

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LA
CONSTRUCCIÓN**



**PROPUESTA DE REHABILITACIÓN DE UNA ESTRUCTURA DE
MAMPOSTERÍA EN DETERIORO CON EL USO DE FIBRA DE VIDRIO Y
RESINA POLIÉSTER, CASO DE ESTUDIO: IGLESIA DE SAN FELIPE Y
SANTIAGO, UBICADA EN EL MUNICIPIO DE SINALOA DE LEYVA, ESTADO
DE SINALOA.**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN**

**PRESENTA:
JESÚS LEYVA LÓPEZ**

**DIRECTOR:
DR. MANUEL DE JESUS PELLEGRINI CERVANTES**

**CODIRECTOR:
DR. JOSÉ RAMÓN GAXIOLA CAMACHO**

CULIACÁN, SINALOA

DICIEMBRE DE 2018



UAS- Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional

Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual, 4.0 Internacional.

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco primeramente a Dios y a mis padres por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi formación profesional, gracias a la Universidad Autónoma de Sinaloa y a la Unidad de Posgrado en el programa de Maestría en Ingeniería de la Construcción por permitirme formar parte de esta generación, a mis directores de proyecto Dr. Manuel de Jesús Pellegrini Cervantes y Dr. José Ramón Gaxiola Camacho, por su apoyo y paciencia en la realización de este trabajo, que sin ellos no hubiese sido posible.

Doy gracias a mis compañeros y maestros por estar conmigo y apoyarme en esta etapa de mi vida, estoy en deuda con ustedes y les estaré eternamente agradecido por su apoyo.

Dedico este trabajo a mi madre Yadira López Peñuelas, a mi hermana Yadira Leyva López y a mi pareja Rubí Miranda Morales López por su comprensión y cariño, gracias por estar a mi lado siempre.

Gracias.

ÍNDICE

1. Introducción.....	1
1.1 Presentación	1
1.2 Análisis situacional.....	2
1.3 Definición del problema seleccionado.....	3
2. Fundamento teórico.....	5
2.1 Marco histórico y contextual.....	5
2.2 Estado del arte.....	6
2.3 Marco teórico	7
2.3.1 Principios de conservación	7
2.3.2 Tipologías y elementos estructurales	9
2.3.3 Causas de deterioro	12
2.3.4 Métodos de intervención y refuerzo.....	13
2.3.5 Materiales compuestos.....	15
3. Proyecto de intervención.....	17
3.1 Objetivo general	17
3.2 Objetivos específicos	17
3.3 Justificación.....	18
3.4 Metodología	18
3.4.1 Análisis historiográfico.....	19
3.4.2 Levantamiento arquitectónico.....	20
3.4.3 Levantamiento topográfico	20
3.4.4 Caracterización de fallas	20
3.4.5 Evaluación de la mecánica de la estructura	21

3.4.6 Propuesta de rehabilitación	27
3.5 Análisis de resultados	30
3.5.1 Análisis historiográfico.....	30
3.5.2 Levantamiento arquitectónico.....	32
3.5.3 Levantamiento topográfico	46
3.5.4 Caracterización de fallas	48
3.5.5 Evaluación de la mecánica de la estructura	54
3.5.6 Propuesta de rehabilitación	61
3.5.7 Implementación del refuerzo	68
4. Estrategias de implementación.....	76
4.1 Plan de acción.....	76
4.2 Estrategias usadas para presentar y persuadir a los involucrados en el proyecto	76
5. Administración del proyecto	78
5.1 Cronograma de actividades	78
5.2 Recursos.....	79
6. Conclusiones y recomendaciones	80
6.1 Conclusiones.....	80
6.2 Recomendaciones	80
REFERENCIAS.....	81

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

1. Índice de tablas

Tabla 1 - Propiedades mecánicas de los materiales.....	28
Tabla 2 - Cargas vivas recomendadas por las Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones.....	57
Tabla 3 - Coeficiente Sísmico Reducido recomendado por las Normas de Diseño por Sismo.....	58
Tabla 4 - Resumen de evaluación estructural simplificada	61

2. Índice de figuras

Figura 1 - Localización de la ciudad de Sinaloa de Leyva	33
Figura 2 - Localización de la Iglesia de San Felipe y Santiago	34
Figura 3 - Fachada Sur	38
Figura 4 - Fachada oriente.....	39
Figura 5 - Casa cural.....	39
Figura 6 - Fachada norte.....	40
Figura 7 - Transepto poniente	40
Figura 8 - Planta arquitectónica	41
Figura 9 - Cala en unión de muro y columna	42
Figura 10 - Cala en muro	43
Figura 11 - Vista poniente de transepto	44
Figura 12 - Vista norte y sur del transepto	44
Figura 13 - Vista interior y cubierta	45
Figura 14 - Vista de altar y unión de transepto al cuerpo principal.....	45
Figura 15 - Levantamiento topográfico	46

Figura 16 - Curvas de nivel de transepto	47
Figura 17 - Testigos de yeso en grietas	49
Figura 18 - Espesor de grieta máximo	49
Figura 19 - Patrón de agrietamiento (Muro Norte)	50
Figura 20 - Patrón de agrietamiento (Muro Sur).....	51
Figura 21 - Patrón de agrietamiento (Muro Poniente)	52
Figura 22 - Patologías al interior del transepto.....	53
Figura 23 - Propuesta de refuerzo (Muro Norte)	64
Figura 24 - Propuesta de refuerzo (Muro Sur)	65
Figura 25 - Propuesta de refuerzo (Muro Poniente).....	65
Figura 26 - Limpieza de superficie e impregnación de resina	66
Figura 27 - Colocación de fibra de vidrio e impregnación de fibra	67
Figura 28 - Impregnación de fibra y areneo	67
Figura 29 - Acabado final en muro con aplanado cal-arena.....	68
Figura 30 - Relleno de grietas y sustitución de piezas de tabique dañadas (Muro sur).....	69
Figura 31 - Relleno de grietas y sustitución de piezas de tabique (Muro poniente)	69
Figura 32 - Relleno de grietas y sustitución de piezas de tabique dañadas (Muro norte).....	70
Figura 33 - Aplicación de capa de impregnación muro norte y muro sur	71
Figura 34 - Aplicación de capa de impregnación en muro poniente.....	71
Figura 35 - Aplicación de fibra de vidrio (petatillo) e impregnación con resina poliéster (muro sur)	72
Figura 36 - Aplicación de fibra de vidrio (petatillo) e impregnación con resina poliéster (muro sur)	72

Figura 37 - Aplicación de fibra de vidrio, muro norte y muro sur	73
Figura 38 - Aplicación de areneo sobre refuerzo de fibra de vidrio (muro sur) ..	73
Figura 39 - Areneo en muro poniente y aplanado cal-arena en muro norte	74
Figura 40 - Aplanado con mortero cal-arena en muro poniente	74
Figura 41 - Acabado en muro poniente	75
Figura 42 – Acabado en muro sur y muro norte	75

Resumen

Este documento presenta el diseño e implementación de una propuesta de rehabilitación de una estructura de mampostería utilizando un material compuesto por fibra de vidrio y resina poliéster (GFRP), particularmente a la iglesia de San Felipe y Santiago, ubicada en el municipio de Sinaloa de Leyva, que nace de la necesidad de ofrecer una alternativa a la rehabilitación y refuerzo estructural de monumentos históricos. Para ello se realizaron diversos estudios de diagnóstico a la estructura, así como, una evaluación de la mecánica del conjunto con el uso de métodos simplificados de análisis a fin de probar la seguridad de esta. Además, se presenta el análisis del costo y duración de la implementación del proyecto.

Palabras clave

Refuerzo, Rehabilitación, GFRP, Mampostería, Monumento

Abstract

This document presents the design and implementation of a proposal for the rehabilitation of a masonry structure using a composite material of glass fiber and resin polyester (GFRP), particularly in the church of San Felipe and Santiago, located in the municipality of Sinaloa de Leyva the need to offer an alternative to the rehabilitation and structural reinforcement of historical monuments. To do this, the diagnostic studies of the structure are analyzed, as well as the evaluation of the mechanics of the whole with the use of simplified methods of analysis and the safety of this. In addition, the analysis of the cost and duration of the project implementation is presented.

Keywords

Reinforcement, Rehabilitation, GFRP, Masonry, Monument

1. Introducción

1.1 Presentación

El proyecto de intervención sugiere realizar una propuesta técnica y descriptiva de rehabilitación de una estructura de mampostería utilizando un material compuesto por fibra de vidrio y resina poliéster, particularmente implementado en la iglesia de San Felipe y Santiago, ubicada en el municipio de Sinaloa de Leyva, en el Estado de Sinaloa. Para ello se realiza primeramente un estudio historiográfico acompañado de levantamientos topográficos y arquitectónicos, así como una detallada caracterización de fallas en la estructura en cuestión, seguido de la evaluación de la mecánica a nivel local de la estructura mediante el uso de pruebas in situ, a fin de diseñar un sistema de refuerzo alternativo a los métodos tradicionales, comparándolos en última instancia desde el punto de vista económico, de tiempo de ejecución y ecológico.

Lo anterior, acorde a las normativas aplicables por el principal órgano gubernamental a cargo de la conservación y restauración del patrimonio histórico de México, el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), cuya misión es investigar, conservar y difundir el patrimonio arqueológico, antropológico, histórico y paleontológico de la nación para el fortalecimiento de la identidad y memoria de la sociedad que lo detenta.

Así mismo, el INAH es una Institución con plena facultad normativa y rectora en materia de protección y conservación del patrimonio cultural tangible e intangible, que se encuentra a la vanguardia gracias al nivel de excelencia de la investigación en antropología, arqueología, historia, restauración, museología y paleontología, así como de la formación de profesionales en el ámbito de su competencia.

Sus actividades tienen un alto impacto social pues se ha hecho copartícipe con los diferentes niveles de gobierno y con la sociedad, en el proceso de toma de decisiones de los planes y programas de desarrollo, para el diseño y ejecución de estrategias de conservación y conocimiento del patrimonio y de la memoria

nacional. El INAH actúa en este marco de corresponsabilidad social pues cuenta con infraestructura y recursos adecuados a sus funciones y con suficiente personal altamente capacitado, que se caracteriza por su vocación de servicio para atender los requerimientos del público usuario de manera oportuna, racional y eficiente.

1.2 Análisis situacional

Con el tiempo, el ser humano se ha dado a la tarea de mejorar los materiales usados para edificar, buscando una mayor calidad y comodidad en la construcción de sus estructuras.

La evolución de la mampostería en sus distintas modalidades a lo largo de la historia se ha visto ligada directamente a los distintos lugares en el mundo donde se ha utilizado y a los materiales disponibles en cada región; pero siempre funcionando bajo el mismo principio.

Dado lo anterior, es correcto afirmar que la mampostería en sus distintas modalidades es uno de los procedimientos de edificación más antiguos utilizado alrededor del mundo, y por ende es el usualmente encontrado en aquellos edificios catalogados como históricos. Incluso, actualmente existen vestigios de poblados prehistóricos construidos con rocas asentadas con mortero de barro en distintos lugares del mundo.

La unidad de mampostería hecha por el hombre a partir de una masa de barro secada al sol, para sustituir a la piedra natural debió ocurrir en lugares donde esta última no podía encontrarse fácilmente. Estas unidades eran formadas a mano y se han encontrado en diversas formas, las cuales junto con el mortero de barro constituyen un estado de arte dentro de la construcción con mampostería.

Un avance importante en el desarrollo de la mampostería y en otras actividades fue la aparición del molde hecho por los sumerios en el cuarto milenio a. C., que consistía solo de un simple y rustico marco de madera, pero que possibilitaba el formar unidades más uniformes, así como el incrementar la producción de estas.

La mezcla de barro con la adición de paja y el uso de moldes junto con el secado de las piezas al sol, ampliaron las capacidades de construcción de aquellos tiempos, elevándolos a una escala monumental y dando mayor libertad de construcción. En un principio, la construcción de adobe siguió la misma forma de las construcciones de los materiales usados antes de su descubrimiento, pero, con el tiempo incidentalmente fue dando mayores capacidades de construcción. En el medio oriente a principios del tercer milenio antes de Cristo, el adobe al ser horneado produjo los primeros tabiques cerámicos, mismos que al utilizarse en la construcción eran asentados con mortero de alquitrán con la adición de arena. Esta variante de mampostería se convirtió en el material fundamental de las construcciones más importantes.

En América, y específicamente en Mesoamérica, se lograron desarrollos importantes en la construcción, mismos que hoy en día causan admiración y asombro. Las culturas mesoamericanas, gracias a sus creencias religiosas y su organización, tanto política como social, concibieron una arquitectura monumental basada principalmente en la construcción a base de mampostería usando piezas naturales y artificiales.

Posteriormente, surgieron innovaciones en cuanto a los materiales usados dando una mejora en la durabilidad y la resistencia de las piezas utilizadas. Sin embargo, aún no ha sido posible vencer en su totalidad las inclemencias de la naturaleza y el paso del tiempo mismo, lo que tiene como consecuencia el deterioro del conjunto estructural.

1.3 Definición del problema seleccionado

En muchos países del mundo, y particularmente en México, uno de los sistemas constructivos más utilizados desde siglos pasados hasta la actualidad ha sido la mampostería, misma que está presente en la mayoría de los edificios catalogados como históricos o de alto valor patrimonial. Sin embargo, no se implementó, hasta tiempos recientes la utilización de técnicas de refuerzo en la construcción, usando elementos confinantes como son dalas y castillos armados con acero, por lo que

muchos de los edificios antiguos, al carecer de estos refuerzos, y por los cambios de uso y el entorno, presentan daños que son de atención para asegurar la permanencia de la estructura.

Es preciso enfatizar que, a diferencia de una edificación moderna, los edificios históricos deben ser atendidos con mayor seriedad y delicadeza, ya que no solo se tiene el objetivo de rehabilitar un sistema estructural en sí, sino que también se busca preservar los valores intrínsecos relacionados a la edificación como son la arquitectura, el arte, la economía, la historia e ingeniería de la estructura. El patrimonio de una ciudad, o incluso de una nación completa, es lo que la caracteriza a lo largo de la historia, las generaciones en la sociedad pasan a través del tiempo, pero sus obras arquitectónicas o de ingeniería quedan como un legado que relatan la historia y hablan por su gente a lo largo de los años. En México, existen instituciones como el INAH, que tiene por misión el investigar, conservar y difundir el patrimonio arqueológico, antropológico, histórico y paleontológico de la nación con el fin de fortalecer la identidad y memoria de la sociedad que lo detenta. Así mismo, el INAH es la institución facultada para revisar, evaluar, autorizar, supervisar y sancionar cualquier práctica que se lleve a cabo con el fin de rehabilitar, reforzar y restaurar algún elemento catalogado como histórico o de valor patrimonial.

Específicamente, el ingeniero estructural busca que cada diseño moderno tenga un buen comportamiento estructural durante toda su vida útil, pero existen factores que muchas veces no están al alcance de la ingeniería, más aún cuando la edificación dada su antigüedad carece de criterios de diseño que contemplen los requerimientos presentes en las normas modernas de edificación. Actualmente, tanto en México como en el mundo existen numerosas instituciones y asociaciones que se dan a la tarea de buscar e implementar alternativas de conservación de este tipo de estructuras que van desde los aspectos legales hasta la investigación de nuevos métodos y materiales de refuerzo.

El tratamiento que particularmente requieren las edificaciones históricas debe cumplir con las solicitudes de ingeniería, además con el resguardo del aspecto

artístico y arquitectónico de ellos por su gran valor para la humanidad. Una de las soluciones que podría resolver de mejor manera a estas necesidades es el polímero reforzado con fibra de vidrio (GFRP, por sus siglas en inglés) por ser un sistema menos invasivo que otras técnicas de refuerzo, tener relativa ligereza y proveer de poca alteración a los elementos intervenidos.

2. Fundamento teórico

2.1 Marco histórico y contextual

De forma general, una estructura cualquiera, se analiza y diseña para que complete su vida útil dentro de condiciones aceptables de servicio y resistencia; sin embargo, en una obra civil pueden surgir situaciones que generen cambios durante las distintas etapas del ciclo de vida de la construcción y afecten negativamente la capacidad de resistencia que se espera de dicha estructura, provocando un colapso eventual. En respuesta a lo anterior, muchas veces es necesario realizar un procedimiento de reparación con la introducción de refuerzos en algunos elementos estructurales o en todo su conjunto para aumentar la capacidad portante en un determinado momento de su existencia y así recuperar su funcionalidad [1]. Estos procedimientos cobran aun mayor relevancia cuando se trata de edificaciones con un valor histórico o cultural importante, por lo que la recuperación y rehabilitación, en estos casos se vuelve prioridad.

La gran cantidad de factores involucrados en el deterioro de una estructura obligan, antes que nada, a realizar una evaluación previa del daño existente, con la finalidad de poder determinar el procedimiento de rehabilitación y refuerzo a usar, así como los materiales idóneos a aplicar en la rehabilitación, siendo el acero uno de los preferidos para esta tarea.

Sin embargo, el refuerzo mediante láminas de acero, pese a la eficacia del método, presenta algunos inconvenientes significativos a considerar, como el peso añadido a la estructura, la limitante en su forma y dimensiones, así como el riesgo de corrosión [1]. Para resolver estas deficiencias, frente al creciente número de

estructuras que requieren un refuerzo o rehabilitación, es posible concluir que los materiales tradicionales pueden resultar inadecuados en determinadas situaciones. En la búsqueda de nuevas alternativas a la solución de las deficiencias del acero como medio de refuerzo, surgen los materiales compuestos [1].

2.2 Estado del arte

Los materiales compuestos avanzados se han empleado en la industria aeroespacial, marina e industria automotriz durante las últimas décadas debido a sus buenas propiedades mecánicas como su alta resistencia y rigidez, menor densidad, alta resistencia a la fatiga, alto amortiguamiento y bajo coeficiente térmico. Recientemente, los ingenieros civiles y la industria de la construcción han comenzado a prestar atención al potencial de los materiales compuestos en su aplicación como refuerzo para diversos problemas asociados con el deterioro de las estructuras [2].

Pese al avance que los materiales compuestos han tenido en su aplicación como elementos de refuerzo y rehabilitación, en América latina y particularmente en México existen muy pocos reportes de propuestas de rehabilitación de estructuras en deterioro con el uso de materiales compuestos. No obstante, en Estados Unidos, Asia y Europa ha ganado importancia entre las técnicas de refuerzo y rehabilitación de elementos estructurales [4-6]. Así mismo, en décadas recientes se han realizado numerosos estudios acerca de las propiedades mecánicas de los materiales compuestos y su comportamiento [7, 8]. Además, en Europa y América Latina se han realizado investigaciones y pruebas piloto en búsqueda de optimizar el uso de los materiales compuestos como elementos de refuerzo externo y rehabilitación [9, 10].

Por lo tanto, al no haber en México suficiente investigación sobre el uso de materiales compuestos en el refuerzo o rehabilitación de estructuras de mampostería en deterioro, y ante la evidencia de la diferencia en las características tanto físicas como mecánicas de dichas estructuras sobre todo con

respecto del resto del mundo, surge la necesidad de valorar la aplicabilidad de las técnicas de refuerzo o rehabilitación con material compuesto en las edificaciones deterioradas. Particularmente, el presente proyecto pretende evaluar la aplicación de los GFRPs como alternativa viable a la rehabilitación de una estructura de mampostería en deterioro evitando así la sustitución de esta con el impacto consecuente que se tendría desde el punto de vista social, cultural, económico y ecológico.

2.3 Marco teórico

2.3.1 Principios de conservación

En cualquier intervención estructural, generalmente la metodología a seguir consiste en la identificación de tipos de falla, el diagnóstico de seguridad estructural, el desarrollo de técnicas de rehabilitación y por último la evaluación de eficiencia de procedimientos de refuerzo; todo ello apegado a los reglamentos de construcción aplicables. Sin embargo, como ya se mencionó, en el caso de estructuras con valor histórico y cultural se requiere de la aplicación de criterios específicos para la preservación del valor intrínseco del inmueble.

Dentro de los objetivos principales que se tienen en la conservación estructural de los inmuebles históricos se tiene como prioridad la seguridad física de las vidas humanas, la salvaguarda de los valores intrínsecos y por último, el uso que tiene y tendrá la construcción. Derivado de dichos objetivos, la técnica de intervención seleccionada debe estar basada en los principios de conservación y los criterios modernos de intervención de estructuras históricas, los cuales se encuentran estipulados en la Carta internacional sobre la conservación y restauración de monumentos y sitios (Carta de Venecia, 1964) y en los criterios del Comité científico internacional sobre el análisis y la restauración de las estructuras del patrimonio arquitectónico (ISCARSAH, por sus siglas en inglés) del Consejo internacional de monumentos y sitios (ICOMOS, por sus siglas en inglés), que es una organización internacional no gubernamental dedicada a la conservación de los monumentos y sitios históricos en el mundo.

De forma práctica es posible resumir los principios de conservación como:

- Respeto a la autenticidad estructural
- Mínima alteración o impacto a la construcción
- Seguridad estructural
- Compatibilidad de materiales y sistemas adoptados
- Métodos no invasivos
- Reversibilidad y remoción del sistema elegido
- Monitoreo y control durante las etapas de intervención

Lo ideal en cualquier intervención es lograr cumplir con todos los principios de conservación enlistados. Sin embargo, cualquier intervención, por mínima que esta sea, alterará de alguna forma el estado original que guarda la edificación o los elementos que la componen. Por ende, de forma práctica es imposible cumplir con todos los principios al mismo tiempo por lo que el criterio a adoptar en este caso es que el procedimiento de intervención sea mínimo y respetuoso, toda vez que se logre cumplir la mayoría de los principios en una solución óptima a la problemática presente en la edificación.

En todo caso, el procedimiento a seguir dentro de la intervención consiste básicamente en cuatro etapas que van desde la adquisición de datos, la comprensión del comportamiento estructural del conjunto, el diagnóstico este y la selección de la medida de intervención. A su vez, estas etapas conllevan numerosos estudios multidisciplinarios que están interconectados entre sí con un propósito en común, la preservación.

Es importante mencionar que dentro de las cuatro etapas mencionadas anteriormente debe haber una continua retroalimentación, de tal forma que en el procedimiento de análisis puede darse un flujo cíclico de información la cual debe documentarse en todo momento para dejar un antecedente a investigaciones o intervenciones futuras.

2.3.2 Tipologías y elementos estructurales

Para lograr comprender el comportamiento de una estructura, es importante conocer como está conformada la misma. Dentro de la clasificación de las tipologías en edificios históricos se pueden mencionar tres:

Edificios civiles: Aquellos edificios que tenían el propósito de albergar un bien o que brindaban un servicio a la sociedad. Usualmente cuentan con varios niveles y su sistema constructivo es a base de muros de mampostería de sección variable en función a su altura y tienen sistemas de pisos sobre vigas de madera.

Casas habitación: Utilizadas como viviendas. Suelen ser de un solo nivel y construcción relativamente simple a base de muros de mampostería de adobe y sistemas de losas con vigas de madera y tejas.

Edificios religiosos: Iglesias, conventos y misiones. Usualmente son edificaciones más complejas por la disposición de su planta y la asimetría de sus elementos, el sistema constructivo predominante es a base de mampostería con secciones mayores a los cuarenta centímetros y alturas considerables.

Materiales

Mortero

Consiste en la mezcla de conglomerantes inorgánicos, agregados finos y agua, y posibles aditivos que sirven para aparejar elementos de construcción tales como tabiques, piedras, bloques, etc. Además, se usa para rellenar los espacios que quedan entre los bloques y para el revestimiento de paredes. Los conglomerantes más comunes en la actualidad son los de cemento, aunque históricamente han sido, la cal, la tierra y el yeso los más utilizados.

Dentro de los tipos de mortero más comúnmente encontrados en edificios históricos destacan los morteros de barro, mortero cal-arena, mortero puzolana-cal-arena; este último más utilizado por el imperio romano.

Piedra

De origen natural, utilizado desde los inicios propios de la construcción por el ser humano por ser un material de alta resistencia cuya aplicación en la edificación varía mucho dependiendo del tipo de piedra utilizado, la tecnología disponible para desplazar el material y el labrado de este, así como la ubicación del asentamiento en cuestión.

Tierra

También llamado adobe, consiste básicamente en un tabique previo al proceso de cocción, es una mezcla de barro, arcilla y arena, mezclado en ocasiones con paja y secada al sol. La técnica de fabricación y su uso están extendidos por todo el mundo, encontrándose incluso en culturas que nunca tuvieron relación entre sí. Cabe destacar que este material posee una baja resistencia sísmica y una alta degradación por efecto de la intemperie y humedad.

Mampostería

Es uno de los sistemas de construcción más antiguos y simples, consiste en la colocación manual de elementos denominados mampuestos que pueden ser de origen natural como roca, o artificiales mediante el uso de tabiques o bloques de construcción, usualmente se utiliza un aglutinante para mejorar la cohesión entre las piezas, este puede ser a base de barro o cemento.

Al ser un método tradicional de construcción, en la mampostería, el poco control que se tiene sobre las propiedades de los materiales componentes y el proceso constructivo, tienen como consecuencia la variación en las propiedades mecánicas del conjunto y la difícil predicción de su comportamiento en comparación con otros materiales como el acero o el concreto reforzado [11].

Concreto reforzado

Está documentado en la literatura que el concreto por si solo resiste muy bien los esfuerzos a compresión, sin embargo presenta deficiencias respecto su

resistencia de tensión, del orden de aproximadamente 10 veces menor a la de compresión; en términos poco precisos [12].

Para mejorar los inconvenientes antes descritos se plantea la necesidad de introducir un material que resista a tensión lo que el concreto no puede: el acero. Este material añadido debe colocarse en las zonas donde es más necesario, es decir, donde se desarrollan las tensiones. Al conjunto de ambos materiales trabajando de esta forma se le denomina concreto reforzado [12].

En un ambiente agresivo, el concreto puede ser vulnerable a los ataques químicos, como la carbonatación y el ataque de cloruros que causa la fisura de la barrera alcalina de la matriz de cemento. Consecuentemente, el acero de refuerzo en las estructuras de concreto se vuelve susceptible a corrosión. Tales fenómenos conducen a la delaminación del concreto al nivel del acero de refuerzo, agrietándose y esparciéndose conforme el volumen del acero de refuerzo se incrementa [13].

Estructuras de acero

El acero consiste básicamente en la aleación de hierro y carbono con gran resistencia, flexibilidad y relativamente de bajo peso, por lo que es uno de los materiales más utilizados actualmente en la construcción debido a la eficiencia del proceso y la versatilidad que proporciona desde el punto de vista arquitectónico. Sin embargo, este material presenta una problemática particular respecto a la durabilidad en algunos ambientes ya que, al ser una aleación metálica, es propenso a sufrir corrosión cuando no se dispone de un adecuado mantenimiento acorde a las solicitudes del ambiente al que está expuesta la estructura.

Uno de los usos comunes de la construcción en acero son los puentes carreteros en muchos países europeos y en Estados Unidos donde las solicitudes de las estructuras han cambiado de forma exponencial en los últimos años. En estos casos, el costo de adaptación es mucho menor que el costo de reemplazo.

Además, la retro-adaptación suele tener menos tiempo de ejecución y, por lo tanto, reduce el tiempo de interrupción del servicio.

Es evidente la necesidad de adoptar materiales duraderos y técnicas rentables de adaptación [14].

2.3.3 Causas de deterioro

En una obra civil pueden existir varios factores que afectan el comportamiento de la estructura y que llevan a diseñar y construir un refuerzo.

Entre los principales y más comunes podemos mencionar los siguientes:

a. Cambio de uso en la edificación. - Esta acción supone soportar cargas superiores a las previstas en el diseño original o, que la distribución de estas sea totalmente distinta a las consideradas inicialmente.

b. Asentamientos diferenciales. - Este fenómeno produce fallas en la cimentación por problemas de suelos no considerados en las fases de estudios y diseño.

c. Errores en la fase de proyecto o diseño. - Que comprometen la resistencia y durabilidad de la estructura.

d. Errores que se producen durante la fase de ejecución o construcción. - Provocados por la falta de personal calificado en construcción o por falta de supervisión.

e. Problemas debidos a la degradación y deterioro de los materiales de construcción.- Pueden tener dos causas; el paso del tiempo o la exposición a agentes químicos ambientales como acidez, humedad y cambios de temperatura.

f. Modificación y eliminación parcial o total de ciertos elementos estructurales.

g. Daños producidos por causas accidentales. - Explosión, fuego, impactos, etc., que disminuyen o anulan la capacidad resistente de la estructura en su totalidad, parte de ella o en algunos elementos.

h. Modificación de criterios ante la respuesta sísmica.

i. Modificación de las normas de construcción, códigos y reglamentos de diseño [1].

2.3.4 Métodos de intervención y refuerzo

El reforzamiento constituye trabajos adicionales que implican aumentar la capacidad de carga del inmueble, esto se logra de diferentes formas, como ampliar secciones, incrementar el número de elementos estructurales o intervenir los elementos con materiales de mayor capacidad, cuidando el no modificar sustancialmente su configuración original.

En los edificios de mampostería, por ejemplo, se incrementa la capacidad de los muros ante fuerzas cortantes mediante la adición de malla metálica en variadas configuraciones, recubiertas de mortero de cemento arena.

En edificios de concreto existe la posibilidad de aumentar la sección de las columnas a través de un encamisado, lo cual no modifica la posición de las columnas ni la estructuración original, por lo tanto, se incrementa el volumen de las columnas afectando mínimamente el espacio útil. Este encamisado se recomienda realizarlo con concreto de mejores características y un nuevo armado. Otra posibilidad es la de encamisar con elementos metálicos, en base a ángulos unidos con soleras en forma de celosías. El inconveniente de la práctica de esta alternativa es que el inmueble debe permanecer desocupado durante el procedimiento de refuerzo y dadas las condiciones de trabajo resulta lento y laborioso.

Una forma muy atractiva de aumentar la capacidad resistente de columnas, trabes y losas de concreto es la utilización de recubrimientos de fibra de carbono, estos elementos son adosados a las trabes, losas y columnas prácticamente pegados con resinas epóxicas, incrementando la capacidad resistente del elemento sin modificar la estética de este. La desventaja de este procedimiento radica en que lo debe ejecutar personal especializado en el manejo de las fibras y resinas. Sin

embargo, este puede practicarse en tramos exclusivos, mientras el resto del inmueble puede seguir funcionando normalmente.

En elementos de acero, la práctica más común de refuerzo es el incrementar la capacidad resistente de los elementos mediante la colocación de un cubre-placas. Que consiste en adosar al elemento mediante soldadura una placa que incremente el espesor de los miembros. Esto se realiza en los lugares y miembros que lo requieran. Es un trabajo muy limpio y fácil de ejecutar, se puede realizar en etapas mientras el resto del edificio trabaja normalmente.

La aplicación de cada una de estas prácticas depende de las características y requerimientos del edificio así como de las preferencias de quien va a ejecutar el reforzamiento [10].

Particularmente, cuando se trata de una estructura histórica, el procedimiento de intervención debe atender solicitudes de mayor particularidad que en el caso de edificaciones modernas.

A partir de la Carta de Venecia se reconoce explícitamente la salvaguarda de los valores intrínsecos de la estructura. Por lo que la conservación de esta se fundamenta en el conocimiento y entendimiento del comportamiento de la estructura y de las causas reales de los posibles daños, también se busca que la intervención sea mínima y respetuosa. Además, se establece la importancia de que la intervención se fundamente en un método científico mediante estudios previos. Por último, se establece que los estudios realizados para proponer una rehabilitación sean multidisciplinarios requiriendo la cooperación de distintos profesionistas como historiadores, arquitectos, ingenieros, etc.

Es importante en cualquiera que sea la medida de intervención seleccionada el enfocarse en atacar las causas del problema y no remediar únicamente los síntomas presentes en la edificación.

Básicamente, se cuenta con dos opciones para intervenir una edificación histórica, (1) reducir la demanda en la estructura o (2) aumentar la capacidad de esta. En lo

que respecta a los criterios para clasificar las técnicas de refuerzo en las edificaciones históricas, uno de los más comunes es el dividir las técnicas en tradicionales y modernas, cada una con sus aspectos particulares.

Las técnicas tradicionales son aquellas que han sido aplicadas con métodos y materiales similares a los originalmente usados en la edificación en cuestión, particularmente de estas técnicas se conoce perfectamente las bondades y deficiencias que pudiese tener el sistema, así como su comportamiento a largo plazo.

Por otra parte, las técnicas modernas utilizan materiales y dispositivos aplicados a la construcción actual o a la reparación de edificios modernos. Las principales desventajas de estas técnicas es que en algunos casos no se tiene la experiencia suficiente para validar la efectividad, durabilidad y compatibilidad con la estructura y los materiales originales.

En todo caso, los materiales que se utilicen en la intervención seleccionada deberán respetar, obviamente, los principios de conservación, particularmente en lo respectivo a la durabilidad y compatibilidad con los materiales originales de la estructura.

2.3.5 Materiales compuestos

Se entiende por material compuesto a aquel formado por dos o más componentes, de tal forma que las propiedades del material final sean superiores que las de los componentes por separado.

Sin embargo, se debe tener en cuenta ciertas consideraciones respecto a la definición de materiales compuestos, una de ellas es que el material debe ser expresamente fabricado por el hombre; por otra parte, los materiales compuestos no deben tener continuidad fenomenológica y, finalmente, el concreto armado, a pesar de estar construido expresamente por el hombre y tener discontinuidad fenomenológica, no se considera tampoco como material compuesto ya que este sistema es un material clásico en la Ingeniería Civil.

Un material compuesto presenta dos elementos principales: fibra y matriz. La combinación adecuada de estos componentes tiene como resultado un material con mejores propiedades que las partes que los componen por separado. Además de fibra y matriz, existen otros tipos de componentes como cargas y aditivos que dotan a los materiales compuestos de características peculiares para cada tipo de fabricación y aplicación [15].

Fibra de aramida

Pertenece al grupo de las fibras orgánicas de altas prestaciones. Las aramidias tienen una alta resistencia al impacto y a la corrosión y son extremadamente resistentes al ataque químico exceptuando ácidos fuertes y bases a altas concentraciones [15].

Fibra de carbono

La investigación que dio como resultado el uso de las fibras de carbono en los materiales compuestos modernos se atribuye a los trabajos de principios de los años sesenta de Shindo en Japón, Watt en Inglaterra y Bacon y Singer en los Estados Unidos.

A partir de las temperaturas del tratamiento de calentamiento, se han identificado tres tipos diferentes de fibra de carbono [15]:

- La fibra de carbono de alto módulo (HM) es la más rígida y requiere la mayor temperatura en el tratamiento.
- La fibra de carbono de alta resistencia (HR) es la más fuerte y se carboniza a la temperatura que proporciona la mayor resistencia en tensión.
- El último tipo de fibra de carbono (III) es la más barata; la rigidez es menor que en las anteriores, pero presentando buena resistencia. Este tipo de fibra tiene la temperatura más baja en el tratamiento.

Fibra de vidrio

Es el refuerzo más utilizado actualmente en la fabricación de materiales compuestos, sobre todo en aplicaciones industriales. Esto se debe a su gran disponibilidad, sus buenas características mecánicas y su bajo costo. De hecho, los primeros estudios ingenieriles sobre materiales compuestos fueron realizados sobre materiales compuestos de fibra de vidrio [15].

Si la fibra utilizada es de vidrio, de carbono o de aramida, los compuestos se denominan respectivamente GFRP, CFRP y AFRP. En general, los materiales compuestos reforzados con fibra (FRP, por sus siglas en inglés), además de tener alta resistencia respecto a los materiales convencionales, resultan ser muy ligeros y resistentes a condiciones extremas del ambiente. Su bajo peso hace que las técnicas de refuerzo o rehabilitación sean más fáciles y que no se requiera restringir los espacios en rehabilitación ni reforzar las cimentaciones. Además, su bajo peso causa incrementos despreciables en las fuerzas inerciales causadas por sismos. Una desventaja de los FRP es la susceptibilidad que la resina tiene a los rayos ultravioletas, por lo que los FRP deben protegerse de la exposición directa de la luz solar [11].

3. Proyecto de intervención

3.1 Objetivo general

- Evaluar la aplicación del GFRP como alternativa viable a la rehabilitación de una estructura de mampostería con valor histórico en deterioro.

3.2 Objetivos específicos

- Evaluar el estado actual de deterioro de una estructura con valor histórico, social y arquitectónico ubicada en la ciudad de Sinaloa de Leyva.
- Diseñar e implementar un sistema de rehabilitación y refuerzo externo con el uso de materiales compuestos GFRP.

3.3 Justificación

El presente proyecto de intervención se justifica en virtud de ofrecer una alternativa de conservación y rehabilitación de estructuras en decadencia como la que se plantea intervenir, mitigando a la par el impacto económico, social y ecológico que originaría la demolición y reconstrucción de esta, optimizando los recursos disponibles en la solución de la problemática actual.

3.4 Metodología

Como se mencionó anteriormente, de forma general, es posible dividir la intervención en cuatro fases que son la adquisición de datos, la descripción del comportamiento estructural, el diagnóstico y seguridad, así como la medida de intervención. Cabe recalcar que dentro de estas etapas fue necesaria una constante retroalimentación entre cada una, además de documentar respectivamente toda la información recabada en el proceso.

A continuación, se brinda la información respectiva al desarrollo del estudio en cuestión para el cual se hicieron una serie de levantamientos en campo a fin de evaluar la mecánica de la estructura a intervenir para poder diseñar el sistema de refuerzo óptimo para las solicitaciones existentes. Cabe recalcar que existe una gran cantidad de factores involucrados en el deterioro de una estructura, por ello se propone la siguiente metodología a fin de determinar cuáles son los factores más significantes en el problema para poder determinar el procedimiento de rehabilitación y refuerzo óptimo. Dicha propuesta debe cumplir con los lineamientos establecidos por las instituciones competentes en materia de conservación de edificios históricos.

Inicialmente, se hizo el diagnóstico del estado actual de la estructura en cuestión, para ello se utilizaron diversas herramientas de medición para realizar levantamientos en campo y análisis de gabinete a fin de identificar las zonas donde será factible colocar el refuerzo externo con el uso de GFRP, mismas que se hicieron siguiendo las recomendaciones de las Normas Técnicas

Complementarias del Reglamento de Construcción de la Ciudad de México (NTRCCDMX) en su apartado de rehabilitación, así como las recomendaciones otorgadas por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), que sirvieron como guía para la caracterización del agrietamiento existente en la estructura, dependiendo de su posición, longitud y abertura. Posteriormente, se procedió a diseñar un sistema de refuerzo externo que cumpla con las solicitudes presentes en la estructura, la configuración del refuerzo propuesto dependerá en gran medida del diagnóstico previo del sistema, así como de las propias recomendaciones de las NTRCCDMX, donde se buscó una equivalencia entre la resistencia a tensión del acero necesario para reforzar cada segmento contra la resistencia a tensión del material compuesto de fibra de vidrio a fin de poder determinar el espesor, longitud y la posición de cada tira de material que se utilizó.

3.4.1 Análisis historiográfico

Este análisis consiste en la recopilación de los antecedentes históricos de la estructura principalmente con el uso de la bibliografía existente donde se obtuvo información referente al procedimiento constructivo y los tiempos de los trabajos de edificación. Así mismo, se buscó conocer los periodos en los que la estructura estuvo en uso, los cambios de uso que pudo tener en momentos determinados, los trabajos previos de mantenimiento o conservación que pudieron llevarse a cabo, así como toda la información relevante que pueda tener influencia en el daño presentado, o bien, que sea de utilidad para comprender el sistema estructural y el diseño de la propuesta de rehabilitación.

De igual forma, este análisis sirvió para destacar la importancia de la preservación de la estructura, dado el impacto que esta tiene en el ámbito social y cultural, incrementando así, la necesidad de un sistema de rehabilitación eficiente que cumpla con los requerimientos previamente establecidos por el INAH.

3.4.2 Levantamiento Arquitectónico

Dado que uno de los objetivos es preservar la estructura en su estado original, es necesario desarrollar un levantamiento arquitectónico a detalle, describiendo los elementos existentes en el conjunto estructural, su geometría y posición, sus dimensiones y en general, todos los elementos arquitectónicos que componen la estructura; lo anterior es realizado mediante visitas al sitio, mediciones con distanciómetros y software de dibujo para la digitalización de los planos obtenidos.

Así mismo, se requirió de la ejecución de sondeos en la estructura a fin de determinar el sistema constructivo predominante, los materiales y toda información relevante para el estudio, complementándose con un levantamiento fotográfico de todos los frentes existentes en la sección a intervenir con la finalidad de dejar antecedentes del estado en que actualmente se encuentra la estructura para intervenciones futuras.

3.4.3 Levantamiento Topográfico

A fin de determinar la topografía del terreno donde se encuentra la estructura se desarrolló un levantamiento topográfico utilizando un teodolito electrónico, cinta y estadal. De igual forma se verificó la verticalidad de los elementos presentes en la estructura a fin de complementar la evaluación de la seguridad estructural del mismo.

3.4.4 Caracterización de fallas

Es necesario conocer el nivel de daño presente en la estructura, por ello se requirió identificar todas las fallas existentes, esto se logró mediante una inspección en los elementos estructurales utilizando herramientas de medición como son flexómetros y medidores de grietas.

Primeramente, se trazó sobre los muros y demás elementos un sistema coordinado que permitió hacer un levantamiento minucioso de las grietas existentes, el sentido en que se encuentran distribuidas y la abertura de estas; tal

levantamiento sirvió para identificar las zonas de mayor daño en la estructura, así como el trazo que se seguirá para la colocación del refuerzo externo. Posteriormente dicho patrón de agrietamiento se digitalizó para facilitar la manipulación de la información.

De forma complementaria, se llevó a cabo un registro de las patologías no estructurales presentes en la sección a intervenir, tales como humedades, efectos de la intemperie y demás efectos que deberán atenderse dentro de la etapa de restauración del monumento histórico.

En esta etapa, se elaboró un resumen de resultados describiendo el sector de localización, número de fallas y porcentaje daño para cada sección. Para ello se utilizaron los criterios y recomendaciones de las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcción de la Ciudad de México.

3.4.5 Evaluación de la Mecánica de la Estructura

De forma general, consistió en la elaboración de un peritaje estructural siguiendo las recomendaciones establecidas por el Reglamento de Construcción de la Ciudad de México y sus Normas Técnicas Complementarias. Derivado de lo anterior, fue posible obtener un dictamen estructural con la finalidad de conocer las condiciones específicas del conjunto estructural.

El parámetro más importante del cual dependen las propiedades mecánicas de los muros de mampostería es la resistencia a compresión de las piezas. Por otro lado, las propiedades mecánicas pueden determinarse ya sea por el estudio de los materiales componentes, piedra y mortero, o del ensaye directo del conjunto de ambos. Evidentemente, el primer método es menos preciso debido a la gran cantidad de variables que intervienen en el problema y a la dificultad de tomar en cuenta la interacción entre ambos materiales.

Las NTCRCCDMX otorgan valores específicos de las propiedades mecánicas de diseño para las combinaciones más usuales de piezas y morteros, para las que existe información experimental y experiencia práctica disponible.

De igual forma, una de las situaciones más importantes en las que un muro se somete a tensión diagonal es, por supuesto cuando una edificación de mampostería se ve sometida a un efecto sísmico. Sin embargo, existen muchas otras circunstancias en las que se pueden producir este tipo de sollicitación en la mampostería, por ejemplo, cuando se producen hundimientos diferenciales en una edificación, o bien por la acción de cargas gravitatorias cuando existe una distribución de cargas verticales poco uniforme en un determinado muro. Por estos motivos es de gran importancia conocer el comportamiento mecánico de la mampostería no reforzada bajo estas situaciones, ya que son ellas quienes con mayor frecuencia producen la falla de la mampostería. Por ende, se infirió la resistencia a compresión diagonal de la mampostería de antecedentes bibliográficos y estudios previos, dichos parámetros fueron de gran utilidad para conocer el tipo y nivel de refuerzo a utilizar.

Cabe mencionar que, por tratarse de un edificio histórico, será complicado obtener muestras cien por ciento representativas de la mampostería como tal, por lo que se optará por la utilización de factores propuestos en estudios anteriores al presente, así como las recomendaciones planteadas por las NTCRCCDMX y del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) en sus guías de rehabilitación, a fin de disminuir la incertidumbre existente en los datos presentados en el análisis.

Adicional a las pruebas antes mencionadas, el análisis incluirá la siguiente información:

- Descripción del edificio; indicando su ubicación precisa, su funcionalidad y estructuración de este.
- Revisión de verticalidad de la estructura; se elaboró de acuerdo con lo dispuesto en la Norma Técnica Complementaria para Diseño por Sismo, que para estructuras existentes indica que se deberá considerar el desplome que la misma pudiese tener y donde se ubica el mismo, en caso de existir, dentro de los parámetros marcados por el propio reglamento.

- Condición actual de la estructura; desarrollada a partir de la caracterización de fallas e inspección visual previa donde se identifican los daños existentes en el conjunto.
- Clasificación de la estructura; que se elaboró de conformidad al Artículo 139 fracción I del Reglamento de Construcción de la Ciudad de México y atendiendo a las características que presenta el edificio.
- Ubicación geotécnica y sísmica; se realizó según lo dispuesto en el artículo 170 del capítulo VIII del Reglamento y con las figuras 2.1 y 1.1 de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones y Diseño por Sismos, respectivamente.
- Factor de comportamiento sísmico Q; este factor está íntimamente relacionado con la ductilidad que presenta la estructura en su conjunto. En el apartado 5 de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo vigente, se recomienda la adopción de un factor, el cual es función directa de la estructuración del edificio, la resistencia y rigidez del entrepiso y de la ductilidad de los miembros estructurales que conforman el inmueble.
- Evaluación de cargas; se elaboró conforme a lo dispuesto por el RCCDMX en el artículo 150 del capítulo III, correspondiente a las categorías de acciones, de acuerdo con la duración con que obran sobre las estructuras, considerando para tal efecto tres tipos de acciones:
 - Cargas muertas; se evaluaron considerando los pesos de los elementos estructurales, de los materiales que constituyen los acabados de los pisos, del material para relleno en azotea, los muros de mampostería interiores y todo aquel elemento y material que ocupa un lugar permanente dentro del edificio y el ajuste en los pesos de materiales en fachadas. Para cada caso en particular se tomará el valor máximo probable de los pesos volumétricos de cada material utilizado en la construcción del edificio.
 - Cargas vivas; para la evaluación de las cargas vivas nominales unitarias se siguieron los lineamientos marcados en el capítulo V, artículo 161 y 162 del Reglamento vigente y la tabla 6.1 de las Normas Técnicas

Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones.

- Cargas accidentales; dichas acciones se calcularon de acuerdo con los parámetros que presenta el RCCDMX y sus Normas para Diseño por Sismo.

Para la determinación de las fuerzas accidentales producidas por efectos sísmicos, se estableció el coeficiente respectivo conforme al lugar y como lo especifica el Reglamento vigente en su capítulo VI, artículos 164 al 167 y la figura 1.1 de las Normas por Sismo.

- Análisis sísmico y estructural; se realizó adoptando los criterios simplificados para la evaluación de seguridad estructural de construcciones históricas publicados por Rivera Vargas y otros en 2012 [18]. Donde se hará principalmente una evaluación sísmica, evaluación de desplomos permisibles y la distorsión angular de muros.
- Interpretación de los resultados del análisis estructural; identificando principalmente la respuesta del edificio a la acción sísmica, la revisión de los estados límite de falla y la revisión de los estados límite de servicio.

Evaluación de la seguridad estructural

Debido a la complejidad de la geometría y las características mecánicas del material de las construcciones históricas, éstas se deben analizar con métodos avanzados que permiten tener una mejor estimación de la respuesta estructural ante diferentes acciones externas [18]. Sin embargo, para efectos de llevar a cabo una evaluación de la seguridad estructural más simplificada y rápida se optó por la utilización de los criterios de evaluación estructural de construcciones históricas presentados por Rivera Vargas y otros, 2012. Ya que demostraron que de forma práctica se pueden utilizar como evaluación preliminar y tienen buena aproximación respecto a un análisis de modelo con elementos finitos.

Elementos de Soporte

Capacidad de carga vertical

Para la evaluación de capacidad de carga axial a compresión en los muros se tomó en consideración la ecuación recomendada por el reglamento Uniform Building Code - UBC (1997) para estructuras de mampostería (Ecuación 1):

$$F_a = 0.20f_m \left[1 - \left(\frac{h^3}{42t} \right) \right] \dots\dots\dots 1$$

Donde, F_a resistencia permisible a compresión, f_m es la resistencia a compresión del material, h y t son la altura y espesor del muro, respectivamente. En el caso de las columnas h y t se interpreta como la altura y dimensión mínima de la columna, respectivamente.

Capacidad de carga lateral

Debido a la dificultad de la obtención de las propiedades mecánicas de los materiales presentes en la estructura, se siguieron las recomendaciones del reglamento UBC (1997), cuya ecuación (Ecuación 2) evalúa la resistencia permisible al cortante (F_v) en función a la resistencia a compresión de la mampostería (f_m), cabe mencionar que, debido a que no es posible obtener una muestra representativa ni utilizar las técnicas de campo necesarias para su obtención, éste valor será tomado de estudios previos, específicamente de Meli, 1998:

$$F_v = 0.3(f_m)^{1/2} \dots\dots\dots 2$$

Evaluación sísmica

Para la evaluación sísmica se comparó la fuerza lateral total impuesta por el sismo y la capacidad que tiene la estructura para resistir dicha fuerza (Ecuación 3). La fuerza sísmica total (V_a) se considera como el peso de la estructura (W) multiplicado por el coeficiente sísmico (c), mismo que se obtendrá de la metodología que marca las Normas de Diseño por Sismo del Reglamento de Construcción de la Ciudad de México:

$$V_a = cW \dots\dots\dots 3$$

Dicha fuerza se consideró igual para cada dirección en la que actúe el sismo. En contraparte, el edificio cuenta con resistencia diferente en función al sentido en que sea analizado. Por tal efecto, se consideró que la fuerza sísmica resistente (VR) es igual a la suma de las contribuciones de los muros alineados a la dirección del análisis; esta contribución se determinó con el producto del área transversal del muro por el esfuerzo cortante resistente de la mampostería (Vm), expresado en la Ecuación 4:

$$V_R = \sum A_m V_m \dots\dots\dots 4$$

En última instancia, la comparación se hizo aplicando las relaciones (Ecuación 5 y 6):

$$F_{sx} = \frac{V_{Rx}}{V_a} \dots\dots\dots 5$$

$$F_{sy} = \frac{V_{Ry}}{V_a} \dots\dots\dots 6$$

Para cada sentido de análisis.

Desplomo permisible de muros por hundimientos del terreno

Para el cálculo de los desplomos permisibles se determinó el ángulo de desplomo permisible con la siguiente relación, donde t y H son el espesor y altura del muro, respectivamente.

$$\alpha = \text{Tan}^{-1} \left(\frac{1}{3} \frac{t}{H} \right) \dots\dots\dots 7$$

$$\Delta_{PERM} = H \text{Sen } \alpha \dots\dots\dots 8$$

Distorsión angular de muros

Asentamiento permisible:

$$\Delta = \gamma L \dots\dots\dots 9$$

Posiblemente los métodos simplificados no den lugar a emitir un dictamen confiable en los casos en donde se tenga una condición crítica e incertidumbre en cuanto a la capacidad de carga y la distribución de las acciones externas, lo cual amerita un análisis bajo un método avanzado, no obstante un método simplificado puede servir para realizar una evaluación preliminar rápida sobre la seguridad estructural del edificio y con base a ello determinar si es suficiente con dicha valoración o en su defecto amerita un análisis más detallado con un método sofisticado [18].

3.4.6 Propuesta de Rehabilitación

La propuesta de rehabilitación se basa en el diseño de la recuperación y/o refuerzo de los elementos estructurales de mampostería y elementos principales, en este punto se tomarán las NTCRCCDMX a fin de sustituir el sistema de refuerzo externo de acero que comúnmente se utiliza por un su equivalente utilizando la fibra de vidrio y resina poliéster con la configuración óptima, siguiendo el patrón de agrietamiento o los requerimientos que posea la estructura en cuestión.

Para determinar la configuración en la cual fue colocado el refuerzo sobre los muros existentes es necesario comprender el comportamiento de los muros de mampostería y los mecanismos de falla que esta puede presentar en diversos escenarios.

La falla producida en un muro por efecto de fuerzas cortantes ocurre generalmente a través de grietas inclinadas debidas a tensiones diagonales. Dichas grietas se forman generalmente a lo largo de las juntas, propiciadas por la debilidad de la unión pieza-mortero; sin embargo, para piezas con baja resistencia y buena adherencia con el mortero, las grietas atraviesan indistintamente piezas y mortero.

En el caso particular del templo que se pretende intervenir los muros están constituidos de mampostería simple que, generalmente, tienen un comportamiento muy deficiente ante el efecto de fenómenos sísmicos o de asentamientos

diferenciales del suelo. En los muros de carga, las fallas se deben a la fragilidad del material, a la falta de liga entre los elementos y a la falta del confinamiento. Precisamente, el objetivo de la aplicación del refuerzo externo GFRP es el lograr dicho confinamiento en los elementos a forma de lograr una equivalencia entre elementos confinantes, dadas y castillos, con las tiras de material compuesto, cuyas dimensiones y espesores se diseñarán tomando como consideración las principales propiedades mecánicas de los materiales involucrados como se muestra en la Tabla 1. Por otra parte, la configuración en la cual será dispuesto el refuerzo será de forma perpendicular al agrietamiento presentado, ya que los materiales compuestos soportan únicamente esfuerzos de tensión y con esta disposición se logrará optimizar su aplicación aprovechando completamente sus atribuciones al refuerzo.

Tabla 1 - Propiedades mecánicas de los materiales

Parámetro	MPa	Kg/cm ²
Resistencia de fluencia nominal, varilla #3 (9.5mm)	412	4200
Resistencia de fluencia nominal, varilla #2 (6.4mm)	227.60	2320
Módulo de elasticidad de GFRP	16.70	1.7x10 ⁵
Resistencia a la adherencia entre GFRP y tabique	47.90	4.7
Resistencia a la tensión de GFRP	269.50	2750

Respecto a las dimensiones que debe tener cada tira de material compuesto se buscará una equivalencia entre el área de acero que recomiendan las NTCRCCDMX para cualquier elemento confinante determinado por la fórmula 5.1.1 de las Normas antes mencionadas (Ecuación 10):

$$A_s = 0.2 \frac{f'_c}{f_y} b_c h_c \dots\dots\dots 10$$

Donde: f'_c es la resistencia a compresión del elemento, f_y es la resistencia de a tensión del acero, b_c y h_c corresponden a las dimensiones del elemento confinante sobre el plano del muro y perpendicular a este, respectivamente. Cabe recalcar que se considerará para un elemento cuadrado de 65 cm, correspondientes al propio espesor del muro en cuestión.

Dicha área de acero se transformó en una fuerza resistente a tensión del acero con la que se determinó el ancho de las tiras del material compuesto. Respecto a la longitud de estas, se determinaron en función al ancho de las tiras y la resistencia de adherencia entre el material compuesto y la mampostería, igualando la fuerza resistente con la fuerza que se estima aplicar en los elementos. La posición en todo caso fue perpendicular al sentido del agrietamiento.

Una vez concluida la evaluación de los daños presentes en la estructura se definió el proceso de rehabilitación que primeramente consistió en el relleno de grietas existentes, para ello se requirió retirar el aplanado circundante a la zona de agrietamiento para su resane con un mortero fluido compuesto por arena-cal. Aquellas piezas con un nivel considerable de daño, fueron retiradas y reemplazadas por piezas nuevas; así mismo, las zonas que requirieron de un apuntalamiento o refuerzo provisional durante los trabajos fueron reforzadas debidamente para lograr la mayor seguridad durante las actividades.

Posterior al fraguado de los materiales utilizados se dio paso a la preparación de la superficie para la aplicación del refuerzo de GFRP, esto retirando la pintura y aplanados, uniformizando la superficie y retirando cualquier residuo que pueda afectar la adherencia del material compuesto. A continuación, se hizo la aplicación de una primera capa de impregnación de resina para permitir que las piezas de tabique absorban el material y tener así una superficie adecuada para la aplicación de las tiras de fibra de vidrio, una vez colocadas, se procedió a una segunda capa de impregnación y, después de 24 de horas de reposo, se aplicó una capa final de resina para sellar las oquedades restantes en la fibra. Por último, fue necesaria la aplicación de una fina capa de arena cribada sobre la resina a fin de lograr una

superficie donde se pueda adherir el mortero para el acabado final en el muro y protegiendo al material compuesto de los rayos del sol que provocarían su degradación.

Es importante mencionar que por tratarse de una estructura donde el principal objetivo es la conservación de su aspecto original, fue necesario la aplicación de una muestra del procedimiento antes mencionado con la finalidad de identificar reacciones no esperadas en el material ya una vez aplicado en el sitio y el comportamiento que se tendría en el acabado final de las superficies.

A efectos de medir el comportamiento que tendrá la estructura una vez rehabilitada, se propone la utilización de bancos de nivel y el monitoreo de puntos de referencia sobre la estructura que indiquen la pasividad de esta y, por ende, el correcto funcionamiento del sistema de refuerzo aplicado.

3.5 Análisis de resultados

3.5.1 Análisis historiográfico

La parroquia de San Felipe y Santiago de Sinaloa se encuentra ubicada en la cabecera municipal de Sinaloa de Leyva, cuyo origen es de finales del siglo XVI siendo la población de origen español más septentrional del territorio novohispano después de Culiacán [16].

La fundación de la Villa de San Felipe y Santiago de 1583 y ubicada en los márgenes del Río Sinaloa, compuesta por un reducido grupo de españoles que provenían de otra efímera población desaparecida víctima de una rebelión de los Zauques, dando paso al surgimiento de la Villa que fue asiento principal de la Orden de la Compañía de Jesús, que se convirtió en relativamente poco tiempo, en parte fundamental en el proceso de pacificación y conquista implementado con la participación de la Orden Religiosa comúnmente llamados Jesuitas, quienes desde 1591 se establecieron en esta Villa de Españoles, iniciando las actividades evangélicas que desarrollaron a través de las misiones, preparando las condiciones necesarias para el poblamiento y la consolidación del territorio del

noroeste de México [17]. En esta villa ubicaron su centro de operaciones: el Colegio de la Compañía de Jesús de Sinaloa, que funcionó como cabeza y eje fundamental administrativo de las misiones en el noroeste novohispano, debido a que el establecimiento de las misiones como proyecto de pacificación y control dirigido a la conversión cultural y espiritual indígena, apoyado con diferentes elementos como los presidios, el colegio, las actividades de producción implementadas desde las misiones generaron la fundación exitosa de estas nuevas comunidades y sirvieron de base para, una vez consolidadas, extenderse territorialmente hasta las Californias, Nuevo México y regiones americanas en un lapso de 176 años, hasta el momento de la expulsión de la orden de la Compañía de Jesús de los territorios Españoles en 1767 decretada por el Rey Carlos III.

Durante este proceso la Villa de Sinaloa cobró tal importancia que llegó a ser sede del Rectorado de Sinaloa, posteriormente fue constituida sede capital de las provincias de Chiametla, El Rosario, Culiacán, Sinaloa, Sonora y Ostimuri, así también fue capital del Estado de Occidente formado por los actuales estados de Sinaloa y Sonora. Lo anterior denota su relevancia como asentamiento desde la época colonial y durante otros procesos históricos posteriores, fue por ejemplo nombrada Sinaloa de Leyva desde 1933 en reconocimiento al Protomártir de la Revolución Mexicana Gabriel Leyva Solano.

En el periodo jesuita, donde se estableció el Colegio de la Compañía con un templo de 3 naves edificado ya desde 1635 y el cual se reconoce como el antecedente innegable del actual inmueble que nos ocupa, el Templo Secular de San Felipe y Santiago; que debe su origen al desafortunado acontecimiento que sufriera en 1770 el templo del periodo misional, colapsado producto de una creciente del Rio Petatlán (hoy Rio Sinaloa). La necesidad de edificar otra iglesia en un lugar mejor ubicado y que, aunque no jesuita, debido a su concepción posterior al año de la expulsión de 1767, guarda intrínsecamente en su fabricación, la composición y orientación inclusive de su antecesor.

Es claro que al edificarse en un sitio con mayor elevación se pretendió pragmáticamente evitar el mismo destino del anterior. Se cuenta actualmente con

datos fehacientes de referencia de las dimensiones físicas determinadas mediante la investigación de arqueología histórica llevada a cabo entre los años 2012 y 2014 por el Centro INAH Sinaloa donde se lograron identificar los restos del inmueble del Templo Jesuita, con sus dimensiones, espesores y desplantes de muros, algunos indicios de los sistemas constructivos y que nos permite contrastar y comprobar la relación que se guarda con el templo actual de San Felipe y Santiago de Sinaloa. La nueva edificación iniciada desde 1796 según consta en una placa alusiva en el muro testero que muestra grabada esta fecha, fue concluida según se propone una monografía a 1811 como fecha de terminación: *“En 1796 se inició la construcción del nuevo templo promovido por el Sr. Carlos de Rentería y su esposa Juana Heredia, y se terminó en 1811, también con tres naves, dos entradas laterales y una principal, planta de cruz latina y una casa cural anexa; tenía dos torres comenzadas y dos capillas en crucero. Los techos eran de ladrillo y mezcla con vigas de cedro, excepto el altar mayor que era de bóveda. Contaba con una sacristía y un bautisterio.”*

3.5.2 Levantamiento arquitectónico

Emplazamiento y descripción arquitectónica

El Templo de San Felipe y Santiago se encuentra en un paraje cercano a 300 m. pero a mayor elevación respecto al templo anterior, además se encuentra desplantado sobre un atrio en desnivel que presenta en su lado sur un desnivel de 2.60 m al ser la parte hacia donde baja el terreno, en sus lados oriente y poniente se va aminorado esta altura respecto de la calle, conforme se desplaza al norte, hasta la pared de los accesos al templo donde es de aproximadamente 50 cm. Este atrio presenta una contención de material de relleno confinado por un muro de tabique asentado con mezcla de cal arena con un espesor de 40 cm aproximadamente y con algunos restos de contrafuertes al lado sur; así como también sobre este muro desde el nivel del atrio se adicionó un muro bajo de aproximadamente 1 m. con arcos casi de medio punto invertidos con castillos de concreto armado entre cada uno de ellos, delimitando el atrio. En el lado sur, donde el atrio es más elevado por la pendiente de la colina se encuentra un

acceso enmarcado con una composición de un vano de medio punto inscrito en un cuerpo rectangular macizo con remates simples y dos elementos decorativos sencillos en medio circulo a los flancos y un elemento central cubico al centro con una pequeña cruz de fierro. De este acceso se desarrolla una escalera de concreto armado que baja con rumbo al sur hacia la calle, mediante peraltes y huellas variables en su dimensión y alturas. Del acceso o límite de la barda del atrio hasta el acceso del templo hay 15 m. formando una explanada en el atrio que permite la apreciación del inmueble que se impone por su macizo predominante.

A los lados del templo se encuentran tres calles y solo hacia el lado oriente un callejón peatonal que le separa de las instalaciones del Palacio Municipal de finales del siglo XIX y una plazoleta; cruzando la calle al poniente se encuentra la plaza principal y su kiosco; al lado norte de por medio se encuentra una escuela y algunas edificaciones ya del siglo XX.



Figura 1 - Localización de la ciudad de Sinaloa de Leyva



Figura 2 - Localización de la Iglesia de San Felipe y Santiago

El Templo se trata de un monumento histórico por determinación expresa de la Ley Federal Sobre Monumentos y Zonas Arqueológicas, Artísticas e Históricas y por el INAH, en tanto que su edificación corresponde a finales del siglo XVIII lo cual adquiere gran relevancia y es parte fundamental de la cultura material de la Arquitectura Religiosa del Noroeste de México; además debido a la carga y connotación de relación con el templo jesuita del que refiere su antecédete y del cual se ha mencionado, presenta similitudes, materiales y proporciones que lo relacionan intrínsecamente a los procesos históricos que le dieron origen.

La estructura se define con orientación con su eje central que corre de sur a norte inclinado al nororiente a 8° aproximadamente; se dispone con planta basilical de proporciones 1:4 aproximadamente entre el ancho (15.34 m) y largo (57.07 m) del cuerpo que conforman las tres naves hasta el muro testero; su longitud total desde el acceso principal al muro testero es de 57.07 m y el crucero de 34.50 m. La nave central presenta 8 tramos hasta llegar al transepto, de los cuales el primero corresponde al coro y sotocoro, exceptuando este primer tramo, los demás son

arcos de medio punto y columnas cuadradas que soportan una cubierta de 2 aguas de mayor altura que la de las naves laterales, ésta cubierta es a dos aguas con poca inclinación y es de concreto armado producto de las intervenciones en “segundas historias constructivas” del que no ha sido excepción este inmueble. Las cubiertas de las naves laterales son de bóvedas de cañón rebajado de fabricación de tabique según se aprecia en el coro del lado oriente donde el material base está expuesto. Las de las capillas que forman el transepto son de bóveda catalana con vigas metálicas en disposición norte sur, particularmente la capilla poniente presenta agrietamientos en sus muros y es donde está enfocado el presente proyecto de intervención.

El conjunto presenta dos accesos laterales ubicados en el quinto tramo de intercolumnios y estos al igual que el principal presentan arco de medio punto con enmarcamientos de talla en cantera con jambas estriadas de base y capiteles con molduramientos. Se encuentra con cuatro altares en las naves laterales (2 en cada una) y dos altares secundarios en las capillas del transepto; dos altares más rematan las naves laterales flanqueando el presbiterio que se reduce y extiende en el ancho de la nave central. Dicho presbiterio presenta un camarín que se muestra detrás del retablo principal y al que actualmente se puede acceder solamente por la sacristía debido a que se tapió un acceso directo que existía desde el presbiterio en el lado bajo al poniente. La sacristía a la cual se accede por un vano desde el presbiterio y otro desde la capilla oriente es de menor altura que las naves laterales y que las capillas del transepto.

Las fachadas del inmueble presentan diferentes materiales en sus muros como la piedra laja en la portada principal, oriente y norte y parcialmente en la del lado poniente en el cuerpo del presbiterio. En la portada principal se combina con la piedra laja los cuerpos de tabique de la torre y campanario del lado poniente al oriente solo el primer cuerpo. El lado que mira al poniente presenta en su mayoría, exceptuando la torre y el cuerpo del presbiterio, aplanados tanto en muros como contrafuertes. Dichos contrafuertes se distribuyen uno a cada lado de los accesos laterales en la fachada. En el caso de la fachada oriente se presenta la casa cural

como agregado de una segunda historia de fabricación de entre finales del siglo XIX y principios del XX por sus características formales y que dicho sea de paso es de tres niveles, elemento que en su composición rompe la fisonomía del inmueble de la iglesia.

Presentándose a los flancos de la portada principal se encuentran los primeros cuerpos de las torres con muro de tabique en forma rectangular con pilastras resaltadas en las esquinas y remates sobrios; la única torre que se construyó es la del poniente y refiere a una edificación y composición de trazo academicista presentado tres cuerpos cimborrio, cúpula y cupulín de donde el primero ya mencionamos su geometría rectangular y su altura empata a las naves laterales, el segundo cuerpo de forma rectangular con un vano de medio punto muy bien proporcionado e cada lado y con jambas molduras y remates de tabique en relieve, así con resalto de tabique se enfatiza la clave del arco mencionado; el tercer cuerpo de la torre es de forma octagonal con vanos de medio punto y con derrames en sus intradós, sobre este cuerpo se encuentra el cimborrio de ocho lados con vanos circulares con derrames al interior y se corona con un cupulín hexagonal en el cual se encuentra una pequeña cruz.

El interior del templo presenta aplanados en todos sus muros y columnas a excepción del presbiterio y los últimos 3 pares de columnas que en desafortunada intervención se les liberó el aplanado, posiblemente para dejar a manera decorativa la cantera que es su material base terminal.

Las segundas historias que han suscitado modificaciones y alteraciones al inmueble en el transcurrir del tiempo han sido muchas, de las cuales se denotan las de las modificaciones de las cubiertas y pisos que han sido agregados de concreto en el caso del piso se aprecia una placa que marca marzo de 1920. De igual manera ya se refirió la existencia del agregado que representa la casa cural al oriente del recinto y en tiempos más recientes se agregó una cochera cubierta al lado poniente del presbiterio, las escaleras de concreto y muro de arcos invertidos en atrio, pisos de concreto, rampas, puertas de herrería y algunos vanos tapiados.

Caso particular de las modificaciones de algunos vanos tapiados reflejan el desarrollo y modificaciones de acondicionamiento del inmueble en diferentes temporalidades, por ejemplo, el caso de la portada al oriente se presentan 2 grandes vanos ventanas tapiados que coinciden con los altares del interior de la nave lateral, lo cual deja evidencia que su intervención fue expreso para la incorporación de dichos elementos. Existen otros cambios y testimonios que develan el carácter de la historia constructiva del monumento histórico en cuestión. Como testimonios de molduramientos en el sotocoro, parcialidades de molduras y capiteles de pilastras en los cuerpos de las naves laterales en el sotocoro, en el presbiterio y camarín, la misma portada principal con piezas de cantera canteadas en esquina y adosamiento de los cuerpos de las torres, cambios de materiales y tipologías formales diferentes. Los sistemas constructivos denotan igualmente los procesos de fábrica y son testigos fundamentales de la historia arquitectónica y los procesos históricos a que pertenecen.

A continuación, las figuras 3-8 muestran la fachada sur, fachada oriente, casa cural, fachada norte, fachada poniente y planta arquitectónica, respectivamente.



Figura 3 - Fachada Sur

Dentro del propio levantamiento arquitectónico fue posible obtener parte de los planos del estado actual del edificio de una intervención realizada recientemente, los detalles faltantes y el plano de la sección a intervenir se desarrolló en base a levantamientos físicos del transepto poniente, mismos que se presentan anexos a continuación.



Figura 4 - Fachada Oriente



Figura 5 – Casa Cural



Figura 6 - Fachada Norte



Figura 7 - Transepto Poniente

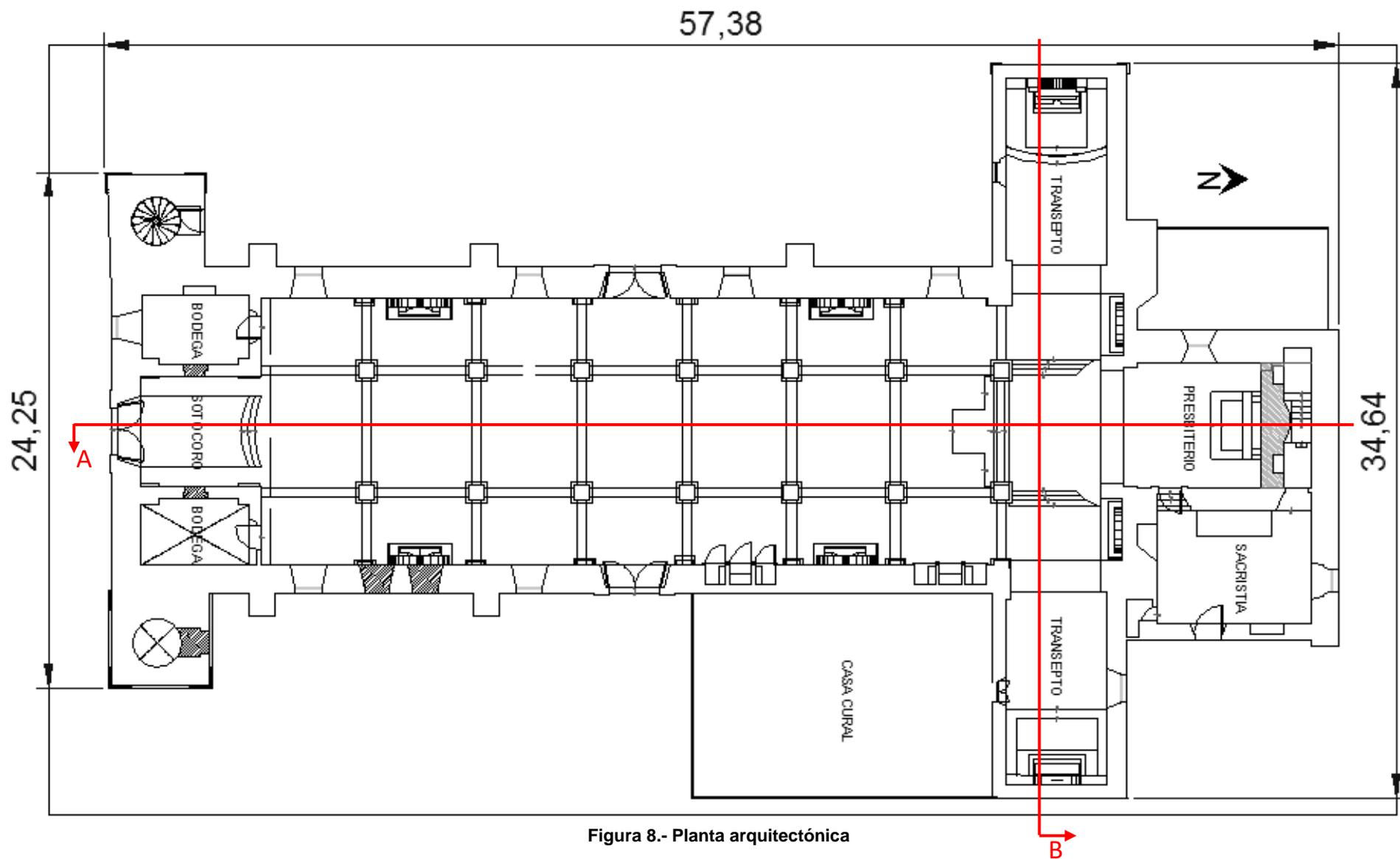


Figura 8.- Planta arquitectónica

Sondeos en estructura

Dada la importancia de conocer el sistema estructural utilizado en la sección a intervenir, fue necesaria la realización de sondeos tanto en el interior como en el exterior del recinto, el sistema en este caso se trata de muros de 0.65 m de espesor a base de tabique recocado de dimensiones 0.40x0.20 m y 6 cm de espesor colocados de forma intercalada, asentado con mortero cal-arena en juntas de aproximadamente 3.50 cm de espesor y un núcleo de arcilla. En su interior es posible identificar, en base a los sondeos, la presencia de pintura mural existente en los muros del transepto, lo que limita la aplicación del refuerzo al exterior del recinto.

La cimentación de la sección está resuelta por mampostería de piedra desplantada a una profundidad promedio de 1.00 m desde el nivel de terreno natural. El firme existente no es el original del templo, puesto que en un sondeo se constató que bajo el mismo se encuentra un piso a base de tabique a una profundidad de 0.20m por debajo del nivel de piso existente.



Figura 9.- Cala en unión de muro y columna

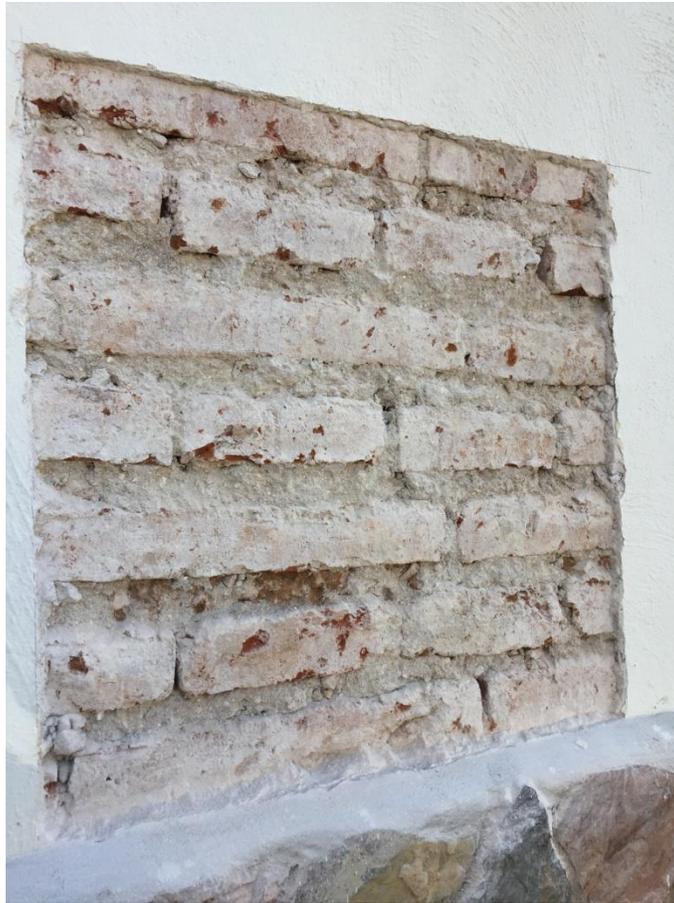


Figura 10.- Cala en muro

Reporte fotográfico

Como actividad complementaria al levantamiento arquitectónico, se llevó a cabo un levantamiento fotográfico, a fin de evidenciar el estado actual de la sección a intervenir y documentar toda actividad realizada para que la información generada en el presente documento sirva a futuras intervenciones de este u otros edificios similares al proyecto de intervención desarrollado.



Figura 11.- Vista poniente de transepto



Figura 12.- Vista norte (izquierda) y sur (derecha) del transepto



Figura 13.- Vista interior (izquierda) y cubierta (derecha)



Figura 14.- Vista de altar (izquierda) y unión de transepto al cuerpo principal (derecha)

3.5.3 Levantamiento topográfico

En el tramo a intervenir se realizó el levantamiento topográfico correspondiente obteniendo primeramente como resultado los niveles de terreno natural y banquetas adyacentes al transepto, por otra parte, se revisó la verticalidad de los elementos principales, muros y columnas. De igual forma, con la información obtenida en campo es posible realizar la triangulación y trazo de las curvas de nivel respectivas.



Figura 15.- Levantamiento topográfico

Tomando como punto de referencia el extremo sureste del transepto, es posible identificar un desnivel en el terreno natural hacia el punto opuesto de la sección de 31.6 cm.

En lo referente a la verticalidad de los elementos, se determinó que el desplome máximo se encuentra en el muro sur, con un desfase de 1.08 cm con respecto a su vertical, en el caso del muro norte el valor obtenido fue de 0.49 cm.

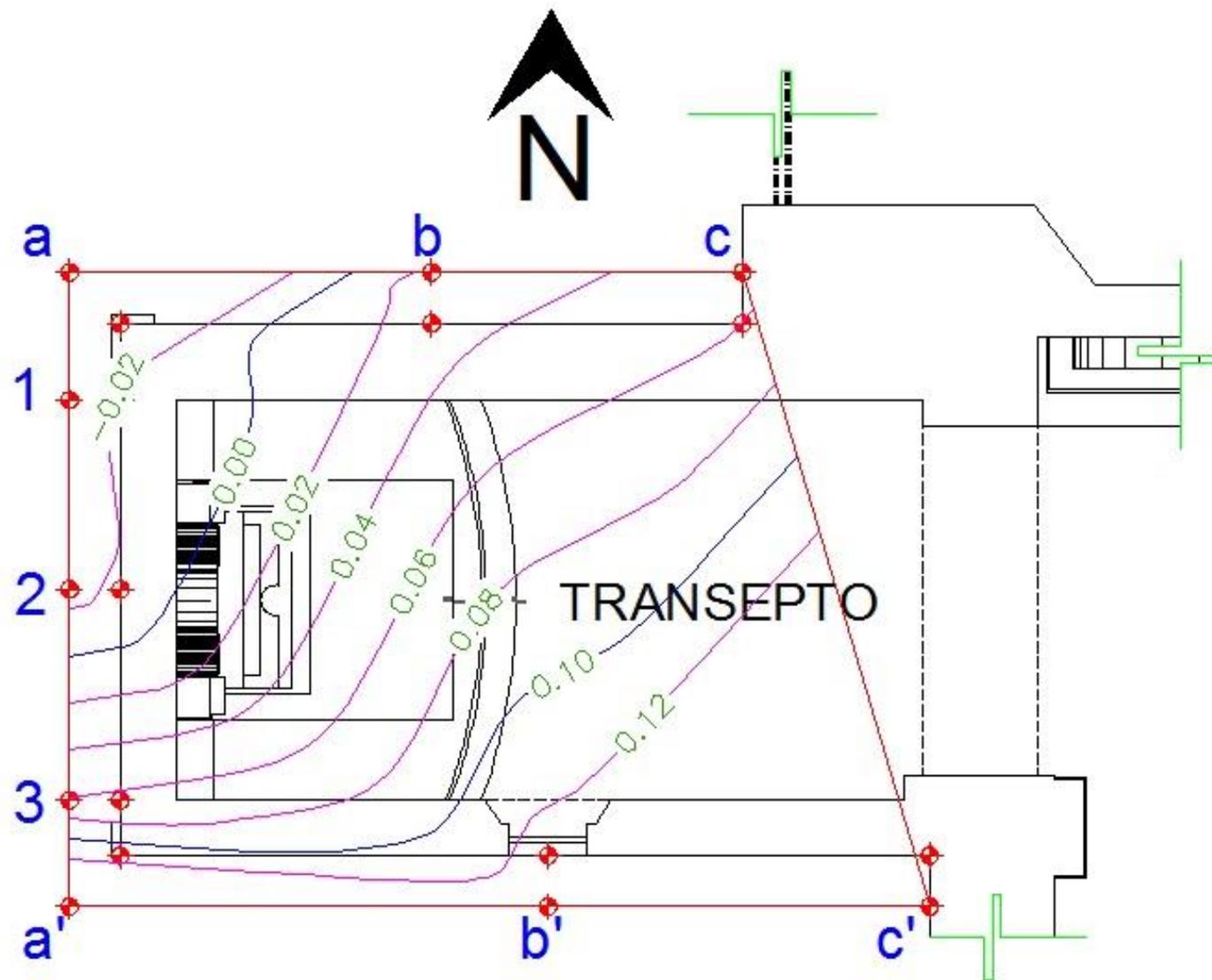


Figura 16.- Curvas de nivel de transepto

3.5.4 Caracterización de fallas

Según lo establecen las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería en su capítulo 11, Se deberá evaluar la seguridad estructural de una edificación cuando se tenga indicios de que ha sufrido algún daño, presente problemas de servicio o de durabilidad, vaya a sufrir alguna modificación, cambie su uso, o bien, cuando se requiera verificar el cumplimiento del nivel de seguridad establecido en el Título Sexto del Reglamento.

El proceso de evaluación, acorde a las propias normas, incluye la investigación y documentación de la estructura, la clasificación del daño según su severidad y modo de comportamiento y la determinación de la necesidad de rehabilitación.

Para la caracterización de fallas, iniciando por el levantamiento de grietas existentes, fue necesario primeramente trazar un sistema coordinado sobre cada uno de los elementos que componen el tramo a intervenir, en función a ello se realizó el levantamiento del patrón de agrietamiento mostrado en las figuras 19, 20 y 21.

Por otra parte, también llevó a cabo el monitoreo de las grietas más significativas mediante la colocación de testigos de yeso donde se puede apreciar que durante el monitoreo las grietas no presentaron movimiento alguno por lo que es posible deducir que se encuentran inactivas. El ancho máximo de grieta medido fue de 5 mm en el muro sur.



Figura 17.- Testigos de yeso en grietas



Figura 18.- Espesor de grieta máximo (5mm)



AGRIETAMIENTO - MURO NORTE

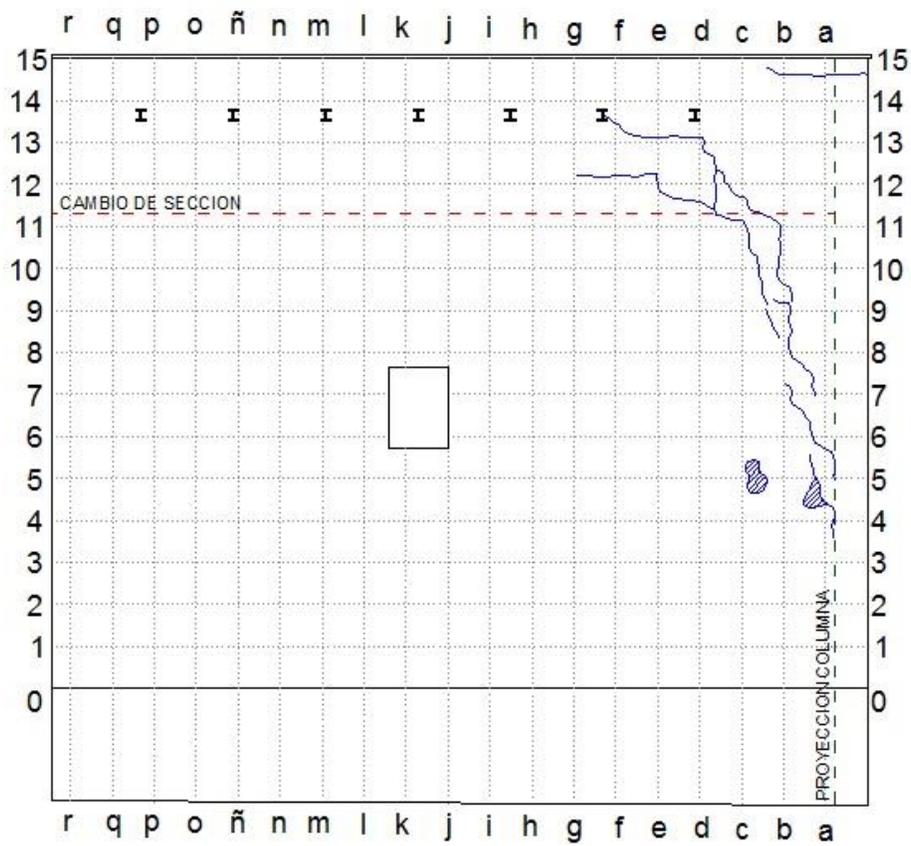


Figura 19.- Patrón de agrietamiento (Muro Norte)



AGRIETAMIENTO - MURO SUR

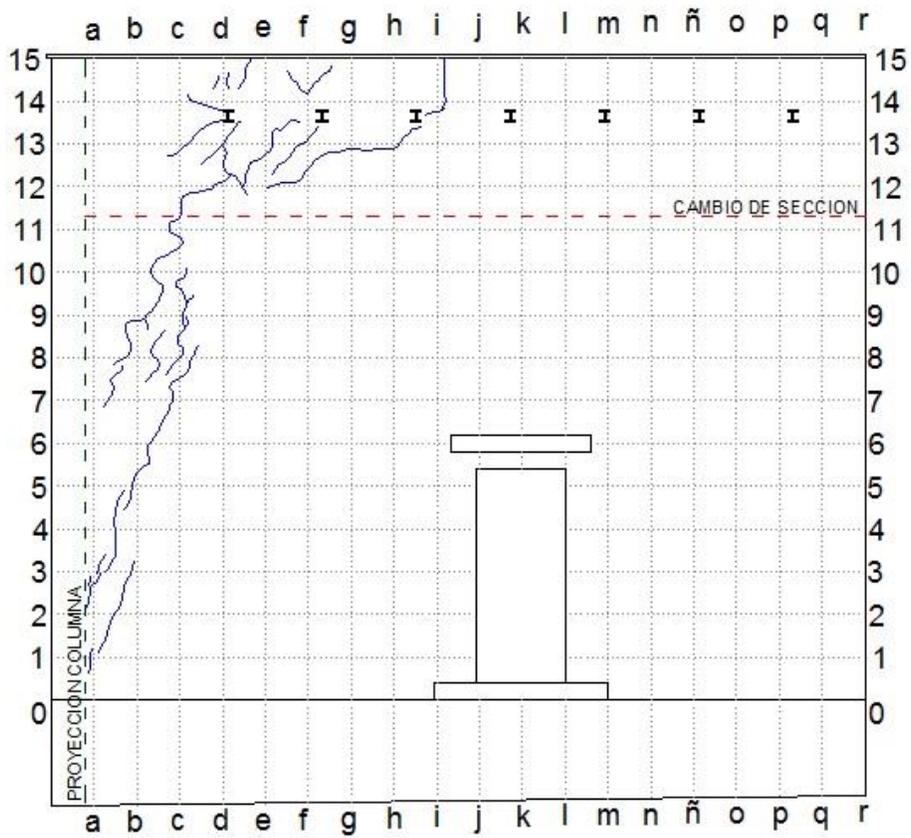


Figura 20.- Patrón de agrietamiento (Muro Sur)

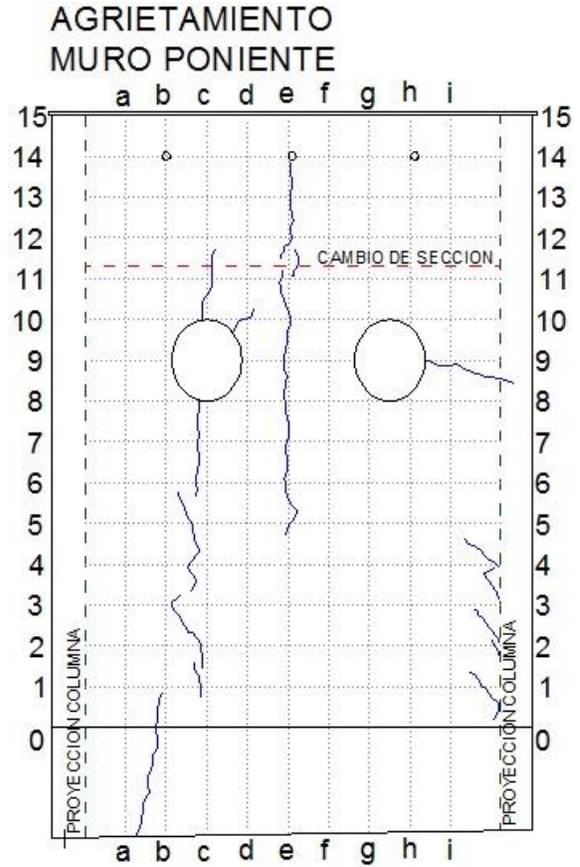


Figura 21.- Patrón de agrietamiento (Muro Poniente)

Como parte adicional a la caracterización de fallas y por tratarse de un edificio con valor histórico, se realizó un levantamiento de patologías presentes en la estructura con la finalidad de atender daños presentes a la misma buscando una correcta restauración de todos los elementos desde una perspectiva no solo estructural sino también estética y artística. El resultado de dicho levantamiento se muestra en la figura 22.

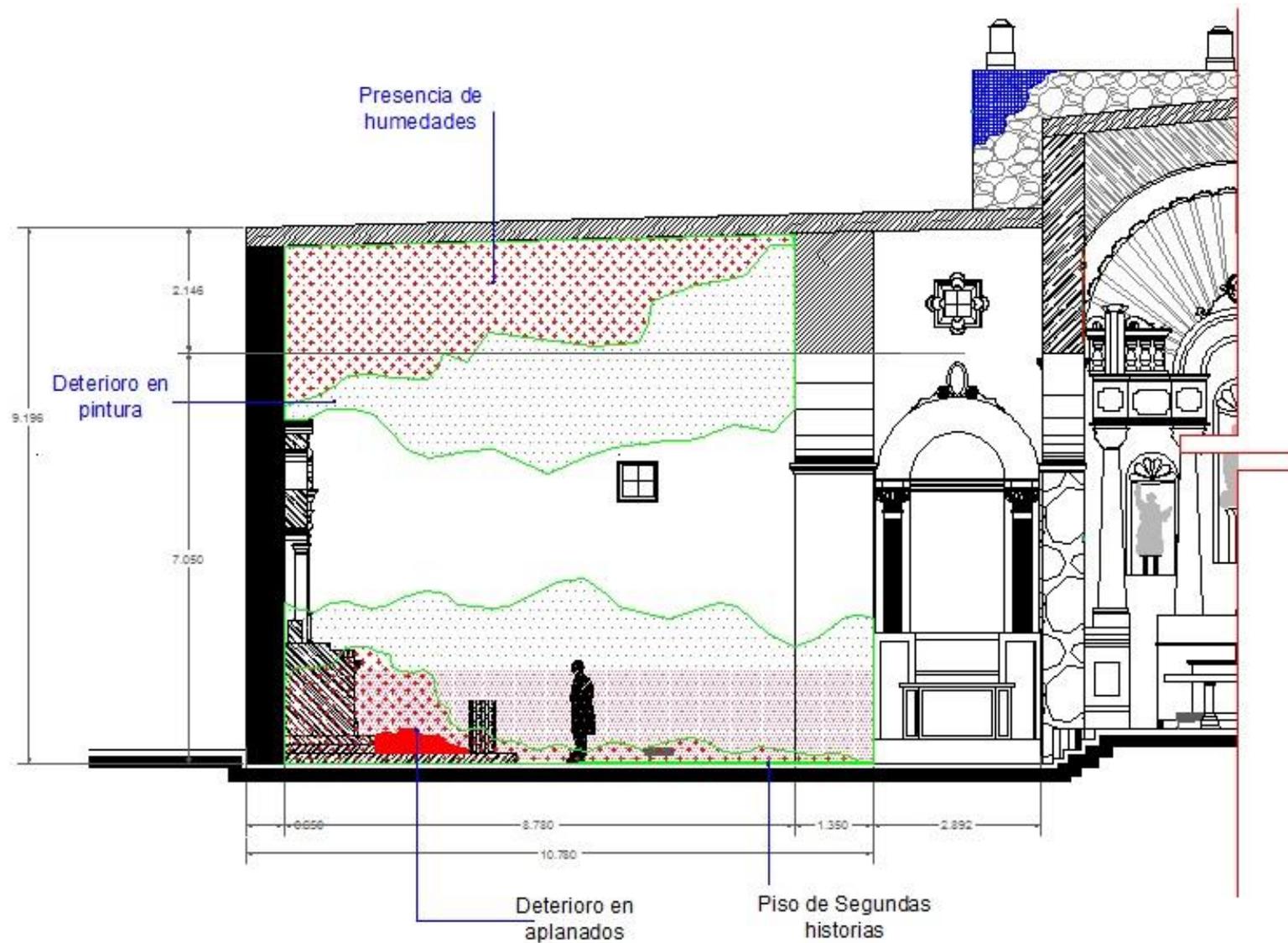


Figura 22.- Patologías al interior del transepto

3.5.5 Evaluación de la Mecánica de la Estructura

Descripción del edificio

Ubicación

La iglesia de San Felipe y Santiago está ubicada en el centro de la ciudad de Sinaloa de Leyva, con su fachada principal hacia la calle Miguel Hidalgo, esquina con Daniel Gámez.

El terreno donde se encuentra desplantado el inmueble corresponde a la zona I de lomas, según la carta de sub-zonificación geotécnica de la Ciudad de México.

El inmueble colinda hacia el oriente con el edificio del H. Ayuntamiento de Sinaloa de Leyva y en los demás frentes con las calles mencionadas anteriormente. El transepto por evaluar se ubica en el lado oriente del conjunto, sobre la calle Daniel Gámez, casi esquina con Francisco I. Madero.

Funcionalidad

Se trata de un edificio religioso de finales del siglo XVI que a la fecha sigue cumpliendo como escenario de procesiones y demás eventos religiosos, acorde con su objetivo inicial.

Cuenta con una orientación norte-sur con su acceso principal, torre campanario y sotocoro en su extremo sur y en el extremo norte de su nave principal se encuentran dos transeptos, uno a cada lado, el presbiterio y la sacristía.

Estructuración

El edificio, en la sección del transepto poniente, presenta daños en sus muros propios de un asentamiento diferencial del suelo. Se encuentra estructurado a base de muros de tabique asentado con mezcla cal-arena de 0.65 m de espesor y altura media de 8.80 m desde el nivel de piso interior hasta la losa de bóveda catalana con vigas de acero que sustituye a la original, así mismo se presenta una

reducción en la sección del muro a partir de una altura de 7.00 m. También derivada de una anterior intervención.

La cimentación es a base de zapatas corridas de mampostería de piedra desplantadas a una profundidad aproximada de 1.00 m de profundidad, que es donde se encuentra el estrato de roca sobre la ladera. La superestructura en el transepto consta de muros de carga con dos columnas de concreto armado de 0.40 x 0.40 m de sección aparentemente también colocados en una intervención posterior.

Revisión de la verticalidad

De acuerdo con lo dispuesto en la Norma Técnica Complementaria para Diseño por Sismo, debe considerarse, en el análisis de estructuras existentes, el desplome que puede tener. Si este es considerable, las fuerzas sísmicas deberán incrementarse. Por ello fue necesario obtener los desplomes reales de la estructura, los cuales resultaron menores que el máximo permisible indicado en el Reglamento. ($D/H = 10.80/8790 = 0.00123 < 0.0015$). (Según levantamiento topográfico en mayo 2018)

Condición actual del edificio

Durante los recorridos e inspecciones al inmueble, y en particular a la sección a intervenir, no se detectaron daños que pueden poner en peligro la estabilidad del inmueble ante cargas estáticas. La estructura en general se encuentra estable y libre de deformaciones excesivas. No obstante, es posible observar agrietamiento en sus muros de carga propios de un asentamiento diferencial.

De forma general es posible decir que el comportamiento de la estructura es aceptable.

Clasificación de la estructura

De conformidad con el artículo 139 fracción II del reglamento y atendiendo a las características que presenta el edificio, se clasificó a este como una estructura del Grupo A, que al tratarse de un edificio catalogado como histórico según criterio adquiere la importancia de un museo.

Ubicación geotécnica y sísmica

De conformidad con lo dispuesto en el artículo 170 del capítulo VIII del reglamento y con las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones y Diseño por Sismos, respectivamente, la estructura se puede catalogar como ubicada en la zona I de lomas.

Factor de comportamiento sísmico Q

Este factor se encuentra íntimamente ligado a la ductilidad que presenta la estructura en su conjunto. En el apartado 5 de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, se recomienda la adopción de un factor, el cual es función directa de la estructuración del edificio, la resistencia y rigidez de entrepiso y de la ductilidad de los miembros estructurales que conforman el inmueble.

Para el caso particular de este edificio, de acuerdo con su estructuración y lineamientos marcados por las correspondientes normas, se utilizó un factor de comportamiento sísmico en ambas direcciones ortogonales $Q_x = Q_y = 1.0$.

Evaluación de cargas

Conforme a lo dispuesto por el reglamento en el artículo 150 del capítulo III, correspondiente a las categorías de acciones, de acuerdo con la duración con que obran sobre las estructuras, se consideraron tres tipos de acciones:

Cargas muertas

La evaluación de las cargas muertas que gravitan en la estructura se realizó considerando los pesos de los elementos estructurales, de los materiales que constituyen los acabados de los pisos, del material para relleno en azotea, los muros de mampostería y todo aquel elemento y material que ocupa un lugar permanente dentro del edificio. Para cada caso en particular se tomaron los valores máximos probables de los pesos volumétricos de cada material utilizado en la construcción del edificio.

Cargas vivas

Para la evaluación de las cargas vivas nominales unitarias se siguieron las recomendaciones marcadas en el capítulo V, artículo 161 y 162 del reglamento de construcción y la tabla 6.1 (Tabla 2) de las Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones, el cual indica los siguientes valores tabulados:

Tabla 2 – Cargas vivas recomendadas por las Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones.

Destino de piso o cubierta	W_m (Kg/m²)	W_a (Kg/m²)	W (Kg/m²)
f) Otros lugares de reunión (bibliotecas, templos , cines, teatros, gimnasios, salones de baile, restaurantes, sala de juego y similares).	350	250	40

Donde:

W = Carga viva media

W_a = Carga viva instantánea

W_m = Carga viva máxima

Cargas accidentales

Las acciones accidentales se calcularon de acuerdo con los parámetros que presenta el reglamento y sus normas para diseño por sismo.

Para la determinación de las fuerzas accidentales producidas por efectos sísmicos, se estableció el coeficiente respectivo conforme al lugar y como lo especifica el reglamento vigente en su capítulo VI, artículos 164 al 167 y a la figura 1.1 de las Normas por Sismo.

Parámetros del análisis sísmico reglamentario

De acuerdo con los parámetros indicados en las normas para diseño por sismo, y por consiguiente a las características e importancia del edificio, su ubicación dentro de la zonificación sísmica y al tipo de suelo se tiene:

Método de análisis simplificado

El coeficiente sísmico reducido a utilizar por el método de análisis simplificado se obtuvo de la tabla 7.1 (Tabla 3) de las Normas de Diseño por Sismo que otorga dichos valores para estructuras del grupo B y que de igual forma especifica que en caso de tratarse de una estructura del grupo A, como es este caso, los coeficientes deberán multiplicarse por 1.5.

Tabla 3 – Coeficiente Sísmico Reducido recomendado por las Normas de Diseño por Sismo.

Zona	Muros de concreto o de mampostería de piezas macizas			Muros de mampostería de piezas huecas		
	Altura de construcción, m			Altura de construcción, m		
	Menor de 4	Entre 4 y 7	Entre 7 y 13	Menor de 4	Entre 4 y 7	Entre 7 y 13
I	0.07	0.08	0.08	0.10	0.11	0.11
II y III	0.13	0.16	0.19	0.15	0.19	0.23

Tipo de Suelo: I (Lomas)

Tipo de estructura: A

Factor de comportamiento sísmico ($Q_x=Q_y$): 1.0

Factor de irregularidad estructural = 1.0

Coeficiente Sísmico Reducido (C.S.R.) = $0.08 \times 1.5 = 0.12$

Evaluación de la seguridad estructural

Elementos de Soporte

Capacidad de carga vertical:

$$F_a = 0.20 * 100 \text{ ton/m}^2 \left[1 - \frac{(8.94\text{m})^3}{42 * 0.65\text{m}} \right]$$

$$F_a = 503.46 \text{ ton}$$

Capacidad de carga lateral:

$$F_v = 0.3 \left(100 \text{ ton/m}^2 \right)^{1/2}$$

$$F_v = 3 \text{ ton/m}^2$$

Evaluación sísmica

Fuerza sísmica total:

$$V_a = (0.12)(234.67 \text{ ton})$$

$$V_a = 28.16 \text{ ton}$$

Fuerza sísmica resistente:

$$V_{Rx} = (7.97 \text{ m} * 0.65 \text{ m} * 10 \text{ ton/m}^2) + (6.92 \text{ m} * 0.65 \text{ m} * 10 \text{ ton/m}^2)$$

$$V_{Rx} = 51.81 \text{ ton} + 40.81 \text{ ton} = 92.62 \text{ ton}$$

$$V_{Ry} = (7.87 \text{ m} * 0.65 \text{ m} * 10 \text{ ton/m}^2) + (8.71 \text{ m} * 0.65 \text{ m} * 10 \text{ ton/m}^2)$$

$$V_{Ry} = 51.16 \text{ ton} + 56.62 \text{ ton} = 107.78 \text{ ton}$$

Comparación fuerza sísmica total vs fuerza sísmica resistente:

$$F_{sx} = \frac{V_{Rx}}{V_a} = \frac{92.62 \text{ ton}}{28.16 \text{ ton}} = 3.29$$

$$F_{sy} = \frac{V_{Ry}}{V_a} = \frac{107.78 \text{ ton}}{28.16 \text{ ton}} = 3.83$$

Para cada sentido de análisis.

Desplomo permisible de muros por hundimientos del terreno

$$\alpha = \text{Tan}^{-1} \left(\frac{1.065 \text{ m}}{3.894 \text{ m}} \right) = 1.39^\circ$$

$$\Delta_{PERM} = 8.94 \text{ Sen}(1.39^\circ) = 0.22 \text{ m}$$

Distorsión angular de muros

Asentamiento permisible:

$$\Delta = \frac{1}{2000} (975 \text{ cm}) = 0.49 \text{ cm} = 4.90 \text{ mm}$$

Inicio de daño:

$$\Delta = \frac{1}{1000} (975 \text{ cm}) = 0.98 \text{ cm} = 9.80 \text{ mm}$$

A continuación, se presenta el resumen de resultados obtenidos con sus respectivas observaciones (Tabla 4).

Tabla 4 - Resumen de evaluación estructural simplificada

Resumen de la evaluación estructural simplificada		
Evaluación	Resultado	Observaciones
Evaluación sísmica	$F_{sx} = 3.29$ $F_{sy} = 3.83$	En ambas direcciones el inmueble ofrece un factor de seguridad por sismo mayor a 3.
Desplomo permisible de muros por hundimiento del terreno.	$\alpha = 1.39^\circ$ $\Delta_{PERM} = 0.22 \text{ m}$	Los muros ante un eventual hundimiento de terreno pueden experimentar una pérdida de verticalidad menor a 22 cm para que se mantengan estables. Actualmente los muros presentan desplomos inferiores a 1° .
Distorsión angular de muros	Asentamiento permisible: $\Delta = 4.90 \text{ mm}$ Inicio de daño: $\Delta = 9.80 \text{ mm}$	Tomando como referencia el muro más largo (975 cm), se estima que si este experimenta asentamientos superiores a 4.90 mm empezará a sufrir daños. Se estima que esta es la causa de los daños existentes.

3.5.6 Propuesta de rehabilitación

Tomando como referencia la ecuación 5.1.1 del reglamento de construcción de la Ciudad de México para el cálculo del área de acero en los elementos de refuerzo, misma que sirvió como punto de partida para el cálculo de las dimensiones del refuerzo externo.

$$A_s = 0.2 \left[\frac{75 \text{ kg/cm}^2}{4,200 \text{ kg/cm}^2} \right] (65 \text{ cm})(65 \text{ cm}) = 15.09 \text{ cm}^2$$

Resistencia de acero

$$R_s = A_s * f_y \dots\dots\dots 11$$

$$R_s = 15.09 \text{ cm}^2 * 4,200 \text{ kg/cm}^2 = 63,378 \text{ kg}$$

Área de sección transversal de fibra

$$A_F = \frac{R_s}{f_{GFRP}} \dots\dots\dots 12$$

$$A_{F1} = \frac{63,378 \text{ kg}}{2,750 \text{ kg/cm}^2} = 23.05 \text{ cm}^2$$

Partiendo de la siguiente ecuación:

$$A_{F1} = ST_F * ES_F \dots\dots\dots 13$$

Dónde: A_{F1} = Área de fibra

ST_F = Sección transversal de fibra

ES_F = Espesor de fibra

Despejando ST_F :

$$ST_F = \frac{A_{F1}}{ES_F} \dots\dots\dots 14$$

$$ST_F = \frac{23.05 \text{ cm}^2}{0.30 \text{ cm}} = 76.83 \text{ cm}$$

Considerando la colocación en dos capas sobrepuestas:

$$ST_F = \frac{76.83 \text{ cm}}{2} = 38.42 \text{ cm} \approx 40 \text{ cm}$$

Por cuestiones técnicas, ya que el ancho comercial de la fibra existente en la zona es de 1.30 m, se considera un ancho de fibra de 40 cm.

Desarrollo de fibra

$$F_{ad} = A_{F2} * f_{ad} \dots\dots\dots 15$$

Dónde: F_{ad} = Fuerza de adherencia por fibra.

A_{F2} = Área de adherencia de la fibra.

f_{ad} = Resistencia de adherencia de la fibra (Quiñonez, 2006).

Despejando A_{F2} :

$$A_{F2} = \frac{F_{ad}}{f_{ad}} \dots\dots\dots 16$$

$$A_{F2} = \frac{63,378 \text{ kg}}{4.7 \text{ kg/cm}^2} = 13,484.68 \text{ cm}^2$$

Considerando:

$$A_{F2} = SL_F * ST_F \dots\dots\dots 17$$

Dónde: SL_F = Sección longitudinal de fibras

ST_F = Sección transversal de fibras

Despejando SL_F :

$$SL_F = \frac{A_{F2}}{ST_F} \dots\dots\dots 18$$

$$SL_F = \frac{13,484.68 \text{ cm}^2}{76.83 \text{ cm}} = 175.51 \text{ cm} \approx 2.00 \text{ m}$$

Se consideró un desarrollo de dos metros de longitud del refuerzo, a partir del punto de agrietamiento.

El sentido de la colocación del refuerzo se hizo perpendicular a la dirección del agrietamiento. Adicional a esto, se hizo el reemplazo de las piezas que sufrieron

mayor daño, así como el relleno de las grietas con una mezcla fluida de arena y cal.



Figura 23.- Propuesta de refuerzo (Muro Norte)

REFUERZO - MURO SUR

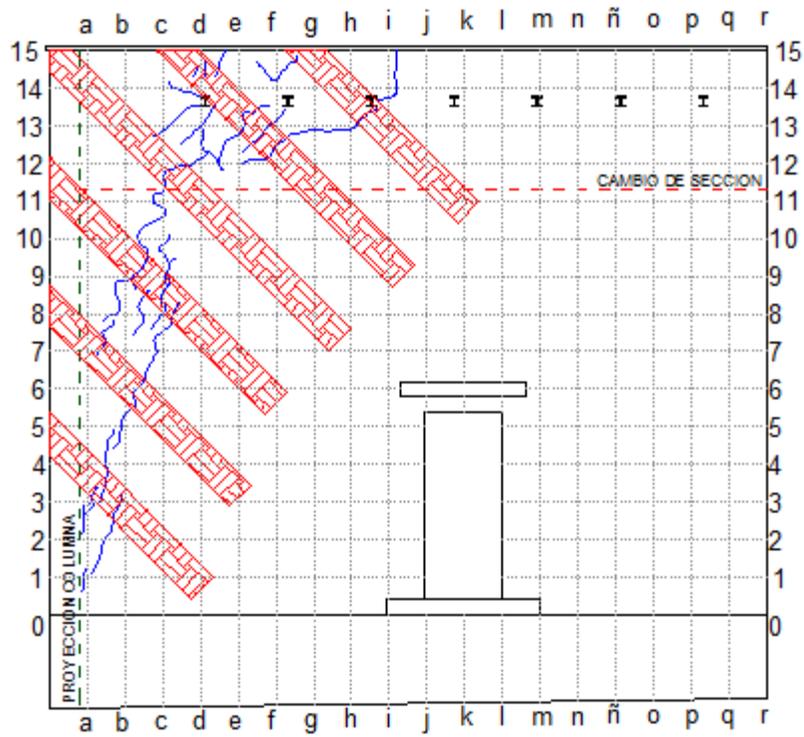


Figura 24.- Propuesta de refuerzo (Muro Sur)

REFUERZO - MURO PONIENTE

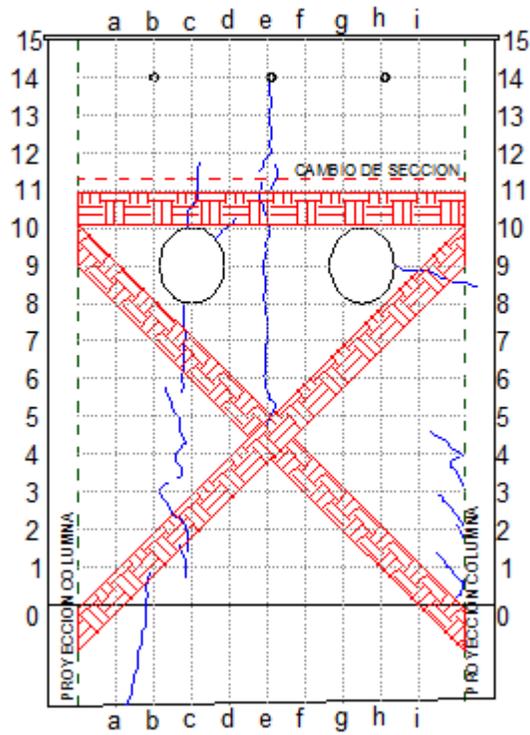


Figura 25.- Propuesta de refuerzo (Muro Poniente)

Previo a la aplicación del sistema de refuerzo, fue de utilidad para evaluar la compatibilidad de los materiales y cualquier reacción o comportamiento que el material pudiese presentar ya en campo, dando resultados positivos durante el periodo de prueba que fue de 10 meses, entre la realización de la prueba en campo hasta la implementación del sistema de refuerzo completo.

También fue de utilidad esta prueba para poder obtener un estimado de los rendimientos de los materiales, estimados de tiempos de aplicación y costos del sistema de refuerzo.



Figura 26.- Limpieza de superficie (izquierda) e impregnación de resina (derecha).



Figura 27.- Colocación de fibra de vidrio (izquierda) e impregnación de fibra (derecha).



Figura 28.- Impregnación de fibra (izquierda) y areneo (derecha).



Figura 29.- Acabado final en muro con aplanado cal-arena.

3.5.7 Implementación del refuerzo

El proceso de aplicación de refuerzo inició con el retiro del aplanado en las zonas afectadas, para proceder al relleno de grietas con una mezcla fluida de arena y cal. De igual forma, se hizo la sustitución de piezas de tabique que presentaban daño considerable por piezas nuevas fabricadas en la región.

Una vez concluido el relleno de las grietas, se llevó a cabo el trazo de según el diseño en cada uno de los muros a intervenir, liberando posteriormente el aplanado cuidando solo retirar el material necesario para la correcta colocación del refuerzo.



Figura 30.- Relleno de grietas y sustitución de piezas de tabique dañadas (Muro sur).



Figura 31.- Relleno de grietas y sustitución de piezas de tabique (Muro poniente).



Figura 32.- Relleno de grietas y sustitución de piezas de tabique dañadas (Muro norte).

Para la colocación de refuerzo con material compuesto fue necesario primeramente llevar a cabo una correcta limpieza de la superficie, realizada manualmente con una brocha cerca únicamente retirando el polvo producto de los trabajos, acto seguido se llevó a cabo la colocación de una primer impregnación de resina reposando ésta por 24 horas para aplicar una segunda mano sobre la cual se procedió a implementar la primer capa de malla de fibra con su respectiva capa de resina para impregnación y de nuevo un periodo de fraguado de 24 horas. Posteriormente a ese periodo, se repitió la impregnación para la colocación de la segunda capa de fibra y una impregnación final con resina, finalmente se procedió a colocar un areneo sobre la última capa de impregnación, esto último con la intención de formar una superficie con la suficiente adherencia en la cual se pueda colocar el aplanado de cal en los muros.

Por último, se aplicó el aplanado en muros a base de mortero cal-arena y la pintura sobre las áreas intervenidas.



Figura 33.- Aplicación de capa de impregnación muro norte (izquierda) y muro sur (derecha).



Figura 34.- Aplicación de capa de impregnación en muro poniente.



Figura 35.- Aplicación de fibra de vidrio (petatillo) e impregnación con resina poliéster (muro sur).



Figura 36.- Aplicación de fibra de vidrio (petatillo) e impregnación con resina poliéster (muro sur).



Figura 37.- Aplicación de fibra de vidrio, muro norte (izquierda) y muro sur (derecha).



Figura 38.- Aplicación de areneo sobre refuerzo de fibra de vidrio (muro sur).



Figura 39.- Areneo en muro poniente (izquierda) y aplanado cal-arena en muro norte (derecha).



Figura 40.- Aplanado con mortero cal-arena en muro poniente.

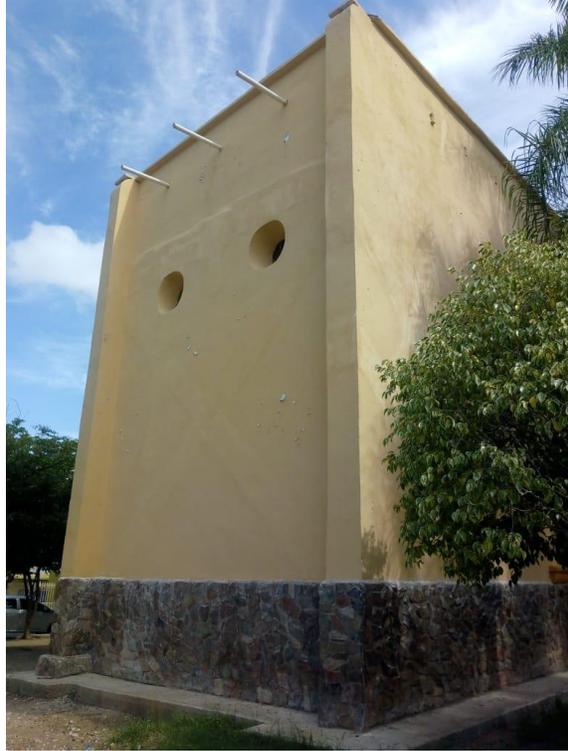


Figura 41.- Acabado en muro poniente.



Figura 42.- Acabado en muro sur (izquierda) y muro norte (derecha).

4. Estrategias de implementación

4.1 Plan de acción

El plan de acción adoptado para la implementación del proyecto de intervención consistió primeramente en la etapa de recopilación de información donde un actor clave fue el acercamiento, tanto con el Instituto Nacional de Antropología e Historia como con la empresa Umbral Arquitectos, S.A. de C.V., donde se obtuvieron los antecedentes históricos del edificio, parte de los levantamientos arquitectónicos y del estado actual de la estructura. En este punto, se dieron a conocer los objetivos y la metodología planteada para el desarrollo del proyecto de intervención, despertando el interés de las partes involucradas, logrando la aplicación del sistema de refuerzo.

Así mismo, el análisis minucioso y monitoreo de la estructura fue fundamental para el entendimiento de los elementos involucrados y el diseño del sistema de refuerzo que cumpliera con las solicitudes presentes en la estructura.

Durante la etapa de implementación fue necesario un seguimiento minucioso de las actividades desarrolladas a fin de que se lograsen los resultados deseados del proyecto, así como poder documentar todo acontecimiento relevante y mejoras que pudieron adaptarse al proceso constructivo durante su ejecución.

4.2 Estrategias usadas para presentar y persuadir a los involucrados en el proyecto

Previo a la implementación del proyecto de intervención, se diseñó una metodología en la cual se identificaron los principales puntos de resistencia que se tendrían para la aceptación del proyecto. Los puntos identificados fueron el desconocimiento de sistemas de refuerzo similares a los propuestos en la región, las ventajas de su implementación, los antecedentes del estudio desarrollado y la factibilidad en términos económicos del proyecto planteado.

Las estrategias de persuasión consistieron principalmente en dar difusión al proyecto, sus alcances y objetivos entre las partes involucradas. En este punto, fue sumamente importante hacer énfasis en las ventajas que ofrece el sistema propuesto respecto a los sistemas comúnmente utilizados en materia de refuerzo estructural de edificios históricos ya que, particularmente, en el estado de Sinaloa hay un gran número de edificaciones históricas que presentan este tipo de problemática y por cuestiones diversas, económicas y falta de empresas especializadas en el tema; no ha sido posible que se atiendan.

Se hicieron ver, en base a fundamentos y con estudios previos, la factibilidad del desarrollo del proyecto, los casos de éxito que se tienen alrededor del mundo en proyectos similares y la necesidad de innovar con la aplicación de materiales compuestos.

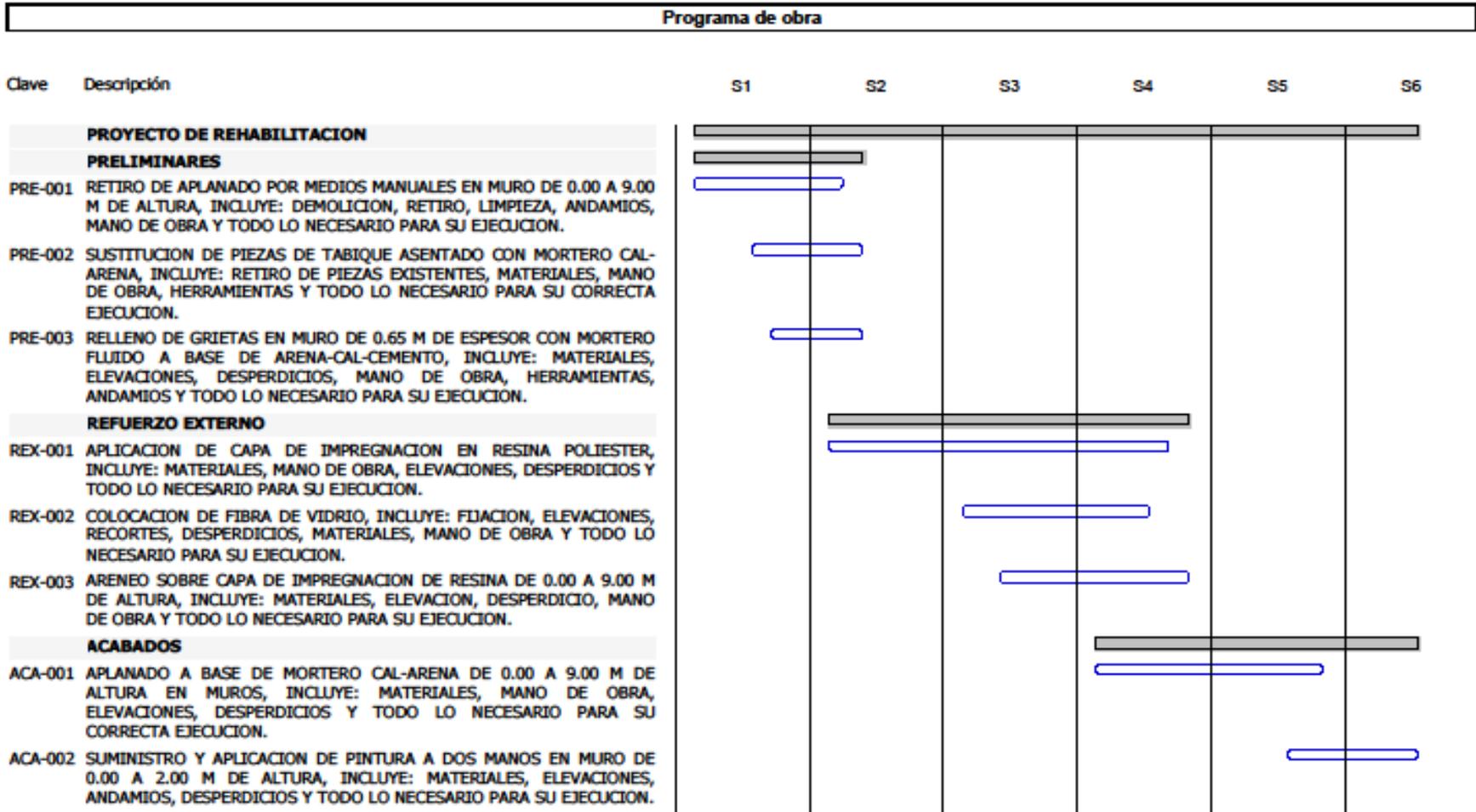
Como un doble propósito, se realizó una prueba en campo de aplicación del sistema de refuerzo que por una parte sirvió para medir el comportamiento y rendimiento de los materiales utilizados y, por otra parte, fue de utilidad para demostrar la simplicidad del método propuesto en el proyecto de intervención.

Otro de los puntos de resistencia identificados durante la presentación fue el tema económico, por ello, previo al desarrollo del sistema de refuerzo se elaboraron estimados de costos simples del proyecto, así como la posibilidad de un financiamiento por parte del maestrante y el apoyo puntual durante toda la ejecución del proyecto de intervención.

Adicionalmente, y con la intención de dar mayor difusión al proyecto de intervención, se busca la publicación de artículos tanto a nivel local como nacional e internacional, buscando servir como antecedente para futuros proyectos de igual naturaleza. También se visualiza la ponencia del proyecto en foros y congresos de gremios afines.

5. Administración del proyecto

5.1 Cronograma de actividades



5.2 Recursos

Presupuesto					
Clave	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Total
PROYECTO DE REHABILITACION					\$52,026.91
PRELIMINARES					\$14,647.50
PRE-001	RETIRO DE APLANADO POR MEDIOS MANUALES EN MURO DE 0.00 A 9.00 M DE ALTURA, INCLUYE: DEMOLICION, RETIRO, LIMPIEZA, ANDAMIOS, MANO DE OBRA Y TODO LO NECESARIO PARA SU EJECUCION.	m2	19.0800	\$130.46	\$2,489.18
PRE-002	SUSTITUCION DE PIEZAS DE TABIQUE ASENTADO CON MORTERO CAL-ARENA, INCLUYE: RETIRO DE PIEZAS EXISTENTES, MATERIALES, MANO DE OBRA, HERRAMIENTAS Y TODO LO NECESARIO PARA SU CORRECTA EJECUCION.	pza	32.0000	\$197.14	\$6,308.48
PRE-003	RELLENO DE GRIETAS EN MURO DE 0.65 M DE ESPESOR CON MORTERO FLUIDO A BASE DE ARENA-CAL-CEMENTO, INCLUYE: MATERIALES, ELEVACIONES, DESPERDICIOS, MANO DE OBRA, HERRAMIENTAS, ANDAMIOS Y TODO LO NECESARIO PARA SU EJECUCION.	mL	50.0500	\$116.88	\$5,849.84
** CATORCE MIL SEISCIENTOS CUARENTA Y SIETE PESOS 50/100 MXN **					
REFUERZO EXTERNO					\$25,597.51
REX-001	APLICACION DE CAPA DE IMPREGNACION EN RESINA POLIESTER, INCLUYE: MATERIALES, MANO DE OBRA, ELEVACIONES, DESPERDICIOS Y TODO LO NECESARIO PARA SU EJECUCION.	m2	306.0000	\$59.89	\$18,326.34
REX-002	COLOCACION DE FIBRA DE VIDRIO, INCLUYE: FIJACION, ELEVACIONES, RECORTES, DESPERDICIOS, MATERIALES, MANO DE OBRA Y TODO LO NECESARIO PARA SU EJECUCION.	m2	61.2000	\$95.20	\$5,826.24
REX-003	ARENEO SOBRE CAPA DE IMPREGNACION DE RESINA DE 0.00 A 9.00 M DE ALTURA, INCLUYE: MATERIALES, ELEVACION, DESPERDICIO, MANO DE OBRA Y TODO LO NECESARIO PARA SU EJECUCION.	m2	61.2000	\$23.61	\$1,444.93
** VEINTICINCO MIL QUINIENTOS NOVENTA Y SIETE PESOS 51/100 MXN **					
ACABADOS					\$11,781.90
ACA-001	APLANADO A BASE DE MORTERO CAL-ARENA DE 0.00 A 9.00 M DE ALTURA EN MUROS, INCLUYE: MATERIALES, MANO DE OBRA, ELEVACIONES, DESPERDICIOS Y TODO LO NECESARIO PARA SU CORRECTA EJECUCION.	m2	61.2000	\$102.07	\$6,246.68
ACA-002	SUMINISTRO Y APLICACION DE PINTURA A DOS MANOS EN MURO DE 0.00 A 2.00 M DE ALTURA, INCLUYE: MATERIALES, ELEVACIONES, ANDAMIOS, DESPERDICIOS Y TODO LO NECESARIO PARA SU EJECUCION.	m2	191.5300	\$28.90	\$5,535.22
** ONCE MIL SETECIENTOS OCHENTA Y UN PESOS 90/100 MXN **					
** CINCUENTA Y DOS MIL VEINTISEIS PESOS 91/100 MXN **					
Subtotal de Presupuesto					\$52,026.91
** CINCUENTA Y DOS MIL VEINTISEIS PESOS 91/100 MXN **					
				IVA 16.00 %	\$8,324.31
				Total	\$60,351.22
** SESENTA MIL TRESCIENTOS CINCUENTA Y UN PESOS 22/100 M.N. **					

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

En base a los resultados obtenidos y de las observaciones realizadas durante el desarrollo del proyecto de intervención es posible enlistar las siguientes conclusiones:

1. El peso añadido a la estructura con la aplicación de materiales compuestos es menor al que se tendría con la utilización del acero, madera o la adición de elementos al sistema estructural. Además, el costo y tiempo de aplicación es menor con ésta alternativa.
2. Al adoptar un sistema de refuerzo de este tipo, se tiene mayor libertad en cuanto a las formas en que se puede adaptar este material.
3. El sistema de refuerzo con el uso de materiales compuestos GFRP ofrece una alternativa viable a la rehabilitación de estructuras de mampostería, ofreciendo practicidad en su aplicación.

6.2 Recomendaciones

El proyecto de intervención demuestra la posibilidad de intervenir una estructura histórica con el uso de materiales compuestos GFRP, sin embargo, es necesario llevar a cabo un estudio más amplio en otros aspectos de su aplicación, como lo son:

1. Desarrollar un criterio específico de diseño de refuerzo con el uso de materiales compuestos GFRP, a fin de optimizar al máximo su aplicación.
2. Realizar pruebas de durabilidad e intemperismo por un periodo mayor al utilizado en el proyecto de intervención.
3. Realizar un proyecto de monitoreo del comportamiento de la estructura posterior a la intervención a fin de verificar el desempeño real del refuerzo a largo plazo.

REFERENCIAS

1. *ROSERO LANDETA, L.F., REFORZAMIENTO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO CON FRP (FIBER REINFORCED POLYMERS). APLICACIÓN AL CASO DE REFUERZO DE UNA LOSA Y COLUMNAS DE UN SALÓN DE AUDIOVISUALES Y UN AUDITORIO. 2013, UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE. CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL.*
2. *PENDHARI, S.S., T. KANT, AND Y.M. DESAI, APPLICATION OF POLYMER COMPOSITES IN CIVIL CONSTRUCTION: A GENERAL REVIEW. COMPOSITE STRUCTURES, 2008. 84(2): P. 114-124.*
3. *EHSANI, P.R.C.M., USO DE TELAS POLIMERICAS REFORZADAS CON FIBRAS (FRP) PARA LA REHABILITACION Y REFUERZO DE INFRAESTRUCTURA Y EDIFICACIONES. SMIE, 2008.*
4. *ESQUIUS BERENGUERAS, M., PROYECTO DE REHABILITACIÓN Y REFUERZO DEL PUENTE ANDARAX. 2013.*
5. *AYUNTAMIENTO DE MADRID, E., REHABILITACION DEL PUENTE DE LA A6 SOBRE LA SENDA REAL. 2009.*
6. *SEN, R. AND G. MULLINS, APPLICATION OF FRP COMPOSITES FOR UNDERWATER PILES REPAIR. COMPOSITES PART B: ENGINEERING, 2007. 38(5): P. 751-758.*
7. *RAMIREZ, A.P., EVALUACIÓN DE PROPIEDADES ADHESIVAS Y MECÁNICAS DE LAMINADOS EPÓXICOS FIBRA DE VIDRIO COMO REFUERZOS EXTERNOS EN VIGAS DE CONCRETO.*
8. *HUANG, X., ET AL., PROPERTIES AND POTENTIAL FOR APPLICATION OF STEEL REINFORCED POLYMER AND STEEL REINFORCED GROUT COMPOSITES. COMPOSITES PART B: ENGINEERING, 2005. 36(1): P. 73-82.*
9. *MOLINA, M., J.P. GUTIERREZ, AND C. LÓPEZ, CONSIDERACIONES ACERCA DEL EMPLEO DE LÁMINAS DE FIBRAS DE CARBONO APLICADAS AL CAMPO DE LAS ESTRUCTURAS.*
10. *HERNÁNDEZ, L.A.E. AND H.R. DE ALBA, TÉCNICAS DE REHABILITACIÓN EN EDIFICACIONES PARA INCREMENTAR SU VIDA UTIL A PESAR DE UN CAMBIO DE USO.*
11. *LEYVA, J., ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO ANTE CARGA LATERAL CÍCLICA REVERSIBLE DE UN MURO DE MAMPOSTERÍA DE TABIQUE CON ABERTURA REHABILITADO CON GFRP. 2014.*
12. *MONTES, E.H. AND L.M.G. MARTÍN, HORMIGÓN ARMADO Y PRETENSADO: CONCRETO REFORZADO Y PREESFORZADO. 2007: [UNIVERSIDAD DE GRANADA], GRUPO DE INVESTIGACIÓN TEP-190 INGENIERÍA E INFRAESTRUCTURAS.*

13. RIZKALLA, S., T. HASSAN, AND N. HASSAN, DESIGN RECOMMENDATIONS FOR THE USE OF FRP FOR REINFORCEMENT AND STRENGTHENING OF CONCRETE STRUCTURES. PROGRESS IN STRUCTURAL ENGINEERING AND MATERIALS, 2003. 5(1): P. 16-28.
14. A. SHAAT; D. SCHNERCH; A. FAM, R.S., RETROFIT OF STEEL STRUCTURES USING FIBER REINFORCED POLYMERS (FRP): STATE-OF-THE-ART. 2004.
15. MIRAVETE, A. AND L. CASTEJÓN, MATERIALES COMPUESTOS. TEMES DE DISSENY, 2002(20): P. 123-139.
16. DE MENDIZÁBAL MIGUEL O. LA EVOLUCIÓN DEL NOROESTE DE MÉXICO. COLECCIÓN DE DOCUMENTOS PARA LA HISTORIA DE SINALOA (16) CENTRO DE ESTUDIOS HISTÓRICOS DEL NOROESTE, A.C. CAMPUS CULIACÁN. 1996. P.15.
17. ELENES GAXIOLA, IGNACIO. HOJEANDO LA HISTORIA ANTIGUA DE SINALOA. ED. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA. MÉXICO. 1982. P. 55.
18. D. RIVERA VARGAS, C. ARCE Y C. BELLI, CRITERIOS SIMPLIFICADOS PARA EVALUAR LA SEGURIDAD ESTRUCTURAL DE CONSTRUCCIONES HISTORICAS. SMIE 2012.
19. QUIÑONEZ ET. AL, RESISTENCIA A TENSION DIAGONAL DE MUROS DE MAMPOSTERÍA REFORZADOS CON FIBRA DE VIDRIO. SMIE 2006.
20. PEÑA MONDRAGON F. AND LOURENCO P.B., CRITERIOS PARA EL REFUERZO ANTISISMICO DE ESTRUCTURAS HISTORICAS, REVISTA DE INGENIERIA SISMICA No. 88 47-66 (2012).