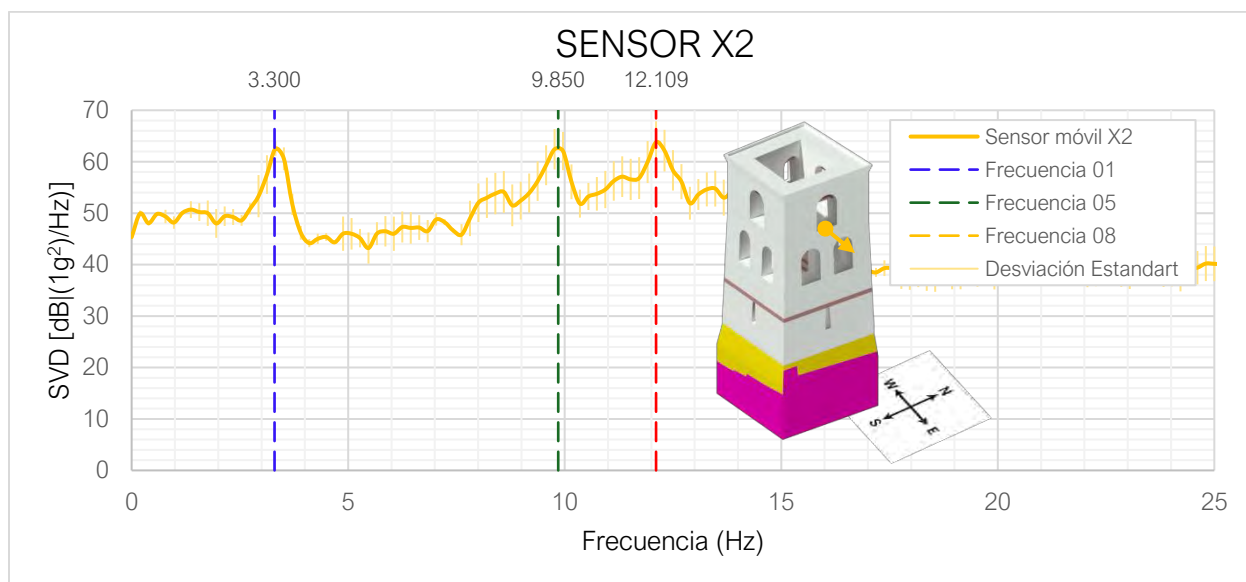
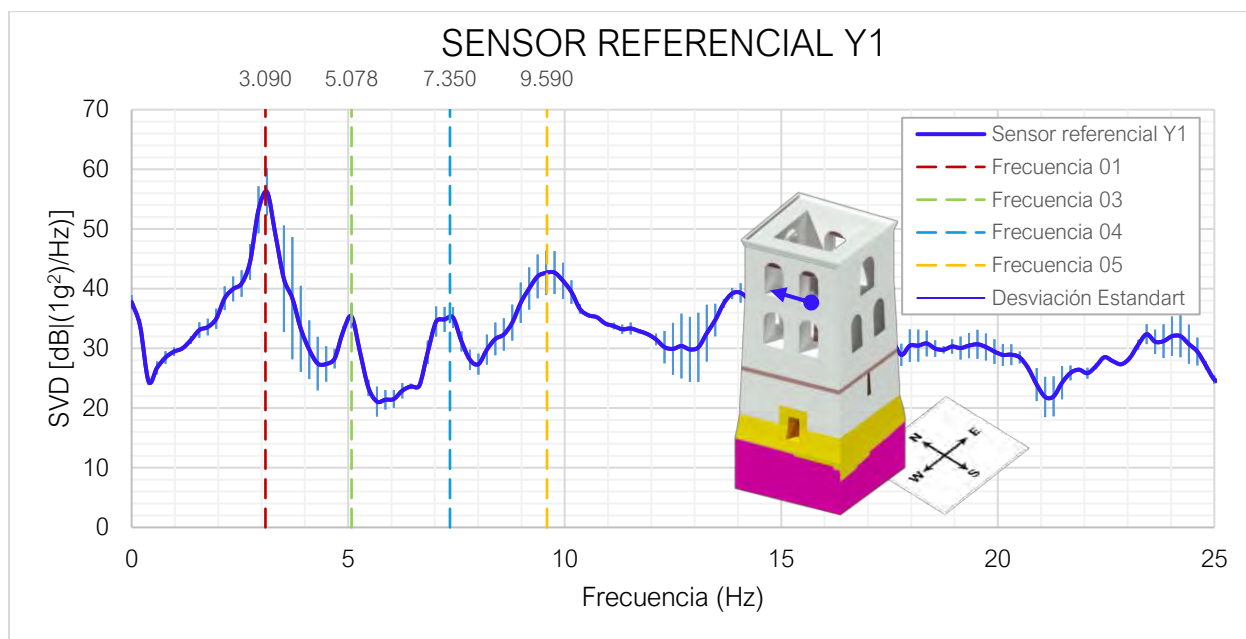
Figura B. 3*Sensor móvil en dirección NORTE – Setup 01. Campaña 03***Figura B. 4***Sensor móvil en dirección ESTE – Setup 01. Campaña 03*

Figura B. 5

SVD de sensor de referencia en dirección NORTE – Setup 02. Campaña 03

**Figura B. 6**

SVD de sensor de referencia en dirección ESTE – Setup 02. Campaña 03

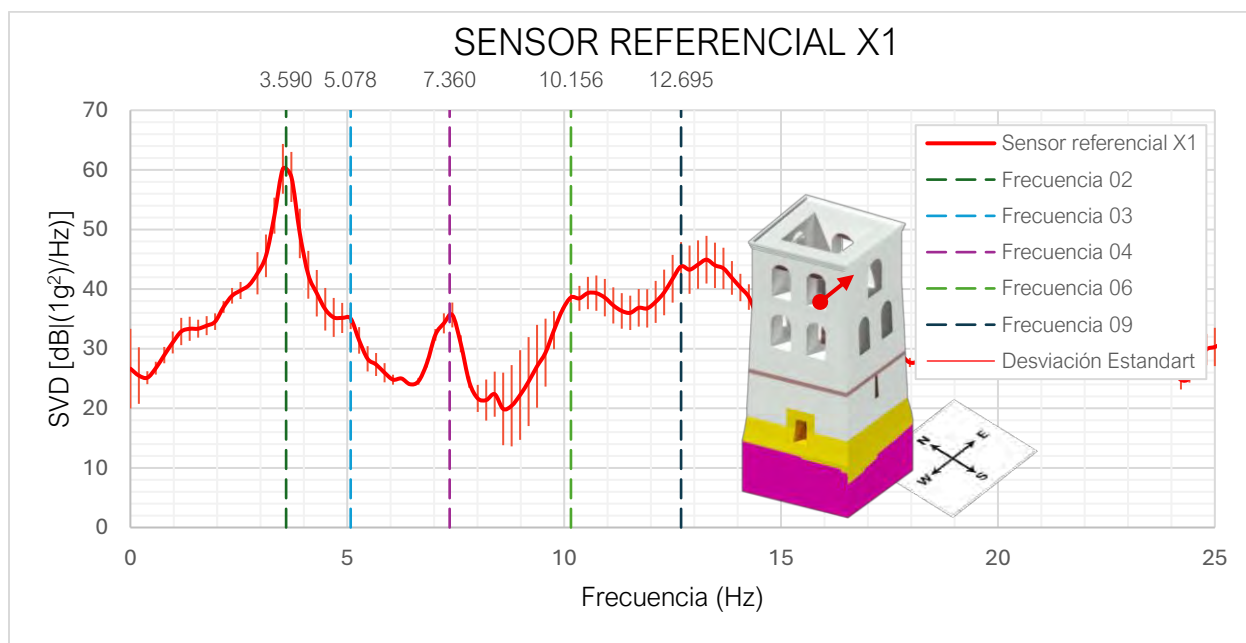


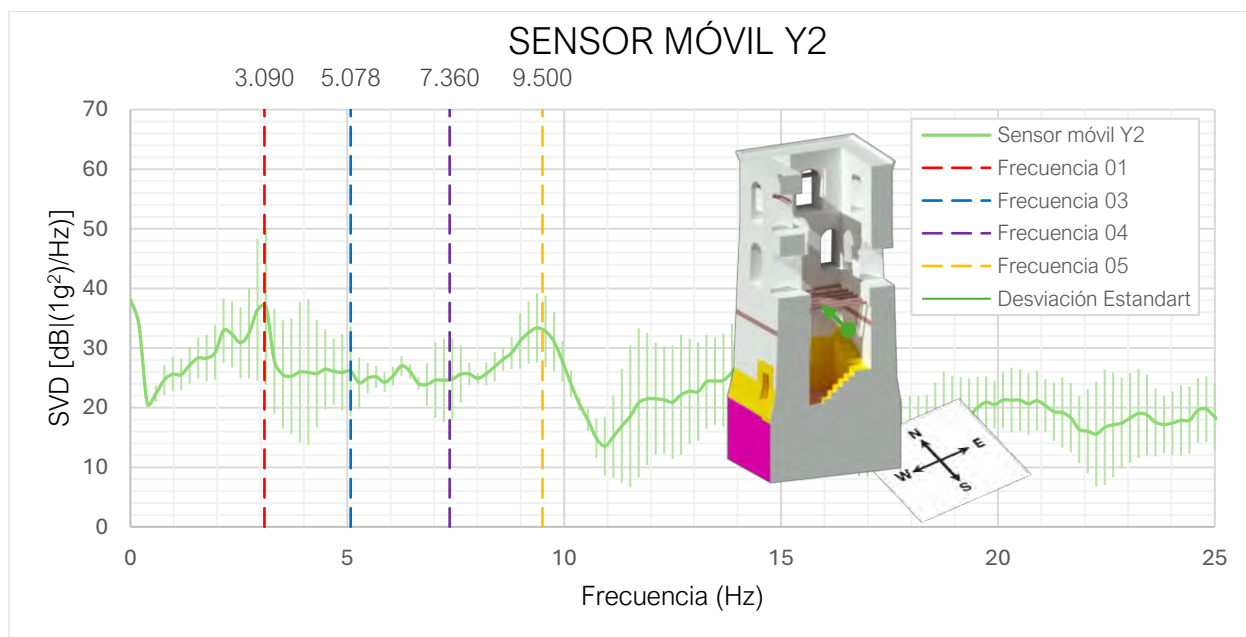
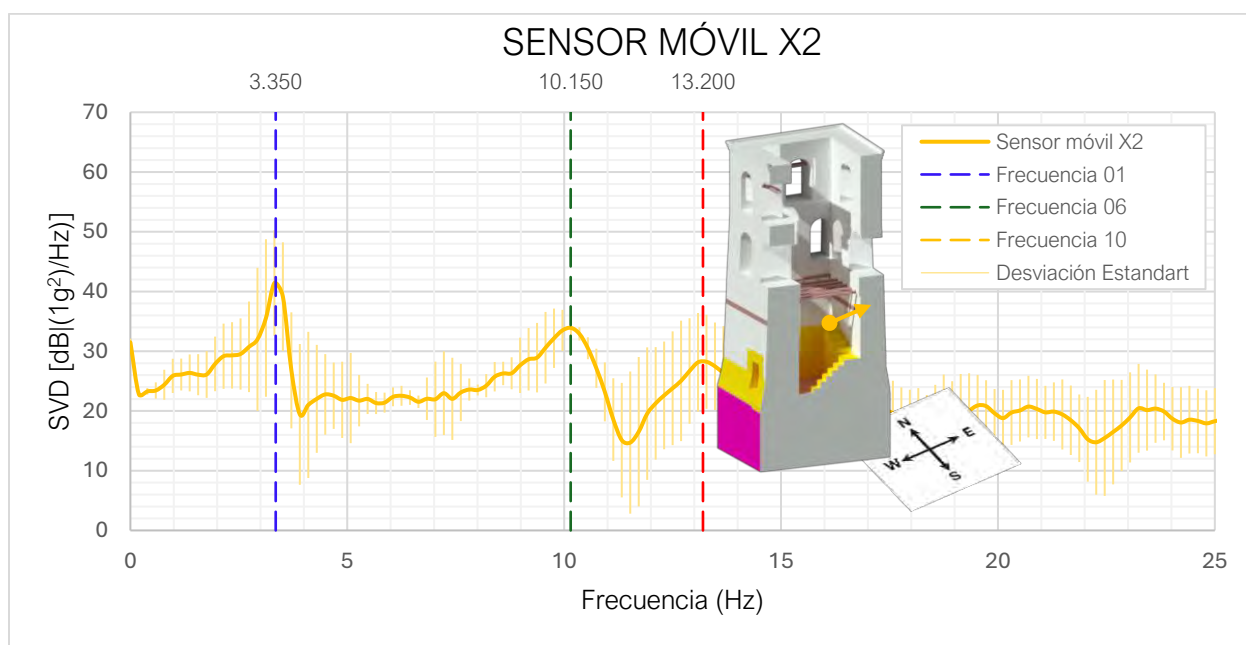
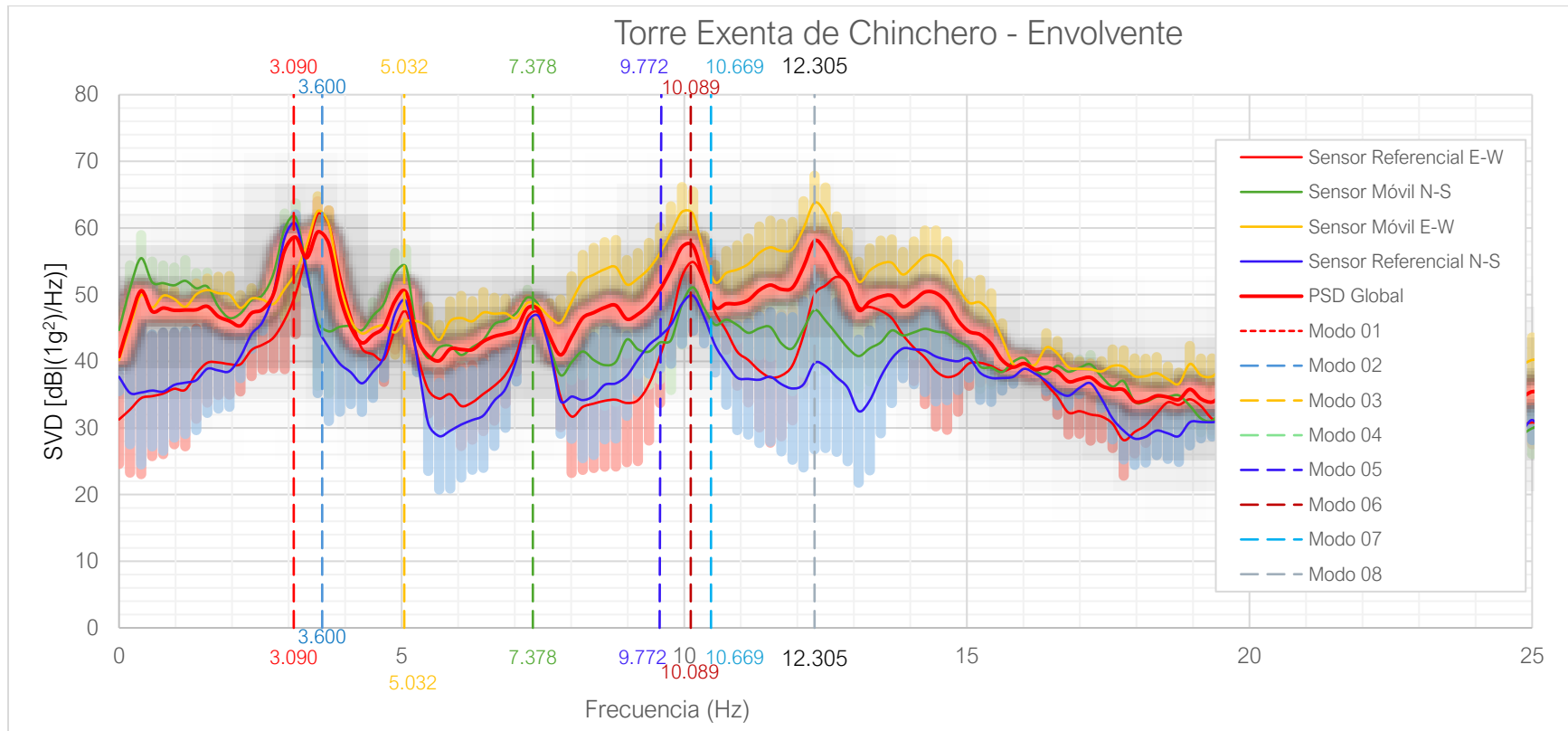
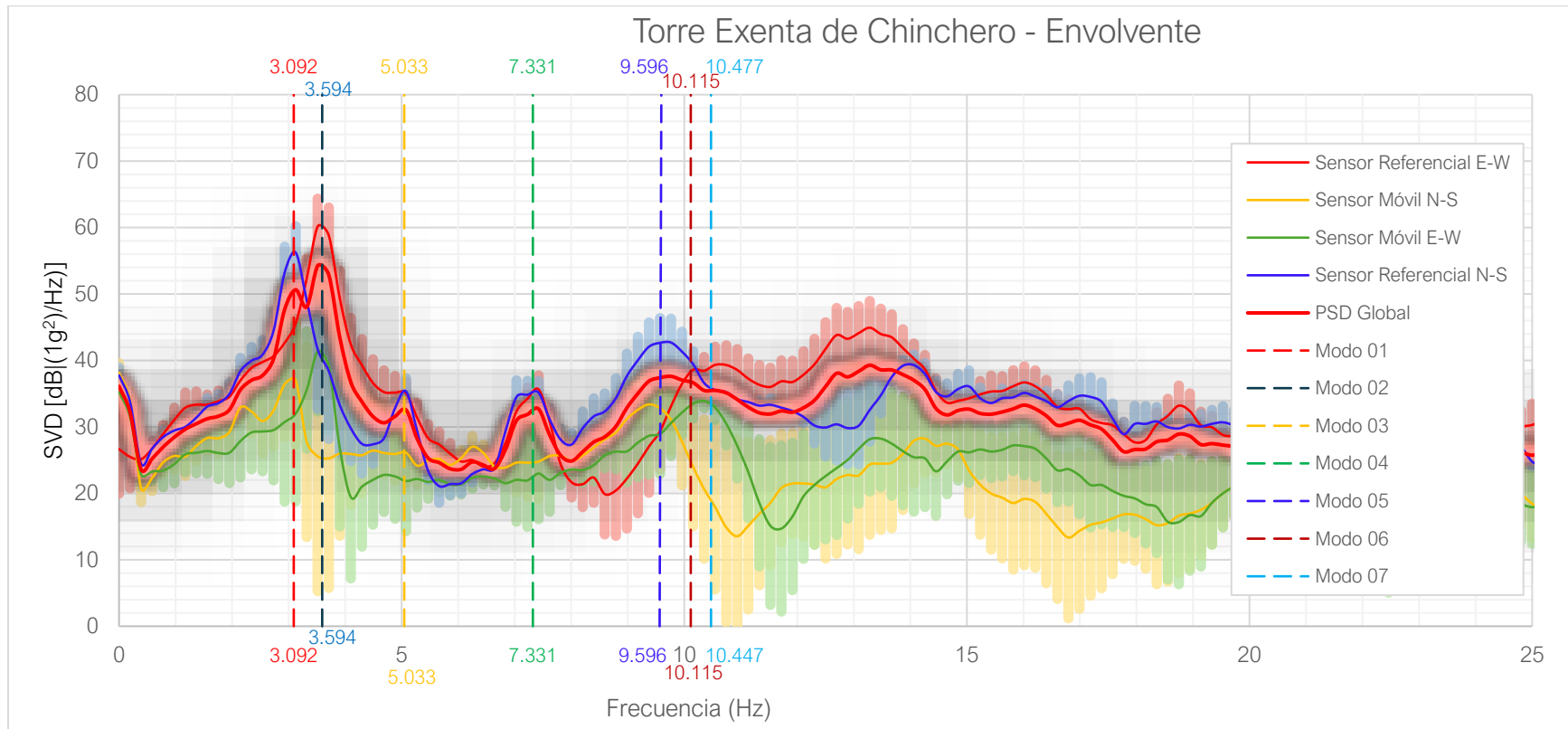
Figura B. 7*Sensor móvil en dirección NORTE – Setup 02. Campaña 03***Figura B. 8***Sensor móvil en dirección ESTE – Setup 02. Campaña 03*

Figura B. 9*Envolvente Setup 01. Campaña 03*

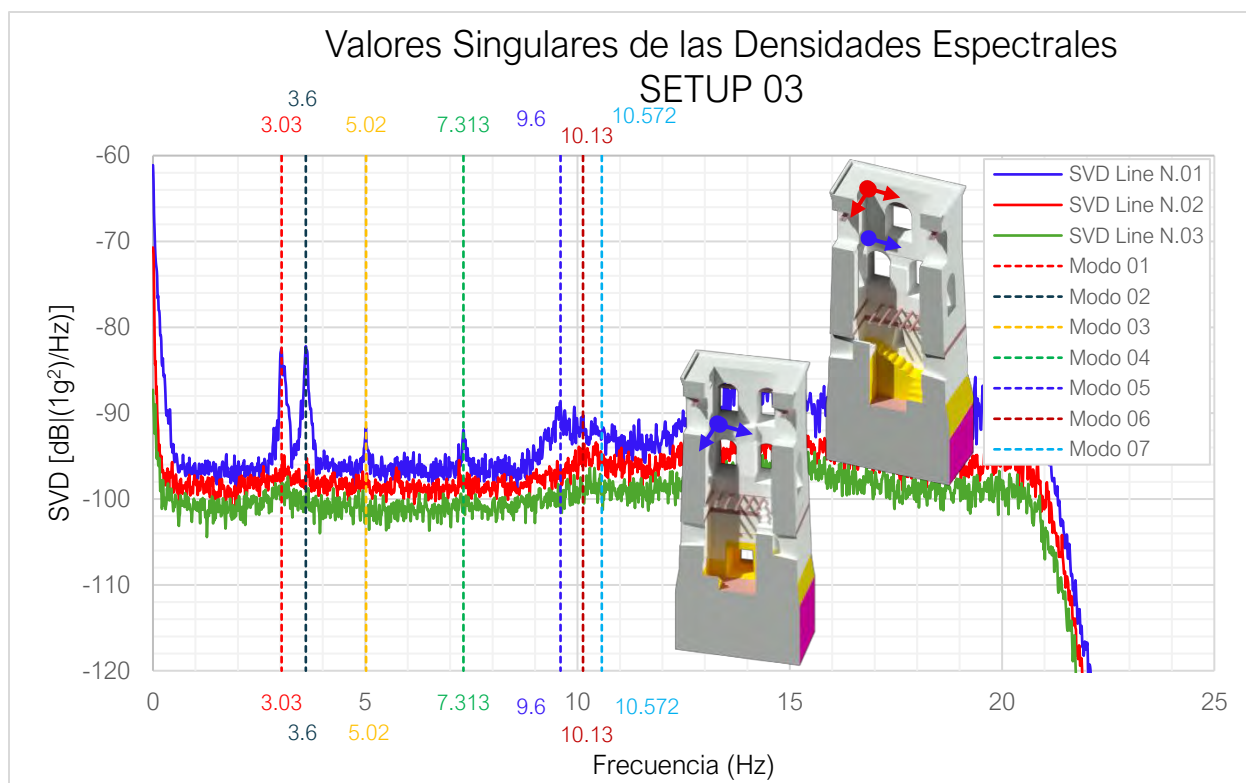
Nota. En la **Figura B. 10**, las líneas entrecortadas muestran los picos de frecuencias obtenidas por los geófonos. En el cuadro adjunto dentro de la figura se detallan los modos identificados y las señales (con desviación estándar) de los sensores en cada dirección, además del PSD global.

Figura B. 10*Envolvente Setup 02. Campaña 03*

Nota. En la **Figura B. 11**, las líneas entrecortadas muestran los picos de frecuencias obtenidas por los geófonos. En el cuadro adjunto dentro de la figura se detallan los modos identificados y las señales (con desviación estándar) de los sensores en cada dirección, además del PSD global.

Figura B. 11

Diagrama SVD y configuración de acelerómetros Setup 03. Campaña 02

**Figura B. 12**

Sensor referencial en dirección ESTE – Setup 03. Campaña 02

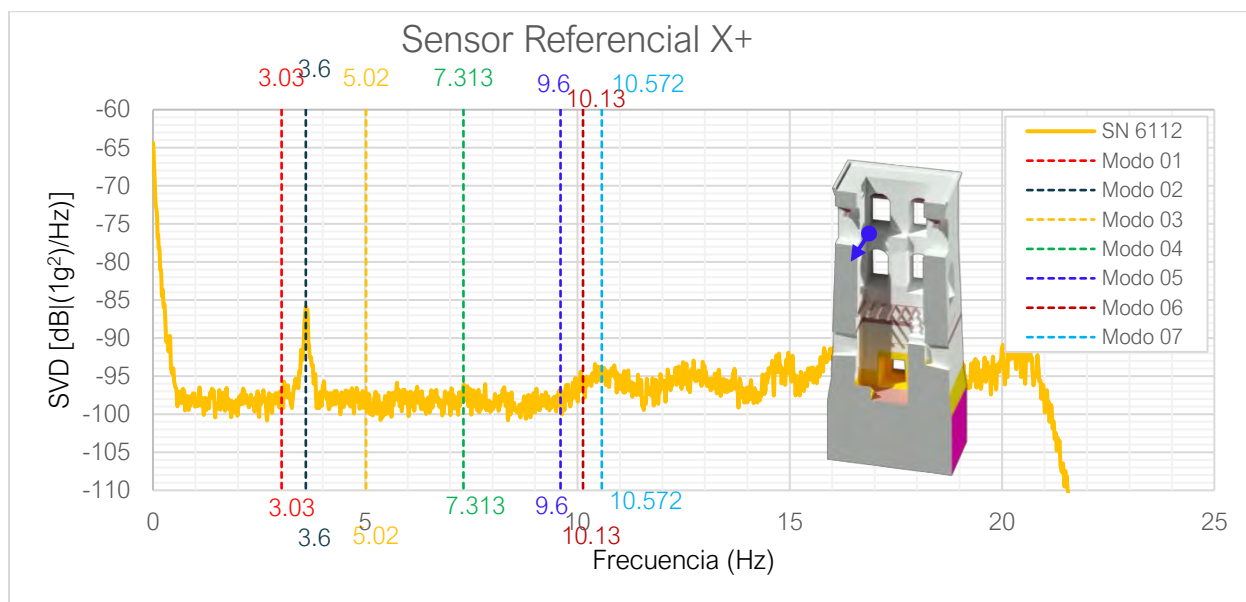


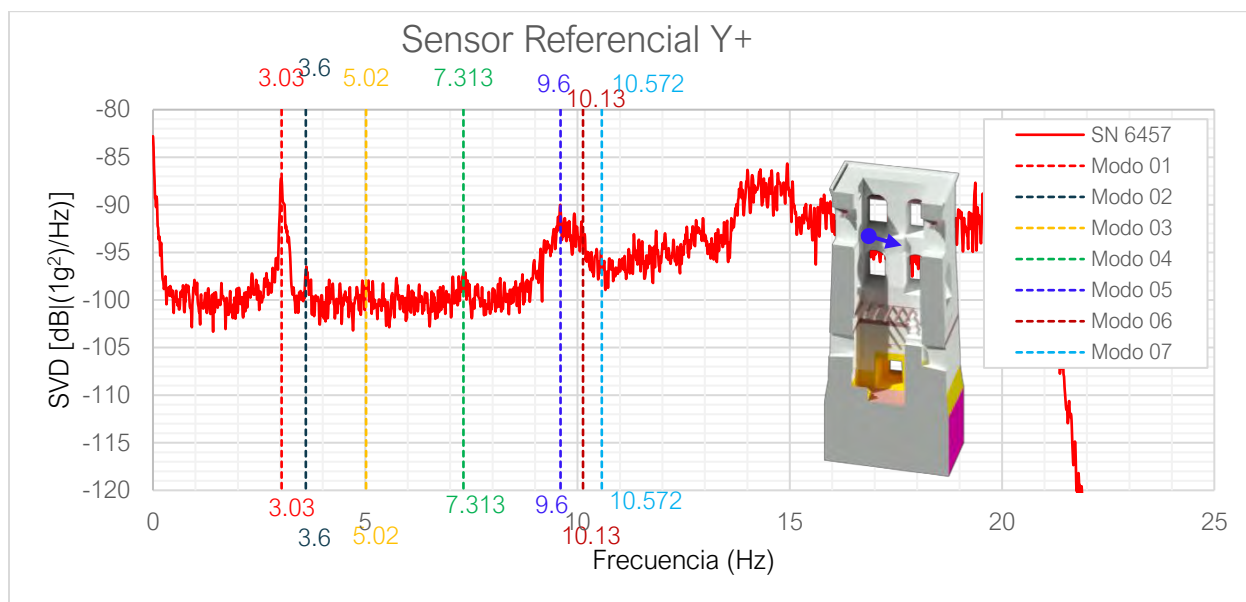
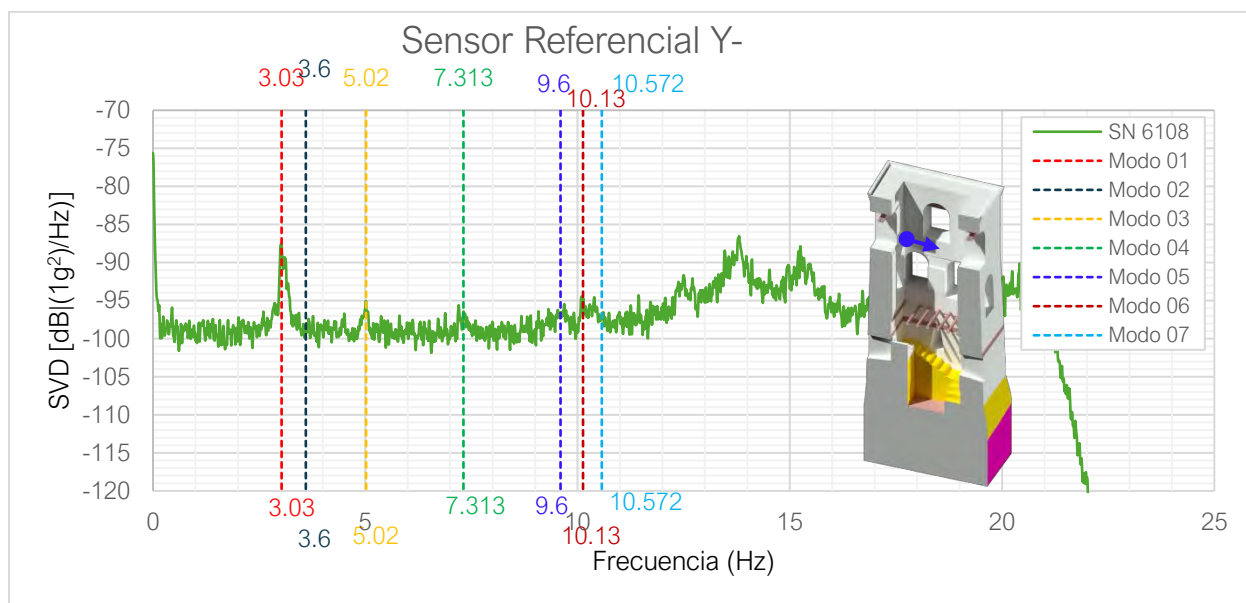
Figura B. 13*Sensor referencial en dirección NORTE – Setup 03. Campaña 02***Figura B. 14***Sensor referencial en dirección SUR – Setup 03. Campaña 02*

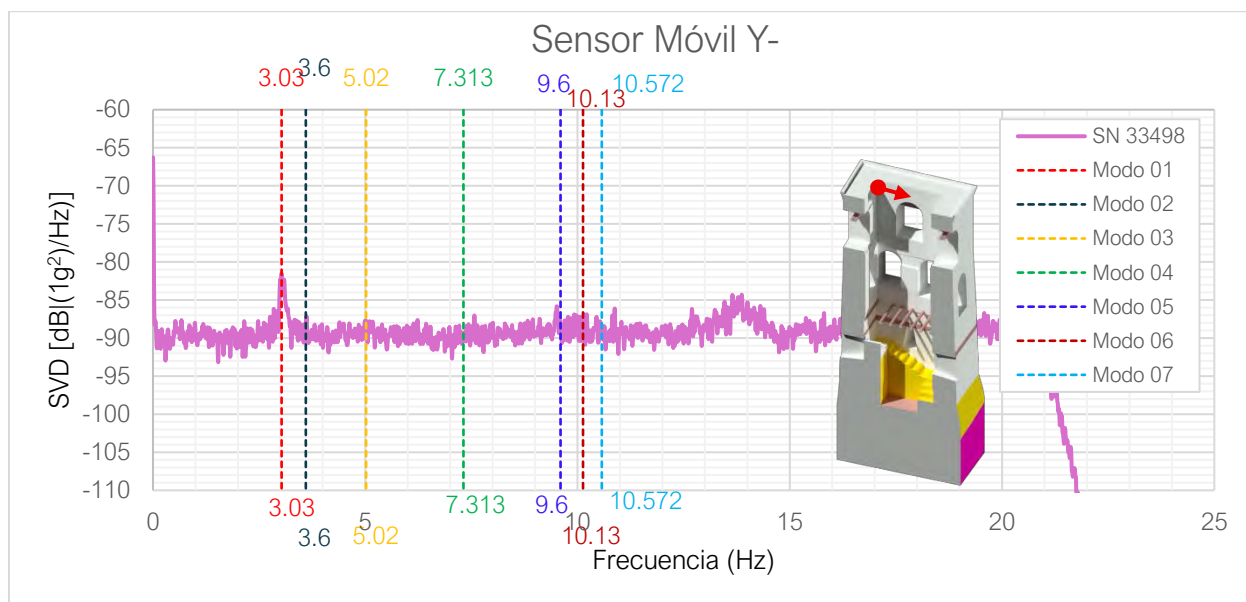
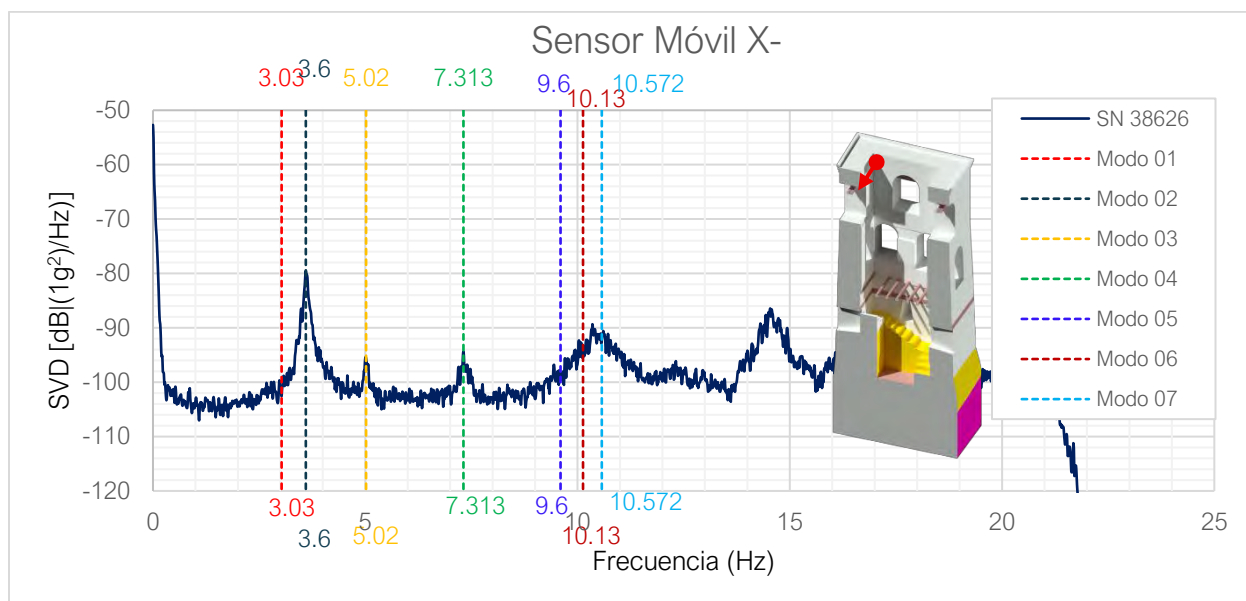
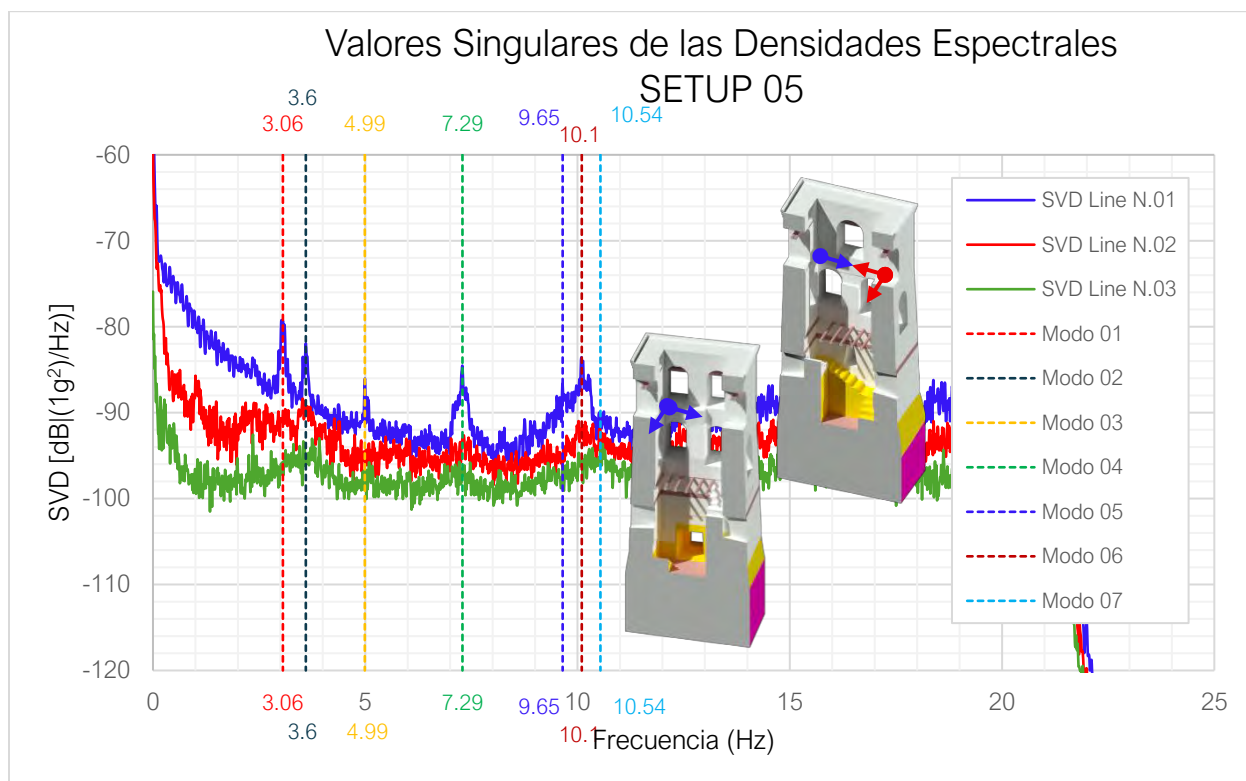
Figura B. 15*Sensor móvil en dirección SUR – Setup 03. Campaña 02***Figura B. 16***Sensor móvil en dirección OESTE – Setup 03. Campaña 02*

Figura B. 17

Diagrama SVD y configuración de acelerómetros Setup 05. Campaña 02

**Figura B. 18.**

Sensor referencial en dirección ESTE – Setup 05. Campaña 02

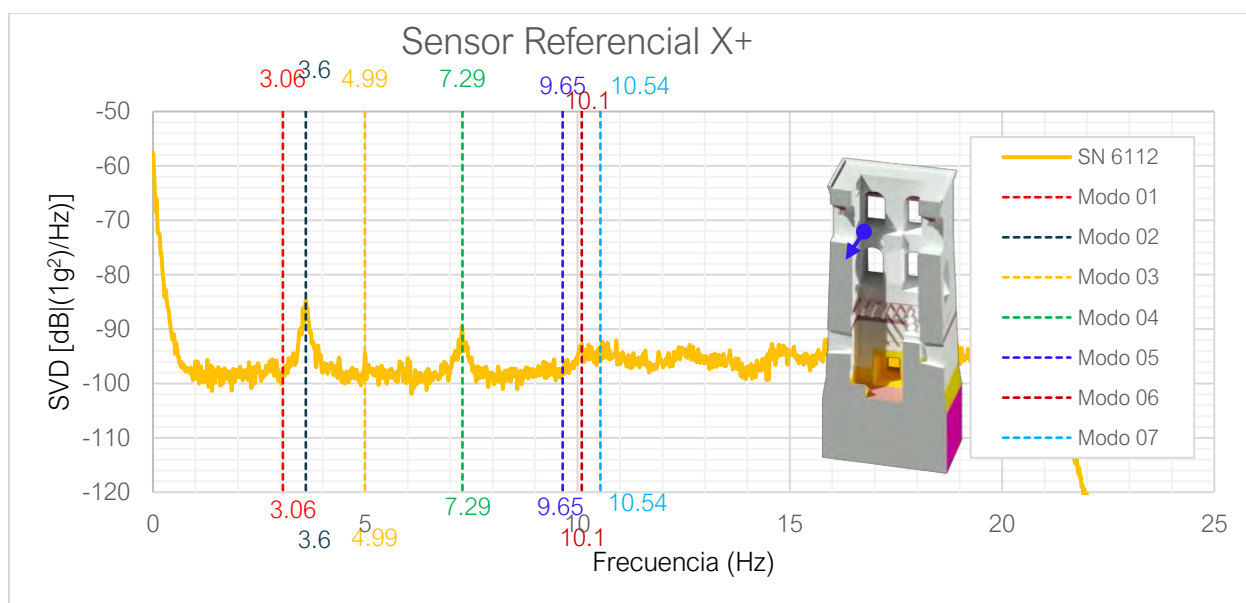
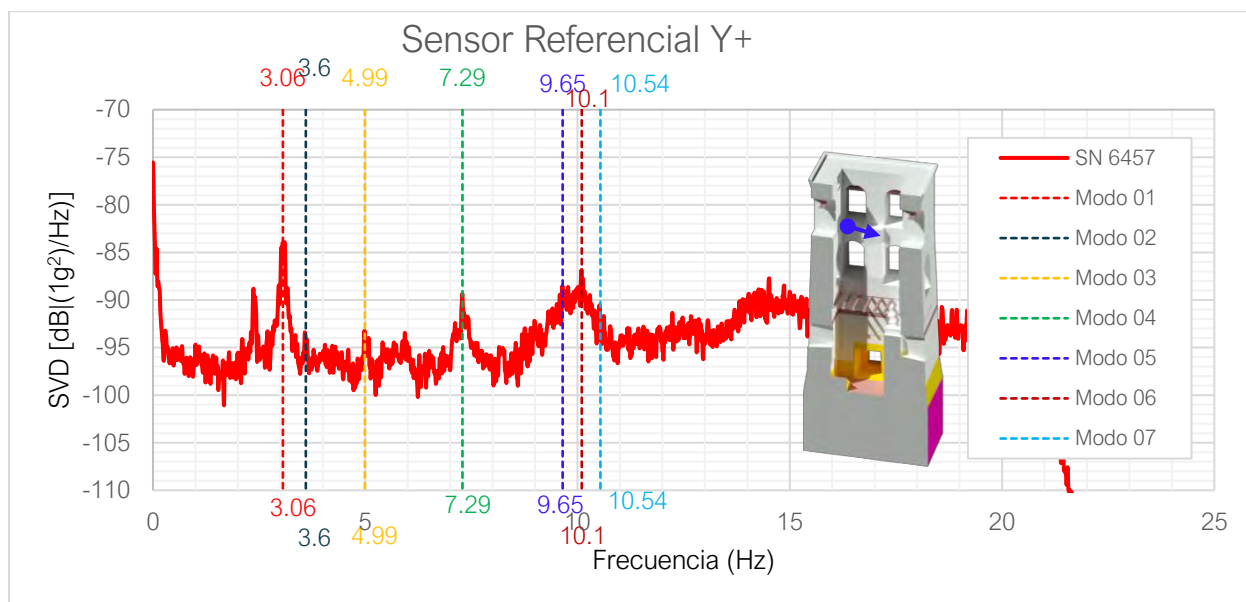


Figura B. 19.

Sensor referencial en dirección NORTE – Setup 05. Campaña 02

**Figura B. 20.**

Sensor referencial en dirección SUR – Setup 05. Campaña 02

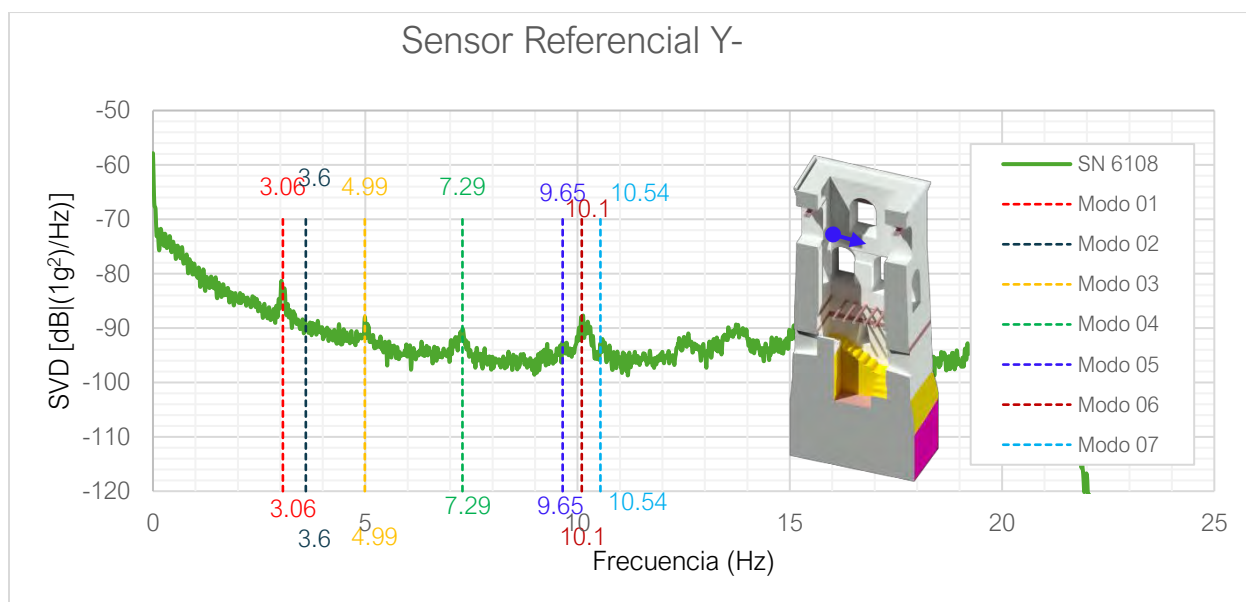


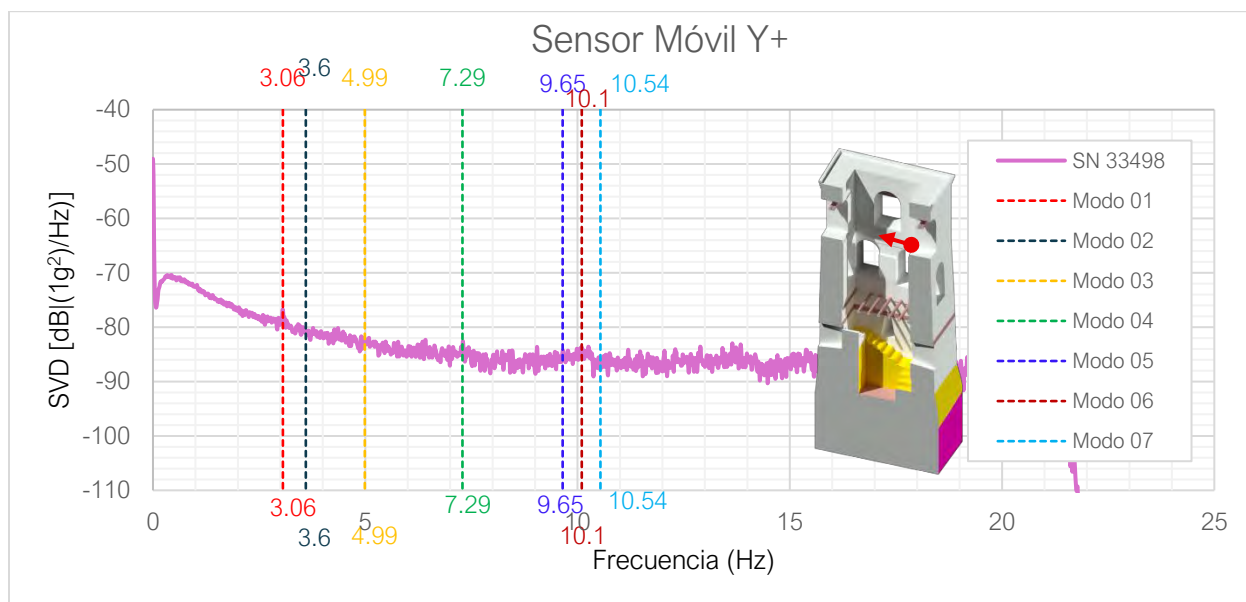
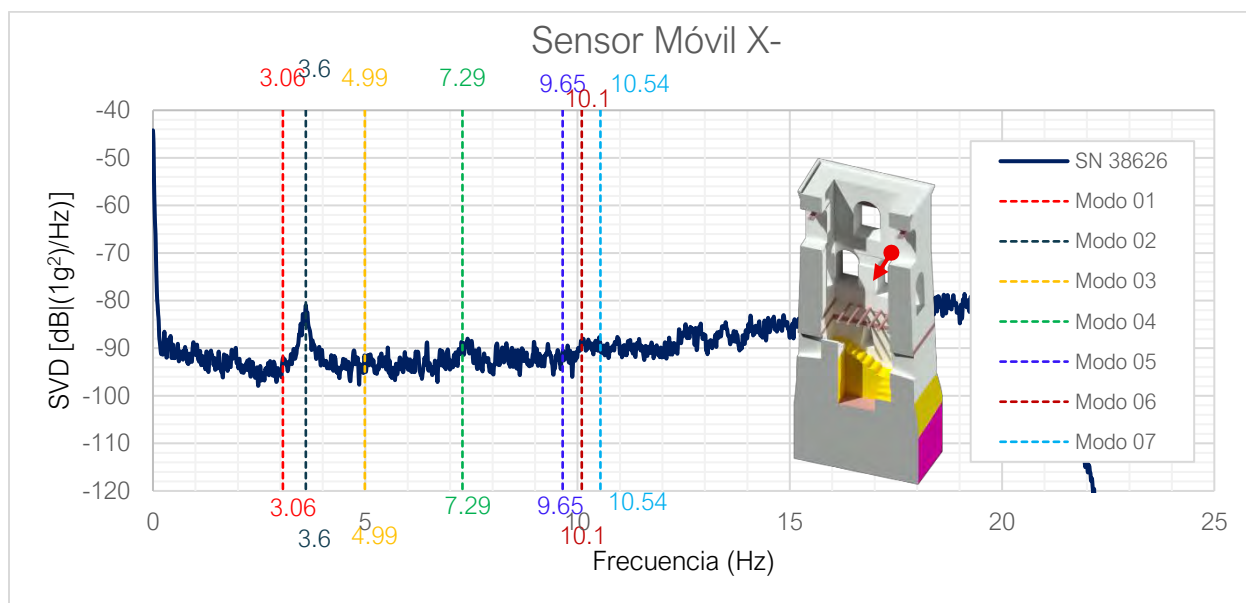
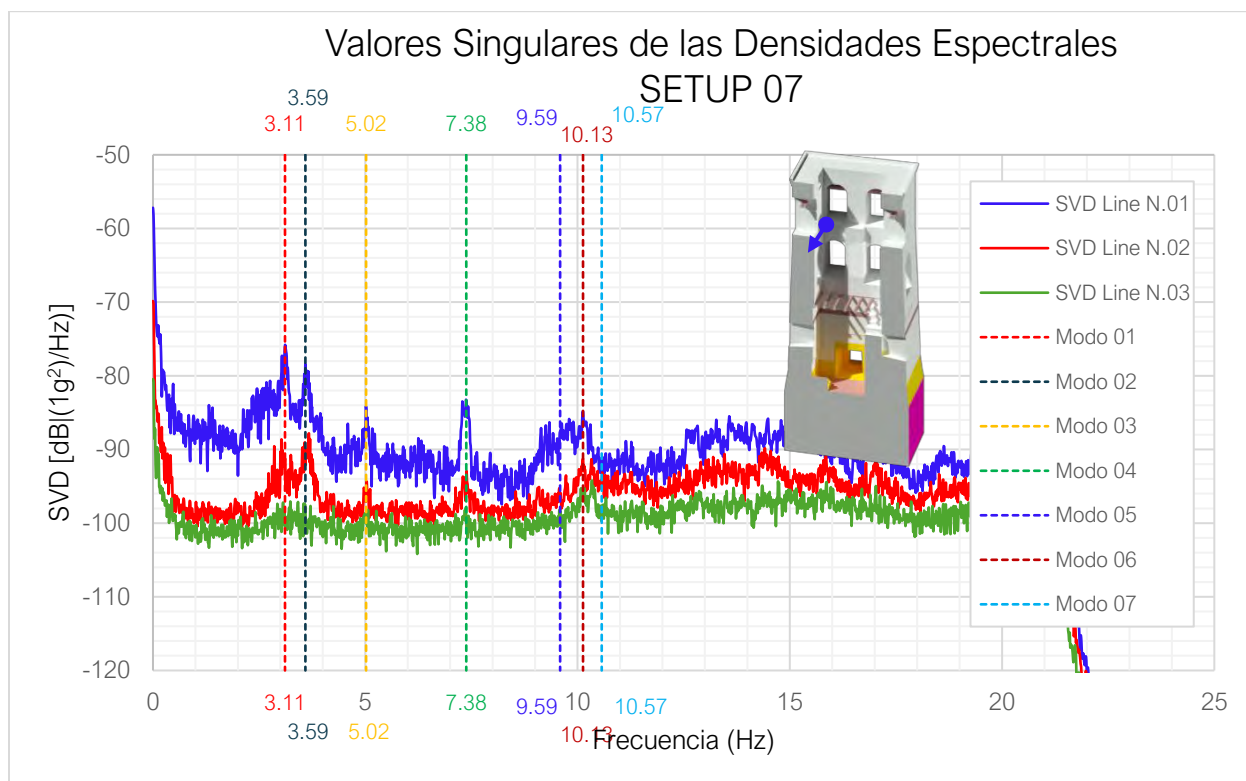
Figura B. 21.*Sensor móvil en dirección NORTE – Setup 05. Campaña 02***Figura B. 22.***Sensor móvil en dirección OESTE – Setup 05. Campaña 02*

Figura B. 23.

Diagrama SVD y configuración de acelerómetros Setup 07. Campaña 02

**Figura B. 24.**

Sensor referencial en dirección SUR – Setup 07. Campaña 02

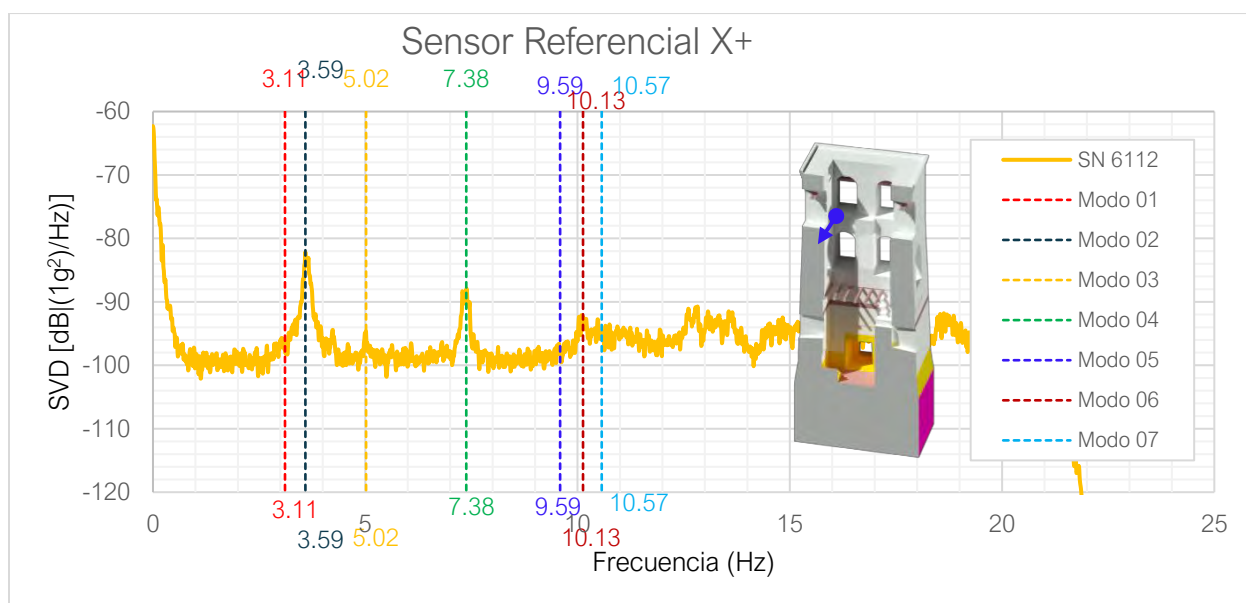


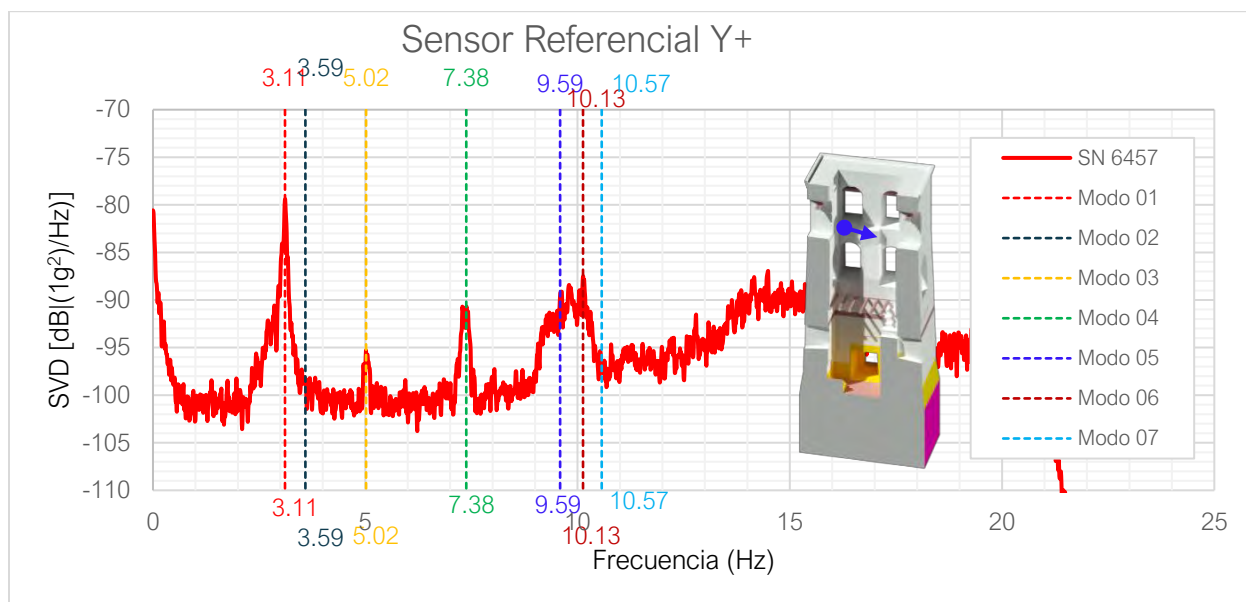
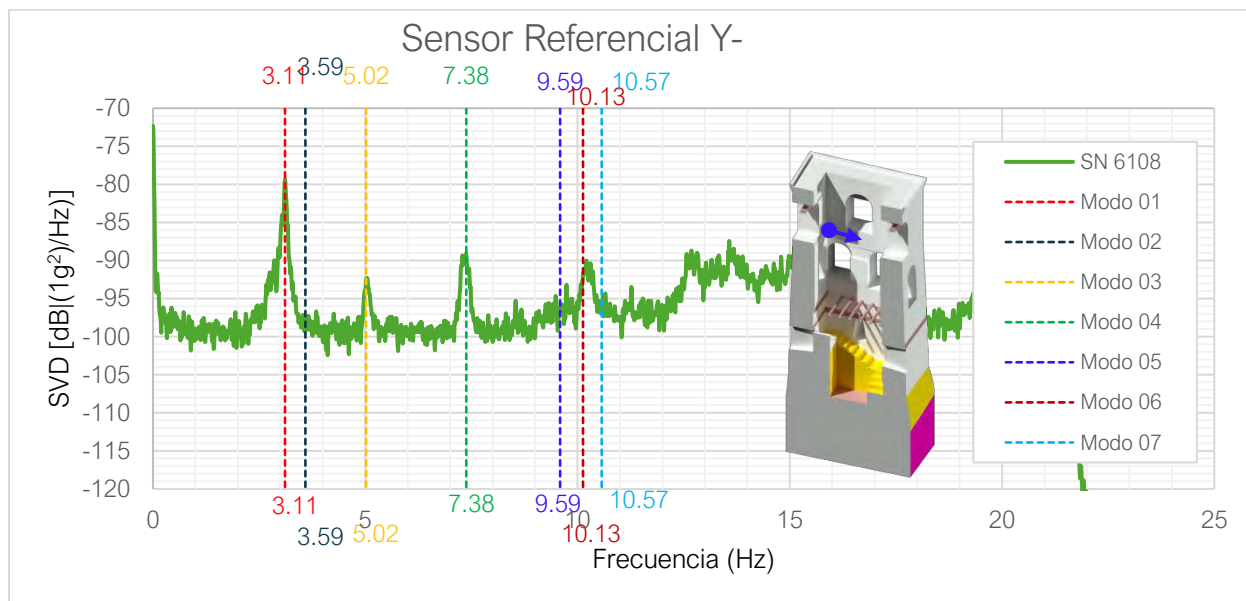
Figura B. 25.*Sensor referencial en dirección NORTE – Setup 07. Campaña 02***Figura B. 26.***Sensor referencial en dirección SUR – Setup 07. Campaña 02*

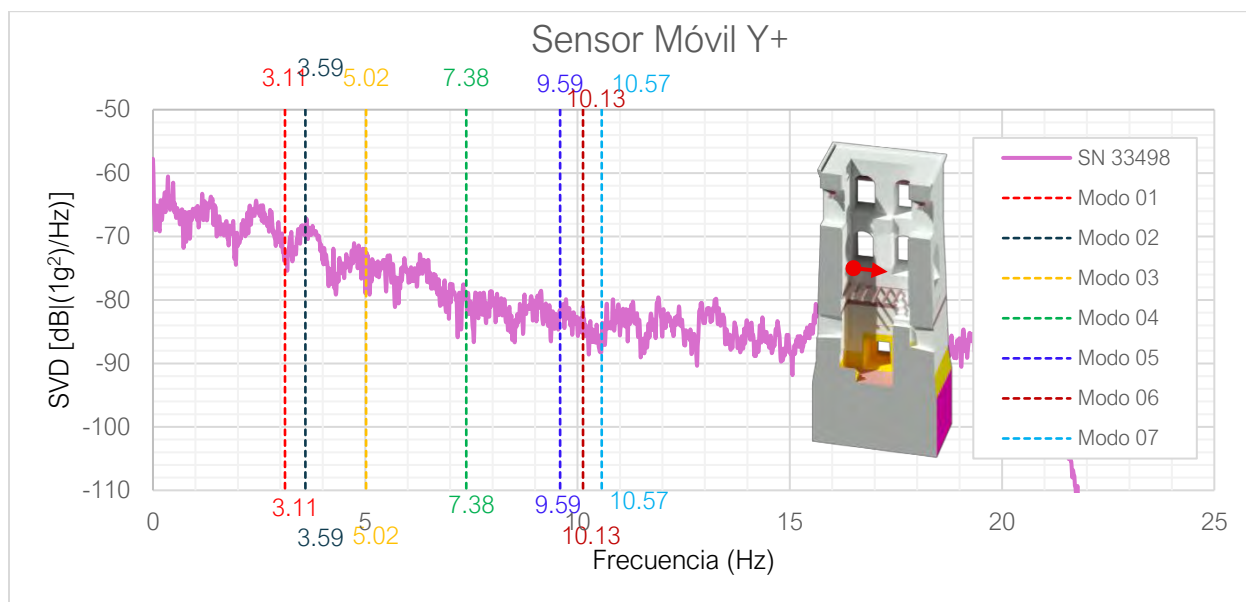
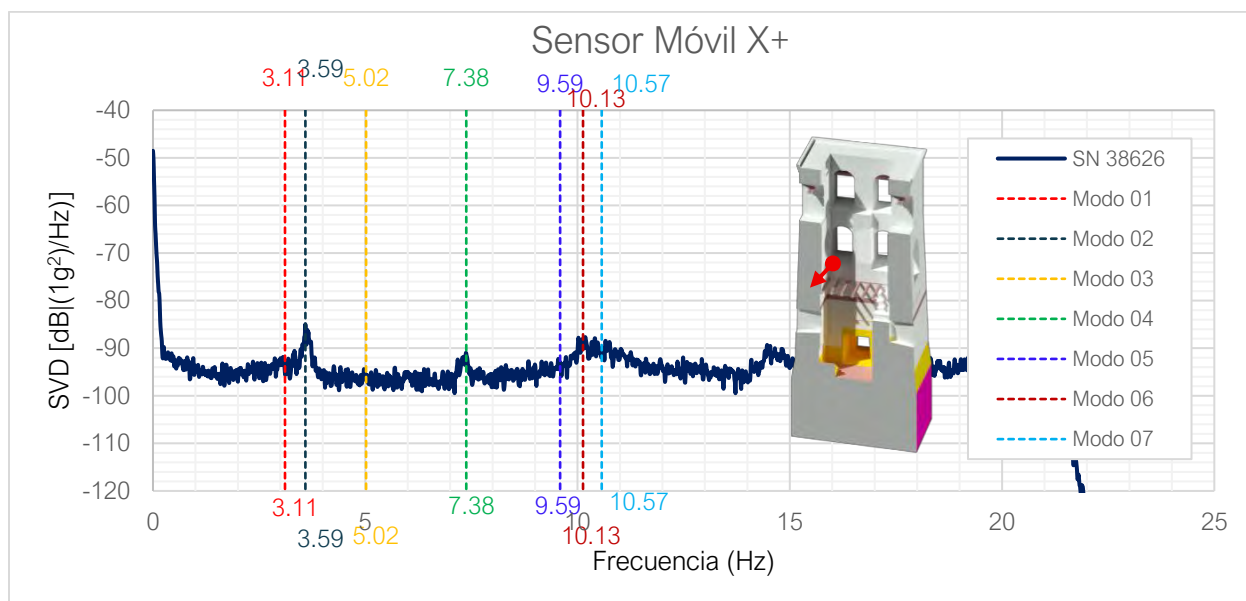
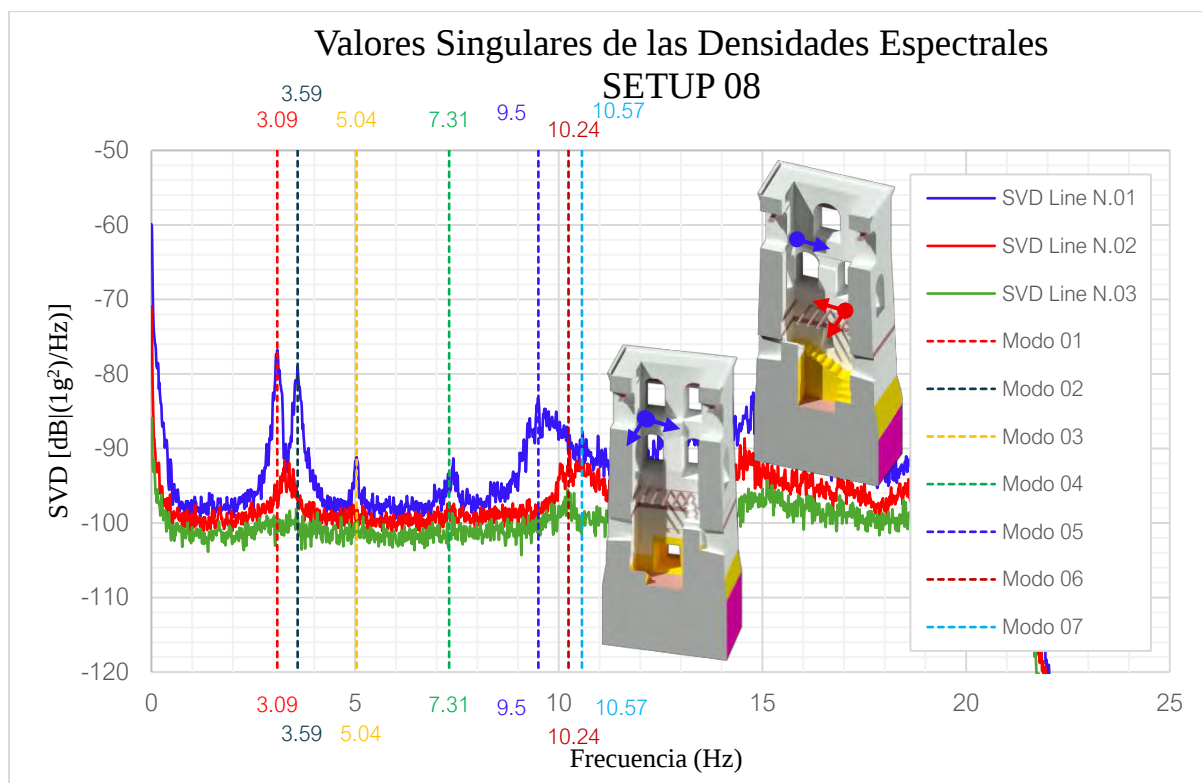
Figura B. 27.*Sensor móvil en dirección NORTE – Setup 07. Campaña 02***Figura B. 28.***Sensor móvil en dirección ESTE – Setup 07. Campaña 02*

Figura B. 29.

Diagrama SVD y configuración de acelerómetros Setup 08. Campaña 02

**Figura B. 30.**

Sensor referencial en dirección SUR – Setup 08. Campaña 02

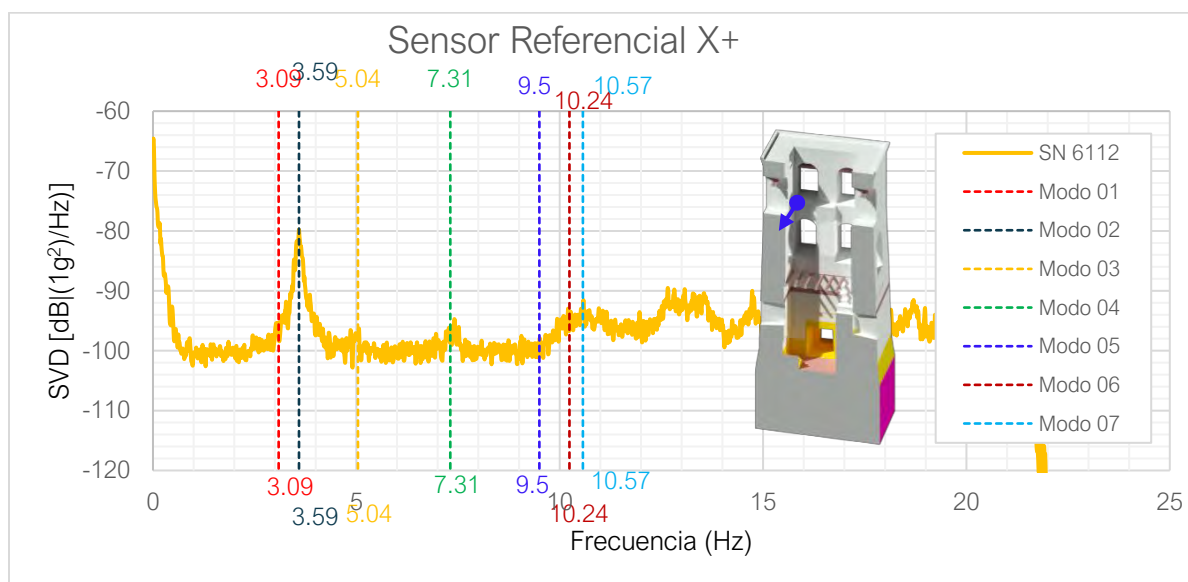


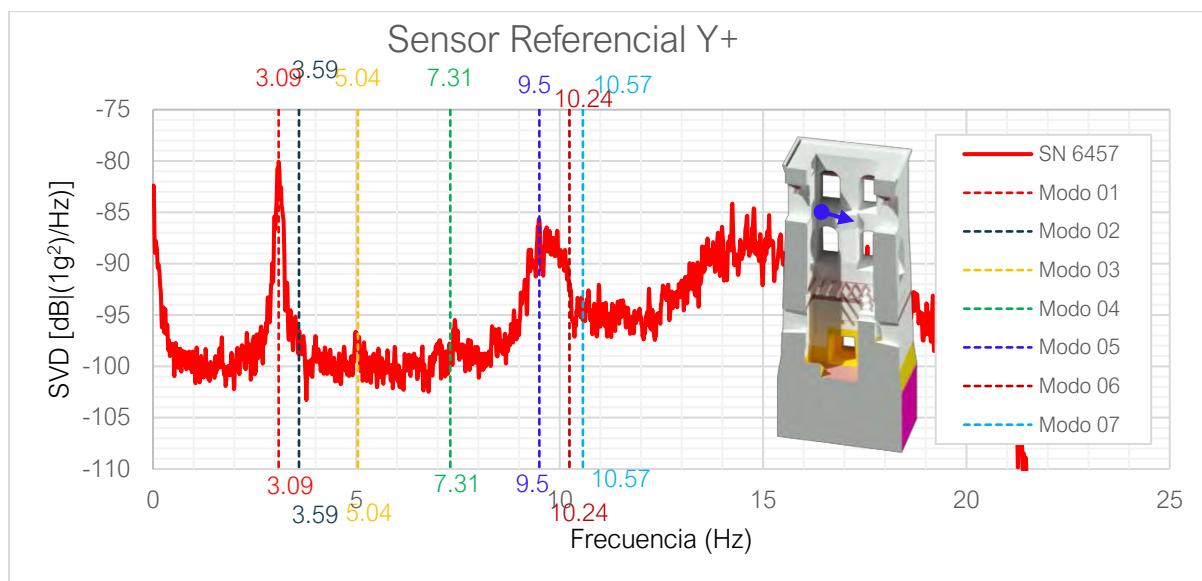
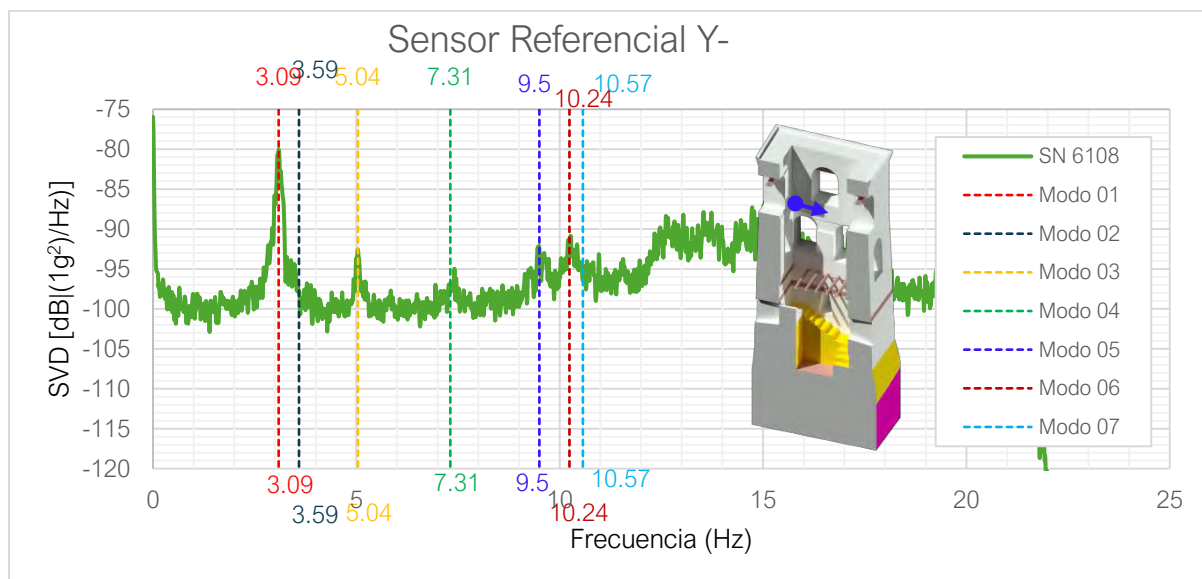
Figura B. 31.*Sensor referencial en dirección NORTE – Setup 08. Campaña 02***Figura B. 32.***Sensor referencial en dirección SUR – Setup 08. Campaña 02*

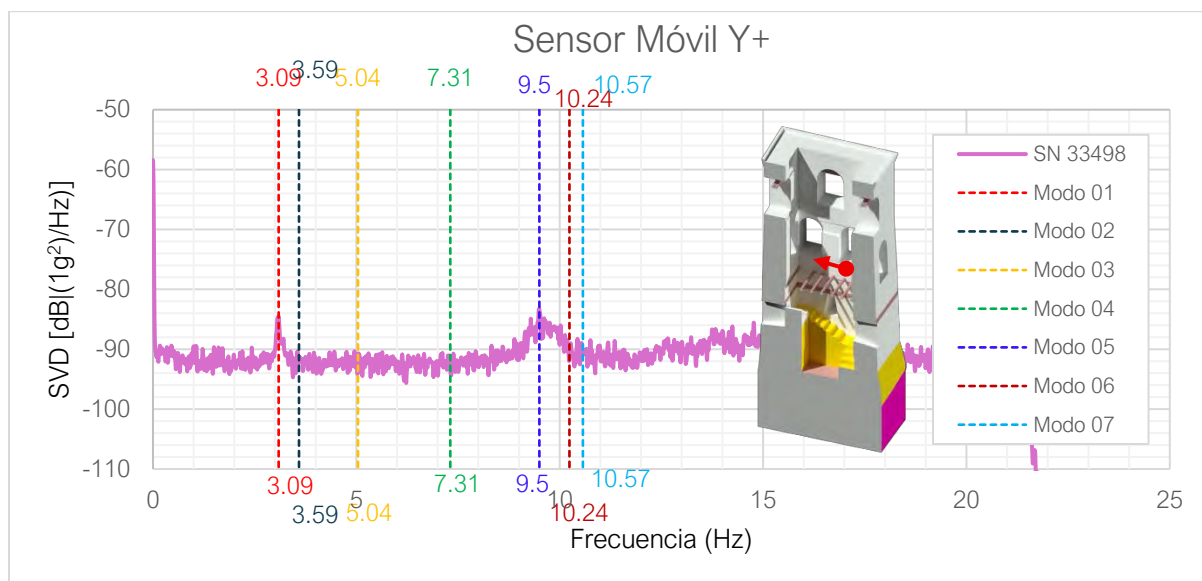
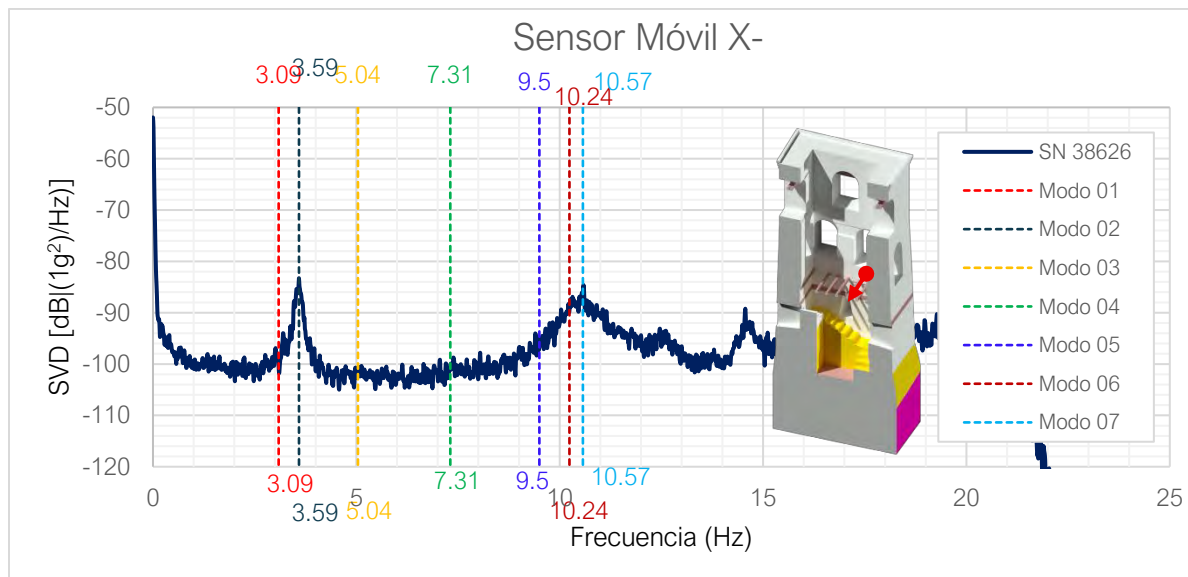
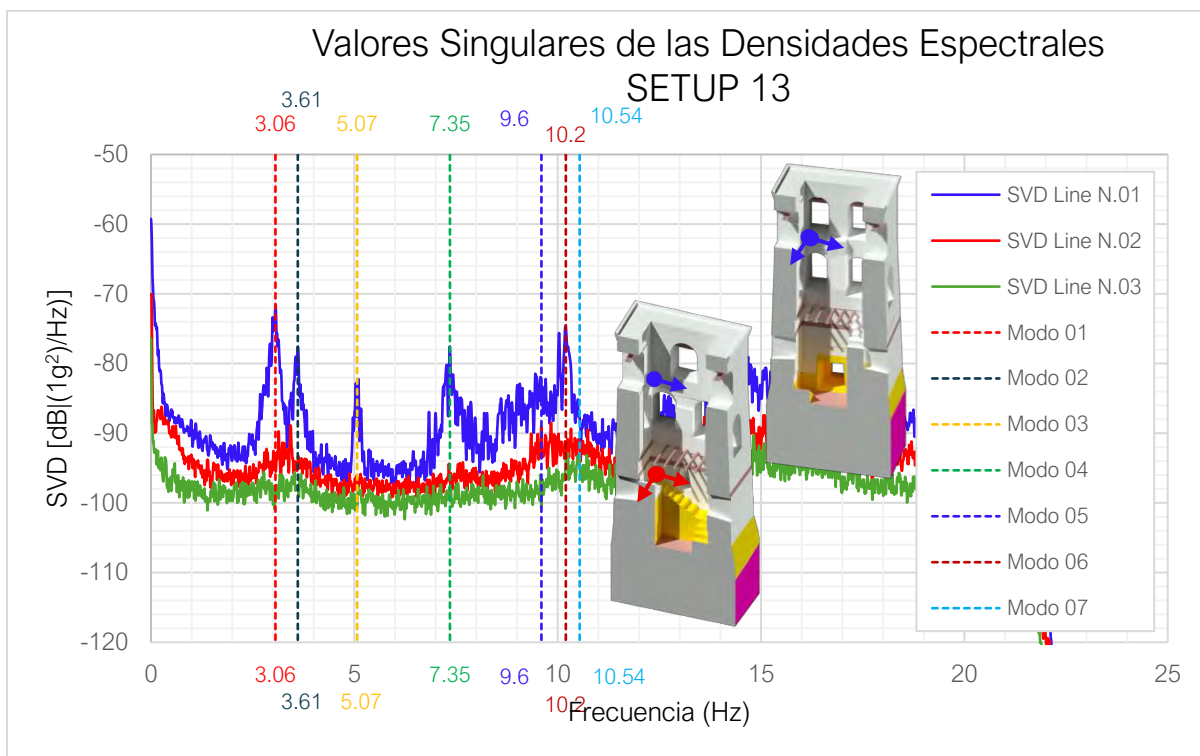
Figura B. 33.*Sensor móvil en dirección NORTE – Setup 08. Campaña 02***Figura B. 34.***Sensor móvil en dirección OESTE – Setup 08. Campaña 02*

Figura B. 35.

Diagrama SVD y configuración de acelerómetros Setup 13. Campaña 02

**Figura B. 36.**

Sensor referencial en dirección ESTE – Setup 13. Campaña 02

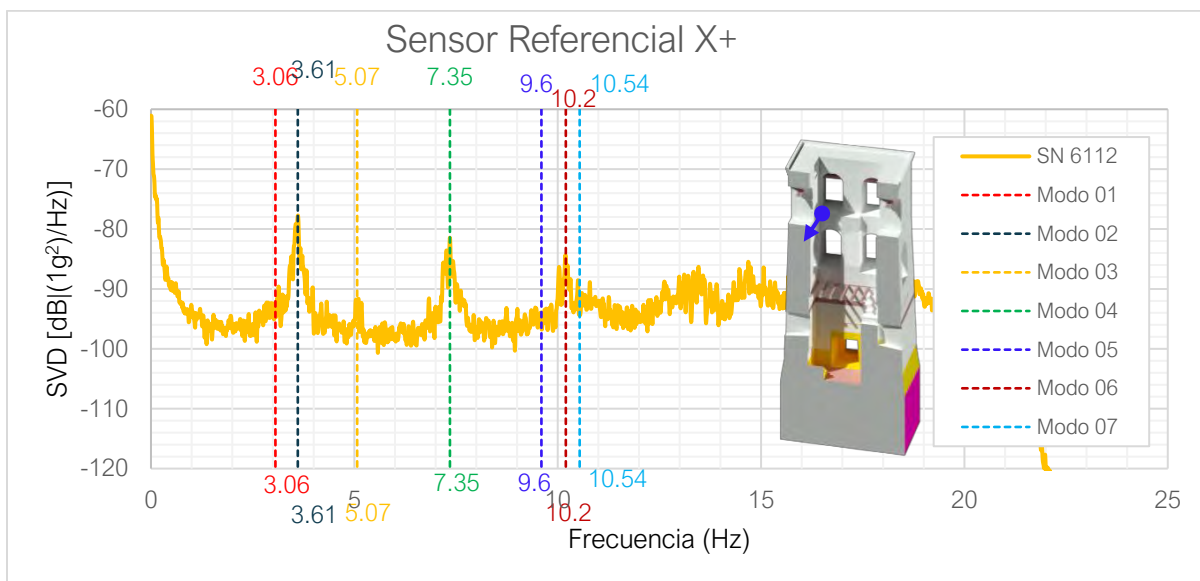


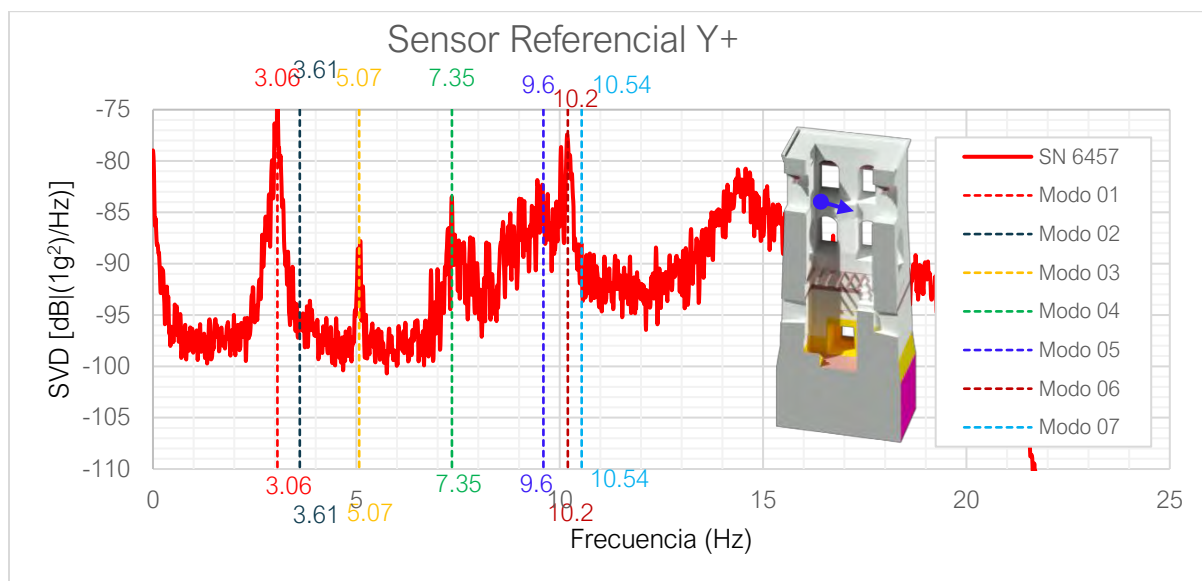
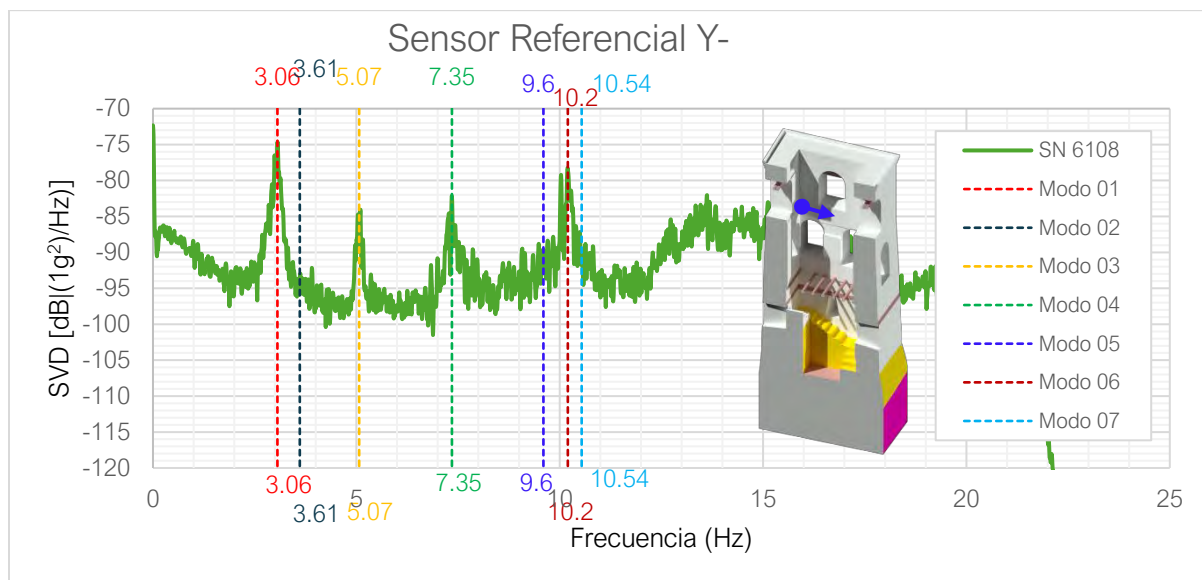
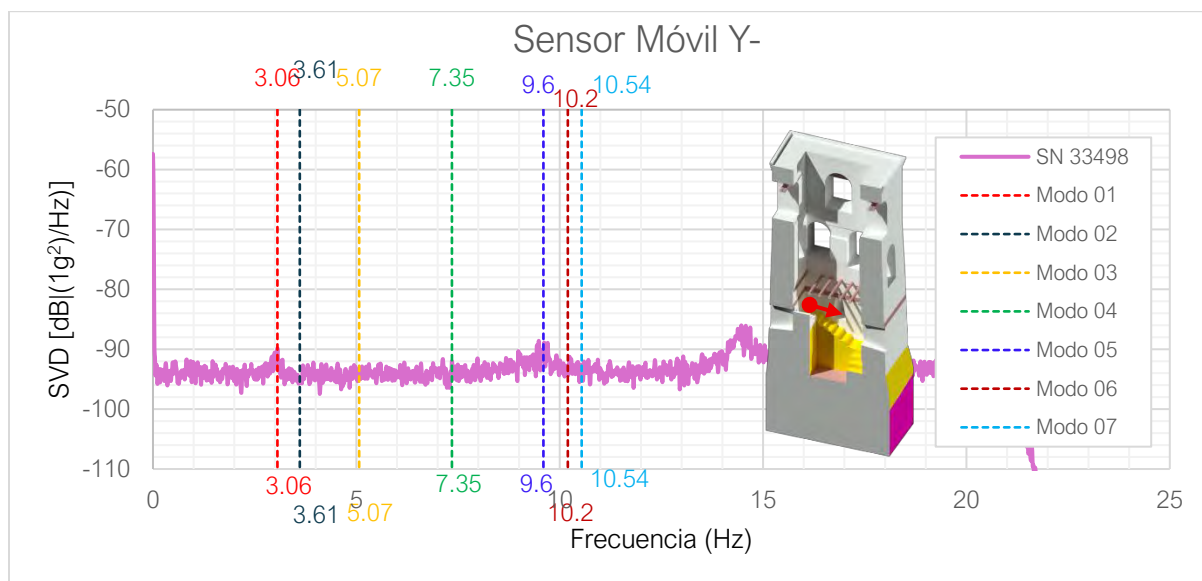
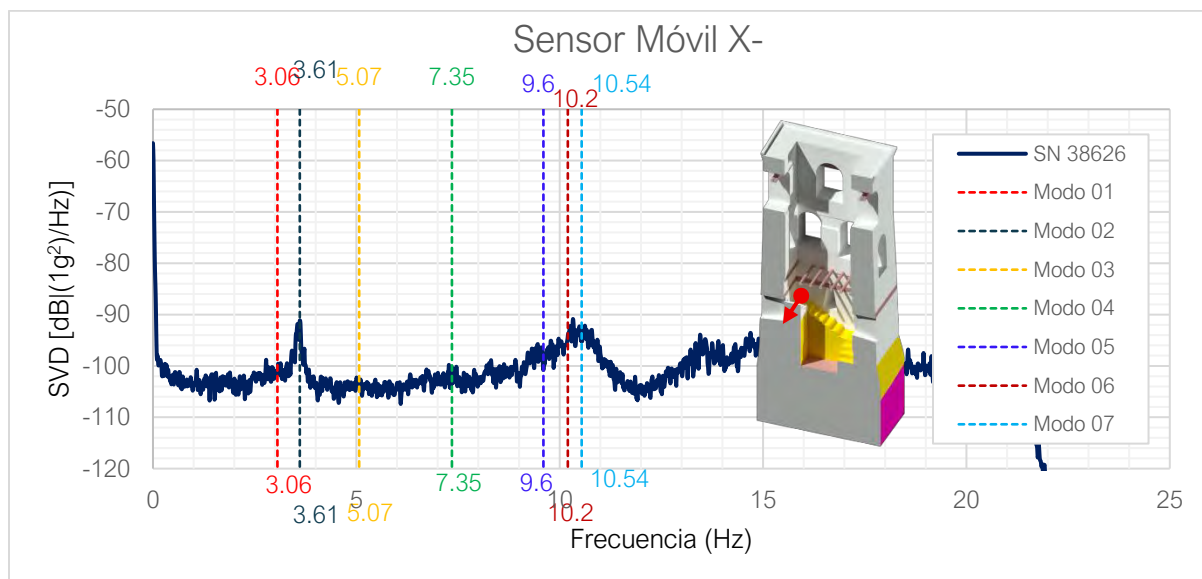
Figura B. 37.*Sensor referencial en dirección NORTE – Setup 13. Campaña 02***Figura B. 38.***Sensor referencial en dirección SUR – Setup 13. Campaña 02*

Figura B. 39.*Sensor móvil en dirección SUR – Setup 13. Campaña 02***Figura B. 40.***Sensor móvil en dirección OESTE – Setup 13. Campaña 02*

D). Hojas de calibración de los sensores de aceleración empleados



Calibration Data

Low Frequency Accelerometer

Model **731-207**

Serial Number **6457**

Sensitivity **9.3 V/g**

Bias Voltage **9.9 Vdc**

Resonance **3.1 kHz**

Maximum Amplitude Range **0.5 g peak**

Frequency Response			
±5%	0.60 Hz	to	1020 Hz
±10%	0.50 Hz	to	1140 Hz
±3dB	0.20 Hz	to	1860 Hz

Calibrated by: **T.PHOUBANDITH** Date: **10/03/2024**

This calibration is traceable to the National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899.

Frequency Response is traceable 5 Hz to 10 kHz.

Low end frequency response and amplitude range are nominal values.

Sensitivity measured at 10 Hz, 0.5g, 25°C.

Wilcoxon Sensing Technologies is an ISO 9001 Registered Company.

Wilcoxon Sensing Technologies
8435 Progress Drive, Frederick, MD 21701, USA

Amphenol (Maryland), Inc. d/b/a Wilcoxon Sensing Technologies

Tel: +1 (301) 330 8811
Tel: 1 800 WILCOXON
FAX: +1 (301) 330 8873
www.wilcoxon.com



Calibration Data

Low Frequency Accelerometer

Model **731-207**

Serial Number **6108**

Sensitivity **10.1 V/g**

Bias Voltage **9.5 Vdc**

Resonance **2.8 kHz**

Maximum Amplitude Range **0.5 g peak**

Frequency Response			
$\pm 5\%$	0.60 Hz	to	1040 Hz
$\pm 10\%$	0.50 Hz	to	1190 Hz
$\pm 3\text{dB}$	0.20 Hz	to	1740 Hz

Calibrated by: **T.PHOUBANDITH** Date: **04/04/2024**

This calibration is traceable to the National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899

Frequency Response is traceable 5 Hz to 10 kHz.

Low end frequency response and amplitude range are nominal values.

Sensitivity measured at 10 Hz, 0.5g, 25°C.

Wilcoxon Sensing Technologies is an ISO 9001 Registered Company.

Wilcoxon Sensing Technologies

8435 Progress Drive, Frederick, MD 21701, USA

Amphenol (Maryland), Inc. d/b/a Wilcoxon Sensing Technologies

Tel: +1 (301) 330 8811

Tel: 1 800 WILCOXON

FAX: +1 (301) 330 8873

www.wilcoxon.com



Calibration Data

Low Frequency Accelerometer

Model **731-207**

Serial Number **6110**

Sensitivity **9.9 V/g**

Bias Voltage **9.8 Vdc**

Resonance **2.7 kHz**

Maximum Amplitude Range **0.5 g peak**

Frequency Response			
$\pm 5\%$	0.60 Hz	to	920 Hz
$\pm 10\%$	0.50 Hz	to	1140 Hz
$\pm 3\text{dB}$	0.20 Hz	to	1690 Hz

Calibrated by: **T.PHOUBANDITH** Date: **04/04/2024**

This calibration is traceable to the National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899

Frequency Response is traceable 5 Hz to 10 kHz.

Low end frequency response and amplitude range are nominal values.

Sensitivity measured at 10 Hz, 0.5g, 25°C.

Wilcoxon Sensing Technologies is an ISO 9001 Registered Company.

Wilcoxon Sensing Technologies

8435 Progress Drive, Frederick, MD 21701, USA

Amphenol (Maryland), Inc. d/b/a Wilcoxon Sensing Technologies

Tel: +1 (301) 330 8811

Tel: 1 800 WILCOXON

FAX: +1 (301) 330 8873

www.wilcoxon.com



Calibration Data

Low Frequency Accelerometer

Model **731-207**

Serial Number **6112**

Sensitivity **10.3 V/g**

Bias Voltage **9.7 Vdc**

Resonance **2.6 kHz**

Maximum Amplitude Range **0.5 g peak**

Frequency Response			
$\pm 5\%$	0.60 Hz	to	850 Hz
$\pm 10\%$	0.50 Hz	to	1070 Hz
$\pm 3\text{dB}$	0.20 Hz	to	1600 Hz

Calibrated by: **T.PHOUBANDITH** Date: **04/04/2024**

This calibration is traceable to the National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899

Frequency Response is traceable 5 Hz to 10 kHz.

Low end frequency response and amplitude range are nominal values.

Sensitivity measured at 10 Hz, 0.5g, 25°C.

Wilcoxon Sensing Technologies is an ISO 9001 Registered Company.

Wilcoxon Sensing Technologies

8435 Progress Drive, Frederick, MD 21701, USA

Amphenol (Maryland), Inc. d/b/a Wilcoxon Sensing Technologies

Tel: +1 (301) 330 8811

Tel: 1 800 WILCOXON

FAX: +1 (301) 330 8873

www.wilcoxon.com

~ Calibration Certificate ~

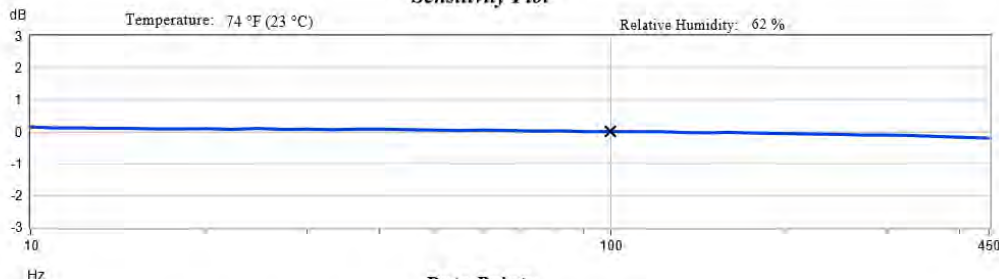
Per ISO 16063-21

Model Number: 393B05Serial Number: 38626Description: ICP® AccelerometerManufacturer: PCBMethod: Back-to-Back Comparison AT401-3

Calibration Data

Sensitivity @ 100 Hz	10.13 V/g (1.033 V/m/s ²)	Output Bias	11.3 VDC
Discharge Time Constant	1.0 seconds	Transverse Sensitivity	1.3 %
		Resonant Frequency	2.9 kHz

Sensitivity Plot



Data Points

Frequency (Hz)	Dev. (%)	Frequency (Hz)	Dev. (%)
10	1.6	300	-1.3
15	1.2	450	-2.1
30	0.8		
50	0.5		
REF. FREQ.	0.0		

Mounting Surface: Beryllium w/Silicone Grease Fastener: 10-32 Female Fixture Orientation: Vertical
 Acceleration Level (g): 0.100 g (0.981 m/s²)

*The acceleration level may be limited by shaker displacement at low frequencies. If the listed level cannot be obtained, the calibration system uses the following formula to set the vibration amplitude: Acceleration Level (g) = 0.008 * (freq)^{1.5}. *The gravitational constant used for calculations by the calibration system is: 1 g = 9.80665 m/s².

Condition of Unit

As Found: n/aAs Left: New Unit, In Tolerance

Notes

1. Calibration is NIST Traceable thru Project 683/283498 and PTB Traceable thru Project 10065.
2. This certificate shall not be reproduced, except in full, without written approval from PCB Piezotronics, Inc.
3. Calibration is performed in compliance with ISO 9001, ISO 10012-1, ANSI Z540.3 and ISO 17025.
4. See Manufacturer's Specification Sheet for a detailed listing of performance specifications.
5. Measurement uncertainty (95% confidence level with coverage factor of 2) for frequency ranges tested during calibration are as follows: 5-9 Hz; +/- 2.0%, 10-99 Hz; +/- 1.5%, 100-1999 Hz; +/- 1.0%, 2-10 kHz; +/- 2.5%.

Technician: _____

Scott Skibniewski

Date: _____

7/5/2013



PAGE 1 OF 1



HEADQUARTERS: 3425 WALDEN AVENUE - DEPEW, NY 14043
 CALIBRATION PERFORMED AT: 10869 HIGHWAY 903 - HALIFAX, NC 27839
 TEL: +1 (888) 684-0013 - FAX: +1 (716) 685-3886 - www.pcb.com

CAL-57-3455873866.157-00

ACS-1



~ Calibration Certificate ~

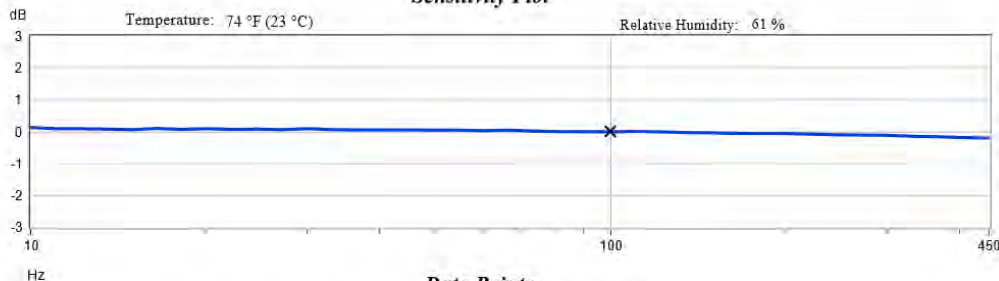
Per ISO 16063-21

Model Number: 393B05Serial Number: 38627Description: ICP® AccelerometerManufacturer: PCBMethod: Back-to-Back Comparison AT401-3

Calibration Data

Sensitivity @ 100 Hz	10.19 V/g (1.039 V/m/s ²)	Output Bias	11.4 VDC
Discharge Time Constant	1.0 seconds	Transverse Sensitivity	2.3 %
		Resonant Frequency	3.0 kHz

Sensitivity Plot



Data Points

Frequency (Hz)	Dev. (%)	Frequency (Hz)	Dev. (%)
10	1.4	300	-1.4
15	0.7	450	-2.5
30	1.0		
50	0.4		
REF. FREQ.	0.0		

Mounting Surface: Beryllium w/Silicone Grease Fastener: 10-32 Female Fixture Orientation: Vertical
 Acceleration Level (g): 0.100 g (0.981 m/s²)

*The acceleration level may be limited by shaker displacement at low frequencies. If the listed level cannot be obtained, the calibration system uses the following formula to set the vibration amplitude: Acceleration Level (g) = 0.008 * (freq)^{1.5}. *The gravitational constant used for calculations by the calibration system is: 1 g = 9.80665 m/s².

Condition of Unit

As Found: n/aAs Left: New Unit, In Tolerance

Notes

1. Calibration is NIST Traceable thru Project 683/283498 and PTB Traceable thru Project 10065.
2. This certificate shall not be reproduced, except in full, without written approval from PCB Piezotronics, Inc.
3. Calibration is performed in compliance with ISO 9001, ISO 10012-1, ANSI Z540.3 and ISO 17025.
4. See Manufacturer's Specification Sheet for a detailed listing of performance specifications.
5. Measurement uncertainty (95% confidence level with coverage factor of 2) for frequency ranges tested during calibration are as follows: 5-9 Hz; +/- 2.0%, 10-99 Hz; +/- 1.5%, 100-1999 Hz; +/- 1.0%, 2-10 kHz; +/- 2.5%.

Technician: _____

Scott Skibniewski

Date: _____

7/5/2013



PCB PIEZOTRONICS
AN AMPHENOL COMPANY

HEADQUARTERS: 3425 WALDEN AVENUE - DEPEW, NY 14043
 CALIBRATION PERFORMED AT: 10869 HIGHWAY 903 - HALIFAX, NC 27839
 TEL: +1 (888) 684-0013 - FAX: +1 (716) 685-3886 - www.pcb.com

CAL-57-3455874774.235#0

PAGE 1 OF 1

ACS-1



~ Calibration Certificate ~

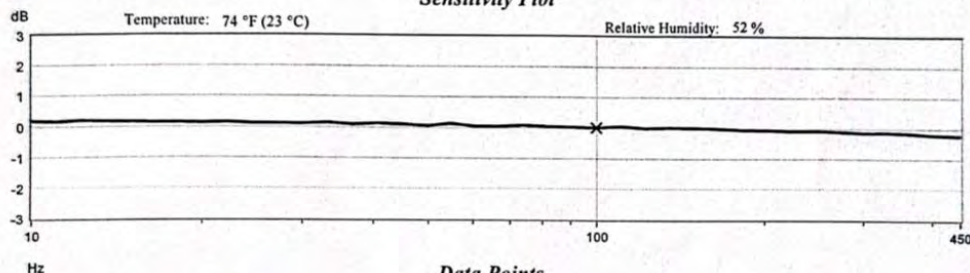
Per ISO 16063-21

Model Number: 393B05Serial Number: 83498Description: ICP® AccelerometerManufacturer: PCBMethod: Back-to-Back Comparison AT401-3

Calibration Data

Sensitivity @ 100 Hz	10.20 V/g (1.040 V/m/s ²)	Output Bias	11.3 VDC
Discharge Time Constant	0.9 seconds	Transverse Sensitivity	2.1 %
		Resonant Frequency	2.9 kHz

Sensitivity Plot



Data Points

Frequency (Hz)	Dev. (%)	Frequency (Hz)	Dev. (%)
10	2.0	300	-1.7
15	1.7	450	-2.7
30	1.2		
50	0.6		
REF. FREQ.	0.0		

Mounting Surface: Beryllium w/Silicone Grease Fastener: 10-32 Female Fixture Orientation: Vertical

Acceleration Level (g): 0.100 g (0.981 m/s²)*The acceleration level may be limited by shaker displacement at low frequencies. If the listed level cannot be obtained, the following formula is used to set the vibration amplitude: Acceleration Level (g) = 0.00795 x (freq)².*The gravitational constant used for calculations by the calibration system is: 1 g = 9.80665 m/s².

Condition of Unit

As Found: n/aAs Left: New Unit, In Tolerance

Product is compliant with specification if measured value is within or equal to the specification tolerance. Product is not compliant with specification if measured value falls outside of the specification tolerance.

Notes

1. Calibration is NIST Traceable thru Project 684/O-0000035821 and PTB Traceable thru Project 17016.
2. This certificate shall not be reproduced, except in full, without written approval from PCB Piezotronics, Inc.
3. Calibration is performed in compliance with ISO 10012-1, ANSI Z540.3 and ISO 17025.
4. Measurement results relate only to the items tested. Refer to Manufacturer's Specification Sheet for performance details.
5. Measurement uncertainty (95% confidence level with coverage factor of 2) for frequency ranges tested during calibration are as follows:
5-9 Hz; +/- 2.0%, 10-99 Hz; +/- 1.5%, 100-1999 Hz; +/- 1.0%, 2-10 kHz; +/- 2.5%, 10-15 kHz; +/- 5%.

Technician: _____

Daniel Lee

Date: _____

8/16/2024



PCB PIEZOTRONICS
AN AMPHENOL COMPANY

HEADQUARTERS: 3425 WALDEN AVENUE - DEPEW, NY 14043
CALIBRATION PERFORMED AT: 10869 HIGHWAY 903 - HALIFAX, NC 27839
TEL: +1 (888) 684-0013 - FAX: +1 (716) 685-3886 - www.pcb.com

CAL 57-380689190.147+0

PAGE 1 OF 1

ACS-1



F). PLANOS

G). PANEL FOTOGRÁFICO



Configuración del DAQ



Instalación de sensores



Lectura de vibraciones



Sistema DAQ



Acelerómetros empelados



Instalación de Acelerómetros



Instalación de Acelerómetros



Instalación de Acelerómetros



Vibraciones de suelo



Instalación de Acelerómetros



Instalación de Geófono



Instalación de Geófono



Lectura del Geófono en ventana



Lectura del Geófono en gradas



Lectura del Geófono en ventana



Instalación de Geófono en terreno



Instalación del Geófono en terreno



Lectura del Geófono en torre vía wifi