



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE AGUASCALIENTES

CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y ESTRUCTURAS

TESIS

**IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE NAKAMURA PARA EL
DIAGNÓSTICO ESTRUCTURAL DEL MUSEO DE LA
INSURGENCIA EN PABELLÓN DE HIDALGO, RINCÓN DE
ROMOS, AGUASCALIENTES.**

PRESENTA

JULIO CÉSAR JIMÉNEZ MEDINA

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL
ESPECIALIDAD EN EL ÁREA DE ESTRUCTURAS

TUTOR:

DR. JESÚS PACHECO MARTÍNEZ

COTUTORA:

DRA. EDITH ESTEFANÍA ORENDAY TAPIA

ASESOR:

DR. RAUDEL PADILLA CENICEROS

AGUASCALIENTES, AGS. NOVIEMBRE DE 2023

Ma. Guadalupe Lira Peralta
DECANO (A) DEL CENTRO CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

PRESENTE

Por medio del presente como **TUTOR** designado del estudiante **JULIO CÉSAR JIMÉNEZ MEDINA** con ID **163628** quien realizó la tesis titulada: **IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE NAKAMURA PARA EL DIAGNÓSTICO ESTRUCTURAL DEL MUSEO DE LA INSURGENCIA EN PABELLÓN DE HIDALGO, RINCÓN DE ROMOS, AGUASCALIENTES**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 30 de noviembre de 2023



Dr. Jesús Padrieco Martínez
Tutor de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

Elaborado por: Depto. Apoyo al Posgrado.
Revisado por: Depto. Control Escolar/Depto. Gestión de Calidad.
Aprobado por: Depto. Control Escolar/ Depto. Apoyo al Posgrado.

Código: DO-918-FO-07
Actualización: 01
Emisión: 17/05/19

Ma. Guadalupe Lira Peralta
DECANO (A) DEL CENTRO CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

PRESENTE

Por medio del presente como **COTUTORA** designada del estudiante **JULIO CÉSAR JIMÉNEZ MEDINA** con ID **163628** quien realizó la tesis titulada: **IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE NAKAMURA PARA EL DIAGNÓSTICO ESTRUCTURAL DEL MUSEO DE LA INSURGENCIA EN PABELLÓN DE HIDALGO, RINCÓN DE ROMOS, AGUASCALIENTES**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 30 de noviembre de 2023



Dra. Edith Estefanía Orenday Tapia
Cotutora de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

Elaborado por: Depto. Apoyo al Posgrado.
Revisado por: Depto. Control Escolar/Depto. Gestión de Calidad.
Aprobado por: Depto. Control Escolar/ Depto. Apoyo al Posgrado.

Código: DO-SEI-FO-07
Actualización: 01
Emisión: 17/05/19

CARTA DE VOTO APROBATORIO
INDIVIDUAL

Ma. Guadalupe Lira Peralta
DECANO (A) DEL CENTRO CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

PRESENTE

Por medio del presente como **ASESOR** designada del estudiante **JULIO CÉSAR JIMÉNEZ MEDINA** con ID **163628** quien realizó la tesis titulada: **IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE NAKAMURA PARA EL DIAGNÓSTICO ESTRUCTURAL DEL MUSEO DE LA INSURGENCIA EN PABELLÓN DE HIDALGO, RINCÓN DE ROMOS, AGUASCALIENTES**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 30 de noviembre de 2023


Dr. Raudel Padilla Ceniceros
Asesor de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

laborado por: Depto. Apoyo al Posgrado.
revisado por: Depto. Control Escolar/Depto. Gestión de Calidad.
probado por: Depto. Control Escolar/ Depto. Apoyo al Posgrado.

Código: DO-SES-FO-07
Actualización: 01
Emisión: 17/05/19



DICTAMEN DE LIBERACIÓN ACADÉMICA PARA INICIAR LOS TRÁMITES DEL EXAMEN DE GRADO



Fecha de dictaminación dd/mm/aaaa: 30 de noviembre de 2023

NOMBRE: Julio César Jiménez Medina **ID** 163628

PROGRAMA: Maestría en Ingeniería Civil **LGAC (del posgrado):** Área de Estructuras

TIPO DE TRABAJO: () Tesis () Trabajo Práctico

TÍTULO: IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE NAKAMURA PARA EL DIAGNÓSTICO ESTRUCTURAL DEL MUSEO DE LA INSURGENCIA EN PABELLÓN DE HIDALGO, RINCÓN DE ROMOS, AGUASCALIENTES

IMPACTO SOCIAL (señalar el impacto logrado): Derivado del particular interés del Instituto Cultural del Aguascalientes por preservar este inmueble, esta investigación aporta el primero modelo integral del edificio, lo que abona a su conservación para que la sociedad siga interactuando con este espacio público.

INDICAR	SI	NO	N.A. (NO APLICA)	SEGÚN CORRESPONDA:
<i>Elementos para la revisión académica del trabajo de tesis o trabajo práctico:</i>				
SI				El trabajo es congruente con las LGAC del programa de posgrado
SI				La problemática fue abordada desde un enfoque multidisciplinario
SI				Existe coherencia, continuidad y orden lógico del tema central con cada apartado
SI				Los resultados del trabajo dan respuesta a las preguntas de investigación o a la problemática que aborda
SI				Los resultados presentados en el trabajo son de gran relevancia científica, tecnológica o profesional según el área
SI				El trabajo demuestra más de una aportación original al conocimiento de su área
SI				Las aportaciones responden a los problemas prioritarios del país
SI				Generó transferencia del conocimiento o tecnológica
SI				Cumple con la ética para la investigación (reporte de la herramienta antiplagio)
<i>El egresado cumple con lo siguiente:</i>				
SI				Cumple con lo señalado por el Reglamento General de Docencia
SI				Cumple con los requisitos señalados en el plan de estudios (créditos curriculares, optativos, actividades complementarias, estancia, predoctoral, etc)
SI				Cuenta con los votos aprobatorios del comité tutorial, en caso de los posgrados profesionales si tiene solo tutor podrá liberar solo el tutor
SI				Cuenta con la carta de satisfacción del Usuario
SI				Coincide con el título y objetivo registrado
SI				Tiene congruencia con cuerpos académicos
SI				Tiene el CVU del Conacyt actualizado
N.A.				Tiene el artículo aceptado o publicado y cumple con los requisitos institucionales (en caso que proceda)
<i>En caso de Tesis por artículos científicos publicados</i>				
N.A.				Aceptación o Publicación de los artículos según el nivel del programa
N.A.				El estudiante es el primer autor
N.A.				El autor de correspondencia es el Tutor del Núcleo Académico Básico
N.A.				En los artículos se ven reflejados los objetivos de la tesis, ya que son producto de este trabajo de investigación.
N.A.				Los artículos integran los capítulos de la tesis y se presentan en el idioma en que fueron publicados
N.A.				La aceptación o publicación de los artículos en revistas indexadas de alto impacto

Con base a estos criterios, se autoriza se continúen con los trámites de titulación y programación del examen de grado:

Sí
 No

Elaboró:

FIRMAS

* NOMBRE Y FIRMA DEL CONSEJERO SEGÚN LA LGAC DE ADSCRIPCIÓN:

Dr. Mario Eduardo Zermeño de León

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO TÉCNICO:

Dr. Martín Hernández Márin

* En caso de conflicto de intereses, firmará un revisor miembro del NAB de la LGAC correspondiente distinto al tutor o miembro del comité tutorial, designado por el Decano

Revisó:

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO:

Dr. Mario Ernesto Espinoza Díaz de León

Autorizó:

NOMBRE Y FIRMA DEL DECANO:

M. en I. Ma. Guadalupe Lira Peralta

Nota: procede el trámite para el Depto. de Apoyo al Posgrado

En cumplimiento con el Art. 105C del Reglamento General de Docencia que a la letra señala entre las funciones del Consejo Académico: ... Cuidar la eficiencia terminal del programa de posgrado y el Art. 105F las funciones del Secretario Técnico, llevar el seguimiento de los alumnos.

Elaborado por: D. Apoyo al Posg.
Revisado por: D. Control Escolar/D. Gestión de Calidad.
Aprobado por: D. Control Escolar/ D. Apoyo al Posg.

Código: DO-SEE-FO-15
Actualización: 01
Emisión: 28/04/20

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Aguascalientes por recibirme en sus aulas y brindarme el espacio para continuar con mis estudios. A Conacyt por otorgarme una beca y darme oportunidad de crecer profesionalmente al financiar mis estudios de posgrado.

A mi tutor, el Dr. Jesús Pacheco Martínez por sus conocimientos y la orientación recibida a lo largo de estos dos años. A mi cotutora la Dra. Edith Estefanía Orenday Tapia por la motivación recibida y al Dr. Raudel Padilla Ceniceros por su paciencia y comprensión.

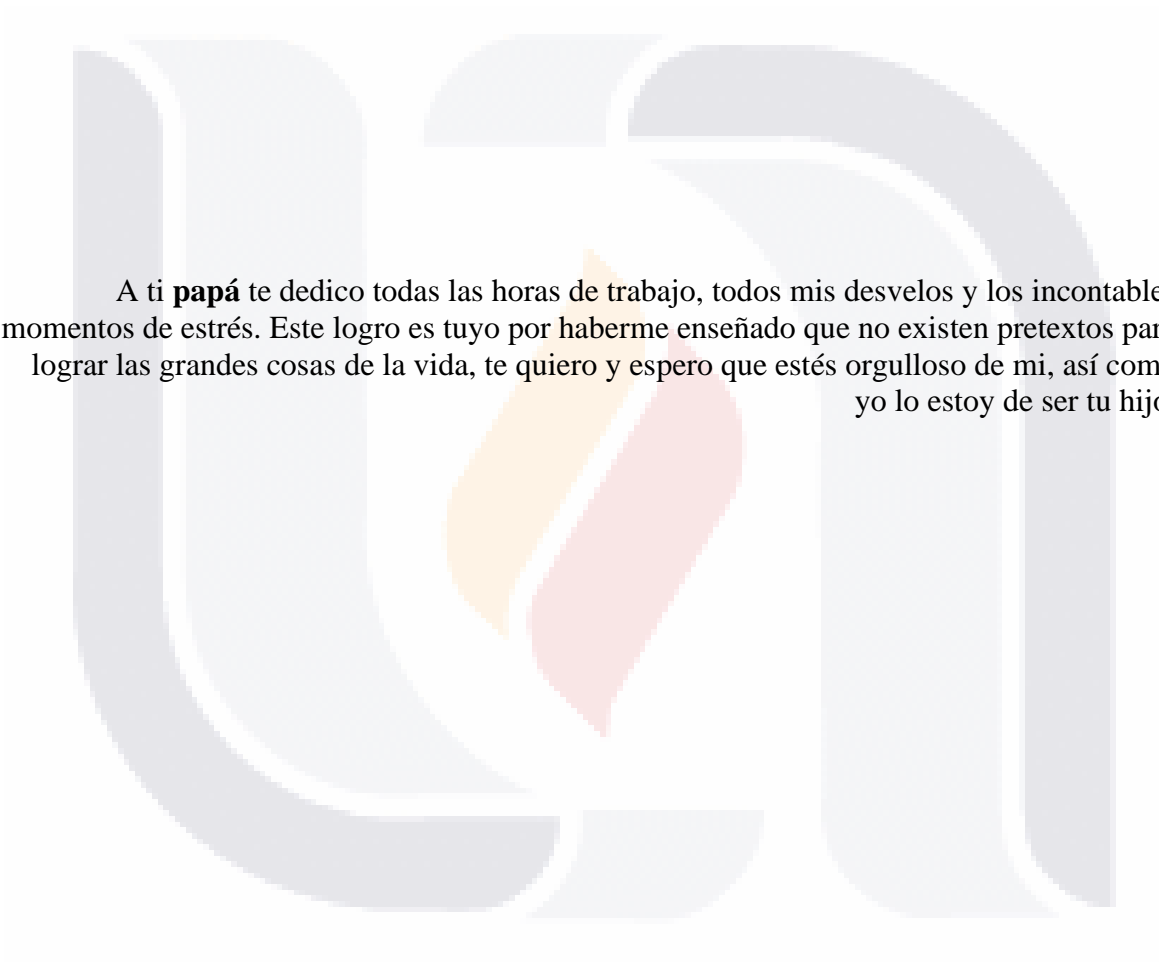
A mi padre por haber cuidado de mí y de mi hermana desde el momento en que mi madre falleció, porque a pesar del gran vacío que me quedó al no tenerla siempre tuve tu figura y nos llenaste de amor y cariño, gracias por todas tus enseñanzas, por tu apoyo incondicional, gracias por ser papá y mamá y ser mi guía en esta vida. A dios por haber puesto las cosas tan difíciles al demostrarme que la vida puede golpear muy duro, sin embargo, agradezco el hecho de poder cuidar de ti como tu cuidaste de mí.

A mi esposa Angélica por estar conmigo en la etapa más difícil de mi vida apoyándome para lograr este objetivo. A mi hijo José Leonardo por ser esa motivación que necesitaba en los momentos más difíciles.

A la familia Jiménez Aragón por habernos apoyado a mi hermana y a mí en los momentos más difíciles de nuestras vidas, sin ustedes no sería posible este logro. A mis tías por el cariño tan inmenso que le han demostrado a mi padre al cuidar de él para que mi hermana y yo tengamos un respiro para continuar con nuestra formación profesional. En especial a mi tía Angelita y mi tía Martina por no dejar de alentarme durante estos dos años, gracias por echar todo en la balanza por amor a mi padre y a nosotros, les estaré eternamente agradecido por todas sus muestras de cariño.

A mi compañero de licenciatura y amigo Joel Ramos por ser incondicional y apoyarme con sus conocimientos para conseguir este logro. A mis compañeros y amigos, Roberto, Brandon y Christian por dos años compartiendo las aulas y de gratos momentos a su lado.

DEDICATORIA



A ti **papá** te dedico todas las horas de trabajo, todos mis desvelos y los incontables momentos de estrés. Este logro es tuyo por haberme enseñado que no existen pretextos para lograr las grandes cosas de la vida, te quiero y espero que estés orgulloso de mi, así como yo lo estoy de ser tu hijo.

INDICE GENERAL

INDICE GENERAL	1
ÍNDICE DE TABLAS	4
ÍNDICE DE FIGURAS	5
RESUMEN	9
ABSTRACT	10
1. Introducción	11
1.1 Planteamiento del problema (Pregunta de Investigación).....	12
1.2 Objetivo General.....	13
1.2.1 Objetivos específicos	13
1.3 Justificación	14
1.4 Hipótesis de Investigación	15
2. Estado del arte	16
2.1 Métodos de valoración de edificaciones históricas.....	16
2.2 Aspectos generales del estudio de estructuras antiguas.....	19
2.2.1 Características de la mampostería histórica	19
2.3 Estudios previos.....	24
3. Marco teórico.....	31
3.1 Definiciones	31
3.2 Patologías en edificios históricos.....	33
3.3 Daños en edificaciones históricas	34
3.3.1 Grietas y fisuras	34
3.3.2 Desplazamientos en grietas	34
3.4 Falla geológica.....	35
3.4.1 Tipos de fallas geológicas	35
3.5 Caracterización de materiales	36

3.6 Métodos NDT	36
3.7 Método de vibración ambiental	36
3.8 Teoría del método de Nakamura.....	37
3.8.1 Función de transferencia	38
3.8.2 Selección de curvas H/V	40
3.9 Método de Elementos Finitos	43
3.10 Propiedades dinámicas.....	43
3.11 Pruebas no destructivas.....	44
4. Antecedentes del Museo de la Insurgencia.....	45
4.1 Estudio Histórico	45
4.2 Intervenciones estructurales.....	45
5. Metodología.....	47
5.1 Levantamientos	47
5.1.1 Dimensiones del Museo y de sus elementos estructurales	47
5.1.2 Levantamiento de daños.....	50
5.2 Monitoreo de grietas	54
5.3 Modelo estructural del Museo	58
5.3.1 Características generales del Museo	58
5.3.2 Materiales.....	59
5.4 Metodología de mediciones de vibración ambiental.....	60
5.4.1 Equipo.....	60
5.4.2 Selección de puntos de medición	61
5.5 Caracterización dinámica del terreno.....	62
5.5.1 Procesamiento de datos.....	63
5.6 Caracterización dinámica de la estructura	65
6. Análisis estructural	68
6.1 Análisis por cargas gravitacionales	68
6.2 Análisis modal	72
6.3 Frecuencias naturales en suelo y el edificio.....	78

6.4 Calibración del modelo 86

6.5 Espectros de diseño..... 90

7. Resultados del análisis estructural..... 94

 7.1 Revisión de estados límite 94

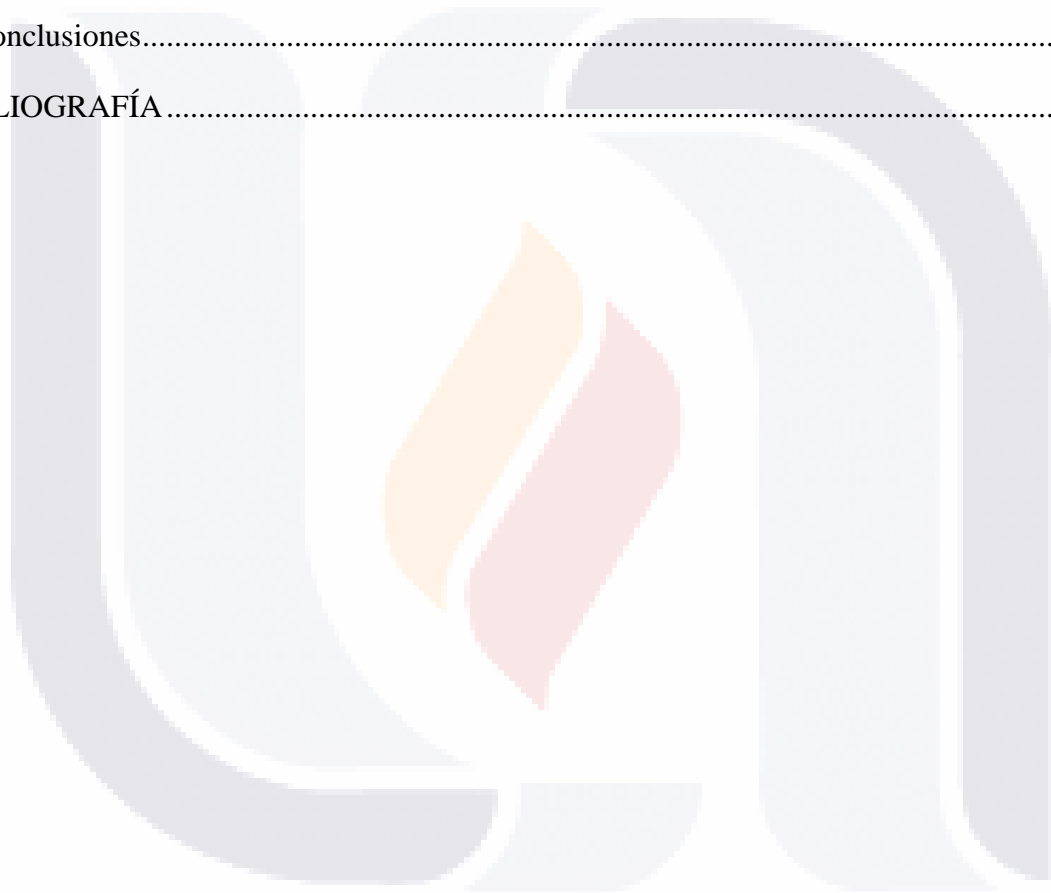
 7.1.1 Estado límite de servicio 94

 7.1.2 Estado límite de colapso 103

8. Discusión de Resultados..... 107

9. Conclusiones..... 108

BIBLIOGRAFÍA..... 109



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades mecánicas de la mampostería histórica (Meli, 1998).....	21
Tabla 2. Velocidad de onda y características de seis sistemas constructivos del Templo de San Antonio de Padua (Orenday Tapia, 2018).....	23
Tabla 3. Propiedades mecánicas de los materiales empleados en la construcción y rehabilitación del Museo de la Insurgencia. Montalvo (2013).....	24
Tabla 4. Esfuerzos principales en columnas y arcos norte (Montalvo Delgado, 2013).	27
Tabla 5. Esfuerzos principales en columnas y arcos sur (Montalvo Delgado, 2013).....	28
Tabla 6. Umbral de valores de desviación estándar para la amplitud y frecuencia (SESAME, 2004).....	42
Tabla 7. Registro de lecturas de desplazamientos.	55
Tabla 8. Propiedades mecánicas de los materiales del modelo numérico. Chávez (2010) ..	60
Tabla 9. Formas modales del Museo de la Insurgencia (bloque 1). Fuente: elaboración propia.....	72
Tabla 10. Formas modales del Museo de la Insurgencia (bloque 2)	74
Tabla 11. Formas modales del Museo de la Insurgencia (bloque 3)	76
Tabla 12. Tabla de frecuencias modales sin calibrar.....	87
Tabla 13. Tabla de frecuencias modales calibradas.	88
Tabla 14. Propiedades mecánicas empleadas en la elaboración del modelo numérico.....	89
Tabla 15. Grupos y clases estructurales. Fuente: Manual de Diseño de Obras Civiles de la CFE.....	90
Tabla 16. Parámetros espectrales. Fuente: Manual de Diseño de Obras Civiles de la CFE.	91
Tabla 17. Desplazamientos principales por sismo en bloque 1.....	99
Tabla 18. Principales desplazamientos por sismo en bloque 2.....	100
Tabla 19. Desplazamientos principales por sismo en bloque 3.....	103
Tabla 20. Cortantes basales producidos por el espectro de diseño reducido.....	105
Tabla 21. Cortantes basales resistentes y actuantes por sismo.	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistemas constructivos del Templo de San Antonio de Padua. Orenday T. (2018)	22
Figura 2. Colocación de geófonos en mampostería. Orenday T. (2018).....	23
Figura 3. Arcos y columnas norte sin deformación del Museo de la Insurgencia (Montalvo Delgado, 2013).	26
Figura 4, Arcos y columnas sur sin deformación del Museo de la Insurgencia (Montalvo Delgado, 2013).	26
Figura 5. Arcos y columnas norte con deformación del Museo de la Insurgencia (Montalvo Delgado, 2013).	26
Figura 6. Arcos y columnas sur con deformación del Museo de la Insurgencia (Montalvo Delgado, 2013).	27
Figura 7.Elevación de arcos norte. (Montalvo Delgado, 2013).....	46
Figura 8. Elevación de arcos sur. (Montalvo Delgado, 2013).....	46
Figura 9. Planta del Museo de la Insurgencia (Montalvo Delgado, 2013).....	48
Figura 10. Identificación de los elementos estructurales del Museo de la Insurgencia. Fuente: elaboración propia	49
Figura 11. Identificación de junta constructiva y bóvedas del Museo de la Insurgencia. Fuente: elaboración propia	49
Figura 12. Testigo de acrílico para medir desplazamientos. Fuente: elaboración propia	54
Figura 13. Ubicación de testigos. Fuente: elaboración propia	55
Figura 14. Tendencias de desplazamientos en T2. Fuente: elaboración propia	56
Figura 15. Tendencias de desplazamientos en t4. Fuente: elaboración propia.....	56
Figura 16. Tendencias de desplazamientos en T4. Fuente: elaboración propia	57
Figura 17. Modelo de elementos finitos (vista tridimensional). Fuente: elaboración propia	58
Figura 18. Modelo de elementos finitos (fachada principal). Fuente: elaboración propia...	59
Figura 19. Modelo de elementos finitos (fachada de lado norte). Fuente: elaboración propia	59

Figura 20. Modelo de elementos finitos (fachada lado sur). Fuente: elaboración propia 59

Figura 21. Sismógrafo Geode Ultra-light. 61

Figura 22. Imagen de sensores de velocidad empleados en la toma de lecturas. Fuente: elaboración propia 61

Figura 23. Puntos de medición de vibración ambiental..... 62

Figura 24. Señales sísmicas registradas en el terreno. Fuente: elaboración propia..... 63

Figura 25. Seccionamiento de señal sísmica en ventanas de tiempo. Fuente: manual SESAME 64

Figura 26. Promedio de espectros horizontales. Fuente: elaboración propia 64

Figura 27. Razón espectral H/V. Fuente: elaboración propia..... 65

Figura 28. Promedio de curvas H/V. Fuente: manual SESAME 65

Figura 29. Mediciones de vibración ambiental sobre el punto 2..... 66

Figura 30. Mediciones de vibración ambiental sobre el punto 3..... 66

Figura 31. Mediciones de vibración ambiental sobre el punto 4..... 66

Figura 32. Mediciones de vibración ambiental sobre el punto 5..... 67

Figura 33. Mediciones de vibración ambiental sobre el punto 6..... 67

Figura 34. Esfuerzos axiales verticales en kg/cm^2 (vista tridimensional). Fuente: elaboración propia. 68

Figura 35. Esfuerzos axiales en arcos del lado norte en kg/cm^2 . Fuente: elaboración propia 69

Figura 36. Esfuerzos axiales verticales en la base en kg/cm^2 . Fuente: elaboración propia.. 70

Figura 37. Desplazamientos por peso propio en dirección vertical en mm (bloque 1). Fuente: elaboración propia 71

Figura 38. Desplazamientos por peso propio en dirección vertical en mm (bloque 2). Fuente: elaboración propia 71

Figura 39. Desplazamientos por peso propio en dirección vertical en mm (bloque 3). Fuente: elaboración propia 71

Figura 40. Grafica de función de transferencia del terreno donde se ubica el Museo de la Insurgencia. Fuente: elaboración propia..... 78

Figura 41. Espectro de frecuencias en el punto 2 (dirección x). Fuente: elaboración propia 79

Figura 42. Espectro de frecuencias en el punto 2 (dirección Y). Fuente: elaboración propia 79

Figura 43. Espectro de frecuencias en el punto 2 (dirección V). Fuente: elaboración propia 80

Figura 44. Espectro de frecuencias en el punto 3 (dirección X). Fuente: elaboración propia 80

Figura 45. Espectro de frecuencias en el punto 3 (dirección Y). Fuente: elaboración propia 81

Figura 46. Espectro de frecuencias en el punto 3 (dirección V). Fuente: elaboración propia 81

Figura 47. Espectro de frecuencias en el punto 4 (dirección X). Fuente: elaboración propia 82

Figura 48. Espectro de frecuencias en el punto 4 (dirección Y). Fuente: elaboración propia 82

Figura 49. Espectro de frecuencias en el punto 4 (dirección V). Fuente: elaboración propia 83

Figura 50. Espectro de frecuencias en el punto 5 (dirección X). Fuente: elaboración propia 83

Figura 51. Espectro de frecuencias en el punto 5 (dirección Y). Fuente: elaboración propia 84

Figura 52. Espectro de frecuencias en el punto 5 (dirección V). Fuente: elaboración propia 84

Figura 53. Espectro de frecuencias en el punto 6 (dirección X). Fuente: elaboración propia 85

Figura 54. Espectro de frecuencias en el punto 6 (dirección Y). Fuente: elaboración propia 85

Figura 55. Espectro de frecuencias en el punto 6 (dirección V). Fuente: elaboración propia 86

Figura 56. Mapa de regionalización sísmica de la República mexicana. Fuente: Manual de diseño de obras civiles de la CFE. 91

Figura 57. Espectro de diseño elástico para el Museo de la Insurgencia obtenido con el programa PRODISIS. 92

Figura 58. Espectro de diseño y espectro reducido por inelasticidad obtenido con el programa PRODISIS. 92

Figura 59. Factores de reducción del espectro de diseño elástico obtenido del programa PRODISIS. 93

Figura 60. Esfuerzos por peso propio en dirección vertical para condiciones de servicio en kg/cm^2 (bloque 1), obtenidos del programa Sap2000. 95

Figura 61. Esfuerzos por peso propio en dirección vertical para condiciones de servicio en kg/cm^2 (bloque 2), obtenidos del programa Sap2000. 95

Figura 62. Esfuerzos por peso propio en dirección vertical para condiciones de servicio en kg/cm^2 (bloque 3), obtenidos del programa Sap2000. 96

Figura 63. Deformaciones en sentido vertical en mm (bloque 1), obtenidos de Sap2000 96

Figura 64. Deformaciones en sentido vertical en mm (bloque 2), obtenidos de Sap2000. .. 97

Figura 65. Deformaciones en sentido vertical en mm (bloque 3), obtenidos de Sap2000. .. 97

Figura 66. Puntos para medición de desplazamientos por sismo en bloque 1. Imagen obtenida de Sap2000. 98

Figura 67. Puntos para medición de desplazamientos por sismo en bloque 2. Imagen obtenida de Sap2000. 100

Figura 68. Puntos para medición de desplazamientos por sismo en bloque 2. Imagen obtenida de Sap2000. 102

Figura 69. Esfuerzos de compresión en sentido vertical en kg/cm^2 del Museo de la Insurgencia obtenidos de Sap2000. 104

RESUMEN

La conservación del patrimonio edificado cada vez ha tomado un carácter más prioritario para las diversas instituciones encargadas de su cuidado debido a los valores intrínsecos que guardan, lo que ha generado un aumento de profesionales que se dedican al estudio y conservación de inmuebles históricos. De acuerdo con lo anterior, en esta investigación se presentan los procedimientos seguidos para diagnosticar estructuralmente al Museo de la Insurgencia ubicado en la comunidad de Pabellón de Hidalgo, Rincón de Romos, Aguascalientes.

Esta investigación se desarrolla a partir de métodos no destructivos como el uso de mediciones de vibración ambiental para determinar las frecuencias naturales del edificio y el suelo utilizando el Método de Nakamura además del monitoreo de grietas presentes en el inmueble. El informe se enfoca en la descripción total del inmueble desde el punto de vista estructural, pasando por su configuración geométrica, análisis de daños, una consulta de artículos e investigaciones relacionadas con caracterización de materiales similares a los presentes en el Museo de la Insurgencia y la caracterización dinámica del inmueble para la correcta realización de un modelo numérico calibrado y validado por medio del cual sea posible replicar el comportamiento real del edificio en la medida de lo posible.

Entre los resultados obtenidos se destaca principalmente el buen estado de la mampostería y su buen comportamiento ante cargas gravitacionales resistiendo satisfactoriamente los efectos de compresión, por otro lado, la respuesta de la estructura ante cargas laterales es limitada en sentido transversal, debido a la carencia de elementos estructurales que soporten dichas acciones. Lo anterior, con base en el hecho de que el museo está dividido en tres bloques independientes como producto de la colocación de una junta fría en sentido transversal a causa de la actividad de una falla geológica.

Palabras clave: Patrimonio, Nakamura, Caracterización, Dinámica, Museo de la Insurgencia.

ABSTRACT

The conservation of built heritage has increasingly taken on a higher priority for the various institutions in charge of its care due to the intrinsic values they hold, which has generated an increase in professionals dedicated to the study and conservation of historical properties. In accordance with the above, this research presents the procedures followed to structurally diagnose the Insurgency Museum located in the community of Pabellón de Hidalgo, Rincón de Romos, Aguascalientes.

This research is developed from non-destructive methods such as the use of environmental vibration measurements to determine the natural frequencies of the building and the ground using the Nakamura Method in addition to monitoring cracks present in the property. The report focuses on the total description of the property from a structural point of view, including its geometric configuration, damage analysis, a consultation of articles and research related to the characterization of materials similar to those present in the Museum of Insurgency and dynamic characterization of the property for the correct realization of a calibrated and validated numerical model through which it is possible to replicate the real behavior of the building to the extent possible.

Among the results obtained, the main highlights are the good condition of the masonry and its good behavior under gravitational loads, satisfactorily resisting the effects of compression. On the other hand, the response of the structure under lateral loads is limited in the transverse direction, due to the lack of structural elements that support these actions. The above, because the museum is divided into three independent blocks as a result of the placement of a cold joint in a transverse direction due to the activity of a geological fault.

Keywords: Heritage, Nakamura, Characterization, Dynamics, Museum of Insurgency.

1. Introducción

La historia y la cultura de las antiguas civilizaciones siguen representadas hoy en día en los edificios antiguos que a pesar del paso de los años continúan de pie. Desde tiempos remotos el ser humano se refugia en estos espacios que constituyen el entorno donde transcurre y se desarrolla la vida cotidiana

El hombre ha construido diversos tipos de edificaciones y monumentos a través de la historia en muchos de los casos para conmemorar personajes o sucesos importantes. Antiguas civilizaciones han erigido diversas edificaciones alrededor del mundo, las cuales muestran su legado histórico y arquitectónico. En este sentido, de acuerdo con Padilla (2017), las edificaciones históricas son parte importante de la sociedad ya que brindan de identidad y carácter a las personas, las vinculan con su pasado y su cultura. A través del tiempo estas construcciones son afectadas por diversos factores como el agua, el viento, la erosión y el desgaste por la actividad del hombre lo cual provoca que estas se vayan deteriorando.

A partir de los años 80's la preservación y revalorización del patrimonio edificado ha tomado un carácter más prioritario (Maricarmen, 2020), esto debido a los beneficios que trae consigo la afluencia masiva de turistas hacia los centros históricos.

De acuerdo con el INAH en Aguascalientes existen 114 monumentos históricos distribuidos en 9 de sus municipios (Padilla, 2017), los cuales se deterioran con el paso del tiempo debido al desgaste por diversos factores de intemperismo, así como los movimientos del suelo donde se ubican entre otras causas.

El Museo de la Insurgencia ubicado en la comunidad de Pabellón de Hidalgo forma parte del camino Real de Tierra Adentro, además es considerado como patrimonio cultural de la humanidad debido a que fue testigo de uno de los hechos más relevantes en la guerra de independencia de nuestro país. Actualmente este edificio es afectado por la actividad de una falla geológica y la aparición de nuevas grietas en el suelo sugiere que los desplazamientos inducidos por la falla comprometen la estabilidad de algunas zonas del museo.

De acuerdo con lo anterior la preservación de los edificios antiguos es una rama importante de investigación desde el punto de vista estructural en donde el objetivo principal es determinar si un edificio posee la suficiente estabilidad para poder mantenerse de pie con

adecuados márgenes de seguridad resistiendo las fuerzas que actúan sobre el (cargas vivas, muertas, cargas laterales por sismo y viento, etc.).

La presente investigación abordará temas de valoración de los edificios históricos, pero desde una perspectiva más enfocada a la parte estructural de la construcción empleando medios computacionales para realizar un modelo que permita analizar y verificar la estabilidad del edificio.

Para alimentar dicho modelo numérico se deberán conocer las características de los materiales que constituyen a la estructura de la edificación tales como el módulo de Young, además, de anomalías como vacíos o algún deterioro que se presente entre otras. Debido al valor histórico que posee el edificio, llevar a cabo la caracterización de los materiales que lo constituyen resulta complejo, ya que de acuerdo con la carta de Venecia (ICOMOS, 2003), existen diversas restricciones que limitan la posibilidad de obtener testigos de prueba.

Debido a lo anterior en esta investigación resulta crucial la implementación de métodos convenientes que permitan conocer las características de dichos materiales. En este sentido este trabajo se encuentra en la línea de investigación de los llamados Métodos no Destructivos (NDT, por sus siglas en inglés) por medio de la implementación de estudios que se derivan del área de la geofísica.

1.1 Planteamiento del problema (Pregunta de Investigación)

Considerado como parte del Camino Real de Tierra Adentro, El Museo de la Insurgencia ubicado en la comunidad de Pabellón de Hidalgo en el municipio de Rincón de Romos, Aguascalientes, actualmente es afectado directamente por la actividad de la falla poniente ubicada en el valle de Aguascalientes. El edificio presenta diversas afectaciones ya que la falla separa al edificio en dirección de norte a sur afectando directamente a los muros, bóvedas y arcos del patio central, y las salas de exhibición presentando, un desnivel en el piso aproximado a 15cm, una separación horizontal en las bóvedas de 10cm. De acuerdo con Montalvo Delgado (2013), se presentaron desplazamientos en lo vertical y horizontal de 3mm y 8mm respectivamente en un lapso de 7 meses. Con el propósito de reducir los esfuerzos inducidos directamente a la estructura debido a la actividad de la falla, el Museo ha sufrido algunas intervenciones colocando una junta fría en los elementos estructurales, lo cual, ha

aliviado la distribución de esfuerzos en la estructura de acuerdo con la investigación realizada por Montalvo, (2013) sin embargo aún persiste la necesidad de realizar un análisis más completo de la estructura.

De acuerdo con lo anterior, resulta de gran relevancia responder a la siguiente pregunta **¿Cuál es el comportamiento actual de los elementos que constituyen la estructura del Museo de la Insurgencia después de sufrir la actividad de la falla?** Para responder a la pregunta anterior será necesario llevar a cabo una modelación numérica, la cual deberá ser válida para conocer el comportamiento de la estructura, y profundizando un poco más en el tema surge la necesidad de emplear los métodos adecuados para determinar las características y parámetros de los materiales utilizados en la construcción.

Uno de los principales intereses cuando se trabaja con edificaciones consideradas como patrimonio edificado es no perturbar su composición original. Tomando como base lo anterior, los llamados métodos no destructivos (NDT) suponen una herramienta de gran ayuda para determinar los parámetros que han de alimentar al modelo numérico.

1.2 Objetivo General

Realizar un diagnóstico del Museo de la Insurgencia a través de un análisis estructural con un modelo numérico del edificio, validado mediante el contraste del comportamiento dinámico de dicho modelo y el comportamiento dinámico del edificio.

1.2.1 Objetivos específicos

- Realizar un modelo numérico que sirva de base para analizar el comportamiento estructural del Museo de la Insurgencia.
- Determinar las frecuencias naturales del suelo y del edificio a través de una campaña experimental de vibración ambiental.
- Monitorear los desplazamientos horizontales y verticales mediante la instalación de testigos de prueba.

1.3 Justificación

De acuerdo con datos del INEGI en el año 2019 el turismo representó el 8.7% del PIB a nivel nacional (INEGI, 2019). En este sentido surge la creciente preocupación de las ciudades por adentrarse en materia de políticas urbanas para la conservación del patrimonio histórico edificado.

Son muchos los turistas que viajan buscando lo tradicionalmente auténtico, templos, palacios, monumentos, museos y toda clase de edificaciones antiguas forman parte de su itinerario de vuelo debido a sus “**valores intrínsecos**”.

Cuando se habla de valores intrínsecos se refiere a todo aquello que se podría perder en caso de la desaparición del inmueble. En general hablamos de cinco valores (Peña, 2010): arquitectura, arte, económico, histórico y la ingeniería.

Existe una gran cantidad de inmuebles históricos alrededor del mundo que no son visitados debido a que no existe la infraestructura necesaria para que estos puedan ser visitados o porque son inseguros para el público, debido al grado de deterioro que estos presentan en su estructura.

La determinación de las características mecánicas, dinámicas y la geometría de los elementos estructurales presentes en la construcción es fundamental para determinar su comportamiento. Por medio de la obtención de probetas o muestras de los materiales se puede obtener dicha caracterización en laboratorios de ensaye, pero, debido a la importancia de estos edificios no es posible realizar pruebas destructivas que dañen a la construcción. Por lo tanto, los llamados métodos no invasivos suponen una alternativa muy viable para llevar a cabo el análisis de materiales.

Construida en el siglo XVII la ex hacienda de San Blas fue testigo de uno de los sucesos más importantes durante la guerra de independencia y fue abierta al público como museo en el año 1964 con el objetivo de difundir la historia del movimiento de independencia (Ramirez, 2023).

Dentro del Instituto Cultural del Aguascalientes, existe particular interés por conocer la salud estructural del Museo de la Insurgencia ya que este ha sido intervenido en sus elementos estructurales debido a que lo atraviesa una falla geológica activa asociada al proceso de subsidencia del valle de Aguascalientes, dicha intervención consistió en la

colocación de una junta constructiva en sentido transversal del edificio para reducir los sobre esfuerzos generados por los desplazamientos inducidos por la falla, sin embargo, existe la incertidumbre por conocer cómo se comporta actualmente ya que la falla sigue incrementando su salto.

A pesar de que ya se realizó un diagnóstico de la estructura, es importante mencionar que existe la necesidad de monitorear dicho comportamiento. En este sentido realizar una nueva modelación numérica validada proporcionará información valiosa.

Aunque el Museo de la Insurgencia posee sus propias cualidades y características en cuanto a materiales y configuración de su estructura, la presente investigación servirá de referencia para posteriores investigaciones realizadas a casos de estudio similares.

1.4 Hipótesis de Investigación

A través de un modelo numérico calibrado y validado es posible determinar el comportamiento estructural del Museo de la Insurgencia en que se considere la actividad de la falla geológica.

2. Estado del arte

En la literatura revisada se han encontrado varios artículos en los que se describen metodologías, métodos de caracterización, así como métodos de análisis estructural empleados por diversos autores para llevar a cabo diagnósticos de edificaciones históricas tomando en cuenta todos los aspectos importantes que estos representan.

En el presente capítulo se desarrollan temas relacionados con líneas de investigación de valoración de estructuras antiguas, además de las metodologías empleadas por diversos autores para llevar a cabo trabajos similares a este caso de estudio.

Para el estudio del estado del conocimiento actual se consultarán principalmente los aspectos mencionados a continuación:

1. Antes de abordar temas relacionados con el caso de estudio será necesario realizar primero una revisión de las metodologías empleadas en el análisis e investigaciones similares al caso de este estudio.
2. Investigación relacionada con los métodos no destructivos aplicados a edificios históricos para la caracterización mecánica y dinámica de los materiales de los elementos estructurales.
3. Investigar los diferentes métodos de análisis estructural empleados en la revisión de las estructuras antiguas.

2.1 Métodos de valoración de edificaciones históricas

Para Cedeño (2009), es claro que los criterios estructurales modernos están concebidos para diseñar, construir y revisar edificaciones nuevas de concreto y acero, sin embargo dichas especificaciones son de poca utilidad a la hora de realizar un diagnóstico a una edificación antigua debido su naturaleza, materiales de construcción y los métodos de construcción empleados para erigirlas por lo que resulta de gran relevancia el surgimiento de nuevas investigaciones encaminadas a establecer diferentes metodologías que ayuden al estructurista en la toma de decisiones sobre estos inmuebles.

Los estudios relacionados con las estructuras antiguas tienen algunas peculiaridades debido a que suelen presentarse varias limitaciones debido a las restricciones que los diferentes organismos encargados de su conservación suelen presentar. Una propuesta interesante es la que sugiere el autor Cedeño (2009), el cual establece una metodología encaminada al deterioro de los elementos estructurales aplicando la siguiente metodología:

1. **Anamnesis.** Se refiere a la sucesión de los hechos que han sucedido en la edificación. Obtener documentos relacionados con la concepción del proyecto original puede brindar información valiosa como los posibles métodos y técnicas constructivas empleadas en esas épocas, además, posibles intervenciones como agregados o demoliciones e información relevante como, por ejemplo, la ocurrencia de fenómenos naturales que hubiesen sometido al edificio a fuerzas externas como terremotos, inundaciones, huracanes, explosiones, etc.

En contraste con la realidad actual, toda información recabada en los estudios previos históricos brinda una mejor visión del panorama actual.

2. **Examen objetivo.** Es la etapa del reconocimiento donde se lleva a cabo la caracterización de los materiales mediante ensayos mecánicos.

Para llevar a cabo dicho reconocimiento se establecen 5 grupos de elementos:

- Estructuras
- Cerramientos
- Cubiertas
- Interiores
- Instalaciones

Se da mayor valor a los tres primeros ya que, estos elementos inciden de manera directa en la seguridad del edificio. En este sentido es necesario definir el estado actual del edificio considerando los aspectos geométricos y cinemáticos, constitutivos (de la naturaleza y propiedades de los materiales) y el aspecto estático (origen y magnitud de las cargas).

3. **Prognosis.** Es la etapa donde una vez realizado el diagnóstico de la estructura se pueden concluir las posibles causas del desequilibrio ya que el modelo ha permitido

relacionar las causas con los efectos y se pueden hacer conclusiones con que sirven como base para determinar el grado de intervención de la edificación.

Otra propuesta interesante es la metodología sugerida por el doctor Meli (2012), en la cual se centra en el deterioro de los elementos estructurales, así como en las fallas que estos presentan. En este sentido el autor describe tres aspectos fundamentales para llevar a cabo el diagnóstico:

- Análisis histórico. Evaluar el desempeño en el pasado puede permitir prever el desempeño futuro y dar indicaciones sobre el nivel de la seguridad de la estructura en su situación actual.
- Análisis cualitativo. Procedimiento inductivo, basado en comparar la situación actual de la estructura con la de otras similares cuyo comportamiento ha podido ser evaluado y confirmado.
- Análisis cuantitativo. Incluye modelos matemáticos resueltos con los principios y herramientas de la ingeniería estructural.

Una vez descritas las partes importantes del diagnóstico, el autor describe la secuencia de las etapas básicas para llevar a cabo una campaña de recolección de información con la cual se alimentará el proyecto de investigación:

- Reunir información histórica sobre la concepción de la estructura, las técnicas de construcción, de las modificaciones realizadas y del desempeño a lo largo del tiempo y de la situación actual.
- Determinación de las características estructurales; propiedades geométricas y mecánicas; preparar planos estructurales, levantamiento de daños y deterioros; determinar si los daños se han estabilizado.
- Estudios de campo, pruebas para determinar las características de los materiales estructurales y del subsuelo.
- Monitoreo, especialmente de grietas, desplomes y asentamientos.

2.2 Aspectos generales del estudio de estructuras antiguas.

Para llevar a cabo la correcta interpretación del Museo de la Insurgencia es necesario determinar las propiedades que han de dictar el comportamiento del edificio para lo cual se ha realizado una consulta de artículos y trabajos relacionados con el estudio de edificaciones antiguas con el fin de preservarlas sin afectar su integridad y sus valores intrínsecos.

Para los fines de este estudio queda más que evidente que desde el punto de vista estructural es crucial poder determinar las características mecánicas y dinámicas del Museo sin comprometer su integridad. De acuerdo con lo anterior, a continuación, se abordan temas relacionados con dicha caracterización.

2.2.1 Características de la mampostería histórica

El término de mampostería se refiere a la combinación de piedras o ladrillos prismáticos con mortero, por un lado, el mortero cumple con diversas funciones como rellenar los huecos existentes entre el acomodo de las piezas (piedras o ladrillos), fungir como un medio que dé continuidad a la correcta transmisión de las cargas, además, de unir a las piezas posicionadas de tal manera que permanezcan en el lugar deseado. El comportamiento de la mampostería histórica difiere de la mampostería moderna ya que sus propiedades dependen en gran medida de la calidad de los materiales con que se construyó, además, del grado de deterioro que esta presenta por la acción del tiempo, así como el arreglo de sus piezas y los procesos implementados en su construcción (Meli, 1998).

Chávez (2010) realizó un estudio sobre el comportamiento estructural de las edificaciones de mampostería histórica ante eventos sísmicos para lo cual determinó parámetros sus mecánicos. En dicho documento menciona que la mampostería de mejor calidad es aquella que contiene la menor cantidad de mortero y mayor cantidad de piedras, mejorando su comportamiento en la medida que el aparejo de éstas asegure una trabazón adecuada que garantice mayor estabilidad.

Para Chávez (2010) la mampostería se puede idealizar como una serie de capas superpuestas piedra-mortero que al ser comprimidas presentaran acortamiento en el sentido de la

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

aplicación de la carga, por el contrario, presentara un alargamiento en la dirección transversal a la dirección de los esfuerzos aplicados. Debido a la disparidad entre las rigideces de la piedra y el mortero, este último sufre deformaciones en ambas direcciones, por lo que el mortero presentará compresiones mientras que la piedra se tensionará en la dirección transversal. A causa de que el mortero queda confinado por las piedras, su falla en compresión no llega a ser crítica. Por otro lado debido a la baja resistencia en tensión de la piedra, esta presentará agrietamientos en su superficie para cargas elevadas.

Heyman (1968) menciona que las estructuras antiguas construidas a base de mampostería funcionan como sistemas de gravedad en donde las cargas inducidas son transmitidas a la base por medio de esfuerzos de compresión. Para que esto suceda es necesario que la aplicación de las cargas se de en el tercio medio de las secciones de los elementos cargados, lo cual se cumple generalmente para cargas gravitacionales, sin embargo, esto no sucede así cuando se producen desplazamientos laterales provocados por sismos ya que estos provocan que las cargas se salgan del tercio medio, lo cual provoca que se produzcan tensiones en la mampostería generando de esta manera agrietamientos al superar la poca resistencia a tensión que esta posee. Es evidente notar que, aunque no haya transmisión de esfuerzos de tensión, al cambiar el sentido de aplicación de las cargas laterales producidas por el sismo, las grietas se cierran y entonces transmiten esfuerzos de compresión y de cortante provocando de esta manera una redistribución de esfuerzos sobre la estructura, además, las grietas sirven como disipadores de energía inducida por el sismo.

Es evidente notar que el análisis de un material como la mampostería es complejo debido a su comportamiento no lineal. Por dicha razón surge la necesidad de desarrollar diferentes métodos de análisis que consideren el comportamiento no lineal de la mampostería. Chávez (2010) menciona los siguientes métodos implementados en el análisis en el intervalo inelástico de este material: **Micromodelo**, **Micromodelo simplificado** y **Macromodelos** los cuales utilizan como herramienta de análisis al Método de Elementos Finitos.

Meli (1998), clasifica a la mampostería de acuerdo con la forma, tamaño de las piezas y al acomodo sobre la matriz de mortero, lo cual provoca variaciones en la resistencia a

compresión que van desde 5 a 50kg/cm² (Meli, 1998). Por otro lado, el autor menciona que el módulo de elasticidad o de Young va desde 5000kg/cm² para mampostería de piedra irregular con exceso de mortero y 20,000kg/cm² con mampostería de buena calidad y menos cantidades de mortero. En la tabla 1 se observan diferentes valores de las propiedades mecánicas de mampostería (Meli, 1998).

Tabla 1. Propiedades mecánicas de la mampostería histórica (Meli, 1998)

Material	Peso volumétrico (t/m ³)	Resistencia a compresión (kg/cm ²)	Resistencia a cortante (kg/cm ²)	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)
Tepetate	1.8	2-5	0.5	3000
Bloques de tepetate con mortero de cal	1.8	5-10	0.5	5000
Ladrillo con mortero de lodo	1.6	5-10	1.0	5000
Ladrillo con mortero de cal	1.6	15-20	2.0	10000
Mampostería de piedra irregular con mortero de cal	2.0	10-15	0.5	5000
Mampostería de piedra de buena calidad	2.0	30	2.0	20000

Orenday (2018), llevó a cabo una investigación en el templo de San Antonio de Padua implementando un método proveniente de estudios geofísicos. Dicho método mide la velocidad de propagación de ondas (P y S) a través de un medio continuo, lo cual sirve como herramienta para determinar algunas características físicas y mecánicas de la mampostería aplicando la Teoría de la Elasticidad.

La exploración sismológica es comúnmente aplicada para conocer información acerca de la composición del subsuelo, como están configurados sus estratos y sus propiedades mecánicas.

En este sentido la autora realizó una serie de ensayos considerando una clasificación de 6 sistemas constructivos existentes en el edificio en el cual se contemplan características como el tipo de roca y el tipo de junteo de mortero utilizado para unir las piezas.

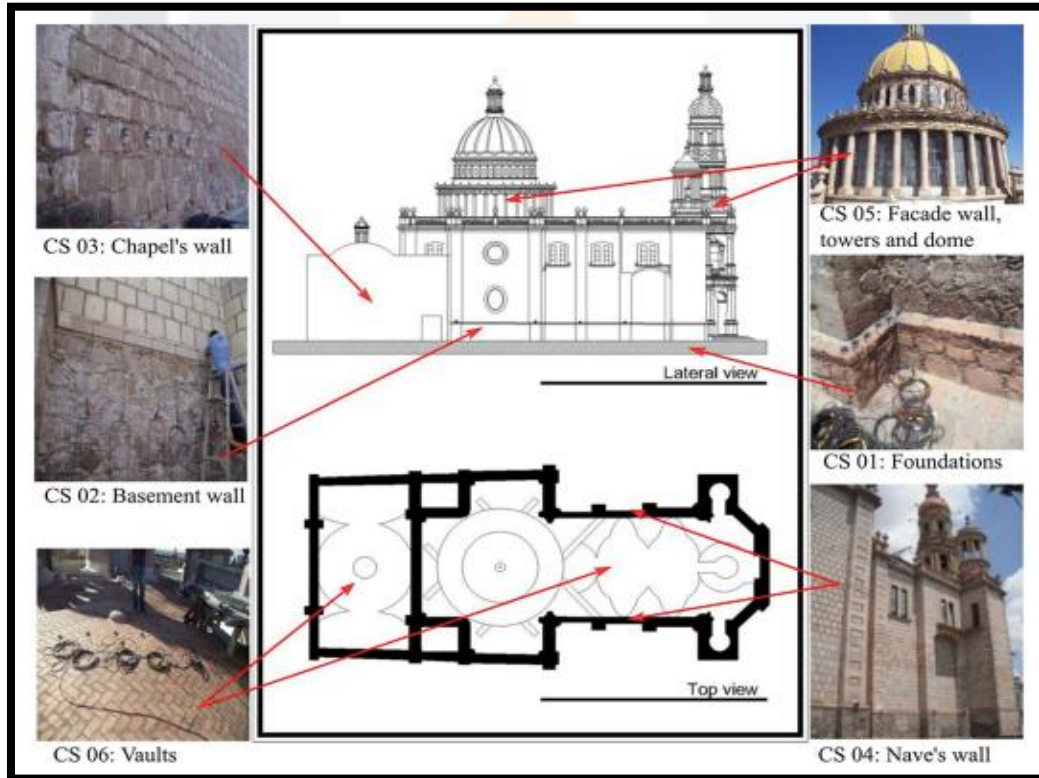


Figura 1. Sistemas constructivos del Templo de San Antonio de Padua. Orenday T. (2018)

La autora realiza mediciones con un sismógrafo y de 4 a 6 geófonos alineados y conectados a un sistema de cómputo para obtener las velocidades de onda sísmicas S y P como se muestra en la siguiente figura.



Figura 2. Colocación de geófonos en mampostería. Orenday T. (2018)

En la tabla 2 se presentan los resultados obtenidos por Orenday (2018) en las mediciones del Templo de San Antonio de Padua en los diferentes sistemas constructivos identificados.

Tabla 2. Velocidad de onda y características de seis sistemas constructivos del Templo de San Antonio de Padua (Orenday Tapia, 2018)

SISTEMA CONSTRUCTIVO / DATOS	VELOCIDAD DE ONDA (PROMEDIO)		PROPIEDADES MECÁNICAS CARACTERIZADAS (PROMEDIO)		
	Vp (m/s)	Vs (m/s)	P (kg/m ³)	E (Mpa)	fc (Mpa)
Cimentación	2002	955	2060	5103	0.32
Muro basal	1478	748	1920	2820	0.31
Muro de capilla	638	370	1560	530	0.23
Muro de nave principal	895	497	1690	1060	0.27
Muro de fachada, torres y domo	1294	655	1860	2100	0.32
Bóvedas	2313	1001	2150	5980	0.38

Dado que no se pudieron realizar muestreos de los materiales del templo para corroborar los resultados obtenidos con el método, el autor localizó valores teóricos y experimentales reportados por diversos autores y normas italianas observando que las mediciones realizadas no presentan una variación considerable respecto a los encontrados en la literatura.

2.3 Estudios previos

Montalvo (2013) realizó un diagnóstico estructural en el mismo Museo de la Insurgencia en el cual se basó en tres ejes fundamentales: caracterización mecánica de los materiales constructivos; monitoreo de grietas y la descripción geométrica de los elementos estructurales analizados.

En primer lugar, se llevó a cabo el monitoreo de las grietas existentes en la estructura registrando los desplazamientos horizontales y verticales en un periodo de tiempo de siete meses en donde los valores máximos de desplazamiento fueron del orden de 3mm y 10mm (horizontales y verticales respectivamente).

En segundo lugar, el autor se dio a la tarea de caracterizar mecánicamente los materiales constructivos (mampostería de ladrillo y mampostería de piedra) por medio de la realización de pruebas destructivas y no destructivas (compresión de especímenes e índice de rebote respectivamente), cabe mencionar que las pruebas de compresión se realizaron con especímenes de prueba extraídos de un edificio aledaño el cual tiene características similares al Museo obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 3. Propiedades mecánicas de los materiales empleados en la construcción y rehabilitación del Museo de la Insurgencia. Montalvo (2013)

Elemento	Resistencia a Compresión kg/cm ²	Peso Volumétrico kg/cm ³	Módulo de elasticidad kg/cm ²	Coefficiente de Poisson	Módulo de corte kg/cm ²	Esfuerzo de fluencia kg/cm ²
Bóvedas (enladrillado)	20	1870	4000	0.25	1600	-
Arcos (mampostería de piedra)	20	1500	4000	0.25	-	-
Columnas (mampostería de piedra)	20	1500	4000	0.25	-	-
Vigas (acero)	-	7850	2x10 ⁶	0.3	784193	2531

Montalvo (2013) empleo un modelo de Elementos Finitos para analizar las columnas y arcos del patio central. Al realizar la modelación el autor consideró los bordes de las columnas

ponientes (donde se considera que no hay afectaciones por los hundimientos) como apoyos empotrados, es decir, restringiendo los desplazamientos y giros en las tres direcciones (X, Y, Z). Por otro lado, en la parte oriente se consideraron articulaciones para simular el desplazamiento debido a los asentamientos diferenciales debidos a la consolidación que tiene el suelo por acción de la falla geológica permitiendo de esta manera la traslación en todos los sentidos, pero restringiendo el giro en todas sus direcciones.

Para analizar la respuesta de la estructura el autor realizó tres simulaciones: en la primera considerando las cargas actuantes y cargas gravitacionales estáticas; en la segunda incluyendo las deformaciones inducidas por la falla más las actuantes permanentes por efecto de las acciones gravitacionales.

Así pues, las combinaciones utilizadas por el autor en el análisis estructural de los dos casos fueron las siguientes:

$$C1 = PP + CM + CV$$

$$C2 = PP + CM + CV + FG$$

En donde:

PP=Peso propio de la estructura

CM=Carga muerta

CV=Carga viva

FG=Deformaciones por Falla Geológica

De acuerdo con Montalvo (2013) las cargas que actúan sobre la estructura del Museo de la Insurgencia son 4: a) peso propio, b) cargas muertas, c) cargas vivas y d) esfuerzos inducidos por la falla geológica.

A partir de las combinaciones descritas el autor obtuvo los siguientes resultados representados en las figuras 3, 4, 5 y 6 que muestran la distribución de isovalores de esfuerzos en las columnas y arcos norte y sur respectivamente:

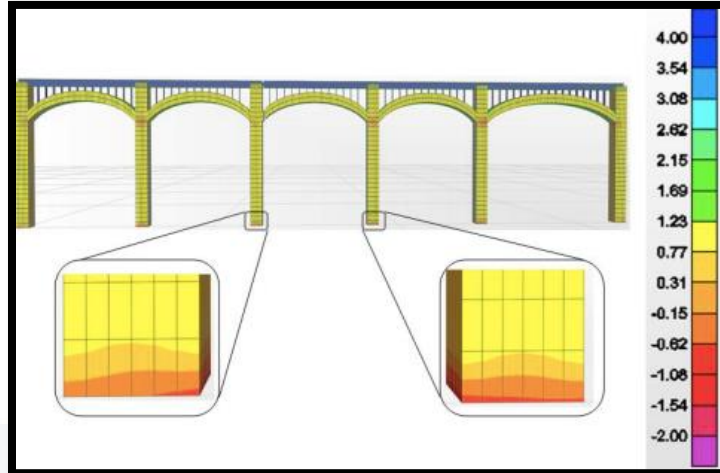


Figura 3. Arcos y columnas norte sin deformación del Museo de la Insurgencia (Montalvo Delgado, 2013).

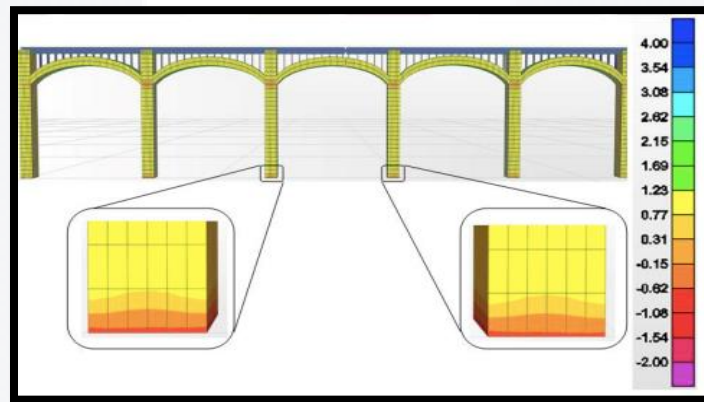


Figura 4. Arcos y columnas sur sin deformación del Museo de la Insurgencia (Montalvo Delgado, 2013).

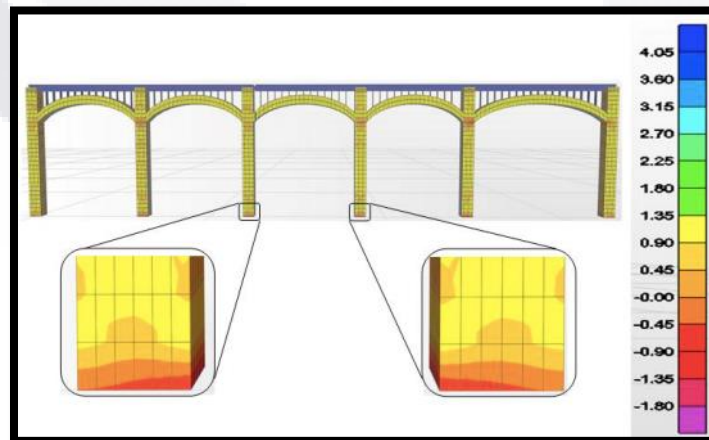


Figura 5. Arcos y columnas norte con deformación del Museo de la Insurgencia (Montalvo Delgado, 2013).

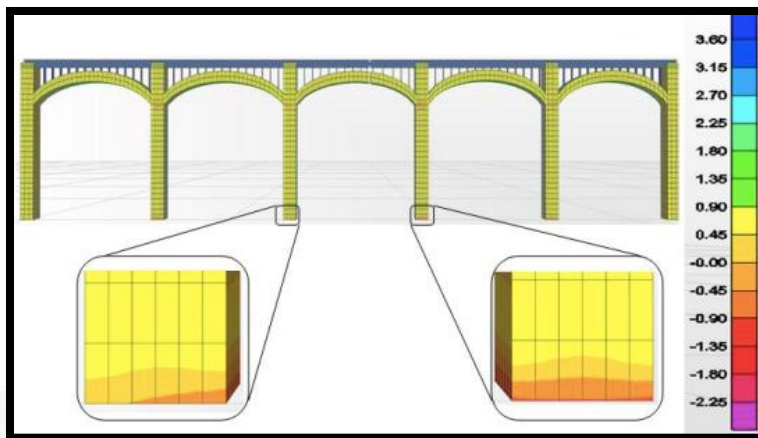


Figura 6. Arcos y columnas sur con deformación del Museo de la Insurgencia (Montalvo Delgado, 2013).

Y a manera de resumen presenta los resultados obtenidos de ambos casos de combinaciones de carga en la tabla 4 y tabla 5.

Tabla 4. Esfuerzos principales en columnas y arcos norte (Montalvo Delgado, 2013).

Arcos y Columnas Norte				
Estado limite de Falla		Condición de Carga C1 (kg/cm ²)	Condición de Carga C2 (kg/cm ²)	Valor del Estado límite de Falla (kg/cm ²)
Tensión	σ_x	1.01	1.17	2.00
	σ_y	0.37	0.56	
cortante	T_{xy}	0.56	0.92	3.50
Compresión	σ_x	1.89	2.57	20.00
	σ_y	1.66	1.98	
Esfuerzos principales	σ_{min}	0.92	1.01	2.00
	σ_{max}	6.69	6.91	

Tabla 5. Esfuerzos principales en columnas y arcos sur (Montalvo Delgado, 2013).

Arcos y Columnas Sur				
Estado límite de Falla		Condición de Carga C1 (kg/cm ²)	Condición de Carga C2 (kg/cm ²)	Valor del Estado límite de Falla (kg/cm ²)
Tensión	σ_x	1.06	1.12	2.00
	σ_y	0.39	0.58	
cortante	T_{xy}	0.84	1.28	3.50
Compresión	σ_x	2.07	3.05	20.00
	σ_y	2.02	2.91	
Esfuerzos principales	σ_{min}	1.02	1.16	2.00
	σ_{max}	7.15	10.36	20.00

De acuerdo con los resultados obtenidos por Montalvo bajo las condiciones contempladas en el análisis (con deformaciones por peso propio y en interacción con la falla) ningún tipo de esfuerzo sobrepasaba los estados límite de falla. De lo anterior se concluyó que la mampostería se encontraba trabajando de manera correcta, sin embargo, se realizó una tercera simulación extrapolando los datos del monitoreo de la falla considerando una variación lineal en la cual se estimó que bajo dichas condiciones la salud estructural del edificio se encontraría comprometida después de 5 años (Montalvo Delgado, 2013).

Al tratarse de un diagnóstico basado en la caracterización dinámica del suelo y la estructura, es importante mencionar investigaciones enfocadas en esa vertiente. Un trabajo interesante es el realizado por Castro (2016), en donde se describe de manera clara el proceso y aspectos importantes del análisis modal operacional. Dicho tema es de sumo interés para esta investigación, ya que definir las condiciones bajo las que opera la estructura es la base de esta investigación, para entender el comportamiento dinámico de una estructura en operación y ayudar a identificar zonas de riesgo a través de la actualización de modelos numéricos.

De las investigaciones elaboradas con relación al análisis estructural de edificaciones históricas por medio de modelos numéricos se tienen las siguientes:

1. “Estrategias para el Modelado y el Análisis de Estructuras Históricas” de Fernando Peña Mondragón.
2. “Análisis estructural de edificios históricos mediante modelos localizados de fisuración” (Clemente, 2007).
3. “Análisis Estructural de la Parroquia de San Bartolomé Apóstol” por la Ing. María Laura Robles Avilés
4. “Diagnóstico y propuesta de rescate estructural de la Capilla de la Trinidad, San Francisco de los Romo, Ags.” del arquitecto Carlos Job Esparza Rojas.

La primera describe la escala de diagnósticos estructurales basado en el nivel de daños ahondar en temas de rehabilitación y procedimientos de refuerzo utilizando el criterio de preservar los valores intrínsecos de los inmuebles. La segunda se focaliza en la modelación numérica de los edificios haciendo referencia a los diferentes métodos de análisis estructural, desde los convencionales basados en cargas gravitacionales y la geometría de la estructura con resultados ambiguos debido a la omisión de los parámetros dinámicos de las estructuras. El autor destaca la importancia del Método de Elementos Finitos como herramienta de análisis en edificios históricos como se menciona ocasionalmente en este documento.

La tercera es otra investigación referente al tema de vibración ambiental es la realizada en el Templo de San Bartolomé Apóstol (Robles, 2013), en donde el autor analiza a la estructura a partir de un modelo de elementos finitos alimentado con propiedades de los materiales obtenidas a través de consultas literarias. Es importante hacer mención del proceso que la autora implementa para llevar a cabo la calibración del modelo numérico, basada en el entendimiento del comportamiento dinámico de la estructura, realizando una comparativa de las formas modales obtenidas computacionalmente contra las obtenidas por medio de mediciones en campo. Por último, hay que resaltar la implementación de los métodos numéricos para calibrar las características mecánicas de la estructura.

De manera similar, Esparza (2013) realizó un diagnóstico en la Capilla de la Trinidad ubicada en el municipio de San Francisco de los Romo, en donde emplea mediciones de vibración ambiental para determinar las frecuencias dominantes del inmueble de estudio determinando

sus espectros de frecuencia y estudia los efectos de sitio determinando las frecuencias naturales del suelo a través del Método de Nakamura. Es importante destacar la metodología que utiliza para modelar numéricamente al edificio, basada en la caracterización geométrica y mecánica de los elementos que conforman al inmueble.



3. Marco teórico

En el presente capítulo se abordan temas relacionados con los conocimientos básicos que los profesionales dedicados al estudio e intervención de monumentos históricos deben reunir para realizar de manera consiente trabajos similares.

Peña (2010), menciona que, para poder diagnosticar un edificio histórico de manera correcta, el estructurista debe adquirir una serie de conocimientos necesarios que van desde los valores intrínsecos de la estructura, materiales de construcción, sistemas constructivos, análisis estructural, etc.

3.1 Definiciones

- **Patrimonio edificado.** El concepto de patrimonio edificado tiene sus orígenes en Europa a raíz de la conversión de la ciudad antigua como un testigo de la historia y paralelamente el surgimiento de la industrialización. Fue hasta que se hizo evidente la diferencia entre la ciudad antigua y la ciudad moderna que la primera pudo ser considerada como tal y surge el pensamiento de que los edificios históricos debían ser objeto de conservación, (Choay, 2007).
- **Patología.** Se define como “la ciencia que estudia los problemas constructivos que aparecen en el edificio (o algunas de sus unidades) después de su ejecución” (Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 1991).
- **Estructura.** “Representa al conjunto de componentes destinados a sostener, repartir y transferir las cargas de un punto a otro del espacio” (Cedeño, 2010).
- **Valoración.** Significa juzgar la capacidad de transferir dichas cargas con márgenes de seguridad adecuados ya que a través del tiempo estos márgenes disminuyen debido al grado de deterioro que sufre la edificación (Cedeño, 2010).

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- **Intervención.** De acuerdo con Terán (2004) en la disciplina de la restauración existen cuatro grados diferentes de intervención:

1. **Preservación.** Se basa en la prevención del deterioro de las edificaciones para lo cual se realizan diversas acciones.

2. **Conservación.** Es el conjunto de procedimientos llevados a cabo con la finalidad de detener el deterioro de la estructura y los mecanismos de alteración con la finalidad de garantizar la prevalencia del edificio.

3. **Restauración.** Se refiere al hecho de reestablecer las condiciones originales de las edificaciones históricas y para ello se aplican diferentes procedimientos especializados dependiendo del grado de afectación de la estructura.

4. **Mantenimiento.** Se refiere al conjunto de procedimientos técnicos aplicados al inmueble con el fin de prevenir y corregir el deterioro de la edificación.

Terán (2004), también menciona que existen diferentes tipos de intervención, los cuales varían en profundidad y alcance dependiendo del grado de intervención que se aplique:

- **Liberación.** Procedimientos técnicos utilizados para remover aquellos elementos que se encuentran alterando al inmueble. Dentro de estos procedimientos se incluye la remoción de escombros, vegetación y todos aquellos elementos agregados por causa humana a la construcción que no son propios del edificio.
- **Consolidación.** “Implica cualquier acción que se realice para dar solidez a los elementos de un edificio” (Terán, 2004). De acuerdo con lo anterior, la consolidación comprende los procedimientos que sirven como refuerzo para dar mayor consistencia

a los elementos estructurales de la construcción con el objetivo de detener la pérdida de solidez, (Terán, 2004).

- **Reestructuración.** Cuando se presenta un desequilibrio en una estructura, esta se ve afectada en su capacidad de transmitir las cargas con márgenes de seguridad adecuados. En este sentido hablar de reestructuración se refiere al tipo de intervención en que se devuelve la estabilidad perdida por el edificio debido al deterioro que ha sufrido.
- **Reconstrucción.** “Es la intervención que se realiza a la estructura de un monumento histórico” (Terán, 2004). Cuando se habla de reconstrucción se trata de partes de la estructura que han sido completamente consumidos por el deterioro que ha sufrido el inmueble a través de los años, (Terán, 2004).
- **Integración.** Hablar de integración se refiere a la intervención en la que se realiza una aportación nueva al inmueble con el objetivo de lograr su conservación.

De manera tradicional existen diferentes metodologías empleadas al momento de realizar diagnósticos de edificios antiguos, aunque dichas metodologías por lo general se enfocan en la parte de la estética empleando técnicas tradicionales de restauración, dejando de lado la parte estructural al momento de realizar una intervención en los inmuebles históricos, (Padilla, 2017). En este sentido conocer el comportamiento de la estructura de un edificio histórico antiguo, es fundamental cuando se desea conocer la salud de un edificio antes de que esta sufra algún tipo de intervención.

3.2 Patologías en edificios históricos

De acuerdo con Salas y Hernández (2022), “la patología es la ciencia que nos proporciona los parámetros para realizar estudios de diagnóstico y con ello dilucidar las posibles fallas presentadas” ya sea por el diseño, construcción, fabricación o la operación del edificio. El autor también menciona que la detección temprana de estas fallas es fundamental para asegurar la seguridad y

durabilidad estructural del edificio ya que la toma de medidas de manera rápida es crucial.

3.3 Daños en edificaciones históricas

De acuerdo con Martínez (2023) diversos factores como el clima, al abandono, el intemperismo y la poca disponibilidad de recursos afectan directamente la salud estructural de los edificios antiguos, dando lugar a diversas patologías entre las que se pueden encontrar: degradación de la madera, humedades, corrosión, grafiti, desplazamiento de la tinta de revestimiento, crecimiento vegetal, distorsión de la estructura, fisuras, grietas y eflorescencia.

3.3.1 Grietas y fisuras

Para Sotomayor (2020), el concepto de grieta se refiere a “aberturas cuyo ancho es mayor a 1mm” las cuales afectan a los elementos estructurales en todo su espesor. Por otro lado, las fisuras son discontinuidades presentes en la superficie de la estructura con un ancho de hasta 1mm, regularmente causadas por humedad, temperatura y al estado tensional del acero (Sotomayor, 2020).

3.3.2 Desplazamientos en grietas

El estudio de las de las deformaciones es un aspecto importante para considerar cuando se habla de los efectos que estos producen sobre una estructura, ya que, de acuerdo con Hooke (1678) la fuerza que devuelve a un cuerpo a su posición original es directamente proporcional a la distancia recorrida (deformación). En otras palabras, cuando se presentan desplazamientos sobre una estructura se genera una redistribución de esfuerzos sobre la misma en donde la presencia de estos disminuye en algunas partes de la estructura y aumenta en otras. Básicamente lo anterior se traduce en un desequilibrio sobre la estructura que puede llegar a comprometer su integridad.

3.4 Falla geológica

El termino de falla geológica se refiere a “Una discontinuidad que se forma en las rocas superficiales de la tierra (hasta unos 200km de profundidad por fractura), cuando las fuerzas tectónicas superan la resistencia de las rocas” (Universidad Politécnica de Catalunya, 2009).

3.4.1 Tipos de fallas geológicas

Principalmente existen tres tipos de falla dependiendo de los esfuerzos que las originan aunado a los desplazamientos de los bloques (Universidad Técnica de Loja, 2008):

Falla inversa: generada por esfuerzos de compresión en donde dos bloques (el de piso y el de techo) convergen en el plano horizontal. Esta falla tiene un ángulo característico de 30 grados respecto a la horizontal.

Falla normal: generadas por tensión horizontal entre dos bloques, uno que desciende (bloque de techo) y otro que se levanta (bloque de piso) con un ángulo de 60 grados al plano superficial por lo general.

Falla Horizontal o de Desgarre: al contrario de las dos anteriores esta falla se origina por el movimiento horizontal de ambos bloques. Dichas fallas son típicamente originadas en zonas donde convergen límites transformantes de placas tectónicas.

Falla oblicua: es aquella que se origina por movimientos en una combinación de direcciones, horizontal y vertical.

Rotacional o de tijera: como su nombre lo dice, esta falla se origina debido al movimiento de ambos bloques, similar al de una tijera, ya que, estos giran alrededor de un punto fijo.

3.5 Caracterización de materiales

Cuando se habla de caracterizar un material, se refiere al hecho de estudiar las propiedades morfológicas y físicas de los materiales con objeto de conocer información importante sobre los mismos. En este sentido, en el campo de las estructuras cuando se habla de caracterizar un material se refiere al hecho de conocer propiedades como el Módulo de Young, peso volumétrico, Módulo de Poisson etc.

3.6 Métodos NDT

Para la determinación de determinado parámetro físico de un material se llevan a cabo diferentes metodologías por medio de las cuales se realizan mediciones sobre la superficie de este. Dichos procedimientos se refieren a los llamados métodos no destructivos o NDT por sus siglas en inglés. Normalmente estas técnicas son de uso cotidiano en la exploración del subsuelo en donde por medio de estudios geofísicos se estudia su estructuración debajo de la superficie. Dichas pruebas desempeñan un papel importante en la prevención de fallas estructurales y por lo tanto en garantizar la seguridad estructural de los edificios.

3.7 Método de vibración ambiental

Contrario a lo que se pudiese pensar, las estructuras no están estáticas sobre el suelo, por el contrario, estas se encuentran vibrando libremente a causa de los microtemblores generados por factores presentes en el ambiente como el oleaje del mar, el tránsito de los vehículos, las corrientes de los ríos, los vientos, tormentas y las actividades humanas. Dichas vibraciones son caracterizadas a través de su amplitud y periodo característico.

Así pues, cuando un cuerpo o sistema es excitado mediante una fuerza externa este comienza a vibrar con la frecuencia natural del mismo. En realidad, cada cuerpo o sistema posee varios periodos característicos y cuando es excitado por una fuerza repetidamente con la misma frecuencia natural, el resultado es la aparición de oscilaciones de gran amplitud y cuando esto sucede se dice que el sistema ha entrado en resonancia y las vibraciones asociadas pueden

crecer sin control hasta influir en la estructura. A partir de lo anterior, conocer las propiedades dinámicas de una estructura es fundamental.

La medición de las vibraciones ambientales es ampliamente usada en el campo de las estructuras debido a que representa una de las herramientas más útiles para caracterizar dinámicamente a un cuerpo. El uso de esta técnica tiene sus inicios en Japón desde mediados de la década de 1950 cuando los investigadores Kanai (1954) y Aki (1957) la implementaron por primera vez. Kanai y Tanaka (1961) estudiaron la correlación existente entre los periodos obtenidos de los microtemblores medidos con registros de vibración ambiental y los obtenidos con registros sísmicos. De esta manera se propusieron la implementación del método para caracterizar de manera dinámica al terreno.

3.8 Teoría del método de Nakamura

Fue en la década de 1980 cuando Nakamura propuso el método de Cocientes espectrales H/V (Nakamura, 1989) que es una técnica de sísmica pasiva utilizada para obtener el periodo dominante del terreno a través de las vibraciones naturales presentes en el ambiente además de las vibraciones artificiales que provienen de otras fuentes. Como se mencionó anteriormente, este parámetro es de gran relevancia para la ingeniería sísmica ya que permite conocer los efectos del sitio sobre una estructura ya que una parte muy significativa de los daños ocasionados en edificios debido a los terremotos suscitados alrededor del mundo están relacionados con el factor de amplificación de sitio.

Mediante la medición de ruido sísmico ambiental, el método de Nakamura (1989) busca estimar una función de transferencia de ondas sísmicas desde un depósito de sedimentos no consolidados relacionando las componentes horizontales (Norte-Sur y Este-Oeste) y vertical de las micro vibraciones en la superficie del terreno. Al relacionar dichas componentes se obtiene una señal compuesta la cual debe ser procesada y analizada para obtener la frecuencia natural del sistema. Queda más que claro que conocer este parámetro (la frecuencia natural del edificio) es de vital importancia para impedir que el periodo de algunas estructuras coincida con el periodo del suelo, evitando de esta manera que la amplitud de las ondas crezca por efecto de la resonancia y por consecuencia que se presenten daños en la estructura.

3.8.1 Función de transferencia

Para poder controlar un sistema es necesario conocer el comportamiento de este, para lo cual se recurre al modelado matemático lo que se refiere a determinar funciones matemáticas que se ajusten en la mayor medida posible al comportamiento del sistema.

“Una función de transferencia es un modelo matemático que a través de un cociente relaciona la respuesta de un sistema con una señal de entrada o excitación”, (Ulloa, 2018).

La función de transferencia de cocientes espectrales es S_{TT} .

$$S_{TT} = \frac{H_S}{H_B}$$

Donde:

H_S = Espectro de Fourier horizontal de una estación superficial

H_B = Espectro de Fourier horizontal del basamento

Una señal sísmica estocástica se puede definir como el resultado de una convolución de las señales que la originan (Ulloa, 2018). De acuerdo con lo anterior tenemos que en el espacio de las frecuencias la señal estocástica queda definida por la multiplicación de dichas señales de frecuencias.

$$H_S(t) = F_H(t) * F_R(t) * S(t)$$

$$H_S(f) = F_H(f) * F_R(f) * S(f)$$

$$H_B(f) = F_H(f)$$

Donde:

F_H = Espectro de Fourier de ondas de cuerpo polarizadas horizontal

F_R = Espectro de Fourier de ondas Rayleigh

S = Espectro de Fourier del Efecto de sitio

De acuerdo con Nakamura (1989) hay una componente vertical superficial sin de efectos de sitio y una componente en sentido vertical del basamento.

$$V_S(f) = F_V(f) \cdot F_R(f)$$

$$V_B(f) = F_V(f)$$

Donde:

V_S = Espectro de Fourier vertical de una estación superficial

F_V = Espectro de Fourier de ondas de cuerpo polarizadas vertical

F_R =Espectro de Fourier de ondas Rayleigh

V_B = Espectro de Fourier vertical del basamento

Suponiendo que las componentes superficiales horizontales y vertical son alteradas por onda Rayleigh en la misma medida, se tiene una función de efecto de sitio modificada que compense la alteración sufrida producto de las ondas superficiales (Ulloa, 2018). Dicho lo anterior se tiene que:

$$S(f) = \frac{H_S}{V_S} \cdot \frac{1}{\frac{H_B}{V_B}} = \frac{R_S}{R_B}$$

Donde R_S y R_B se refiere a las tasas espectrales H/V de la superficie y en el basamento, respectivamente.

- La razón H_S/H_B elimina el efecto de las fuentes lejanas polarizadas horizontal.
- Del mismo modo la tasa V_S/V_B suprime el efecto de las fuentes lejanas polarizadas vertical.
- Por lo que es deducible que solo el efecto de sitio prevalece $S(f)$.

- De acuerdo con diversas observaciones se ha encontrado que, en suelos rocosos, la razón espectral H/V se aproxima a 1 (Ulloa, 2018), ya que las amplitudes de las ondas verticales y horizontales de los micro temblores son muy parecidas ($R_B=1$).

Es así como se define a la función de transferencia modificada S_{TT} como sigue:

$$S_{TT} = R_S \cdot \frac{1}{R_B} \approx R_S = \frac{H_S}{V_S}$$

3.8.2 Selección de curvas H/V

El proceso de selección es realizado de acuerdo con los criterios SESAME (Site Effects assessments using Ambient Excitations), que trata de una serie de pasos prácticos para la toma de datos medidos en el terreno, el procesamiento e interpretación de los resultados.

Criterios para la confiabilidad de las curvas (SESAME, 2004):

1. $f_0 > \frac{10}{I_w}$

Donde:

I_w = ancho de la ventana en segundos

f_0 = frecuencia fundamental H/V

2. $n_c(f_0) > 200$

Donde:

$$n_c = I_w \cdot n_w \cdot f_0$$

n_c = número de ciclos significativos

n_w = número de ventanas seleccionadas por estación

3. $\sigma_A(f) < 2 \in 0.5f_0 < f < 2f_0$ sí $f_0 > 0.5\text{Hz}$

O

$$\sigma_A(f) < 3 \in 0.5f_0 < f < 2f_0 \text{ sí } f_0 < 0.5\text{Hz}$$

Criterios para una Curva limpia H/V

Para considerar que una curva es clara se deben cumplir al menos cinco de los seis criterios indicados en el manual **SESAME** referentes a la amplitud y a la estabilidad del peak enlistados a continuación (SESAME, 2004):

Condiciones de Amplitud:

1. Existe una frecuencia f^- , situada en el rango descrito a continuación

$$\exists f^- \in \left[\frac{f_0}{4}, f_0 \right] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$$

Donde:

$A_0 =$ amplitud del pico de la curva $\frac{H}{V}$ con frecuencia f_0

$A_{H/V}(f) =$ Amplitud del pico de la curva $\frac{H}{V}$ con frecuencia f

2. Además, existe una frecuencia f^+ , situada en el rango de frecuencia también descrito

$$\exists f^+ \in [f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$$

3. De lo anterior se tiene que cumplir que:

$$A_0 > 2$$

Condiciones de estabilidad:

1. La desviación estándar de la amplitud del pico de la curva estará dentro del rango descrito a continuación:

$$f_{peak} \left[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f) \right] = f_0 \pm 5\%$$

Donde:

σ_A = desviación estandar de la amplitud $A_{H/V}(f)$

f = frecuencia registrada

2. El valor umbral de la desviación estándar del valor de la frecuencia (f) para condición de estabilidad de la curva es el descrito a continuación:

$$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$$

3. Por último, el valor umbral de la desviación estándar del valor de la amplitud para condición de estabilidad de la curva es:

$$\sigma_A(f) < \theta(f_0)$$

De acuerdo con el rango de frecuencias que resulta de las lecturas en los diferentes puntos de medición, los diferentes umbrales de las desviaciones estándar para la amplitud y frecuencia están descritos en la tabla 6 (SESAME, 2004).

Tabla 6. Umbral de valores de desviación estándar para la amplitud y frecuencia (SESAME, 2004)

Valores límite para σ_f y $\sigma_A(f_0)$					
Rango de frecuencias (Hz)	< 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 2.0	> 2
$\varepsilon(f_0)$	0.25 f_0	0.20 f_0	0.15 f_0	0.10 f_0	0.055 f_0
$\theta(f_0)$ para $\sigma_A(f_0)$	3	2.5	2	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ para $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.4	0.3	0.25	0.2

3.9 Método de Elementos Finitos

Fue a inicios de la década de 1960 cuando se popularizó el método propuesto por Richard Curant en el año de 1943, el cual se fundamenta en la discretización, dividiendo de esta manera un medio continuo sobre el que están definidas ciertas ecuaciones integrales que caracterizan el comportamiento del medio. En cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados nodos en donde dos nodos que son adyacentes pertenecen al mismo elemento finito y un nodo sobre la frontera de un elemento funciona como una frontera que transmite fuerzas y momentos a los elementos adyacentes (Williamson, 1980).

Así pues, la resolución del método de elementos finitos no se resuelve como si fuese un solo cuerpo si no como una suma de todos los resultados de cada uno de los elementos que integran al medio representado.

De esta manera, el de método de elementos finitos supone una herramienta de gran utilidad a la hora de realizar simulaciones de estructuras que involucran geometrías muy complejas, cargas no distribuidas y propiedades inelásticas de los materiales como es el caso de los edificios antiguos.

3.10 Propiedades dinámicas

De acuerdo con Peña (2013), un proyecto estructural debe estar basado en la comprensión total del comportamiento estructural del edificio, lo cual incluye conocimiento sobre los materiales que lo integran, así como su geometría y sus propiedades dinámicas. Al evaluar la seguridad sísmica, la caracterización dinámica de la estructura es de vital importancia ya que interpretar los movimientos del edificio de manera analítica brinda un panorama más amplio al estructurista.

Las pruebas de vibración ambiental permiten establecer las propiedades dinámicas de una estructura como las frecuencias naturales, las formas modales y los coeficientes de amortiguamiento.

Por lo general este tipo de estructuras son constituidas por diferentes apéndices, los cuales vibran a frecuencias diferentes y a través de estas pruebas aunado a una inspección visual de la estructura.

Con el fin de dar validez al análisis estructural realizado en el software de análisis se emplean los resultados obtenidos en las mediciones de vibración ambiental para calibrar el modelo numérico y de esta manera dar validez al mismo. Contar con un modelo calibrado y validado permite visualizar un panorama más amplio de las condiciones actuales y futuras del edificio a través de extrapolaciones de posibles eventos futuros.

3.11 Pruebas no destructivas

Como producto de las limitaciones que se presentan a la hora de determinar las características de los materiales que constituyen a las edificaciones antiguas surge la necesidad de desarrollar nuevos métodos que garanticen en medida de lo posible la integridad del edificio, los llamados métodos no destructivos o NDT por sus siglas en inglés.

Por lo general las técnicas implementadas para el estudio de estos materiales se basan en métodos geofísicos que principalmente miden la densidad de los materiales a través de diferentes técnicas que finalmente son asociadas a las propiedades mecánicas de los diferentes materiales. Entre otros métodos se pueden mencionar los siguientes:

- Esclerómetro o medición del índice de rebote.
- Ultrasonido o mediciones de velocidad de propagación de ondas.
- Georradar
- Termografía infrarroja
- Estudios de resistividad eléctrica, etc.

4. Antecedentes del Museo de la Insurgencia

4.1 Estudio Histórico

El Museo de la Insurgencia se encuentra ubicado en la comunidad de Pabellón de Hidalgo, municipio de Rincón de Romos, Aguascalientes, lugar en donde después de ser derrotados en la batalla del Puente Calderón, los insurgentes se reagruparon en Aguascalientes, específicamente en la hacienda de San Blas, un edificio que data del siglo XVII es en este sitio donde reunidos el 25 de febrero de 1811 Juan Aldama, Ignacio Allende y Mario Abasolo relevan del mando al cura Miguel Hidalgo, suceso que fue clave en el desarrollo de la guerra de independencia. La ex hacienda de San Blas fue abierta al público como museo en el año de 1964 un 17 de octubre con el motivo de dar alusión al movimiento independentista (Ramirez, 2023).

En dicho poblado se localiza una falla geológica de 800.7m de longitud (Secretaría de Obras Públicas, 2010) de acuerdo con una investigación realizada en 2013 la falla afecta alrededor de 32 edificaciones (Láriz Medina, 2013), entre ellos el Museo de la Insurgencia.

4.2 Intervenciones estructurales

A lo largo de su historia el Museo ha sufrido algunas intervenciones las cuales se realizaron con la intención de resarcir los efectos de la falla geológica. A simple vista la afectación más evidente es el hecho de que el edificio presenta desplazamientos tanto verticales como horizontales que han causado agrietamientos en los muros, bóvedas y los arcos del patio central.

La primera intervención realizada en el museo consistió en la separación parcial del inmueble por medio de la colocación de una junta fría en muros, bóvedas y arcos en sentido transversal para tratar de mitigar la inducción de esfuerzos ocasionados a la estructura debido a los desplazamientos sufridos por la falla. De acuerdo con Montalvo (2013) dentro de esta primera intervención se realizó la colocación de una viga IR 10"x44.8kg/ml en el sentido de los arcos tanto del lado sur como en el lado norte según se aprecia en las figuras 7 y 8.

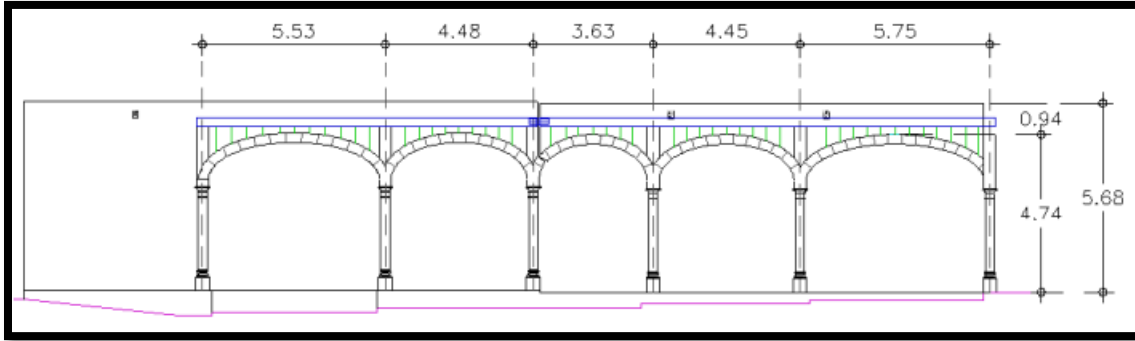


Figura 7. Elevación de arcos norte. (Montalvo Delgado, 2013)

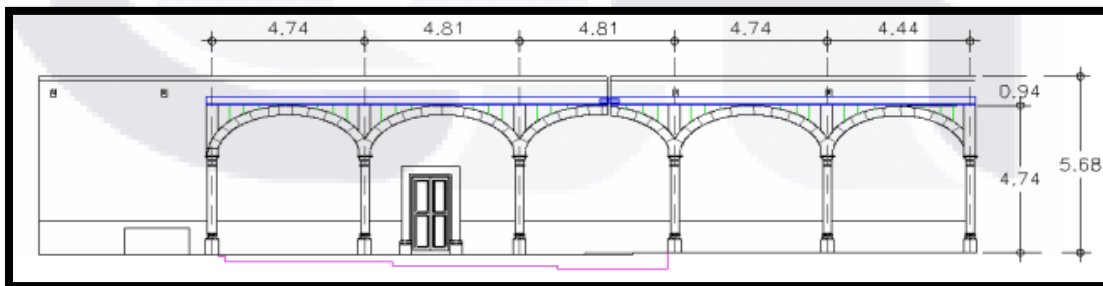


Figura 8. Elevación de arcos sur. (Montalvo Delgado, 2013)

En una segunda intervención se realizaron modificaciones en el patio central en donde se construyó un jardín botánico y se realizó con la colocación de la junta constructiva en el suelo, además, de la colocación de escalones metálicos en el trayecto de la falla en las zonas de los pasillos y salas de exhibición para comodidad de los visitantes.

5. Metodología

En el presente capítulo se presenta una serie de pasos que comprenden la metodología implementada para la realización de esta investigación. En primer lugar, se aborda la geometría de la estructura y todo lo que conlleva, siguiendo con el levantamiento de daños realizado en campo para poder realizar un diagnóstico preliminar que guíe el rumbo de la investigación.

La monitorización de la falla que afecta al edificio fue un punto importante a considerar ya que conocer su comportamiento actual ayuda a predecir posibles eventos futuros, además, establecer las propiedades mecánicas y dinámicas de la estructura para alimentar el modelo numérico, el cual, habrá de ser validado a partir de las mediciones realizadas en el sitio.

5.1 Levantamientos

5.1.1 Dimensiones del Museo y de sus elementos estructurales

Como ya se mencionó anteriormente, en el caso del Museo de la Insurgencia ya se cuenta con un diagnóstico previo en el cual se documentan los planos de las plantas arquitectónicas del edificio y de igual manera los mismos fueron proporcionados por el personal del ICA, sin embargo, las dimensiones descritas en los planos fueron corroboradas en el sitio por medio de un levantamiento con flexómetro laser y se obtuvieron algunas alturas que no estaban especificadas en dichos planos.

El Museo cuenta con un patio en su parte central rodeado por una serie de arcos y columnas que forman una U orientada al poniente, dichas columnas fungen como soporte de las bóvedas de los pasillos que conducen a las dos salas de exhibición, la tienda de recuerdos, las oficinas administrativas y a los baños.

La ex hacienda también cuenta con un patio trasero en donde también se encuentra una sala que se usa como bodega y otras dos que sirven de oficina. La configuración del edificio se presenta en la figura 9.

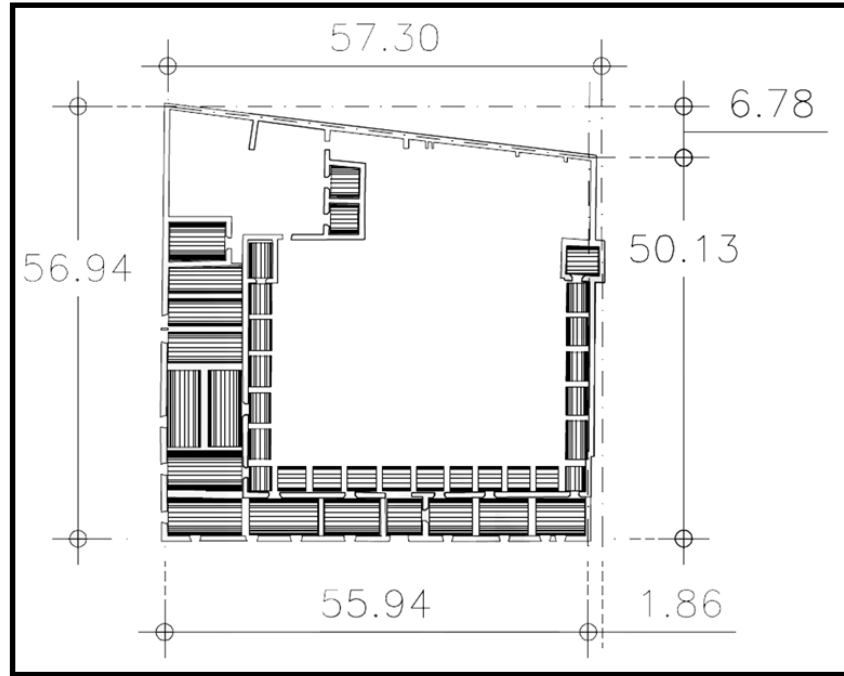


Figura 9. Planta del Museo de la Insurgencia (Montalvo Delgado, 2013)

El espesor de los muros del Museo es de 75cm en promedio en todo su perímetro y dividiendo los espacios disponibles en su interior. También es posible identificar 20 columnas de sección circular de 38cm de diámetro hechas a base de mampostería de piedra que se encuentran soportando las bóvedas de los pasillos alrededor del patio central. De igual manera se ubican cuatro columnas centrales de 75cm por 75cm en la sala de exhibición del lado sur, además, de otras seis columnas empotradas en los muros de la misma sala soportando ocho arcos del mismo espesor hechos a base de mampostería de tabique rojo recocido y cuatro columnas más en la sala del lado oriente que soportan dos arcos más de las mismas características.

El museo posee un total de 23 arcos de mampostería de piedra alrededor del patio central con un espesor de 25 cm aproximadamente. Las bóvedas son de forma semicilíndrica hechas a base de mampostería de tabique las cuales se originan por una generatriz semiesférica y una directriz recta en su eje longitudinal sobre las salas de exhibición, las bóvedas en los pasillos se asemejan un poco más una forma semiesférica debido a su tamaño más pequeño. Las siguientes figuras (10 y 11) muestran de forma esquemática la configuración de los elementos estructurales y arquitectónicos del Museo, además de la ubicación de la junta constructiva colocada en el Museo.

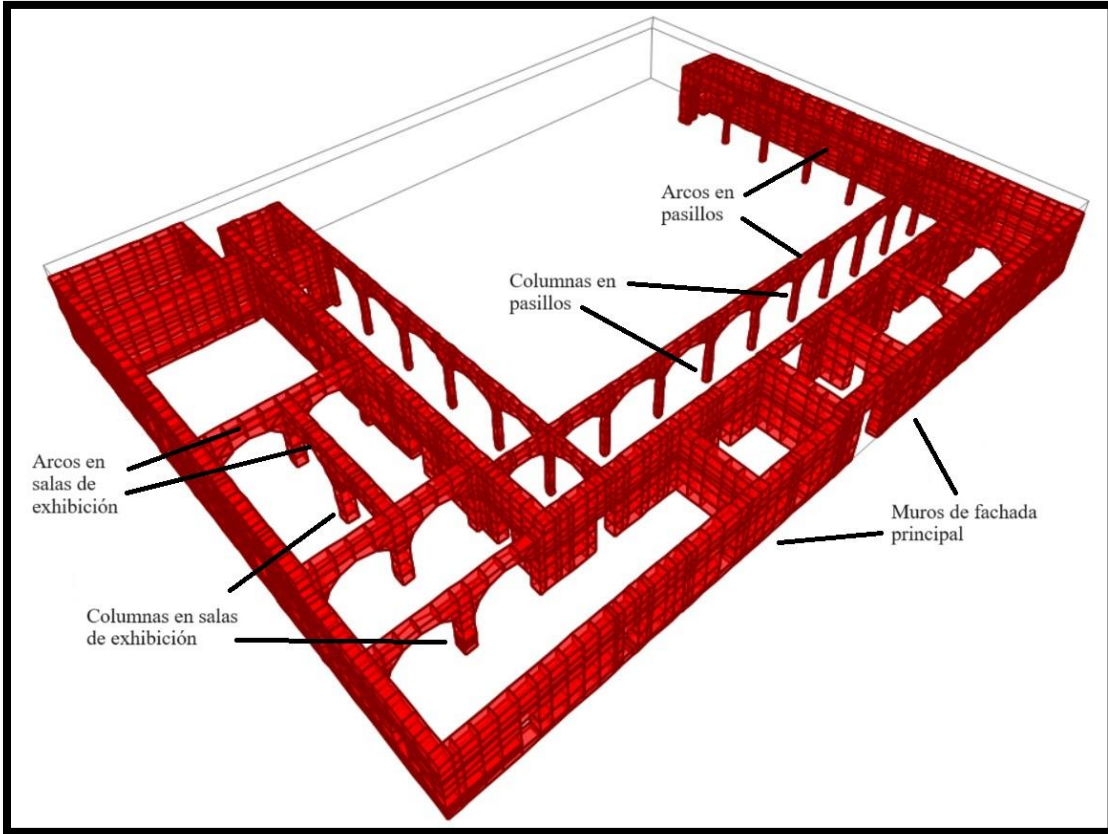


Figura 10. Identificación de los elementos estructurales del Museo de la Insurgencia.
Fuente: elaboración propia

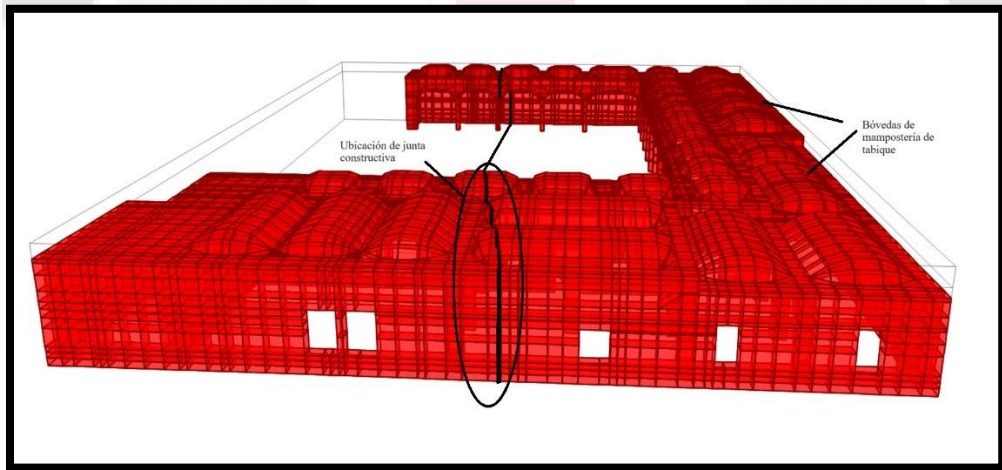


Figura 11. Identificación de junta constructiva y bóvedas del Museo de la Insurgencia.
Fuente: elaboración propia

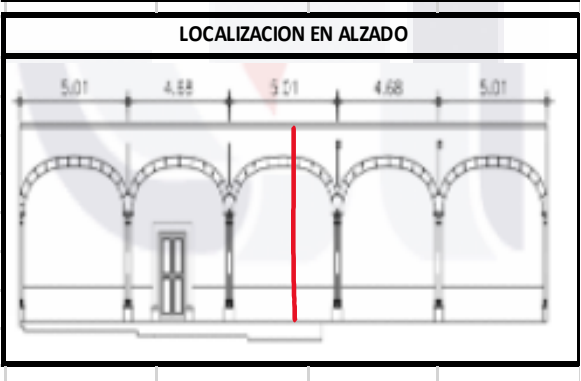
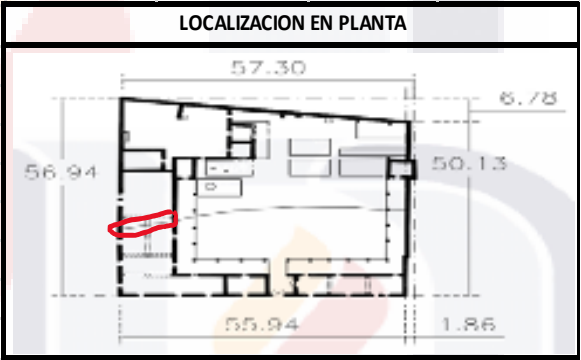
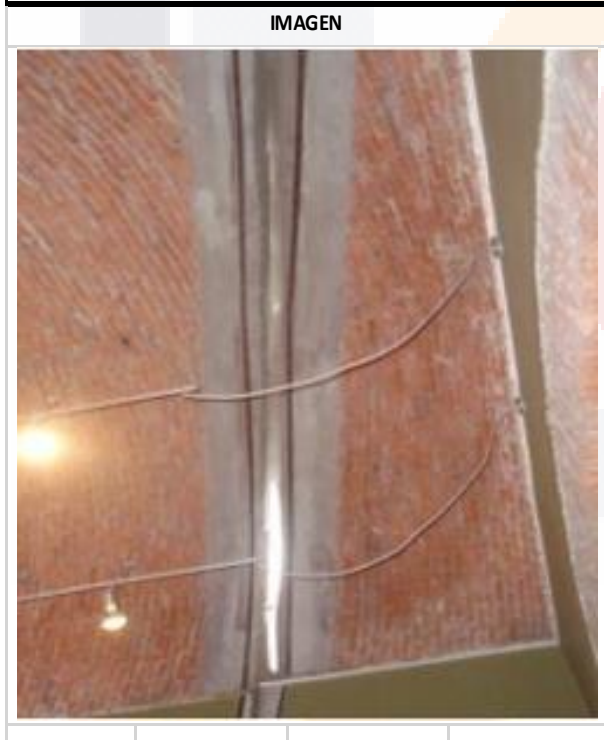
5.1.2 Levantamiento de daños

De acuerdo con Navarro (2013) “el levantamiento de daños permite identificar las patologías que tiene el edificio” y través de la identificación de estas se estudia las alteraciones existentes en una estructura ya sea que sus orígenes se deban al procedimiento constructivo o que aparezca años después. Para el caso del Museo las patologías presentes en la estructura son debidas principalmente por la actividad de la falla geológica que lo corta transversalmente.

De esta manera se realizó el levantamiento de daños del Museo de la Insurgencia y como resultado se ha encontrado principalmente la aparición de nuevas grietas en las columnas y pisos del patio central por causas de origen mecánico debido a la inducción de esfuerzos provocados por el crecimiento de raíces de un árbol aledaño a la zona. Con base en la información recolectada en el sitio se elaboraron las fichas correspondientes que se muestran a continuación en donde se registra la ubicación del daño, descripción, así como los posibles orígenes.

ESTUDIO DE PATOLOGÍA ESTRUCTURAL EN MUSEO DE LA INSURGENCIA, GENERADAS POR LA ACTIVIDAD DE UNA FALLA GEOLÓGICA EN LA COMUNIDAD DE PABELLÓN DE HIDALGO, MUNICIPIO DE RINCÓN DE ROMOS EN AGUASCALIENTES.

	FICHA No. 2
INFORMACIÓN DEL EDIFICIO	FECHA DEL LEVANTAMIENTO: 7/NOVIEMBRE/2022
NOMBRE: MUSEO DE LA INSURGENCIA	UBICACIÓN: SALA DE EXIBICIÓN SUR
LOCALIZACIÓN: PABELLÓN DE HIDALGO, RINCÓN DE ROMOS, AGUASCALIENTES	TIPOLOGÍA DE LA LESIÓN: MECÁNICA
USO ACTUAL: MUSEO TURÍSTICO	
AÑO DE CONSTRUCCIÓN: 1730	CAUSA DE LA LESIÓN: EL AGRIETAMIENTO Y POSTERIOR APERTURA DE LA FALLA EN LA BOVEDA ES DEBIDA INDUCCIÓN DE ESFUERZOS POR ACCIÓN DE LA FALLA.
INFORMACION DE PATOLOGÍA	
MATERIAL: MAMPOSTERÍA DE TABIQUE ROJO RECOCIDO	
SISTEMA CONSTRUCTIVO: MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL DE TABIQUE ROJO COMÚN EN SISTEMA DE BOVEDA	
ELEMENTO AFECTADO: BOVEDA	
DAÑO O DEFECTO: GRIETA EN BOVEDA	
DESCRIPCIÓN DEL DAÑO: SE PRESENTA AGRIETAMIENTO EN DIRECCIÓN DE LA FALLA EN LA ZONA DE SALA DE EXIBICIÓN DEL LADO SUR	



OBSERVACIONES: SE APRECIA UNA SEPARACIÓN MUY CONSIDERABLE TANTO EN LA VERTICAL COMO EN LA HORIZONTAL DEL ORDEN DE LOS 10 Y 25 CM RESPECTIVAENTE.

ESTUDIO DE PATOLOGÍA ESTRUCTURAL EN MUSEO DE LA INSURGENCIA, GENERADAS POR LA ACTIVIDAD DE UNA FALLA GEOLÓGICA EN LA COMUNIDAD DE PABELLÓN DE HIDALGO, MUNICIPIO DE RINCÓN DE ROMOS EN AGUASCALIENTES.

FICHA No. 1

INFORMACIÓN DEL EDIFICIO
NOMBRE: MUSEO DE LA INSURGENCIA
LOCALIZACIÓN: PABELLÓN DE HIDALGO, RINCÓN DE ROMOS, AGUASCALIENTES
USO ACTUAL: MUSEO TURÍSTICO
AÑO DE CONSTRUCCIÓN: 1730

FECHA DEL LEVANTAMIENTO: 7/NOVIEMBRE/2022
UBICACIÓN: PASILLO NORTE DEL PATIO CENTRAL
TIPOLOGÍA DE LA LESIÓN: MECÁNICA

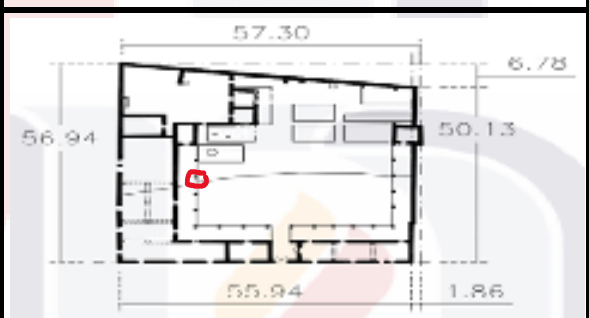
INFORMACION DE PATOLOGÍA
MATERIAL: CANTERA ROSA
SISTEMA CONSTRUCTIVO: MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL DE CANTERA ROSA USADA EN COLUMNAS DEL PATIO CENTRAL
ELEMENTO AFECTADO: COLUMNA
DAÑO O DEFECTO: GRIETA EN BASE DE COLUMNA
DESCRIPCIÓN DEL DAÑO: SE PRESENTA AGRIETAMIENTO EN DIRECCIÓN PARALELA AL EJE LONGITUDINAL DE LA COLUMNA

CAUSA DE LA LESIÓN: PRESUMIBLEMENTE LA APERTURA DE LAS JUNTAS EN EL MAMPOSTEO DE LA BASE DE LA COLUMNA SE DEBE A ESFUERZOS INDUCIDOS POR EL CRECIMIENTO DE RAÍCES DEL ARBOL ALEDAÑO A LA FALLA Y A SU VEZ A LAS COLUMNAS DEL LADO SUR.

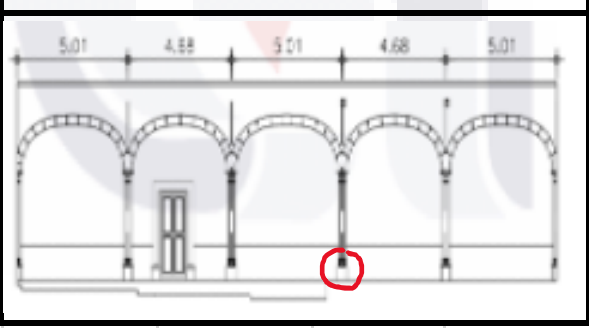
IMAGEN



LOCALIZACION EN PLANTA



LOCALIZACION EN ALZADO



OBSERVACIONES: A TRABES DE L INSTALACIÓN DE TESTIGOS DE ACRÍLICO FIJOS EN LA BASE DE LAS COLUMNAS SE HAN REGISTRADO DESPLAZAMIENTOS PERPENDICULAE A LA DIRECCIÓN DE LA JUNTA DEL ORDEN DE 1.5 MM EN UN INTERVALO DE TIEMPO DE 4 MESES.

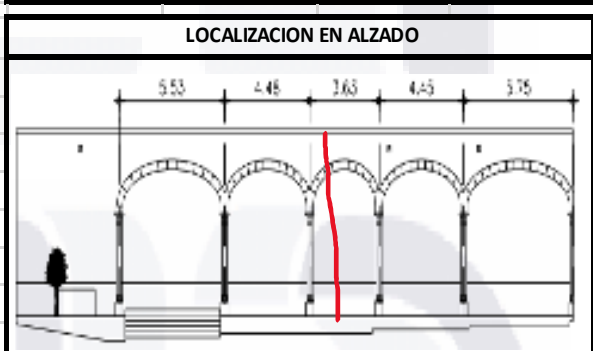
ESTUDIO DE PATOLOGÍA ESTRUCTURAL EN MUSEO DE LA INSURGENCIA, GENERADAS POR LA ACTIVIDAD DE UNA FALLA GEOLÓGICA EN LA COMUNIDAD DE PABELLÓN DE HIDALGO, MUNICIPIO DE RINCÓN DE ROMOS EN AGUASCALIENTES.

FICHA No. 3

INFORMACIÓN DEL EDIFICIO	
NOMBRE: MUSEO DE LA INSURGENCIA	
LOCALIZACIÓN: PABELLÓN DE HIDALGO, RINCÓN DE ROMOS, AGUASCALIENTES	
USO ACTUAL: MUSEO TURÍSTICO	
AÑO DE CONSTRUCCIÓN: 1730	
INFORMACION DE PATOLOGÍA	
MATERIAL: MAMPOSTERÍA DE TABIQUE ROJO RECOCIDO Y DE CANTERA	
SISTEMA CONSTRUCTIVO: MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL DE TABIQUE ROJO COMÚN EN SISTEMA DE BOVEDA BOVEDAS Y ARCOS DEL PATIO CENTRAL.	
ELEMENTO AFECTADO: BOVEDA	
DAÑO O DEFECTO: GRIETA EN BOVEDA	
DESCRIPCIÓN DEL DAÑO: SE PRESENTA AGRIETAMIENTO EN DIRECCIÓN DE LA FALLA EN LA ZONA DE LOS ARCOS Y BOVEDAS DEL PATIO CENTRAL EN EL LADO NORTE	

FECHA DEL LEVANTAMIENTO: 7/NOVIEMBRE/2022
UBICACIÓN: SALA DE EXIBICIÓN SUR
TIPOLOGÍA DE LA LESIÓN: MECÁNICA

CAUSA DE LA LESIÓN: EL AGRIETAMIENTO Y POSTERIOR APERTURA DE LA FALLA EN LA BOVEDA Y ARCO ES DEBIDA INDUCCIÓN DE ESFUERZOS POR ACCIÓN DE LA FALLA.



OBSERVACIONES: PRODUCTO DE LA COLOCACIÓN DE LA JUNTA FRÍA EL ARCO HA PERDIDO SU FUNCION ESTRUCTURAL, LO QUE INDICA QUE AHORA TRABAJA EN VOLADIZO ANTE LA ACCIÓN DE LAS FUERZAS GRAVITACIONALES.

5.2 Monitoreo de grietas

Para recabar información sobre la actividad de la falla se instalaron dispositivos acrílicos fijos, los cuales, permiten visualizar los desplazamientos tanto verticales como horizontales de manera ortogonal a la dirección de la falla. Dichos dispositivos consisten en dos láminas de unos 20 centímetros de largo por 5 de alto y 2mm de espesor, la lámina del fondo con un sistema de ejes cartesianos X, Y, y la del frente con una cruz que señala el desplazamiento.

Los dispositivos fueron instalados en las zonas de interés procurando ante todo no comprometer la integridad del edificio y sus valores intrínsecos tal y como se aprecia en la figura 12.

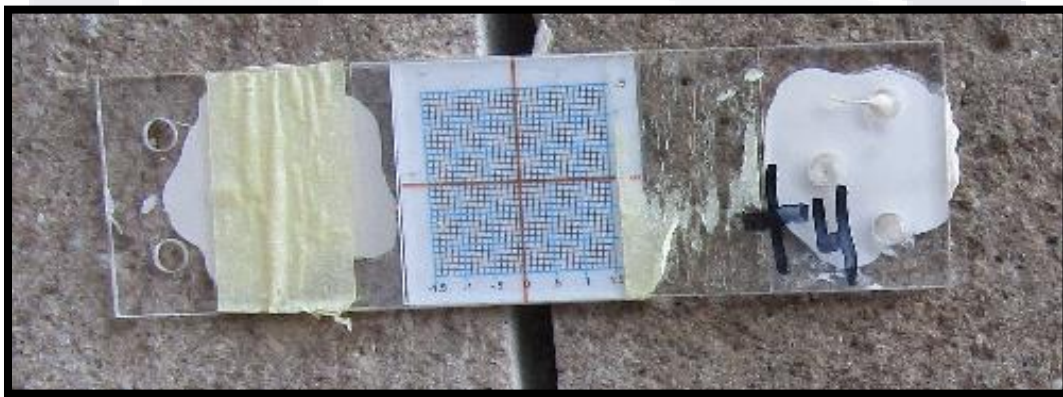


Figura 12. Testigo de acrílico para medir desplazamientos. Fuente: elaboración propia

De este modo se llevó un registro periódico de los efectos que producen los desplazamientos sobre la estructura. La ubicación de los testigos sobre el plano del edificio se muestra en la figura 13.

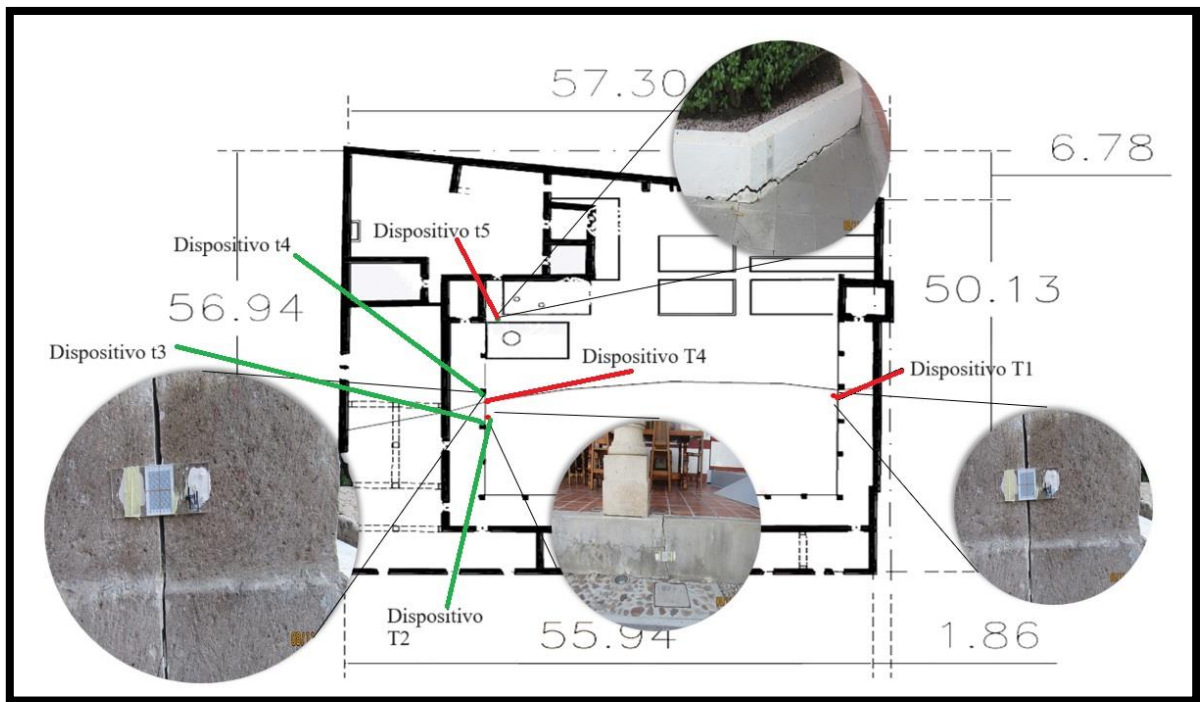


Figura 13. Ubicación de testigos. Fuente: elaboración propia

El registro de las lecturas de los testigos se obtuvo de visitas periódicas al sitio sin considerar las posibles variaciones por efectos de variación de temperatura. En la tabla 7 se presenta el resumen de las lecturas tomadas en periodo comprendido entre las fechas señaladas.

Tabla 7. Registro de lecturas de desplazamientos.

Lectura No.	Fecha	Días	Testigo T2		Testigo t4		Testigo T4		Testigo t5	
			x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)
1	04/09/2022	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	18/09/2022	14	0.5	0.5	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0
3	09/10/2022	35	0.5	0.5	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0
4	16/10/2022	42	1.0	1.5	0.0	0.0	0.5	0.5	0.0	0.0
5	30/10/2022	56	1.0	1.5	0.0	0.0	1.0	0.5	0.0	0.5
6	08/11/2022	65	1.0	2.0	0.0	0.0	1.0	1.0	0.0	0.5
7	24/11/2022	81	1.5	2.0	0.5	0.0	1.5	1.5	0.0	0.5
8	01/12/2022	88	1.5	2.0	0.5	0.0	1.5	1.5	0.0	0.5
9	05/02/2023	154	1.5	2.5	1.0	0.5	1.5	2.5	0.0	0.5
10	14/03/2023	191	1.5	2.5	1.0	0.5	2.0	3.5	0.0	1.0
11	27/05/2023	235	2.0	2.5	1.5	0.5	3.0	4.5	0.0	1.0

A partir de la información recabada se construyeron los gráficos de desplazamientos en ambos sentidos (a excepción del testigo t5 en donde solo se han observado desplazamientos verticales) ya que este dispositivo fue colocado en la guarnición ubicada sobre el crecimiento de raíces de un árbol existente. En dichas gráficas se puede observar la tendencia que siguen los desplazamientos por efectos de la actividad de la falla.

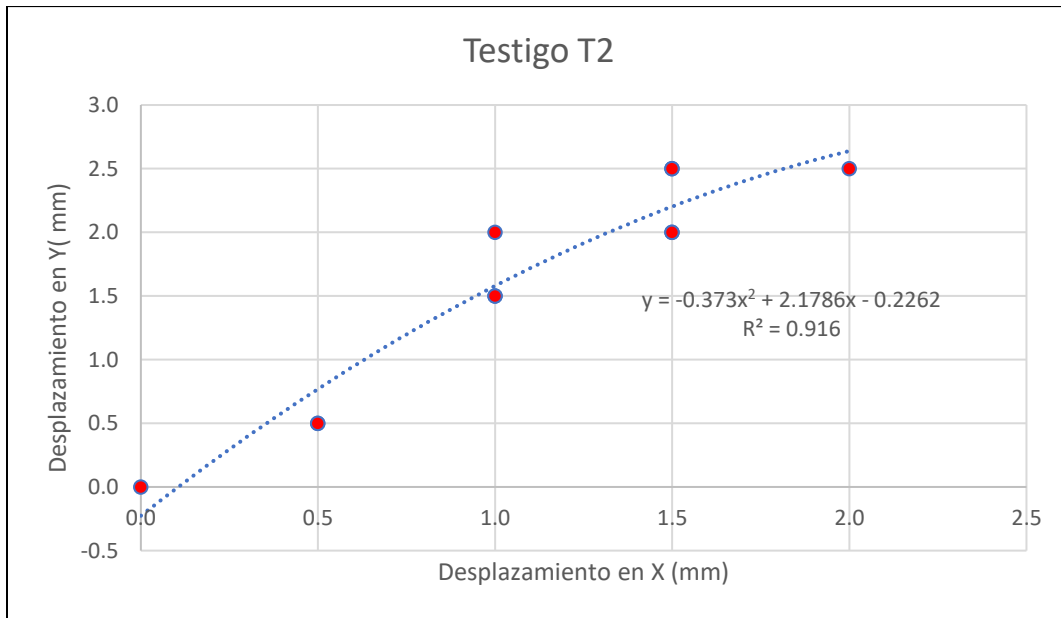


Figura 14. Tendencias de desplazamientos en T2. Fuente: elaboración propia

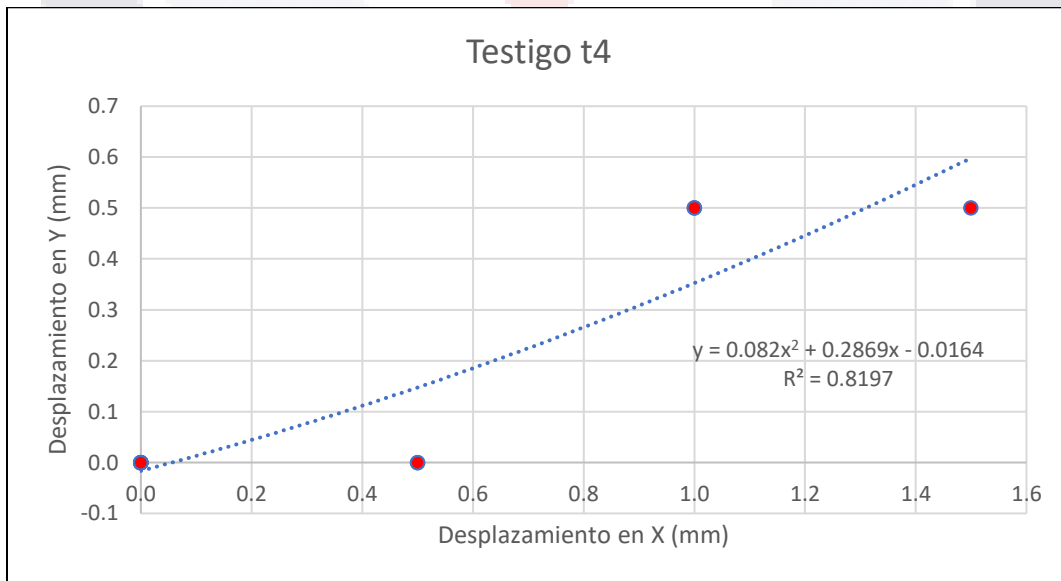


Figura 15. Tendencias de desplazamientos en t4. Fuente: elaboración propia

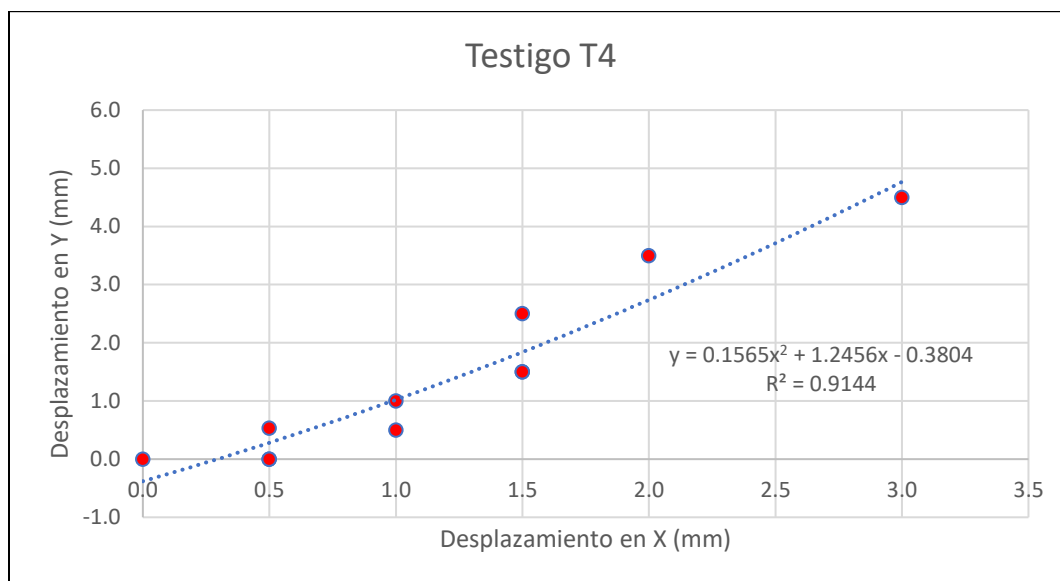


Figura 16. Tendencias de desplazamientos en T4. Fuente: elaboración propia

Como se puede observar que para el caso del testigo T4 se presentan desplazamientos del orden de 4.5mm en la vertical en un lapso de poco más de 7 meses de monitoreo lo cual es significativamente mayor con respecto a los 3mm presentados en la horizontal.

En resumen, fueron instalados 6 testigos en el museo, sin embargo, para los intereses de esta investigación solo se han considerado las mediciones de cuatro de ellos (T2, t4 y T4) de los datos obtenidos se ha observado que los mayores desplazamientos se presentan directamente en la zona de la falla en los testigos ubicados sobre las grietas originadas en el corte transversal que divide al Museo. Por otro lado, los dos testigos restantes presentan desplazamientos más pequeños, pero de acuerdo con los registros pudiesen indicar una elevación del suelo por efectos del crecimiento de las raíces del árbol mencionado anteriormente.

5.3 Modelo estructural del Museo

5.3.1 Características generales del Museo

Como ya se mencionó con anterioridad al tratar de reproducir las geometrías tan complejas que suponen los edificios históricos el método de elementos finitos es de gran ayuda ya que los modelos se pueden describir con mayor precisión. Para este caso de estudio se utilizó el software de análisis Sap2000 en su versión 20.2.0. Para realizar el análisis se utilizaron elementos sólidos rectangulares con ocho nodos para describir el cuerpo de la estructura, además, de considerar ciertas idealizaciones como considerar iguales todos los espesores de los muros, columnas de sección cuadrada y espesor uniforme de 0.2m en bóvedas. También se considera las mismas propiedades mecánicas en muros y columnas, siendo estos elementos construidos a base de piedra y por otro lado se consideran las propiedades de mampostería de tabique para las bóvedas (ver tabla 8).

En la medida de lo posible se trató de representar todos los elementos estructurales descritos en el apartado 5.1.1, es decir, columnas, muros, bóvedas, puertas y ventanas, además de la ubicación de la falla sobre la estructura. En la figura 17 se presenta el modelo numérico realizado en Sap2000.

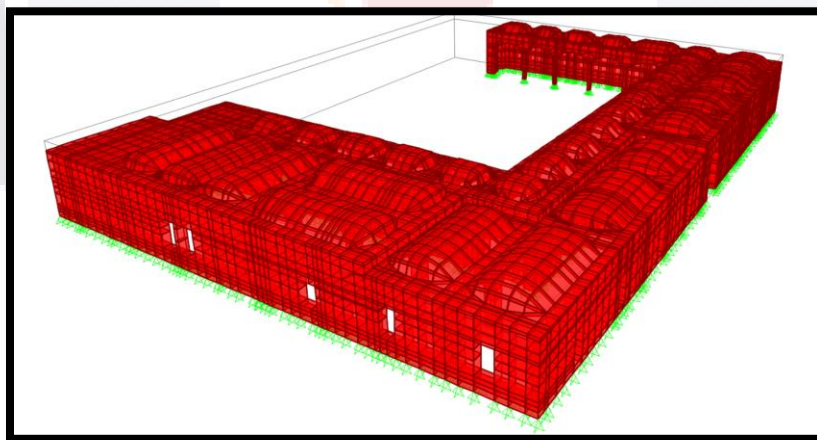


Figura 17. Modelo de elementos finitos (vista tridimensional). Fuente: elaboración propia

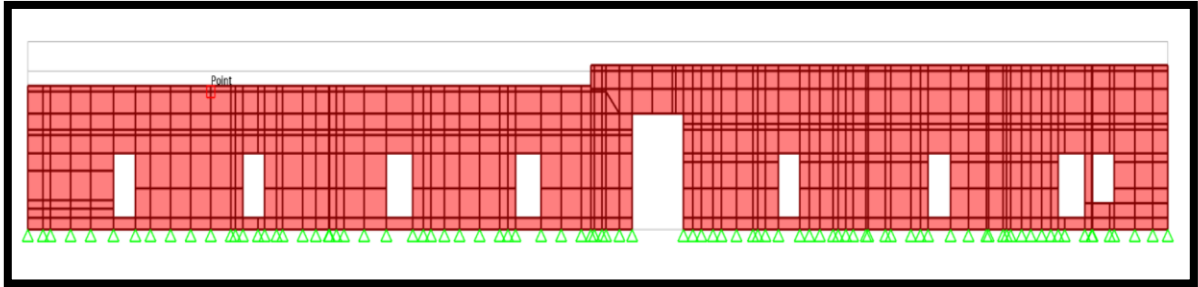


Figura 18. Modelo de elementos finitos (fachada principal). Fuente: elaboración propia



Figura 19. Modelo de elementos finitos (fachada de lado norte). Fuente: elaboración propia

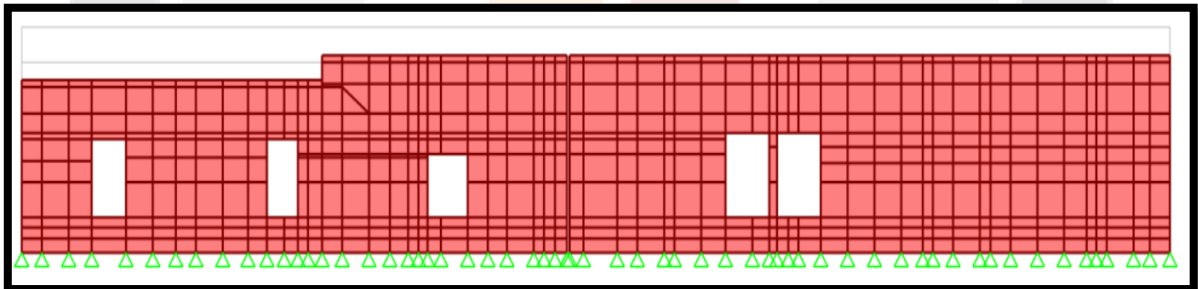


Figura 20. Modelo de elementos finitos (fachada lado sur). Fuente: elaboración propia

5.3.2 Materiales

Para alimentar al modelo numérico con las características mecánicas de los materiales presentes en el museo, se realizó una consulta de investigaciones relacionadas con las propiedades de la mampostería. Como referencia se tomó la propuesta realizada por Meli (1998) en donde describe las propiedades de la mampostería de diferentes materiales (Tabla 2), sin embargo, también se consideró el estudio realizado por Montalvo (2013).

En términos generales en el Museo de la Insurgencia existen dos materiales principalmente. En primer lugar, para los muros se consideró un tipo de mampostería en bruto con aparejo de

pedra irregular, considerando una proporción 65% piedra y 35% mortero, similar a las propiedades de los materiales empleados en los templos conventuales del siglo XVI (Chávez, 2010) y de igual manera para las columnas que soportan los arcos del patio central, por otro lado, para las bóvedas en los pasillos y las salas de exhibición se utilizó mampostería de ladrillo rojo recocido. Para realizar el modelo numérico también se idealiza que los materiales son isotrópicos y homogéneos con la finalidad de simplificar el análisis. En la tabla 8 se presentan los valores de las propiedades mecánicas base de los materiales.

Tabla 8. Propiedades mecánicas de los materiales del modelo numérico. Chávez (2010)

Material	Peso volumétrico (kg/m ³)	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)	Relación de Poisson
Mampostería de tabique rojo recocido (bóvedas)	1550	5400	0.3
Mampostería de piedra irregular (columnas y muros)	1800	4420	0.3

5.4 Metodología de mediciones de vibración ambiental

5.4.1 Equipo

Para el registro de las señales se emplearon sensores de velocidad de 0.5 hz de frecuencia natural midiendo en la dirección vertical y en dos direcciones horizontales ortogonales entre sí, que se hicieron coincidir con los ejes longitudinal y transversal de la estructura, como controlador se utilizó un sismógrafo Geometrics modelo GEODE Ultra Light, el cual, se conecta para ser controlado por una computadora en campo (ver fig. 21).



Figura 21. Sismógrafo Geode Ultra-light.

Los aparatos utilizados miden las velocidades del movimiento. Para este estudio se usaron geófonos unidireccionales por lo que para describir los movimientos de un punto de manera íntegra se colocan 2 aparatos y se realizan dos mediciones en cada punto, una en sentido vertical y longitudinal y otra en sentido vertical y transversal.



Figura 22. Imagen de sensores de velocidad empleados en la toma de lecturas. Fuente: elaboración propia

5.4.2 Selección de puntos de medición

Antes de iniciar con las mediciones es necesario definir la ubicación donde se han de ubicar los dispositivos para realizar el registro de las señales. De acuerdo con Castro (2016) para definir los sitios en donde se han de realizar las mediciones es necesario antes que nada conocer el comportamiento dinámico de la estructura a través de un análisis modal, además, de tener en cuenta la accesibilidad disponible en el edificio.

A partir del análisis modal es posible visualizar los principales modos de vibrar de la estructura y observar las formas modales obtenidas del modelo numérico. De esta manera lo

que se trata de hacer al momento de recabar información sobre las vibraciones del edificio es identificar los principales modos de vibrar sobre la estructura real.

Para la realización de este estudio fueron seleccionados 6 puntos en donde se realizaron mediciones en las tres direcciones (longitudinal, transversal y vertical). La figura 23 muestra la ubicación de las mediciones realizadas sobre el modelo numérico realizado.



Figura 23. Puntos de medición de vibración ambiental.

5.5 Caracterización dinámica del terreno

Para determinar el periodo fundamental del terreno se tomaron registros de vibración ambiental en tres direcciones (Norte-Sur, Este-Oeste y la componente vertical) sobre el terreno para implementar la técnica descrita por Nakamura, también conocida como razón espectral H/V (Nakamura, 1989).

El tiempo de registro en cada punto depende en gran medida del valor esperado de frecuencia del sitio, por lo general se realizan mediciones de 5 a 10 minutos. Es necesario considerar los factores que pudiesen alterar las mediciones, ya que si se tienen fuentes de vibración ajenas al sistema será necesario ampliar el tiempo de medición para lograr obtener un mayor número de intervalos de señal limpia.

Debido a las limitaciones que se presentaron con el equipo disponible, el registro de las vibraciones en las tres direcciones se realizó en dos mediciones consecutivas, una medición registrando la componente vertical y longitudinal y otra medición registrando la componente vertical y transversal.

Para aplicar el método descrito por Nakamura fue necesario combinar ambas mediciones empleando el software de análisis de señales sísmicas PIKWIN y una vez

finalizado este proceso el resultado final fue una señal registrada en sus tres componentes (dos horizontales y una vertical) tal como lo describe la figura 24.

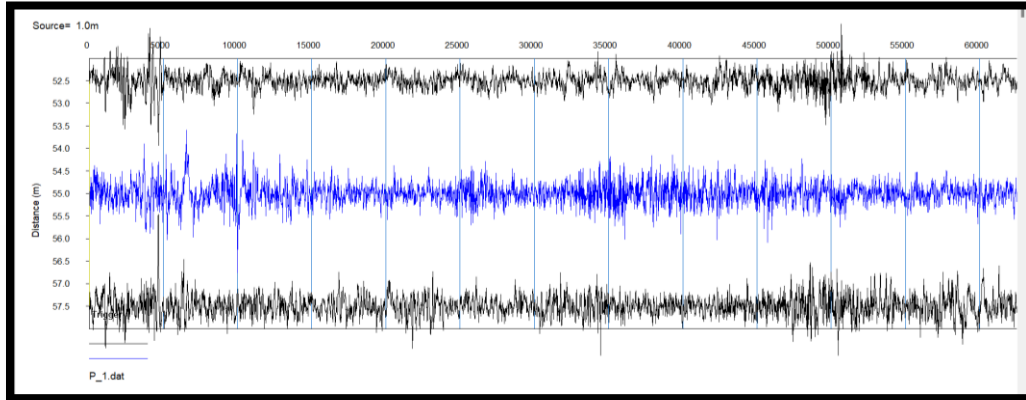


Figura 24. Señales sísmicas registradas en el terreno. Fuente: elaboración propia

5.5.1 Procesamiento de datos

Cuando la señal termina de medirse es necesario realizar el proceso de las señales medidas de acuerdo con el método descrito por Nakamura:

Paso 1.

El proceso consiste en separar el total de la duración del registro de las señales en ventanas de tiempo que por lo general van de 20 a 30s. La selección de dichas ventanas se basa en la homogeneidad de las frecuencias registradas, donde se eliminan las ventanas que presentan eventos transitorios (variaciones de amplitud significativas) producidos por factores externos (ver fig. 25).

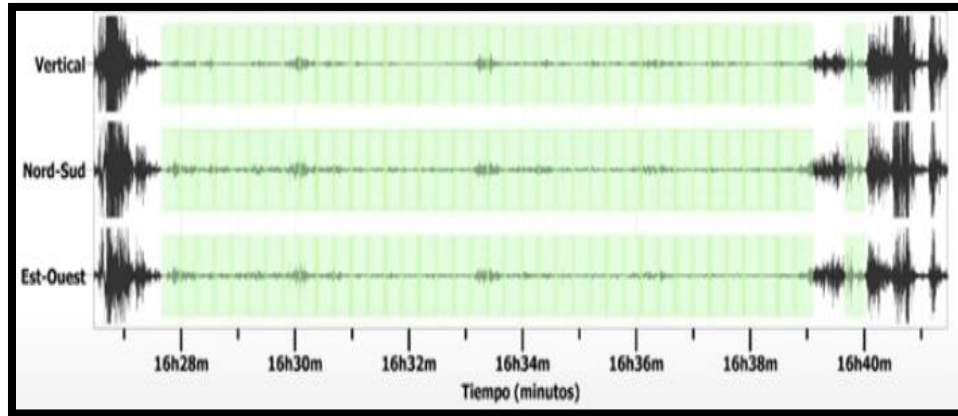


Figura 25. Seccionamiento de señal sísmica en ventanas de tiempo. Fuente: manual SESAME

Paso 2.

El siguiente paso es calcular los espectros de cada ventana de tiempo para cada una de las tres componentes y el resultado será dos espectros horizontales y uno vertical.

Los espectros horizontales se pueden combinar por medio de un promedio o media aritmética para obtener un solo espectro horizontal.

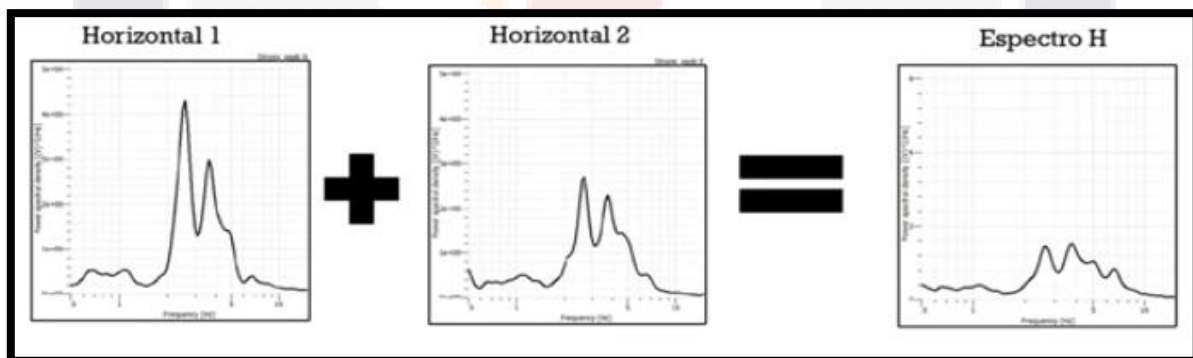


Figura 26. Promedio de espectros horizontales. Fuente: elaboración propia

Paso 3.

Siguiendo la metodología descrita por Nakamura se debe calcular la razón espectral H/V, graficando en el eje x la frecuencia y en el eje y la amplitud.

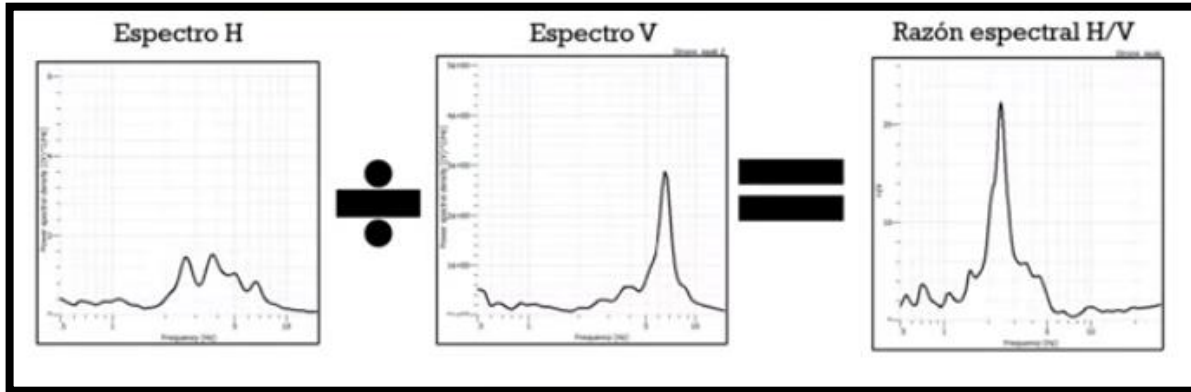


Figura 27. Razón espectral H/V. Fuente: elaboración propia

Paso 4.

Para todos los resultados de las curvas H/V se determina el promedio y su respectiva desviación estándar. Por lo general todas las curvas guardan una figura similar, sin embargo, si esto no sucede se deberá realizar la medición de nuevo ya que esto indica un error en la medición o la toma de ventanas con ruido.

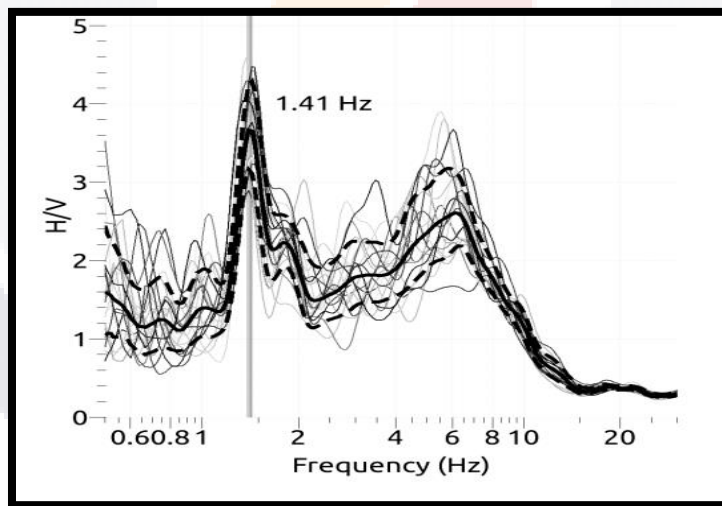


Figura 28. Promedio de curvas H/V. Fuente: manual SESAME

5.6 Caracterización dinámica de la estructura

De la misma manera en que se realizaron las mediciones en el terreno fue necesario instalar el equipo sobre la bóveda en los puntos descritos en el apartado 5.4.2 para realizar las

mediciones de vibración ambiental y conocer la respuesta dinámica de los bloques del edificio. En las siguientes imágenes se muestra de manera gráfica la colocación del equipo y la realización de las mediciones.



Figura 29. Mediciones de vibración ambiental sobre el punto 2



Figura 30. Mediciones de vibración ambiental sobre el punto 3.



Figura 31. Mediciones de vibración ambiental sobre el punto 4.



Figura 32. Mediciones de vibración ambiental sobre el punto 5



Figura 33. Mediciones de vibración ambiental sobre el punto 6

6. Análisis estructural

6.1 Análisis por cargas gravitacionales

Como se mencionó anteriormente las edificaciones antiguas son principalmente estructuras que trabajan como sistemas de gravedad y transmiten las cargas aplicadas hacia la base por medio de esfuerzos de compresión. Para verificar la correcta transmisión de las solicitaciones por gravedad se realizó un análisis de las deformaciones de la estructura por acción de las cargas gravitacionales, además, se pudieron identificar las posibles zonas críticas a través de los diagramas de distribución de esfuerzos. Es importante mencionar que para el análisis solo se contempló el peso de la estructura debido a que no tiene otras solicitaciones en la realidad.

En la figura 35 se puede observar el mapa de isovalores para los esfuerzos generados en el Museo de la Insurgencia. En términos generales se aprecia que la escala de valores comprende solo esfuerzos de compresión, lo que indica, que la transmisión de esfuerzos se da de manera correcta hacia el suelo.

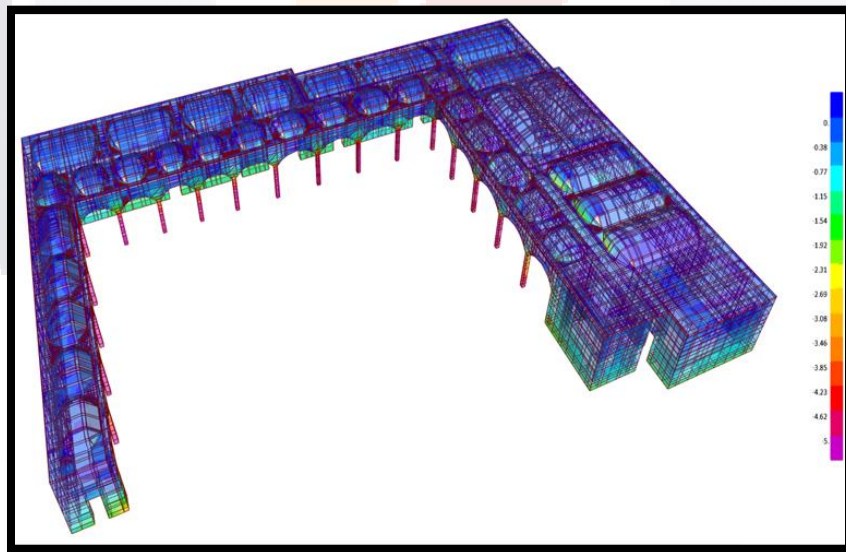


Figura 34. Esfuerzos axiales verticales en kg/cm^2 (vista tridimensional). Fuente: elaboración propia.

Las mayores solicitaciones se dan en las bases de las columnas y de manera puntual se puede observar una concentración de esfuerzos en la parte alta de la columna 3, lo cual, se justifica plenamente al observar el volado que está soportando después de la intervención realizada en el museo en donde se desligaron ambos bloques, provocando un aumento en las solicitaciones de ese punto de la estructura.

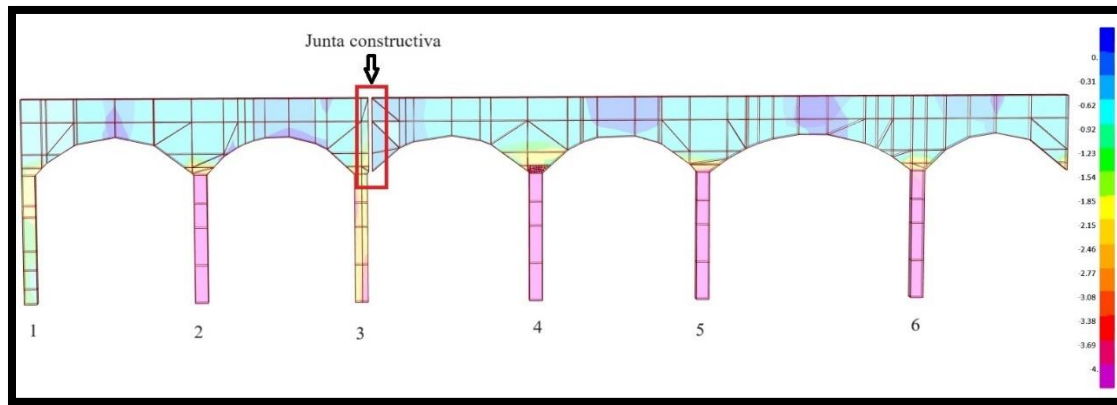


Figura 35. Esfuerzos axiales en arcos del lado norte en kg/cm². Fuente: elaboración propia

Por último, los esfuerzos promedio en la base son del orden de 1.2 kg/cm² y por otro lado los máximos esfuerzos se presentan en las bases de las columnas del patio con 8.01 kg/cm² aproximadamente, también se puede apreciar la notable disminución de presiones en las zonas manchadas en color azul, exactamente donde se ubican las ventanas donde el esfuerzo generado es del orden de 0.05 kg/cm² (ver fig. 24).

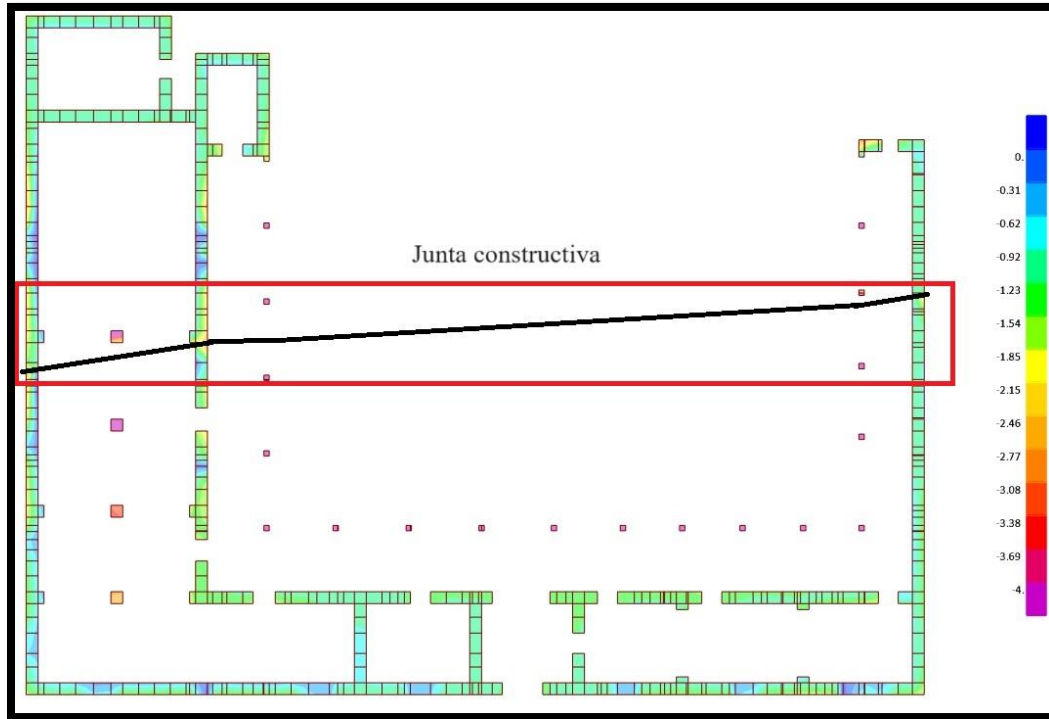


Figura 36. Esfuerzos axiales verticales en la base en kg/cm^2 . Fuente: elaboración propia.

Con base en las figuras mostradas (fig. 35, fig. 36 y fig. 37), en ningún caso los esfuerzos actuantes son mayores a los $12.8 \text{ kg}/\text{cm}^2$ de esfuerzo resistente a compresión de la mampostería de piedra por lo que se puede decir de manera preliminar que la mampostería del Museo se encuentra en buenas condiciones hablando en términos de resistencia.

Como se mencionó anteriormente el museo se encuentra dividido estructuralmente en 3 bloques independientes uno del otro, por lo que, para observar de manera más clara los resultados, el modelo numérico fue dividido en tres modelos independientes, los cuales, se presentan a continuación. De la misma manera en las figuras (38, 39 y 40) se observan las deformaciones más representativas.

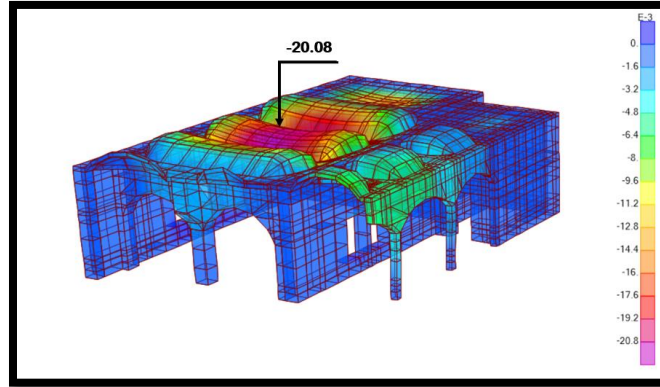


Figura 37. Desplazamientos por peso propio en dirección vertical en mm (bloque 1).
Fuente: elaboración propia

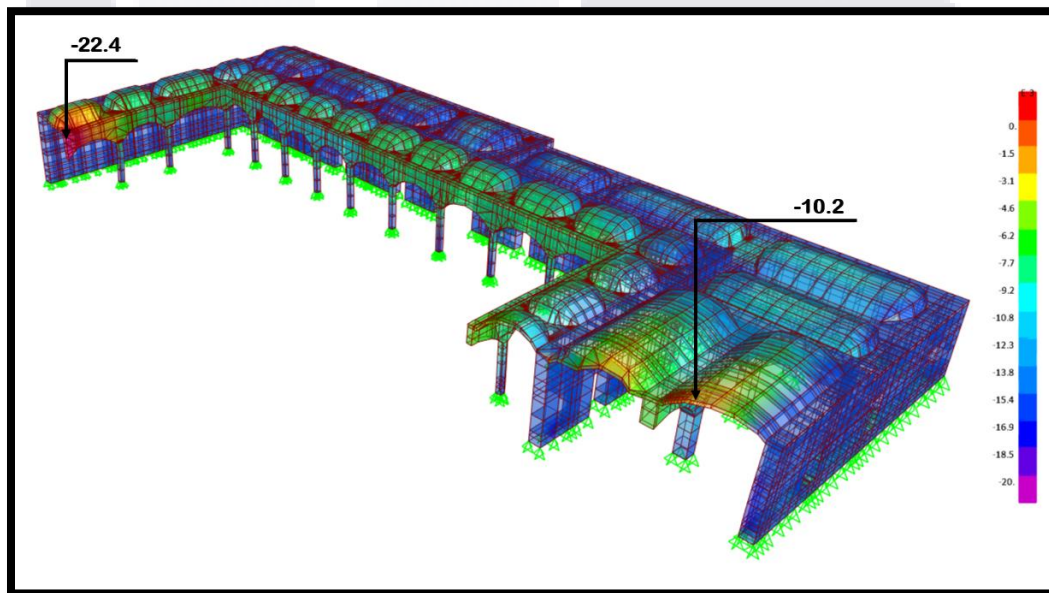


Figura 38. Desplazamientos por peso propio en dirección vertical en mm (bloque 2).
Fuente: elaboración propia

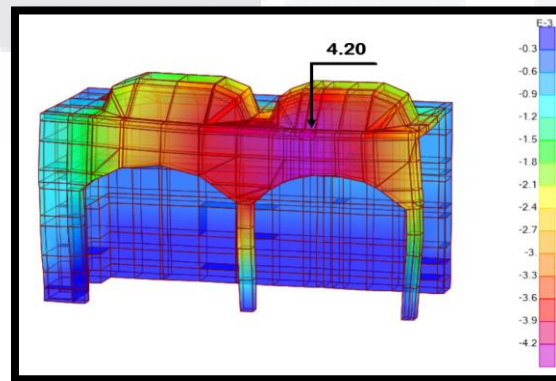


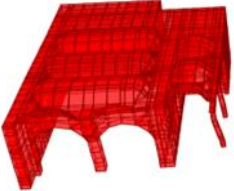
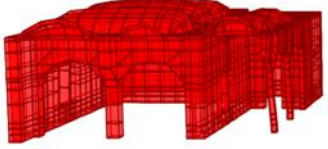
Figura 39. Desplazamientos por peso propio en dirección vertical en mm (bloque 3).
Fuente: elaboración propia

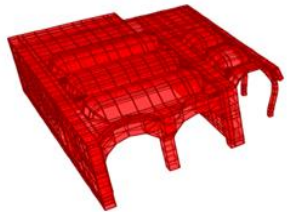
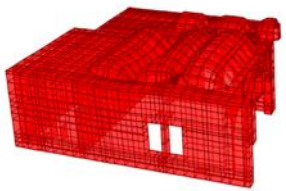
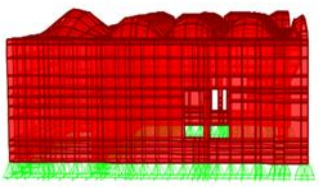
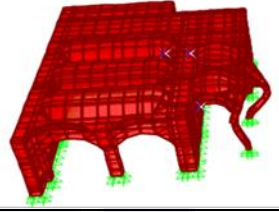
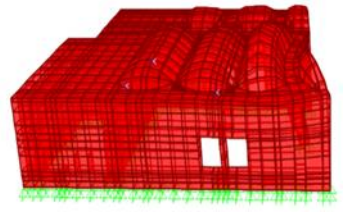
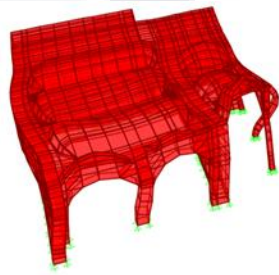
6.2 Análisis modal

De acuerdo con Aganzo de Santos (2017) gracias al análisis modal es posible conocer el comportamiento dinámico de las estructuras ante una excitación. Por otro lado, Castro Triguero (2016) menciona que el principal objetivo de estos es obtener: frecuencias naturales, formas modales y factores de amortiguamiento. Para interpretar lo anterior, podemos decir que conocer el comportamiento dinámico de un edificio ayuda a tener una mejor comprensión de la estructura y de esta manera predecir los diferentes efectos que se pueden presentar al recibir una excitación.

Identificar las formas modales de una estructura sirvió como punto de partida para hacer los arreglos y definir los sitios de medición pertinentes a la hora de realizar pruebas de vibración ambiental para determinar las frecuencias fundamentales de la estructura. Para el Museo de la Insurgencia se realizó un análisis modal con la finalidad de identificar las principales formas de vibrar traslacionales (en sentido transversal y longitudinal) de la estructura y sus respectivas frecuencias. En las siguientes tablas (9, 10 y 11) se presentan los principales modos traslacionales para los tres bloques que integran al museo.

Tabla 9. Formas modales del Museo de la Insurgencia (bloque 1). Fuente: elaboración propia

Modo	Frecuencia	Masa Modal	Forma Modal	Imagen
1	3.544 Hz	L=0.002% T=32.9% V=0.0%	Primer modo traslacional en sentido transversal, movimiento lateral de la bóveda.	
2	3.780 Hz	L=0.0% T=0.01% V=3.3%	Modo vertical de la bóveda combinado con oscilaciones transversales encontradas de los muros	

3	4.652 Hz	L=0.0% T=3.1% V=0.0%	Modo de vibraciones transversales en columnas combinado con leves rotaciones de la bóveda alrededor del eje vertical	
4	4.935 Hz	L=0.3% T=0.0% V=0.01%	Combinacion de oscilaciones verticales en bóveda y vibraciones transversales en muros longitudinales	
5	5.392 Hz	L=0.0% T=0.0% V=1.1%	Modo vertical, vibraciones en sentido vertical en zona de losa plana.	
6	5.498 Hz	L=0.01% T=0.06% V=0.0%	Vibraciones en sentido transversal de columnas del pasillo con oscilaciones verticales en zona de bóvedas	
7	5.91 Hz	L=17.1% T=0.022% V=0.02%	Primer modo longitudinal, vibraciones en sentido longitudinal	
8	6.88 Hz	L=1.00% T=17.90% V=0.00%	Segundo modo transversal.	

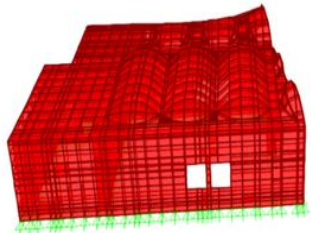
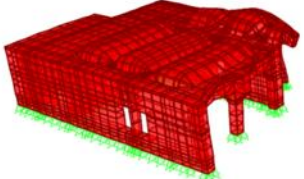
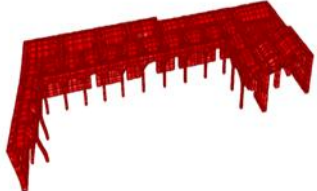
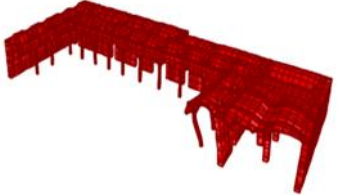
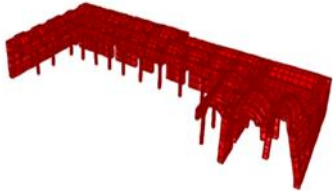
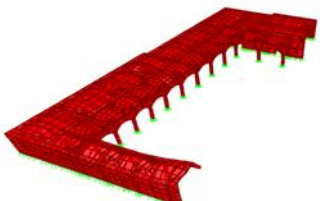
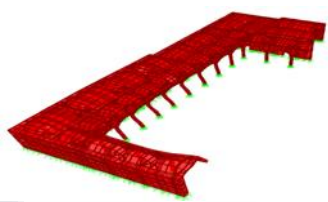
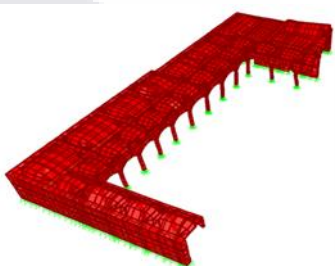
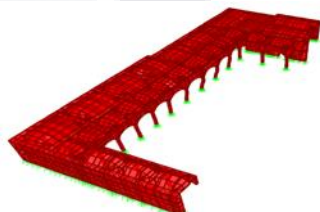
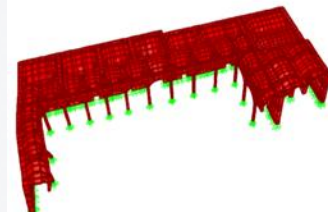
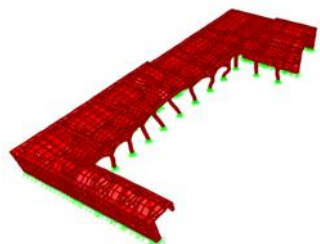
9	7.09 Hz	L=4.60% T=1.3% V=0.6%	Vibraciones en sentido vertical en bovedas del pasillo	
10	7.39 Hz	L=17.30% T=0.05% V=0.00%	Segundo modo longitudinal.	

Tabla 10. Formas modales del Museo de la Insurgencia (bloque 2)

Modo	Frecuencia	Masa Modal	Forma Modal	Imagen
1	1.97 Hz	L=0.005% T=5.00% V=0.0%	Modo transversal, movimiento lateral de apéndice del lado norte (pasillo norte)	
2	2.71 Hz	L=3.02% T=7.80% V=0.005%	Segundo modo transversal, movimientos laterales en sentido transversal en zona de sala de exhibición sur.	
3	3.42 Hz	L=0.0% T=3.1% V=0.0%	Tercer modo transversal. Desplazamiento lateral del apéndice del lado sur.	

4	3.49 Hz	L=2.30% T=0.03% V=0.14%	Vibraciones paralelas al eje longitudinal en zona de bóvedas de sala de exhibición oriente.	
5	3.76 Hz	L=18.10% T=0.15% V=0.10%	Primer modo longitudinal, se presentan oscilaciones sobre el eje longitudinal sobre el cuerpo central.	
6	3.94 Hz	L=0.02% T=3.50% V=0.0%	Se observan desplazamientos transversales de arcos paralelos al eje longitudinal combinado con oscilaciones en bóveda de lado sur.	
7	4.30 Hz	L=1.4% T=0.08% V=0.003%	Segundo modo longitudinal	
8	4.60 Hz	L=0.019% T=2.8% V=0.19%	Movimientos transversales en cuerpo de pasillo del lado norte.	
9	4.67 Hz	L=6.7% T=0.0% V=0.0%	Modo longitudinal, desplazamientos en sentido longitudinal con mayor participacion de la seccion central.	

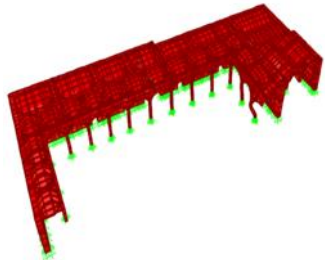
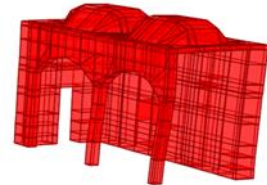
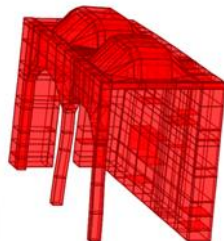
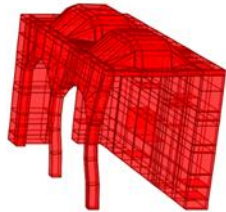
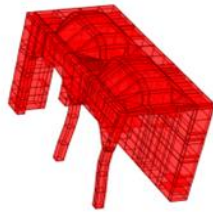
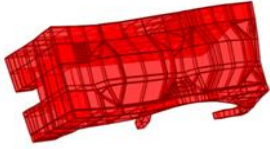
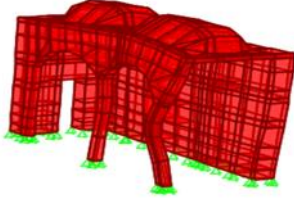
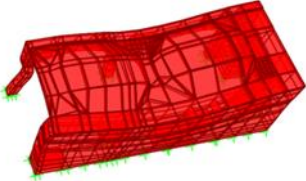
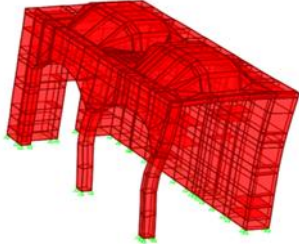
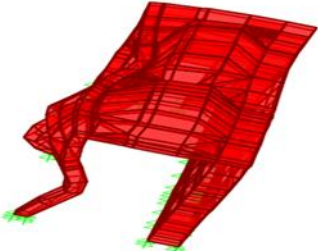
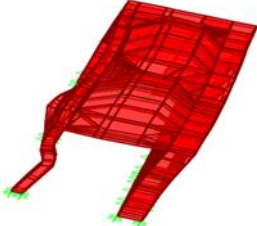
10	4.73 Hz	L=0.90% T=0.40% V=0.01%	Desplazamientos en sentido transversal de arcos del lado sur combinado con oscilaciones de arcos centrales en sentido longitudinal	
----	---------	-------------------------------	--	---

Tabla 11. Formas modales del Museo de la Insurgencia (bloque 3)

Modo	Frecuencia	Masa Modal	Forma Modal	Imagen
1	1.996 Hz	L=2.7% T=39.3% V=0.0%	Primer modo transversal, movimiento lateral del cuerpo.	
2	4.745 Hz	L=16.3% T=25.6% V=0.0%	Segundo modo transversal combinación de dirección de la masa modal con mayor participación en dirección longitudinal.	
3	5.32 Hz	L=0.0% T=3.4% V=0.0%	Vibraciones laterales de las columnas combinado con desplazamientos laterales de la bóveda	
4	6.15 Hz	L=2.4% T=0.30% V=0.02%	Desplazamientos longitudinales del muro, lo que genera oscilaciones en arcos.	

5	7.78 Hz	L=23.0% T=0.46% V=2.8%	Primer modo longitudinal combinado con torsión sobre el eje vertical	
6	8.22 Hz	L=7.3% T=1.4% V=7.2%	Combinación de dirección de masa modal con mayor participación vertical en las bóvedas.	
7	9.72 Hz	L=7.5% T=1.80% V=0.3%	Vibraciones longitudinales combinado con efectos de torsión sobre el mismo eje	
8	9.86 Hz	L=1.60% T=5.90% V=0.09%	Modo transversal de la estructura.	
9	10.56 Hz	L=0.03% T=1.60% V=1.2%	Modo longitudinal combinado con torsión sobre el eje vertical	
10	12.12 Hz	L=0.40% T=3.2% V=0.0%	Modo transversal de la estructura.	

6.3 Frecuencias naturales en suelo y el edificio

El objetivo principal que se tiene al caracterizar dinámicamente el terreno sobre el cual está fundada una edificación es el estudio de los efectos de sitio para verificar que no haya resonancia (cuando el suelo y la estructura vibran con la misma frecuencia) ya que cuando una fuerza se aplica repetidamente a un sistema con la frecuencia natural del mismo, el resultado es la aparición de ondas de gran magnitud al grado que esto puede influir directamente sobre la estructura.

Para el presente caso de estudio el procesamiento de las señales se realizó con ayuda del software *GEOPSY* (GEOPSY, 2012). Dicho programa presenta varias herramientas de ayuda para trabajar los datos como: seccionamiento de ventanas de procesamiento, tipo de suavizado de la curva H/V y el rango de muestro de frecuencia, etc. Para la medición realizada en el suelo se obtuvo que el terreno vibra con una frecuencia de 1.25Hz presentando una amplitud máxima en 1.12Hz aproximadamente como se puede apreciar en la figura 41.

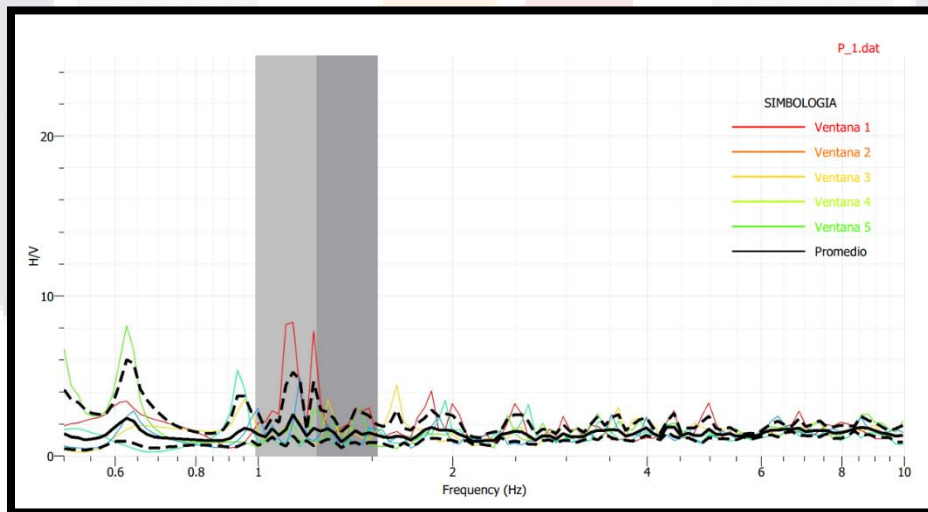


Figura 40. Grafica de función de transferencia del terreno donde se ubica el Museo de la Insurgencia. Fuente: elaboración propia

Por otro lado, una vez obtenidos los registros de las señales sísmicas sobre la estructura, estas fueron procesadas de manera similar a las del terreno, obteniendo así los espectros de frecuencia correspondientes a cada punto en cada dirección (transversal, longitudinal y vertical). Las gráficas correspondientes a dichas señales se presentan en seguida.

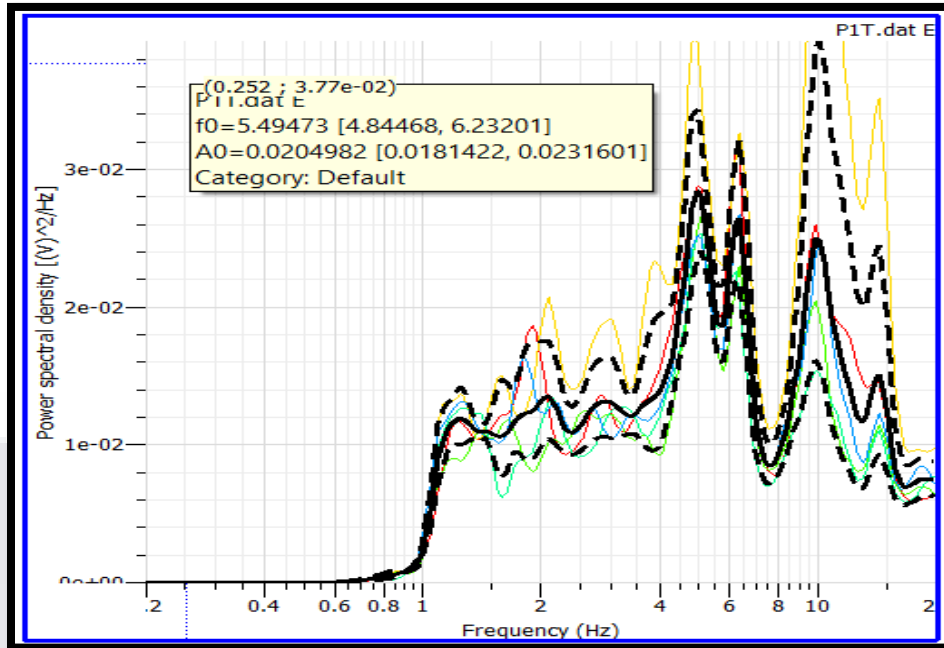


Figura 41. Espectro de frecuencias en el punto 2 (dirección x). Fuente: elaboración propia

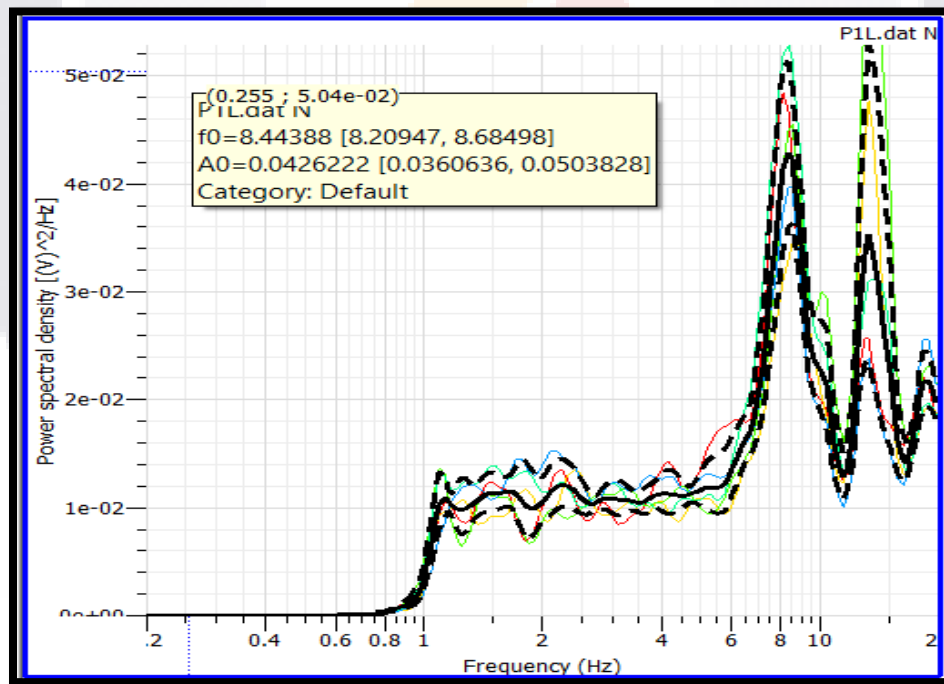


Figura 42. Espectro de frecuencias en el punto 2 (dirección Y). Fuente: elaboración propia

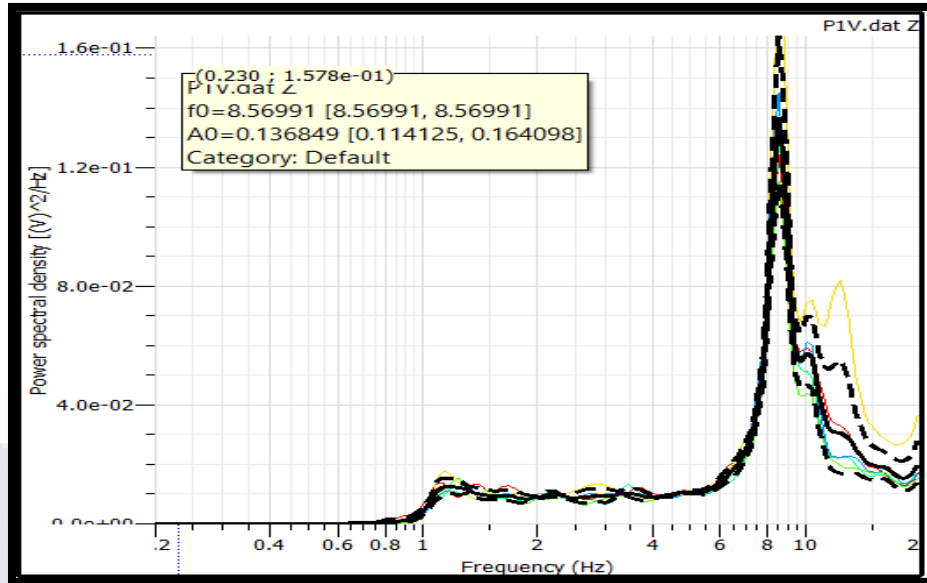


Figura 43. Espectro de frecuencias en el punto 2 (dirección V). Fuente: elaboración propia

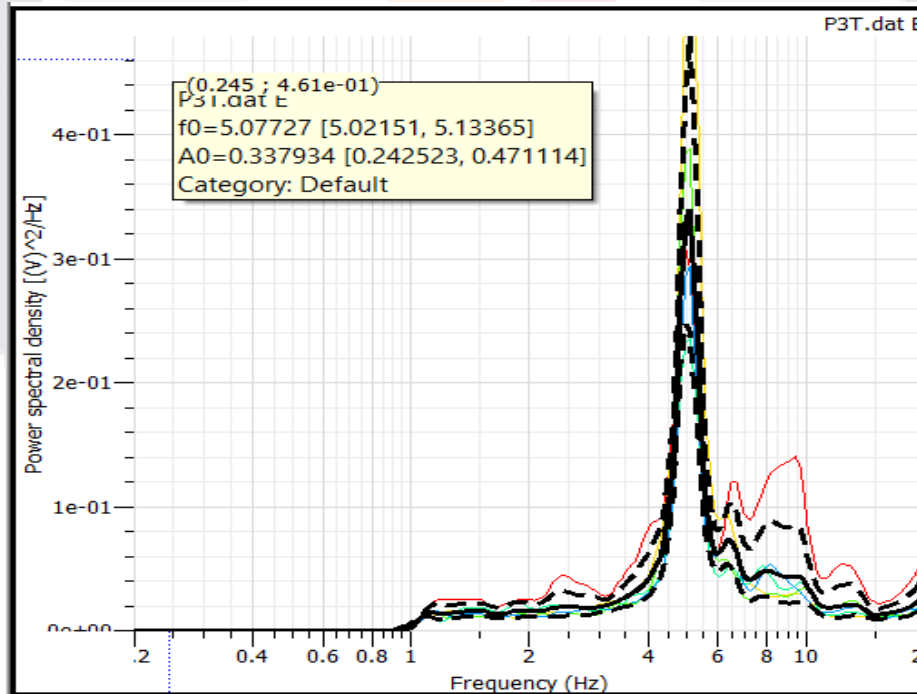


Figura 44. Espectro de frecuencias en el punto 3 (dirección X). Fuente: elaboración propia

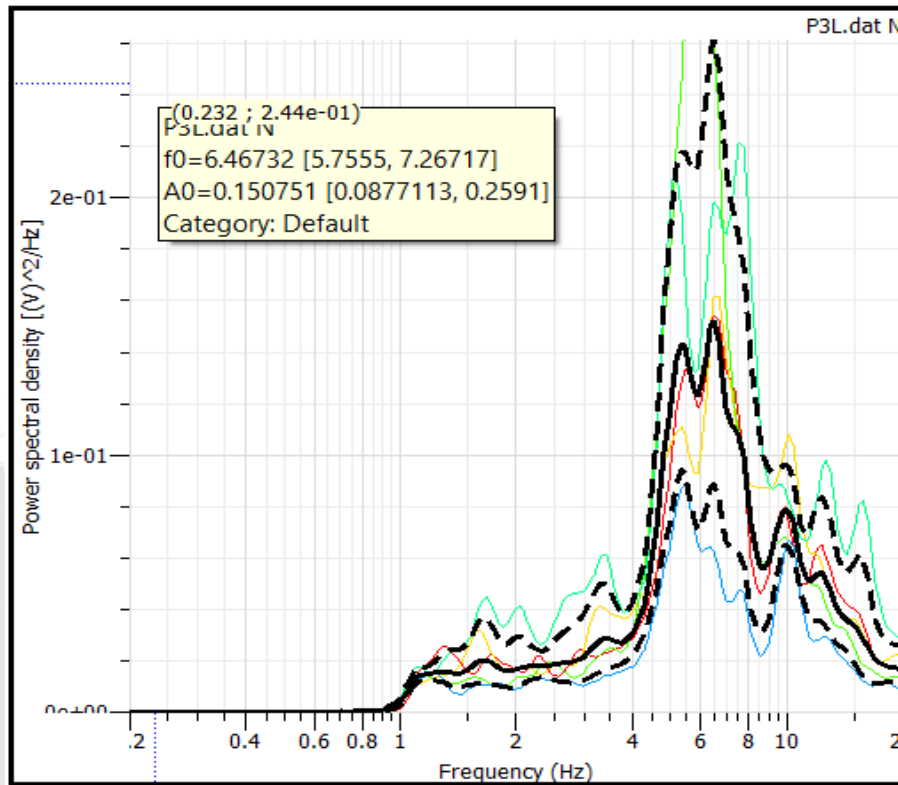


Figura 45. Espectro de frecuencias en el punto 3 (dirección Y). Fuente: elaboración propia

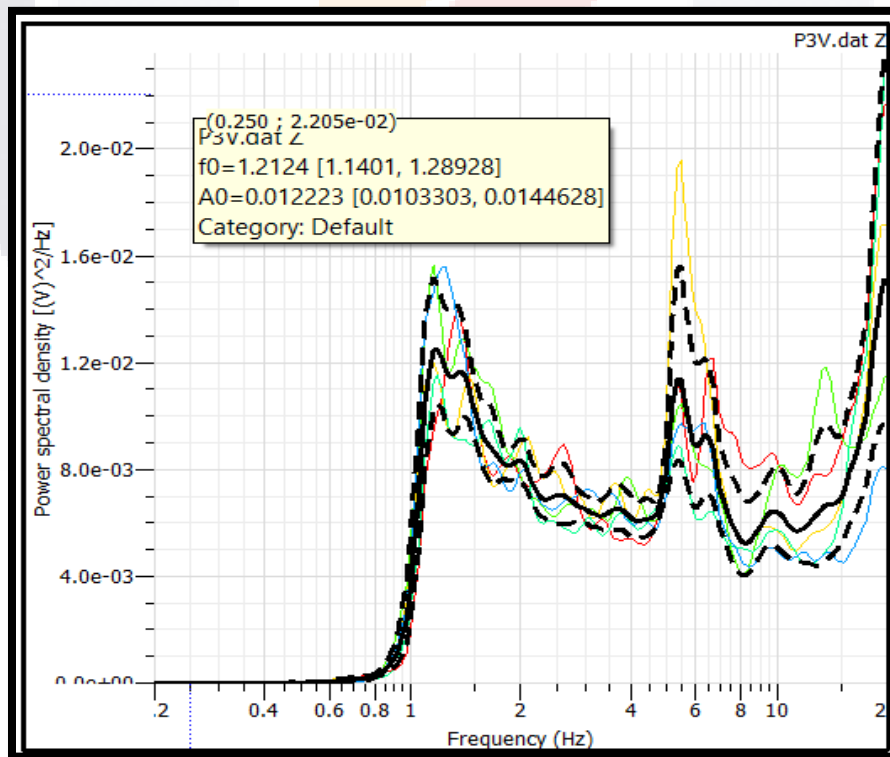


Figura 46. Espectro de frecuencias en el punto 3 (dirección V). Fuente: elaboración propia

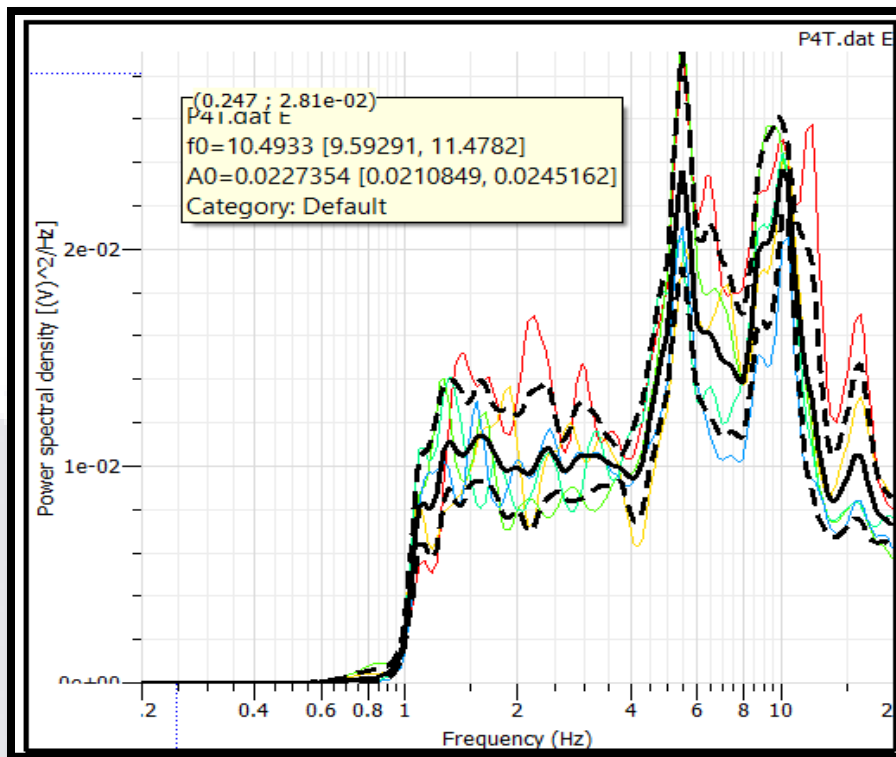


Figura 47. Espectro de frecuencias en el punto 4 (dirección X). Fuente: elaboración propia

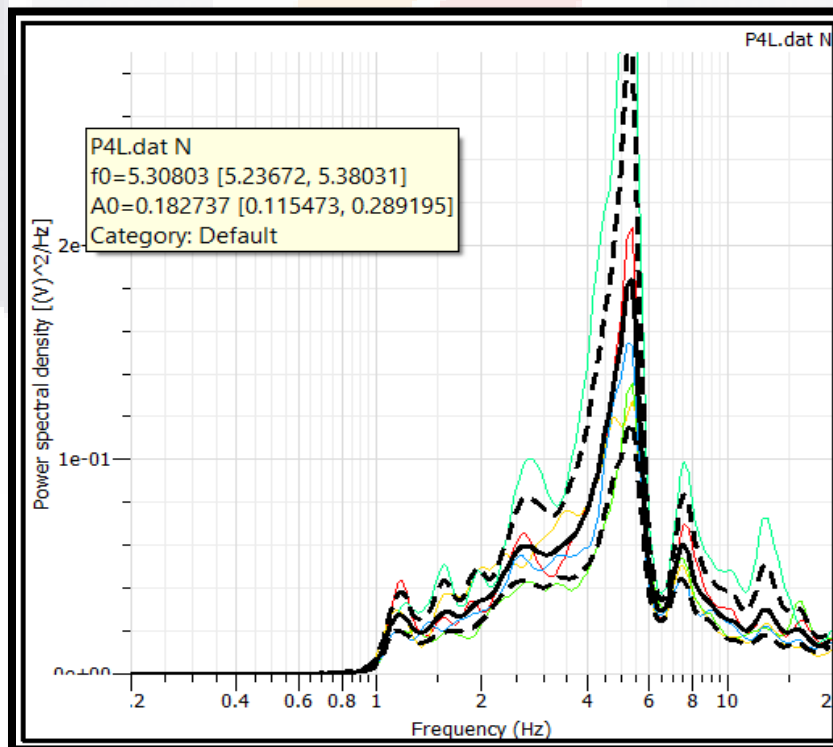


Figura 48. Espectro de frecuencias en el punto 4 (dirección Y). Fuente: elaboración propia

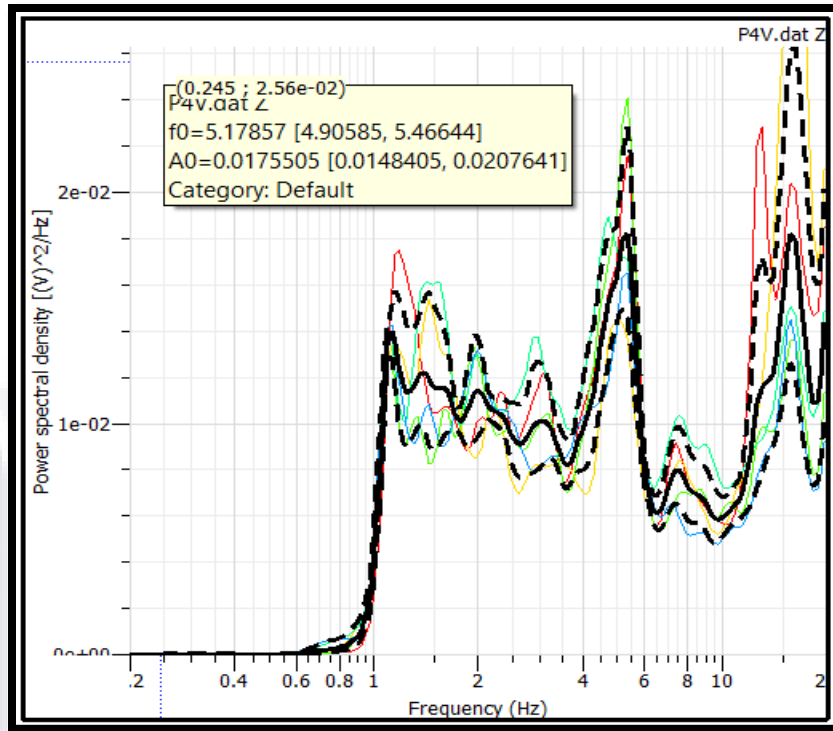


Figura 49. Espectro de frecuencias en el punto 4 (dirección V). Fuente: elaboración propia

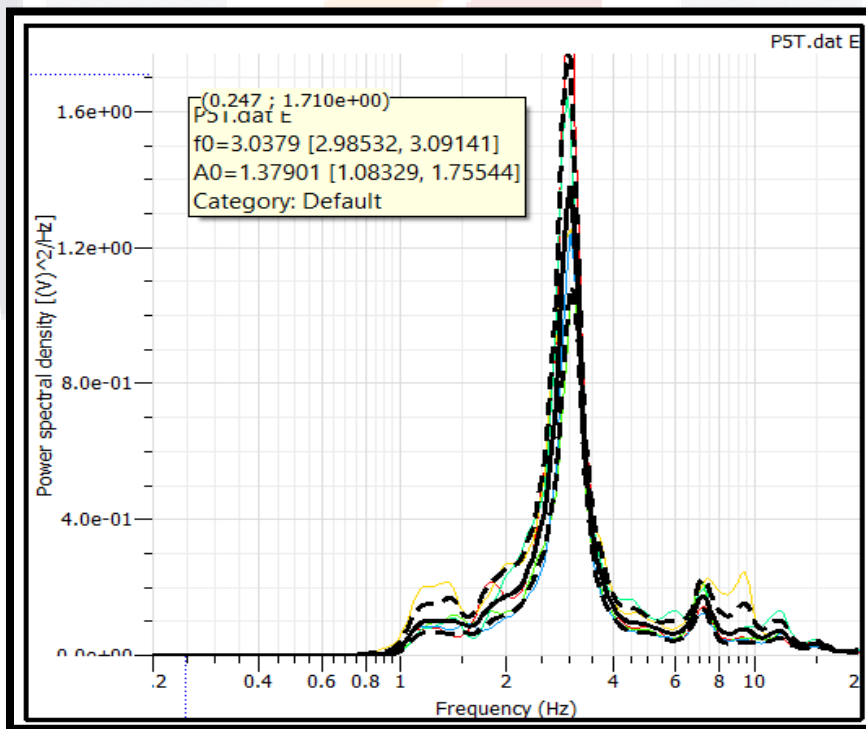


Figura 50. Espectro de frecuencias en el punto 5 (dirección X). Fuente: elaboración propia

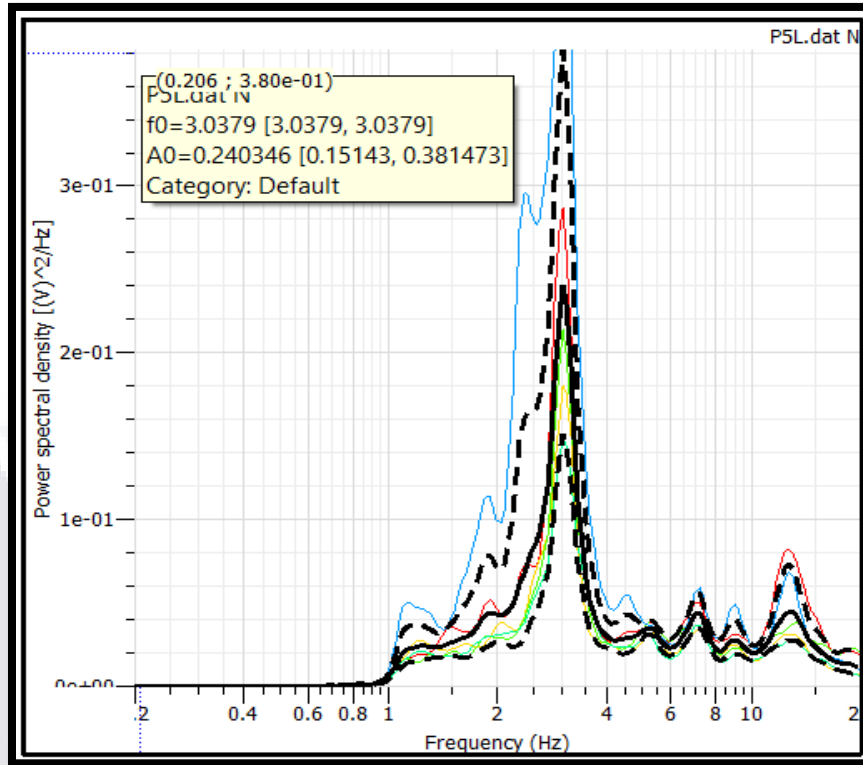


Figura 51. Espectro de frecuencias en el punto 5 (dirección Y). Fuente: elaboración propia

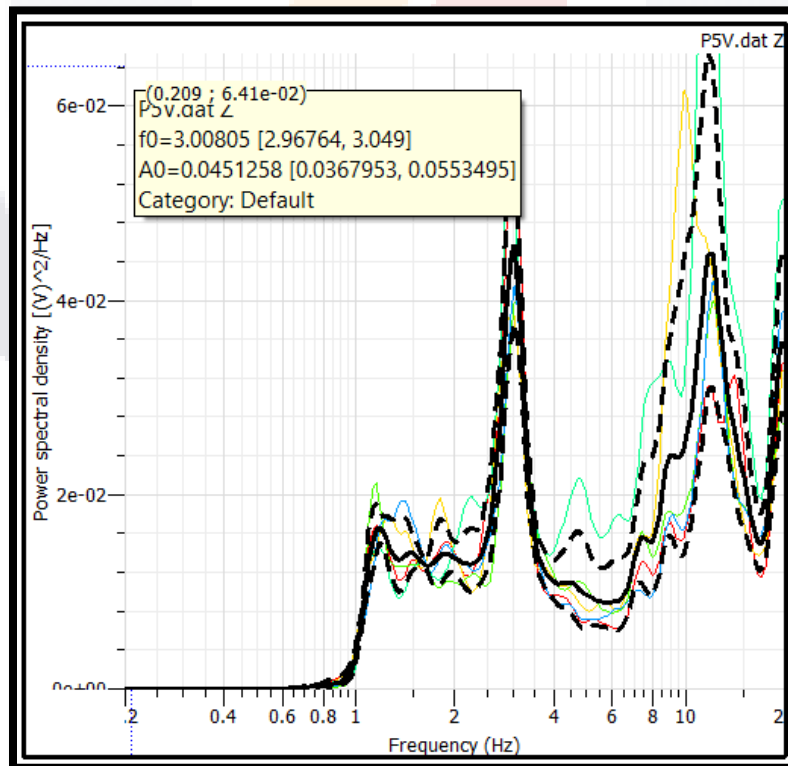


Figura 52. Espectro de frecuencias en el punto 5 (dirección V). Fuente: elaboración propia

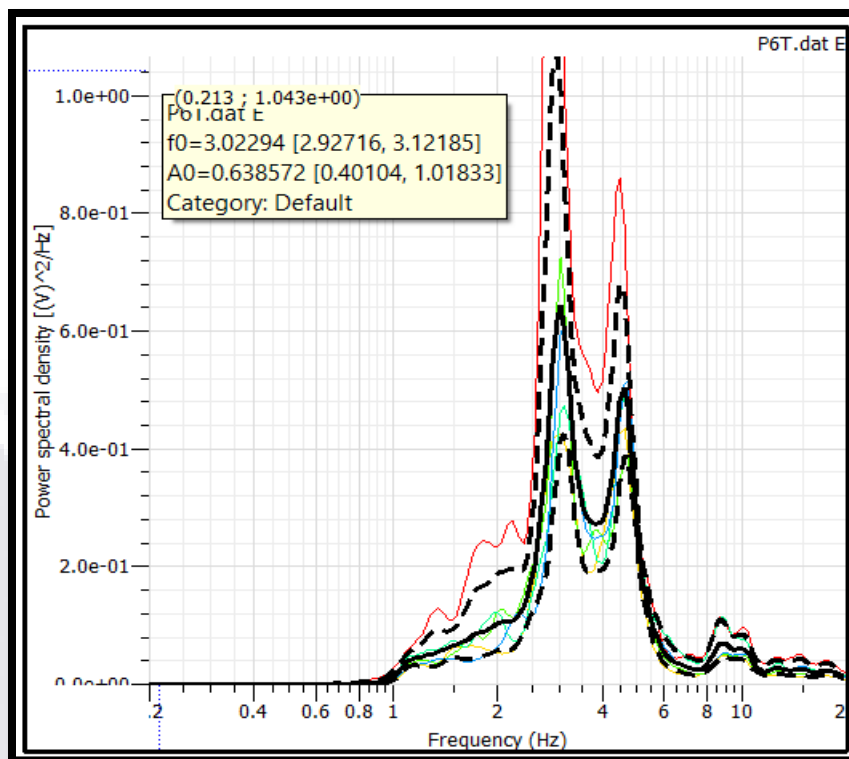


Figura 53. Espectro de frecuencias en el punto 6 (dirección X). Fuente: elaboración propia

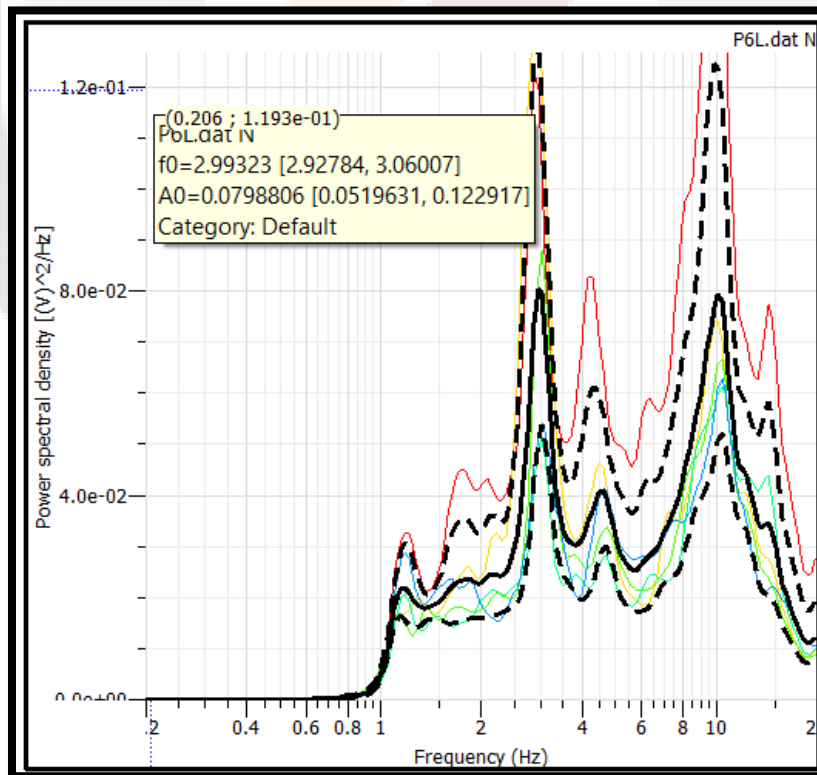


Figura 54. Espectro de frecuencias en el punto 6 (dirección Y). Fuente: elaboración propia

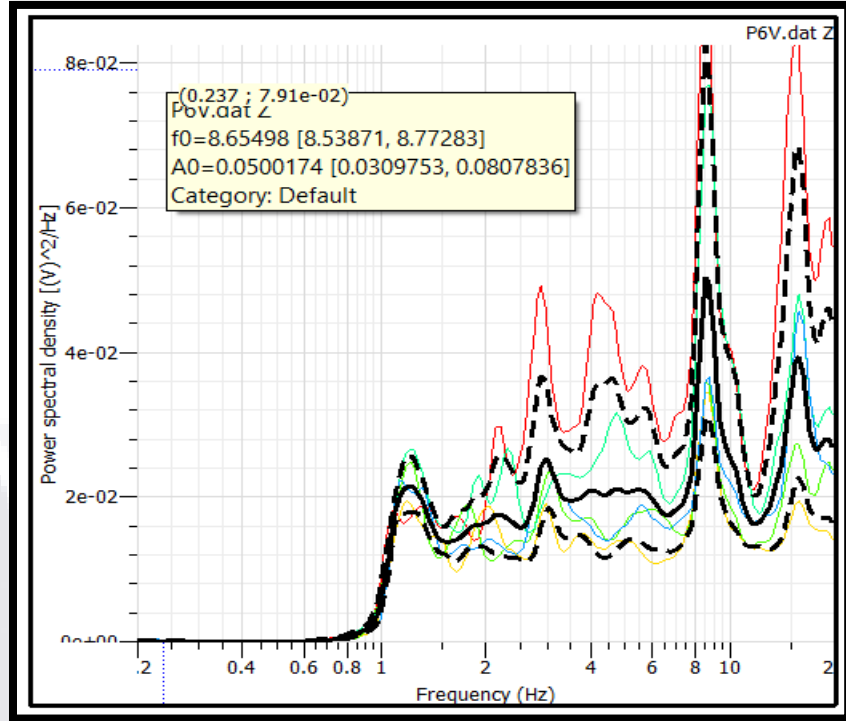


Figura 55. Espectro de frecuencias en el punto 6 (dirección V). Fuente: elaboración propia

6.4 Calibración del modelo

Como se menciona anteriormente las mediciones de vibración ambiental sirven principalmente para dos cosas, la primera es para estudiar los efectos de sitio sobre la estructura y la segunda es para realizar la calibración del modelo numérico. Para llevar a cabo dicho proceso se realizó una revisión de los principales modos de vibrar del museo a fin de identificar aquellos modos que coincidan con los obtenidos experimentalmente. Para el primer bloque se consideró el modo 1 que corresponde a la frecuencia encontrada en el punto 2 en sentido transversal y el modo 7 que corresponde a su primer modo longitudinal. Para el bloque número 2 se consideran los modos 1, 3 y 5 que corresponden a las frecuencias encontradas en los puntos 3, 4 y 5 (en sentido transversal, longitudinal y transversal). Por último, en el bloque más pequeño (3) se consideró el primer modo transversal que corresponde a la frecuencia encontrada en el punto 6 en el mismo sentido.

En la tabla 12 se muestra una comparativa de las frecuencias experimentales seleccionadas y las obtenidas con base al análisis modal del modelo numérico del edificio.

Tabla 12. Tabla de frecuencias modales sin calibrar.

Modelo bloque 1				
modo	Frecuencia experimental (Hz)	Frecuencia del modelo numérico base (Hz)	Forma modal	Variación
1	5.49	3.54	Modo transversal, movimiento lateral de la bóveda y muros.	55%
7	8.44	5.41	Modo longitudinal, oscilaciones del bloque en sentido longitudinal	56%
Modelo bloque 2				
1	3.03	1.97	Modo transversal, movimiento lateral del apéndice comprendido en pasillo norte	54%
3	5.07	3.42	Tercer modo transversal. Desplazamientos laterales en apéndice del lado sur.	48%
5	5.30	3.76	Primer modo longitudinal, oscilaciones paralelas al eje longitudinal en el cuerpo central.	41%
Modelo bloque 3				
1	3.02	1.97	Primer modo transversal con movimiento lateral de la boveda	54%

Como se puede observar hay una tendencia que indica que en general las frecuencias obtenidas experimentalmente son mayores a las obtenidas en el modelo.

Una vez establecidas las variaciones entre las mediciones realizadas en el museo y las frecuencias obtenidas en el modelo base es posible obtener simulaciones que representen un comportamiento más real de la estructura en medida de lo posible. El proceso consiste en aproximar las frecuencias arrojadas por el modelo numérico base a las obtenidas en la campaña experimental, para ello se calibraron las características mecánicas del museo ya que de ellas depende la rigidez de la estructura y por consecuencia su periodo.

Para la calibración se consideraron dos variables para realizar las iteraciones, las cuales fueron el módulo de elasticidad de la mampostería de piedra y el módulo de elasticidad de la mampostería de tabique, obteniendo de esta manera las frecuencias señaladas en la tabla 13.

Tabla 13. Tabla de frecuencias modales calibradas.

Modelo bloque 1				
modo	Frecuencia experimental (Hz)	Frecuencia del modelo numérico calibrado (Hz)	Forma modal	Variación
1	5.49	4.97	Modo transversal, movimiento lateral de la bóveda y muros.	10%
7	8.44	8.39	Modo longitudinal, oscilaciones del bloque en sentido longitudinal	1%
Modelo bloque 2				
1	3.03	3.60	Modo transversal, movimiento lateral del apéndice comprendido en pasillo norte	-16%
3	5.07	4.86	Tercer modo transversal. Desplazamientos laterales en apéndice del lado sur.	4%

5	5.30	5.64	Primer modo longitudinal, oscilaciones paralelas al eje longitudinal en el cuerpo central.	-6%
Modelo bloque 3				
1	3.02	2.92	Primer modo transversal con movimiento lateral de la boveda	4%

En la tabla 13 se aprecia una reducción en la variación de las frecuencias del modelo matemático calibrado con respecto de las frecuencias obtenidas en la campaña experimental, usando las características mecánicas descritas en la tabla 14.

Tabla 14. Propiedades mecánicas empleadas en la elaboración del modelo numérico.

Modelo bloque 1	
Variable	Valor obtenido
Módulo de elasticidad de la mampostería de tabique	8500 kg/cm ²
Módulo de elasticidad de la mampostería de piedra	12500 kg/cm ²
Modelo bloque 2	
Variable	Valor obtenido
Módulo de elasticidad de la mampostería de tabique	9500 kg/cm ²
Módulo de elasticidad de la mampostería de piedra	18000 kg/cm ²
Modelo bloque 3	
Variable	Valor obtenido
Módulo de elasticidad de la mampostería de tabique	6000 kg/cm ²
Módulo de elasticidad de la mampostería de piedra	10200 kg/cm ²

De la tabla anterior se puede decir que los valores obtenidos para las características mecánicas del Museo de la Insurgencia son valores aceptables ya que de acuerdo con Meli (1998), el módulo de elasticidad de la mampostería puede variar desde los 5000 kg/cm² hasta los 20,000 kg/cm² y como se puede apreciar en la tabla en ningún caso se obtuvieron valores fuera del rango descrito por Meli.

6.5 Espectros de diseño

Una vez que realizados los procedimientos correspondientes para caracterizar dinámicamente al edificio es posible reproducir su comportamiento estructural ante cargas laterales mediante un análisis dinámico por sismo.

Para realizar dicho análisis se utilizó el Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad, el cual, describe la metodología para generar los espectros de diseño necesarios para hacer la revisión sísmica con un análisis modal espectral. La zona del valle de Aguascalientes se caracteriza por tener un tipo de terreno firme en donde solo existe terreno tipo I para suelo rocoso en donde no se presentan amplificaciones dinámicas y terreno tipo II en donde se presentan amplificaciones dinámicas intermedias. Para el caso del Museo de la Insurgencia este se encuentra en la comunidad de Pabellón de Hidalgo, Rincón de Romos, Aguascalientes sobre las coordenadas: Longitud: -102.339722, Latitud: 22.176389 sobre terreno tipo II (Laríz, 2013). Por su importancia y área construida, el museo es una estructura de tipo B1 de acuerdo con la tabla 15.

Tabla 15. Grupos y clases estructurales. Fuente: Manual de Diseño de Obras Civiles de la CFE

Grupo	Clasificación de las construcciones	
A+	Todas las estructuras de gran importancia del sector energético o industrial	
A	A1: Pertenece o se relaciona con el sector energético o industrial	A2: No pertenece ni se relaciona con el sector energético o industrial
B	B1: Altura mayor que 13 m o área total construida mayor que 400 m ²	B2: Altura menor o igual que 13 m y área total construida menor o igual que 400 m ²

Por otro lado, de acuerdo con el mapa de regionalización sísmica de la República mexicana (Obtenido del Manual de Diseño de Obras Civiles de la CFE), Aguascalientes se ubica en la zona de baja sismicidad de tipo A donde la aceleración máxima en roca (a_0^r) no excede de 50cm/s^2 .

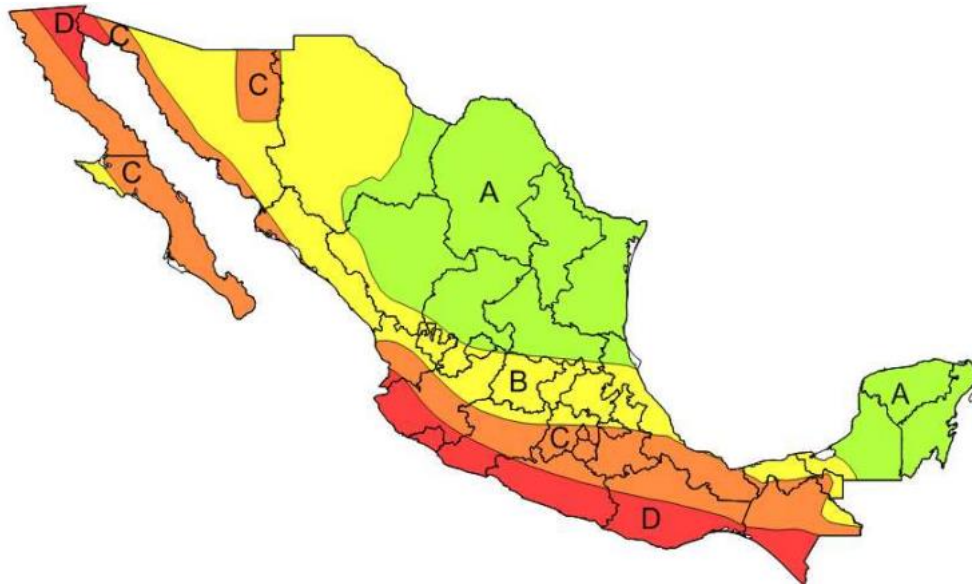


Figura 56. Mapa de regionalización sísmica de la República mexicana. Fuente: Manual de diseño de obras civiles de la CFE.

Una vez establecida la zona sísmica y el tipo de terreno se obtienen los parámetros para obtener el espectro de diseño elástico para el museo de la insurgencia como se aprecia en la tabla 16.

Tabla 16. Parámetros espectrales. Fuente: Manual de Diseño de Obras Civiles de la CFE.

Zona	Tipo de terrane	Ta (s)	Tb (s)	Tc (s)	k	r
A	II	0.2	1.4	2	1	2/3

A partir de la información presentada en este capítulo hasta este punto fue posible determinar el espectro de diseño elástico con ayuda del programa PRODISIS para revisar el estado límite de servicio, dicho espectro aprecia en la figura 58.

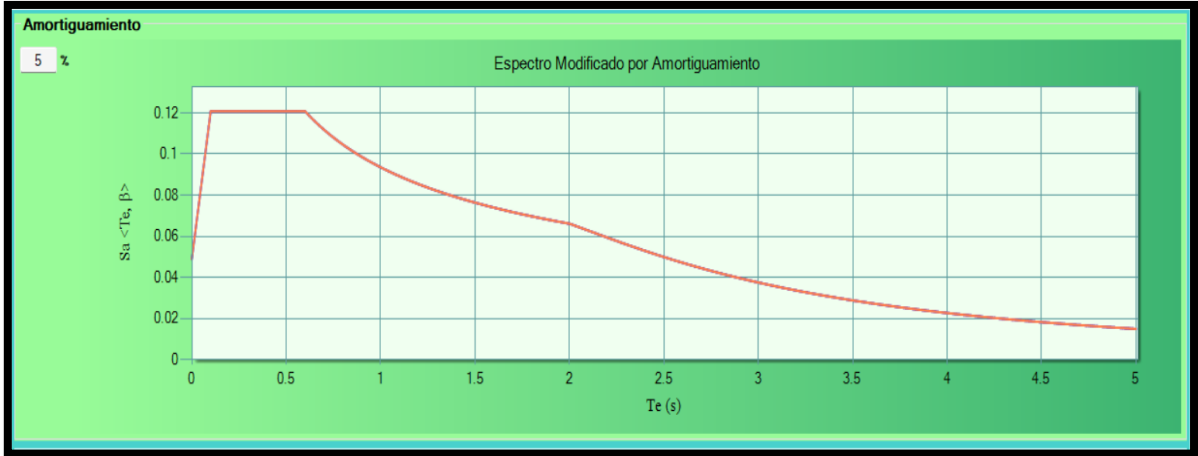


Figura 57. Espectro de diseño elástico para el Museo de la Insurgencia obtenido con el programa PRODISIS.

Por otro lado, de acuerdo con el manual, las normas de diseño sísmico son planteadas para minimizar la posibilidad de falla de las estructuras. De esta manera en dicho manual especifica que para estructuras como lo son los edificios se definen factores que reducen al espectro elástico por amortiguamiento (ξ), ductilidad (Q'), sobrerresistencia (R) y redundancia (ρ) dependiendo de diversos factores como los materiales, detalles de diseño y construcción y el sistema estructural.

Así pues, en la figura 59 se presenta nuevamente el espectro elástico mostrado en la figura 58 así como el espectro reducido por los factores mencionados anteriormente.

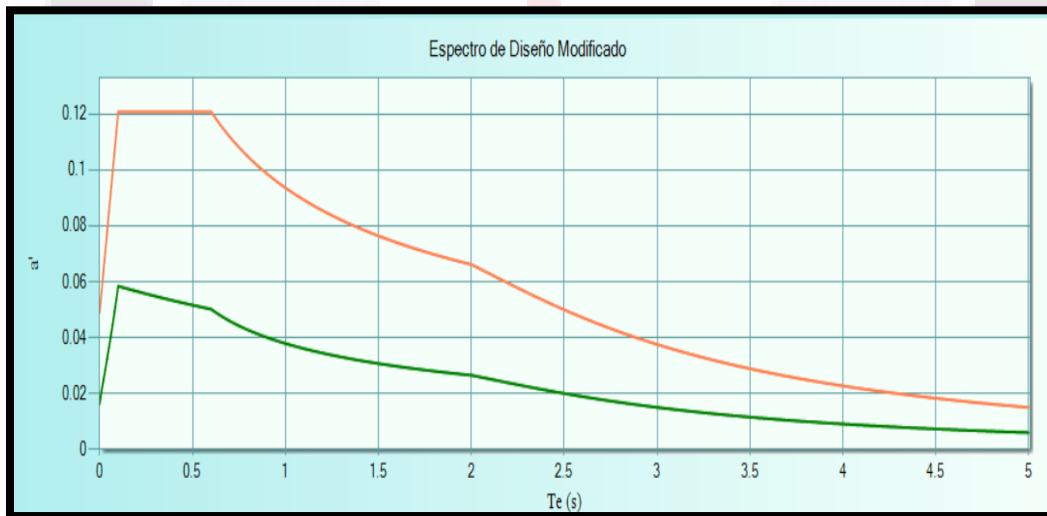


Figura 58. Espectro de diseño y espectro reducido por inelasticidad obtenido con el programa PRODISIS.

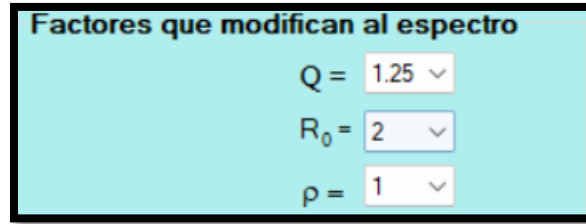
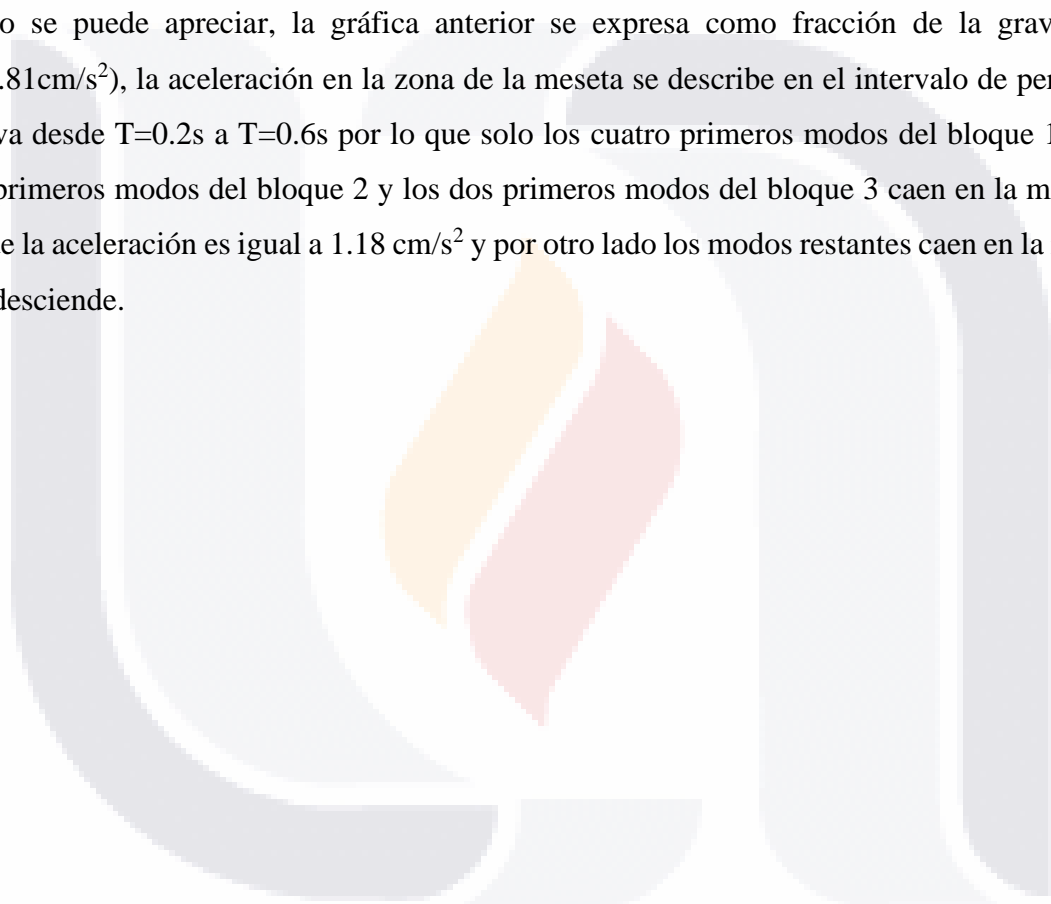


Figura 59. Factores de reducción del espectro de diseño elástico obtenido del programa PRODISIS.

Como se puede apreciar, la gráfica anterior se expresa como fracción de la gravedad ($g=9.81\text{cm/s}^2$), la aceleración en la zona de la meseta se describe en el intervalo de periodo que va desde $T=0.2\text{s}$ a $T=0.6\text{s}$ por lo que solo los cuatro primeros modos del bloque 1, los tres primeros modos del bloque 2 y los dos primeros modos del bloque 3 caen en la meseta donde la aceleración es igual a 1.18 cm/s^2 y por otro lado los modos restantes caen en la rama que desciende.



7. Resultados del análisis estructural

En el presente capítulo a continuación se presentan los resultados del análisis estructural del Museo de la Insurgencia para condiciones de servicio y también considerando el estado límite de falla.

7.1 Revisión de estados límite

De acuerdo con el Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad “se revisará que la rigidez lateral de la estructura cumpla con las dos condiciones siguientes:”

7.1.1 Estado límite de servicio

Con base en el capítulo de las NTC-2017 en donde indica que: “Se revisará que no se rebase ningún límite de servicio bajo el efecto de las posibles combinaciones de acciones, multiplicadas por un factor de carga unitario”.

7.1.1.1 Revisión por cargas gravitacionales

Para el caso del museo de la insurgencia se presenta un análisis por peso propio de la estructura con el programa Sap2000 de donde se obtiene peso total de la estructura el cual es de 2,321 toneladas y de la misma manera al realizar el análisis con el modelo calibrado se observa que la distribución de esfuerzos se comporta de manera similar a la del modelo base, presentando solo esfuerzos de compresión, lo que indica que las descargas hacia el suelo se dan de manera correcta.

Por otro lado, el esfuerzo promedio en la base de los muros es de 1.25 kg/cm^2 y las mayores sollicitaciones se dan en las bases de las columnas llegando a presentar esfuerzos de 9.7 kg/cm^2 en compresión por lo que se puede decir que con base a los resultados obtenidos la mampostería se encuentra en buenas condiciones de trabajando de manera correcta.

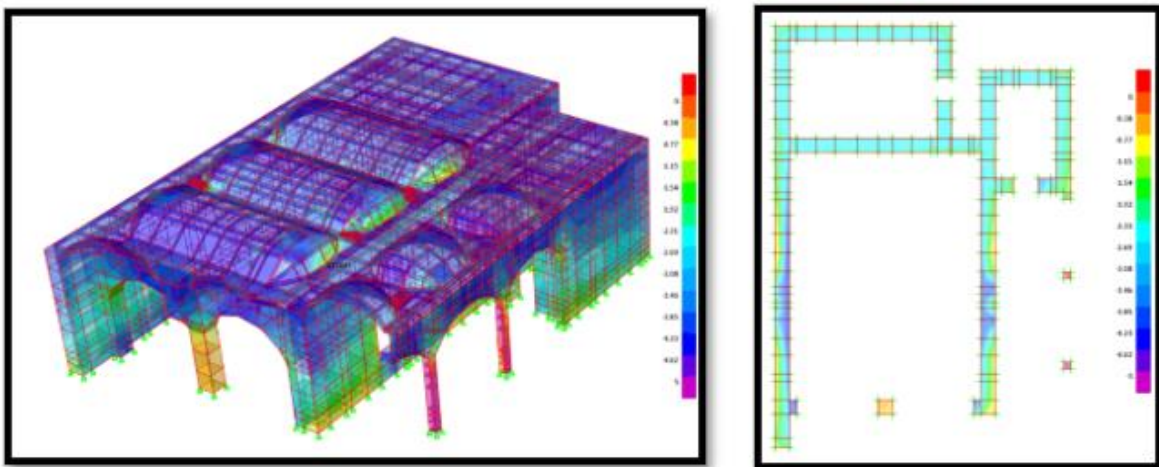


Figura 60. Esfuerzos por peso propio en dirección vertical para condiciones de servicio en kg/cm^2 (bloque 1), obtenidos del programa Sap2000.

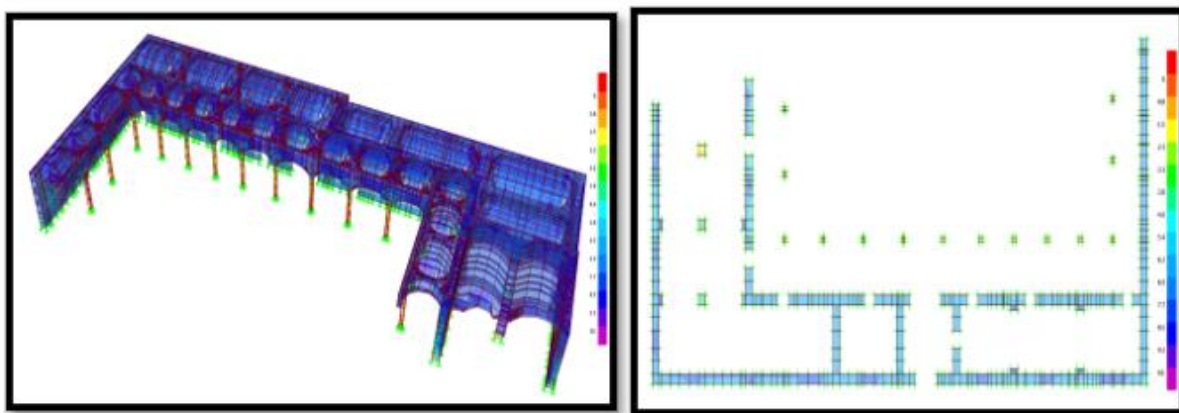


Figura 61. Esfuerzos por peso propio en dirección vertical para condiciones de servicio en kg/cm^2 (bloque 2), obtenidos del programa Sap2000.

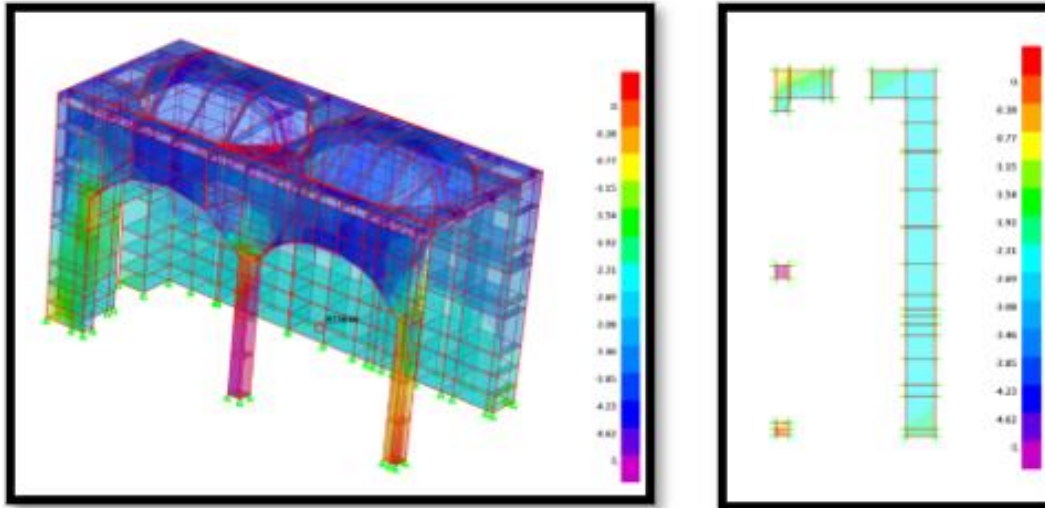


Figura 62. Esfuerzos por peso propio en dirección vertical para condiciones de servicio en kg/cm^2 (bloque 3), obtenidos del programa Sap2000.

Para finalizar se analizan las deformaciones que se presentan en el modelo final en donde se observa una disminución de estas, lo cual es entendible con base en el hecho de que los módulos de elasticidad han sido aumentados y por consecuencia la rigidez de los materiales también ha incrementado causando que se reduzcan dichos desplazamientos.

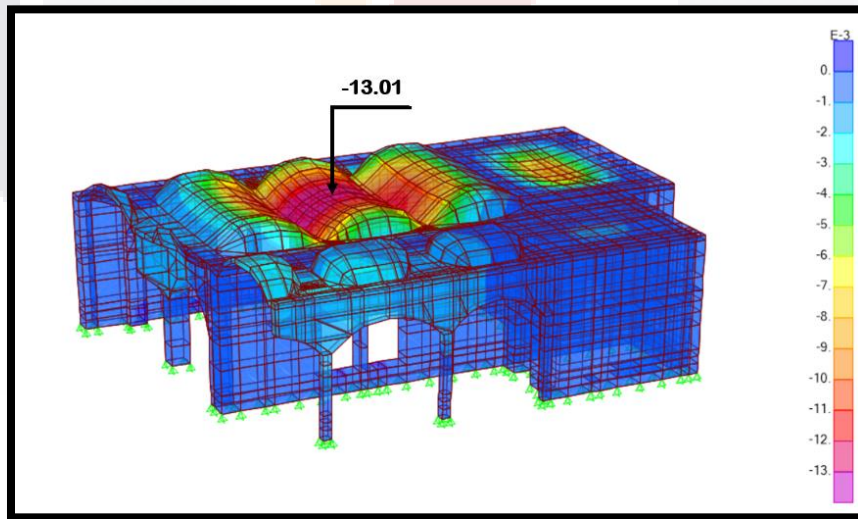


Figura 63. Deformaciones en sentido vertical en mm (bloque 1), obtenidos de Sap2000

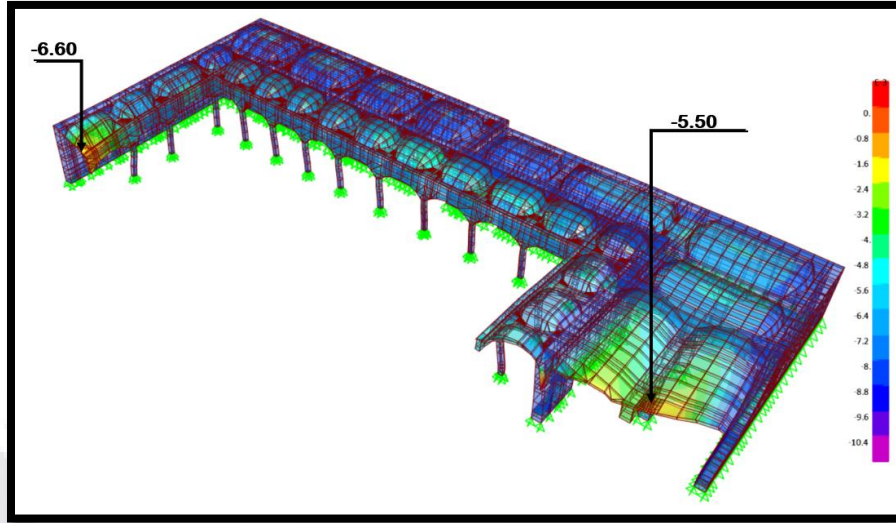


Figura 64. Deformaciones en sentido vertical en mm (bloque 2), obtenidos de Sap2000.

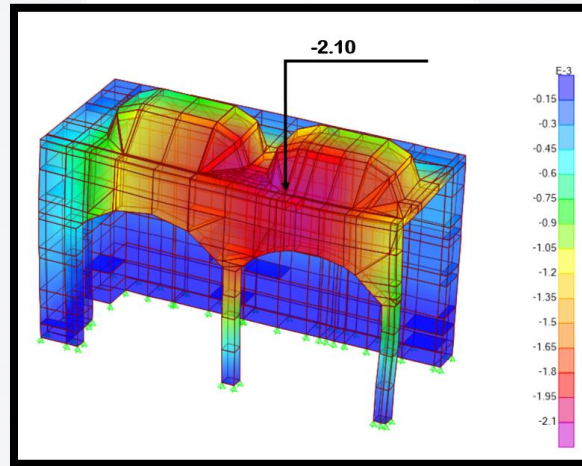


Figura 65. Deformaciones en sentido vertical en mm (bloque 3), obtenidos de Sap2000.

7.1.1.2 Revisión de distorsiones

Para la revisión de las distorsiones por cargas laterales del museo se realizó el análisis modal espectral para cada bloque a partir del espectro de diseño elástico presentado en la figura 58. A continuación, se presentan las combinaciones de carga consideradas en el análisis de acuerdo con lo estipulado en la NTC-S (2023).

1. Distorsiones 1 = $1.0PP+1.0SX+0.3SY$
2. Distorsiones 2 = $1.0PP+1.0SX-0.3SY$

- 3. Distorsiones 3 = $1.0PP-1.0SX+0.3SY$
- 4. Distorsiones 4 = $1.0PP-1.0SX-0.3SY$
- 5. Distorsiones 5 = $1.0PP+1.0SY+0.3SX$
- 6. Distorsiones 6 = $1.0PP+1.0SY-0.3SX$
- 7. Distorsiones 7 = $1.0PP-1.0SY+0.3SX$
- 8. Distorsiones 8 = $1.0PP-1.0SY-0.3SX$

En las figuras 66, 67 y 68 se muestran los puntos más desfavorables de la edificación en donde X, Y y Z corresponden a los ejes transversal, longitudinal y vertical respectivamente.

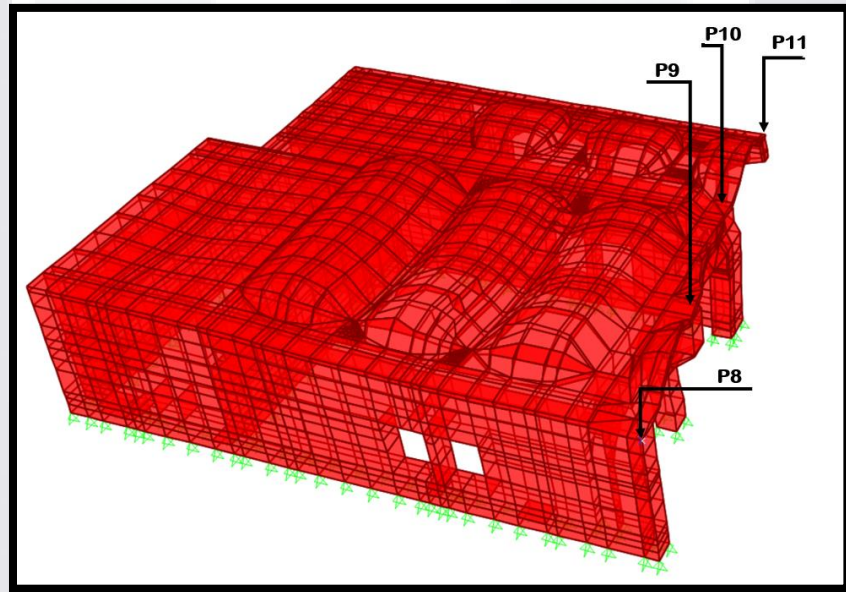


Figura 66. Puntos para medición de desplazamientos por sismo en bloque 1. Imagen obtenida de Sap2000

A manera de resumen se presenta la tabla 17 con los desplazamientos producidos por sismo en los puntos indicados para el bloque 1 en condiciones de servicio.

Tabla 17. Desplazamientos principales por sismo en bloque 1.

Punto	Combinación	Dirección	Dirección	Dirección
		x	y	v
		cm	cm	cm
8	Distorsiones 1	0.71	0.05	0.06
8	Distorsiones 2	0.71	0.05	0.06
8	Distorsiones 3	0.71	0.05	0.06
8	Distorsiones 4	0.71	0.05	0.06
8	Distorsiones 5	0.31	0.03	0.05
8	Distorsiones 6	0.31	0.03	0.05
8	Distorsiones 7	0.31	0.03	0.05
8	Distorsiones 8	0.31	0.03	0.05
9	Distorsiones 1	0.59	0.12	0.16
9	Distorsiones 2	0.59	0.12	0.16
9	Distorsiones 3	0.59	0.12	0.16
9	Distorsiones 4	0.59	0.12	0.16
9	Distorsiones 5	0.20	0.25	0.16
9	Distorsiones 6	0.20	0.25	0.16
9	Distorsiones 7	0.20	0.25	0.16
9	Distorsiones 8	0.20	0.25	0.16
10	Distorsiones 1	0.67	0.05	0.06
10	Distorsiones 2	0.67	0.05	0.06
10	Distorsiones 3	0.67	0.05	0.06
10	Distorsiones 4	0.67	0.05	0.06
10	Distorsiones 5	0.25	0.05	0.05
10	Distorsiones 6	0.25	0.05	0.05
10	Distorsiones 7	0.25	0.05	0.05
10	Distorsiones 8	0.25	0.05	0.05
11	Distorsiones 1	1.19	0.21	0.02
11	Distorsiones 2	1.19	0.21	0.02
11	Distorsiones 3	1.19	0.21	0.02
11	Distorsiones 4	1.19	0.21	0.02
11	Distorsiones 5	0.55	0.09	-0.03
11	Distorsiones 6	0.55	0.09	-0.03
11	Distorsiones 7	0.55	0.09	-0.03
11	Distorsiones 8	0.55	0.09	-0.03

De la tabla anterior se observa que los mayores desplazamientos se generan en el punto 11 sobre los arcos del patio central en donde se tiene un valor de 1.19 cm y considerando la altura de 5.68 m se tiene una distorsión de 0.002, lo cual no rebasa el límite establecido en la tabla 4.2.3 de las NTC-S (2020). De igual manera para analizar los desplazamientos horizontales sobre el bloque 2 se señalan los puntos de interés en la figura 67.

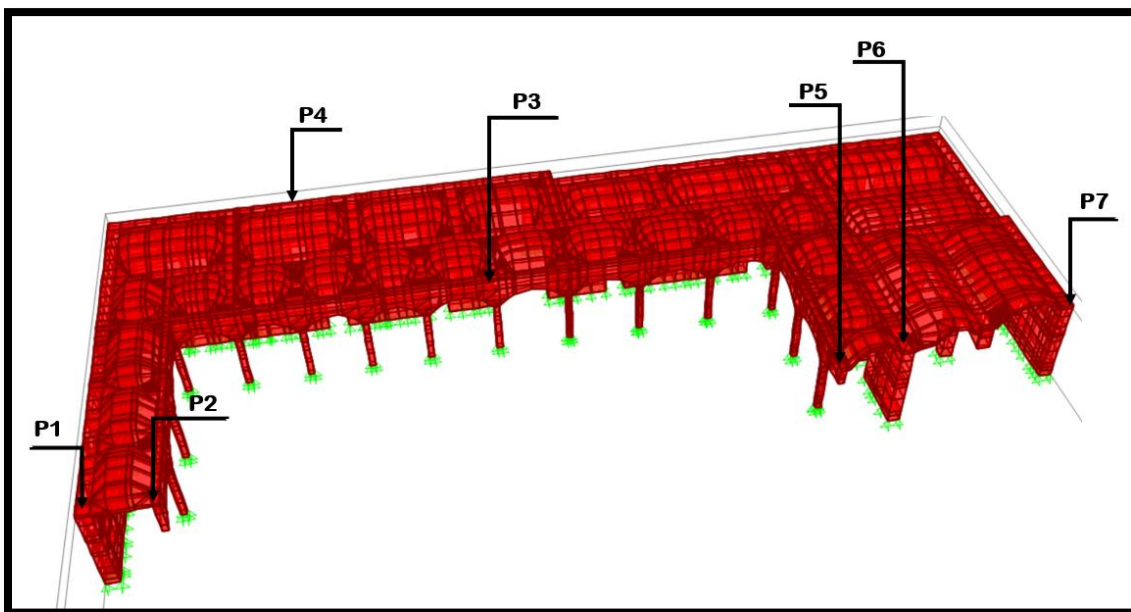


Figura 67. Puntos para medición de desplazamientos por sismo en bloque 2. Imagen obtenida de Sap2000.

Así pues, en la tabla 18 se presentan los desplazamientos generados por sismo en las zonas del museo mostradas en la figura para cada uno de los combos de carga presentados anteriormente en la sección 7.1.1.2.

Tabla 18. Principales desplazamientos por sismo en bloque 2.

Punto	Combinación	Dirección	Dirección	Dirección
		x	y	v
		cm	cm	cm
1	Distorsiones 1	1.75	0.04	0.13
1	Distorsiones 2	1.75	0.04	0.13
1	Distorsiones 3	1.75	0.04	0.13
1	Distorsiones 4	1.75	0.04	0.13

1	Distorsiones 5	1.01	0.03	0.07
1	Distorsiones 6	1.01	0.03	0.07
1	Distorsiones 7	1.01	0.03	0.07
1	Distorsiones 8	1.01	0.03	0.07
2	Distorsiones 1	1.94	0.42	-0.03
2	Distorsiones 2	1.94	0.42	-0.03
2	Distorsiones 3	1.94	0.42	-0.03
2	Distorsiones 4	1.94	0.42	-0.03
2	Distorsiones 5	1.14	0.29	0.07
2	Distorsiones 6	1.14	0.29	0.07
2	Distorsiones 7	1.14	0.29	0.07
2	Distorsiones 8	1.14	0.29	0.07
3	Distorsiones 1	0.05	0.12	0.09
3	Distorsiones 2	0.05	0.12	0.09
3	Distorsiones 3	0.05	0.12	0.09
3	Distorsiones 4	0.05	0.12	0.09
3	Distorsiones 5	0.06	0.22	0.06
3	Distorsiones 6	0.06	0.22	0.06
3	Distorsiones 7	0.06	0.22	0.06
3	Distorsiones 8	0.06	0.22	0.06
4	Distorsiones 1	0.01	0.19	0.03
4	Distorsiones 2	0.01	0.19	0.03
4	Distorsiones 3	0.01	0.19	0.03
4	Distorsiones 4	0.01	0.19	0.03
4	Distorsiones 5	0.01	0.37	0.04
4	Distorsiones 6	0.01	0.37	0.04
4	Distorsiones 7	0.01	0.37	0.04
4	Distorsiones 8	0.01	0.37	0.04
5	Distorsiones 1	1.83	0.33	0.11
5	Distorsiones 2	1.83	0.33	0.11
5	Distorsiones 3	1.83	0.33	0.11
5	Distorsiones 4	1.83	0.33	0.11
5	Distorsiones 5	0.38	0.15	0.25
5	Distorsiones 6	0.38	0.15	0.25
5	Distorsiones 7	0.38	0.15	0.25
5	Distorsiones 8	0.38	0.15	0.25
6	Distorsiones 1	1.28	0.09	0.03
6	Distorsiones 2	1.28	0.09	0.03
6	Distorsiones 3	1.28	0.09	0.03
6	Distorsiones 4	1.28	0.09	0.03

6	Distorsiones 5	0.63	0.06	0.01
6	Distorsiones 6	0.63	0.06	0.01
6	Distorsiones 7	0.63	0.06	0.01
6	Distorsiones 8	0.63	0.06	0.01
7	Distorsiones 1	1.24	0.05	0.11
7	Distorsiones 2	1.24	0.05	0.11
7	Distorsiones 3	1.24	0.05	0.11
7	Distorsiones 4	1.24	0.05	0.11
7	Distorsiones 5	0.89	0.03	0.09
7	Distorsiones 6	0.89	0.03	0.09
7	Distorsiones 7	0.89	0.03	0.09
7	Distorsiones 8	0.89	0.03	0.09

Como era de esperarse, los desplazamientos más desfavorables se presentan en el punto 2 en donde existe un volado considerable debido a la separación de los bloques que conforman al museo. En dicho punto se tiene una deformación de 1.94 cm y considerando la altura de los arcos de 5.68 m se calcula la distorsión en ese punto dando como resultado un valor de 0.003 lo que es superior a 0.002 que es el valor límite indicado en la tabla 4.2.3 de las NTC-S 2020 para elementos de mampostería de piedra por lo que no se cumple con la distorsión especificada en este punto. Después de revisar las deformaciones presentes en todos los puntos indicados anteriormente en el bloque 2 se determina que aquellos con valores superiores a 1.14 cm tampoco cumplen con las distorsiones permisibles (p1, p2, p5, p6 y p7) lo cual es entendible basado en el hecho de que dichos puntos se ubican justo sobre la junta constructiva.

Por último, se presentan los puntos analizados para el bloque número 3 en la figura 68.

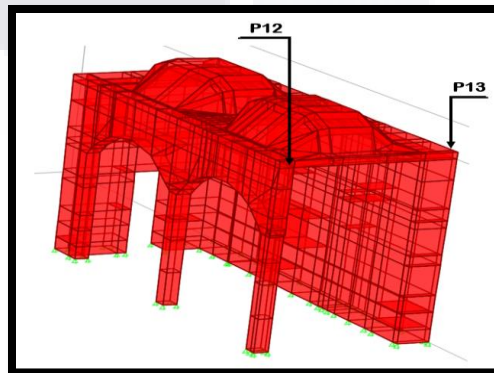


Figura 68. Puntos para medición de desplazamientos por sismo en bloque 2. Imagen obtenida de Sap2000.

De la misma manera que en los casos anteriores se presenta la tabla 19 con el resumen de los desplazamientos producidos por las cargas laterales.

Tabla 19. Desplazamientos principales por sismo en bloque 3.

Punto	Combinación	Dirección	Dirección	Dirección
		x	y	v
		cm	cm	cm
12	Distorsiones 1	2.54	0.86	0.14
12	Distorsiones 2	2.54	0.86	0.14
12	Distorsiones 3	2.54	0.86	0.14
12	Distorsiones 4	2.54	0.86	0.14
12	Distorsiones 5	1.33	0.48	0.15
12	Distorsiones 6	1.33	0.48	0.15
12	Distorsiones 7	1.33	0.48	0.15
12	Distorsiones 8	1.33	0.48	0.15
13	Distorsiones 1	2.53	0.11	0.23
13	Distorsiones 2	2.53	0.11	0.23
13	Distorsiones 3	2.53	0.11	0.23
13	Distorsiones 4	2.53	0.11	0.23
13	Distorsiones 5	1.32	0.07	0.13
13	Distorsiones 6	1.32	0.07	0.13
13	Distorsiones 7	1.32	0.07	0.13
13	Distorsiones 8	1.32	0.07	0.13

Como puede apreciarse en la tabla, para los dos puntos seleccionados en ningún caso se cumple con la distorsión máxima permitida por las NTC-S (2020) ya que los desplazamientos máximos en ambos casos superan los 2 cm que es superior al caso más crítico visto para el punto 2 con valor de 1.94 cm por lo que claramente supera la especificación considerando que en ambos casos la altura es igual a 5.68 m.

7.1.2 Estado límite de colapso

De acuerdo con lo estipulado por las NTC (2017) “se deberá considerar todas las acciones de carga que intervengan en la combinación de cargas para el caso de estudio y a su vez estas serán multiplicadas por los factores descritos en el apartado 3.4 de las NTC (2017)” para revisar las solicitudes por estado límite de colapso.

7.1.2.1 Revisión por cargas gravitacionales

Para realizar el análisis de cargas gravitacionales y obtener los elementos mecánicos últimos se utilizó para este caso de estudio la siguiente combinación de cargas:

$$1.3PP+1.5CV$$

De la expresión anterior PP se refiere al peso propio de la estructura y CV a las cargas vivas que obran sobre la estructura que para este caso se consideró igual a cero. De esta manera a continuación se presenta el modelo generado en el análisis de estado límite de falla por cargas gravitacionales en donde se aprecia un evidente incremento del peso de la estructura, siendo este de 3017 toneladas en general se observa un comportamiento de distribución de esfuerzos de compresión similar al obtenido en el apartado 6.2.1.1, llegando a presentar esfuerzos máximos en la base de hasta 11.23 kg/cm^2 que es menor a los 12.8 kg/cm^2 de resistencia a compresión de la mampostería, por lo que se puede decir que la mampostería soporta de manera correcta las solicitaciones de estado límite de falla por carga gravitacional.

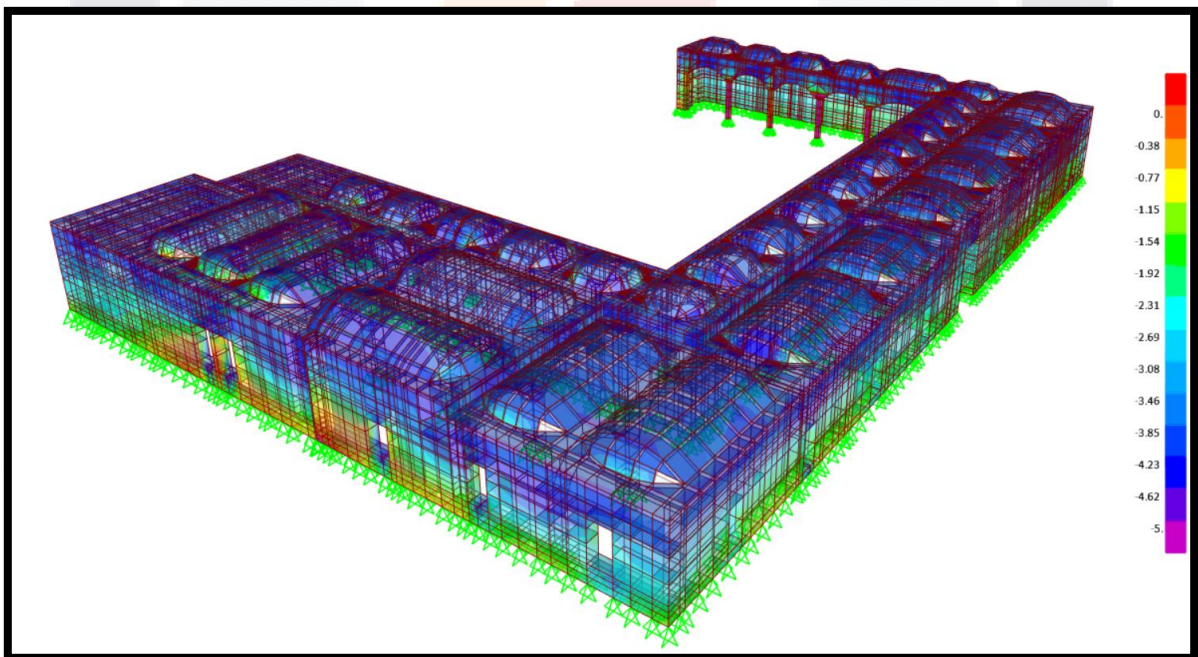


Figura 69. Esfuerzos de compresión en sentido vertical en kg/cm^2 del Museo de la Insurgencia obtenidos de Sap2000.

7.1.2.2 Revisión por cargas laterales

A partir del espectro de diseño reducido generado en el programa PRODISIS se realizó el análisis dinámico modal para determinar elementos mecánicos por cargas laterales para lo cual se definieron los combos de carga presentados en la tabla 20 en donde también se aprecian los valores de los cortantes basales producidos por sismo.

Tabla 20. Cortantes basales producidos por el espectro de diseño reducido.

Bloque	Aplicación de cargas	Cortante basal (kg)	
		Transversal (x)	Longitudinal (y)
1	1.1PP, 1.1SX, 0.33SY	51151.83	12848.37
	1.1PP, 1.1SY, 0.33SX	18068.55	33751.22
2	1.1PP, 1.1SX, 0.33SY	112346.87	60578.84
	1.1PP, 1.1SY, 0.33SX	52180.76	140340.3
3	1.1PP, 1.1SX, 0.33SY	12564.6	5918.12
	1.1PP, 1.1SY, 0.33SX	8222.06	7103.54

Como se puede observar, los mayores cortantes se presentan en el sentido transversal debido a que en ese sentido existe una menor cantidad de elementos que resistan el sismo como lo son los muros y las columnas y por lo tanto el área que soporta dichas solicitaciones es menor, por otro lado, en el sentido longitudinal del museo existen muros muy largos que proporcionan rigidez lateral a la estructura en ese sentido por lo que el edificio resiste bien en este sentido.

De acuerdo con el apartado 8.3.1 de las NTC-M (2020) la resistencia de la mampostería de piedra por cortante es definida por la expresión:

$$F_R V' m = 0.06 Mpa \left(\frac{kg}{cm^2} \right)$$

Así pues, de la expresión anterior F_R se define como un factor de reducción igual a 0.4 y a partir de dicha ecuación se obtuvieron los cortantes resistentes de la estructura al multiplicar

dicha resistencia por el área de la sección transversal de los muros orientados en la dirección de análisis sísmico.

En tabla 21 presenta los cortantes basales obtenidos del análisis modal espectral con espectro reducido, así como los cortantes que resiste la mampostería para cada bloque.

Tabla 21. Cortantes basales resistentes y actuantes por sismo.

Bloque	Cortante basal (kg)			
	Transversal (x)		Longitudinal (y)	
	Actuante	Resistente	Actuante	Resistente
1	18068.55	135132.00	12848.37	210141.00
2	112346.87	488604.00	140340.30	260840.50
3	12564.60	21330.00	7103.54	46143.00

De la tabla anterior se puede apreciar que para el caso del bloque 1 el cortante basal en sentido transversal sobrepasa al cortante resistente de la mampostería y de la misma manera para el bloque número 3 se rebasa las solicitudes en el mismo sentido de acuerdo con lo indicado en el apartado 8.3 de las NTC-S (2017). Lo anterior puede ser atribuible al hecho de que estos bloques carecen de rigidez lateral en sentido transversal.

8. Discusión de Resultados

A partir de los resultados arrojados por el análisis realizado se establecen los siguientes puntos para tener una mejor comprensión del estudio.

1. Las mediciones de vibración ambiental arrojaron la información necesaria para determinar las frecuencias traslacionales de la estructura para caracterizar dinámicamente al edificio, sin embargo, hace falta definir arreglos con diferentes configuraciones para poder describir de mejor manera las formas modales del edificio.
2. La complejidad para poder describir el comportamiento dinámico de una estructura aumenta a medida que se incrementa la irregularidad de los edificios como lo es con los monumentos históricos ya que puede resultar más complejo proponer los arreglos para realizar las mediciones. De lo anterior deriva el hecho de la importancia de contar con modelos numéricos confiables que simplifiquen la toma de decisiones sobre las estructuras.
3. A partir del análisis modal espectral se tiene que a raíz de la intervención realizada en el museo con la colocación la junta constructiva se modificó completamente el comportamiento estructural del edificio con respecto a su composición original. Si bien es innegable el acierto que significó haber liberado al museo en bloques independientes ya que con esto se subsano los sobreesfuerzos que se presentaban por los desplazamientos generados por la falla, también es importante mencionar que como producto de dicha intervención ahora se presentan desplazamientos mayores por las diferentes acciones que pueden obrar sobre la estructura. Prueba de ello es que como producto de la revisión realizada se encontró que para algunas zonas se presentan distorsiones superiores a las admitidas en el reglamento, mismo caso para el cortante basal en el bloque 1 y bloque 3 en sentido transversal, lo que implica que dichos bloques son vulnerables ante un evento sísmico porque carecen de rigidez lateral en sentido transversal.

9. Conclusiones

En términos generales se puede concluir que el museo se encuentra en buenas condiciones debido al constante mantenimiento que este recibe, lo que hace que el edificio se comporte de buena manera para solicitaciones gravitacionales, sin embargo, una vez que se validó el modelo numérico de la estructura y se revisó su respuesta ante eventos sísmicos se han detectado zonas críticas que pudiesen ser vulnerables para cargas laterales.

Del modelo numérico se concluye que representa de manera satisfactoria el comportamiento estructural del Museo de la Insurgencia, lo cual, queda evidenciado al reproducir su respuesta ante las solicitaciones por peso propio, presentando deformaciones equiparables a las reales, sobre todo en la zona donde se colocó la junta constructiva.

De las mediciones de vibración ambiental se pudieron conocer las frecuencias dominantes de la estructura y del suelo para alimentar al modelo matemático, con lo que se pudo caracterizar dinámicamente a la estructura y por lo tanto se concluye que no existen efectos de resonancia que amplifiquen las vibraciones de la estructura.

Del Monitoreo de grietas se concluye que la falla sigue activa al presentar desplazamientos verticales y horizontales del orden de 4.5mm y 3mm respectivamente en el lapso comprendido de octubre de 2022 a mayo de 2023.

BIBLIOGRAFÍA

- Aganzo de Santos, J. (2017). *Identificación modal experimental de estructuras con cargas de ocupación sólidas y líquidas*. Valladolid, España.
- Aki. (1957). Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. *Bull Earthq. Res. Inst.*, 35, 415-456.
- Castro Triguero, R. (2016). *Introducción al Análisis Modal Operacional*. Málaga, España.
- Cedeño, A. (2009). Valoración de las condiciones de la estructura antigua. *Diseño y Sociedad*, 72-81.
- Cedeño, A. (2009). Valoración de las condiciones de la estructura antigua. *Diseño y Sociedad*, 73-81.
- Chávez, M. M. (2010). *Validación Experimental de Modelos Analíticos para el Estudio del Comportamiento Sísmico de las Estructuras Históricas*. Ciudad de México.
- Choay, F. (2007). Alegoría del patrimonio. *Revista de geografía de Norte Grande*, 147-150.
- Clemente, R. (2007). *Análisis estructural de edificios históricos mediante modelos localizados de fisuración*. Barcelona, España.
- Esparza, C. (2013). *Diagnóstico y Propuesta de Rescate Estructural de la Capilla de la Trinidad, San Francisco de los Romo, Ags. Aguascalientes, Aguascalientes*.
- ICOMOS. (2003). *Principios para el análisis, conservación y restauración de las estructuras del patrimonio arquitectónico*. Victoria Falls, Zimbabwe.
- Láriz Medina, M. d. (2013). *Análisis de daños estructurales en edificaciones por discontinuidades geológicas superficiales en la comunidad de Pabellón de Hidalgo, Rincon de Romos Aguascalientes*. Aguascalientes, Aguascalientes.
- Laríz, M. (2013). *Análisis daños estructurales en edificaciones por discontinuidades geológicas superficiales en la comunidad de Pabellón de Hidalgo, Rincon de Romos, Aguascalientes*. Aguascalientes, Aguascalientes.
- Madrid, C. O. (1991). Curso de patología. *Conservación y restauración de edificios, tomo I, Madrid*. Madrid, España.
- Maricarmen, T. (2020). La rehabilitación de los centros históricos: criterios de análisis para una intervención inclusiva en Galicia. *Ciudad y territorio*, 667-684.

- Martínez, G. (2023). *Diagnóstico de manifestaciones patológicas en edificios históricos de Asunción*. Asunción.
- Meli, R. (1998). *Ingeniería Estructural de los Edificios Históricos*. Ciudad de México.
- Montalvo Delgado, H. D. (2013). *Análisis mediante simulaciones numéricas de daños estructurales asociados al agrietamiento superficial en el Museo de la Insurgencia, Pabellón de Hidalgo, Rincón de Romos, Aguascalientes*. Aguascalientes, Aguascalientes.
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Reports of Railway Technical Research Institute* 30, 25-33.
- Navarro, M. (2013). *Levantamiento geométrico y de daños del templo de san antonio y análisis estructural de la situación actual*. Aguascalientes, Aguascalientes.
- Orenday, E. (2018). Characterization of the Mechanical Properties of Ancient Masonry from a Non-destructive Method In Situ. *Structural Analysis of Historical Constructions*, 41-50.
- Padilla, R. (2017). *Desarrollo y adaptación de técnicas de caracterización física de sistemas constructivos en edificios patrimoniales con métodos no destructivos para la conservación del patrimonio edificado*. Aguascalientes, Aguascalientes.
- Peña. (2010). Estrategias para el modelado y el análisis sísmico de estructuras históricas. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 43-63.
- Peña, M. F. (2013). Caracterización Dinámica del Templo de San Bartolomé Apóstol, Naucalpan. *Matemáticas e Ingeniería*, 148-178.
- Ramirez, L. (2023). *HISTORIA DEL MUSEO DE LA INSURGENCIA DE PABELLÓN DE HIDALGO Y LOS MURALES DE ALFREDO ZERMEÑO*. AGUASCALIENTES, AGUASCALIENTES: DIRECCIÓN GENERAL DE DIFUSIÓN Y VINCULACIÓN.
- Robles, M. (2013). *Análisis Estructural de la Parroquia de San Bartolomé Apóstol*. Naucalpan de Juárez.
- Salas, J. (2022). *Estudio de patología para edificación de parqueaderos del conjunto residencial palos verdes ubicado en el municipio de Restrepo Departamento del Meta*. Bogota.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

SESAME. (2004). *GUIDELINES FOR THE IMPLEMENTATION OF THE H/V SPECTRAL RATIO TECHNIQUE ON AMBIENT VIBRATIONS*.

Sotomayor, C. (2020). Entendiendo a las fisuras y grietas en las estructuras de concreto. *Artículo técnico No. 6*.

Terán. (2004). *Consideraciones que deben tenerse en cuenta para la restauración arquitectónica*. Ciudad de México.

Ulloa, R. (2018). *Aplicación del método de nakamura H/V, para estudiar el riesgo sísmico en la zona comprendida por el despliegue de estaciones IMAD*. Concepción, Chile.

Universidad Politécnica de Catalunya. (2009). *Treballs acadèmics UPC*. Recuperado el 28 de noviembre de 2023, de upcommons: <https://upcommons.upc.edu/>

Universidad Técnica de Loja. (04 de Diciembre de 2008). *Blogs.utpl*. Recuperado el 28 de Noviembre de 2023, de <http://blogs.utpl.edu>

Williamson, F. (1980). Richard Courant and the finite element method. *Historia matemática*, 369-378.